

## ANÁLISIS REGIONAL DE LA RECARGA POTENCIAL EN LA CUENCA DE MÉXICO

Sergio González-Ortigoza<sup>1,2,3</sup>, Antonio Hernández-Espriú<sup>4</sup>, Saúl Arciniega-Esparza<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

<sup>2</sup>Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

<sup>3</sup>Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo Edo de México, México.

<sup>4</sup>Grupo de Hidrogeología, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.

\*Autor para correspondencia: Área de geohidrología, Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo, C.P. 56230 Chapingo, Texcoco, Edo. de México, Phone.: +52(59)59528625, E-mail: sgonzalezo@chapingo.mx; ortigoza\_86@hotmail.com

### Resumen

La estimación de la recarga regional de aguas subterráneas (RRAS) es crucial para mejorar las estrategias de gestión del agua; sin embargo, las bases de datos locales terrestres son discontinuas en el tiempo y espacio, lo que limita la estimación de la recarga de manera regional. Por tal motivo, en este estudio se propuso un enfoque práctico pero a la vez robusto, para caracterizar la distribución temporal y espacial de la RRAS utilizando información de percepción remota y modelos hidrológicos globales. Esta estrategia se aplicó a toda la Cuenca de México (CM), una región con alto estrés hídrico que depende de las aguas subterráneas para la mayor parte de su suministro doméstico. Usamos el modelo Soil Water Balance (SWB) para estimar la RRAS de 2000-2021 en una cuenca de ~9,600 km<sup>2</sup> con una población de ~25 millones de personas en el centro de México, incluida la Ciudad de México y su área metropolitana, donde el agua subterránea representa la fuente de agua más importante. El modelo de RRAS se calibró utilizando el escurrimiento registrado en estaciones hidrométricas y la evapotranspiración real de ecuaciones empíricas y datos de percepción remota. Se compararon cuatro configuraciones de modelos, incluidos registros climatológicos de estaciones terrestres locales (M1), precipitación de CHIRPS (M2), precipitación con corrección de sesgo de CHIRPS (M3) y CHIRPS-Daymet (M4). La RRAS media anual estimada en toda la CM utilizando las configuraciones M1, M2, M3 y M4 fue de 40, 49, 43 y 48 mm/año (12.46, 14.78, 13.08 y 14.62 m<sup>3</sup>/s), respectivamente. Llegamos a la conclusión de que las bases de datos globales y de percepción remota pueden utilizarse con éxito para representar cambios regionales en los patrones de recarga potencial dentro de acuíferos con datos limitados, en particular en la CM las bases de datos de percepción remota que tienen mejor desempeño para estimar la variabilidad espacio temporal de la recarga potencial son la CHIRPS para la precipitación y Daymet para la temperatura, que integran la configuración de entrada del modelo CHIRPS-Daymet (M4). Por otro lado, la metodología desarrollada en esta investigación

puede ser extrapolada a otras partes del mundo con entornos geológicos e hidrogeológicos similares para establecer cambios en la recarga regional, lo que puede ser particularmente benéfico en países de bajos ingresos donde los datos específicos del sitio a menudo están incompletos y desactualizados.

**Palabras claves:** Recarga de aguas subterráneas, Balance hídrico, Teledetección y percepción remota.

## Introducción

A nivel mundial, los recursos de agua dulce son cada vez más escasos debido al crecimiento de la población y la degradación ambiental exacerbada por los efectos del cambio climático. Esto vulnera el desarrollo sostenible y plantea desafíos de gestión que deben establecer un equilibrio entre la garantía de la sostenibilidad a largo plazo y las demandas futuras de diversos sectores.

El agua subterránea representa el ~97% del agua dulce disponible (World Resources Institute 1990), una vez considerada un recurso abundante y económico que ayudó a impulsar el rápido desarrollo, está ahora en riesgo de agotamiento o a la contaminación (Konikow y Kendy 2005). Debido a que la extracción del agua subterránea a menudo se desarrolla sin una comprensión adecuada del equilibrio entre su ocurrencia, en el espacio y el tiempo, y la reposición es decir, la recarga, se convierte en un componente clave para comprender completamente el proceso del ciclo hidrológico a escala local, intermedia y regional.

Por ello, las estimaciones de la recarga de aguas subterráneas son cruciales para mejorar las estrategias de gestión y son requeridas en varias aplicaciones hidrogeológicas, como el análisis de flujo base en interacciones entre acuíferos someros y ríos, administración de ecosistemas ribereños, transporte de solutos en medios no saturados, hidrogeología urbana, desarrollo de plumas contaminantes, delineación de perímetros para protección de pozos o cartografía de la vulnerabilidad (Singh et al. 2021), entre otras.

La Cuenca de México (CM) es una de las regiones más pobladas de México, con más de 25 millones de habitantes, incluida la Ciudad de México y su área metropolitana, una de las megaciudades más importantes del mundo que depende en gran medida de agua subterránea (INEGI 2020). El uso actual de agua asciende a 61 m<sup>3</sup>/s (1923.69 hm<sup>3</sup>/año) en toda la cuenca, de los cuales ~65% son abastecidos por ~2,800 pozos, que extraen el agua subterránea de un sistema acuífero regional compuesto por sedimentos aluviales del Cuaternario-Terciario, rocas piroclásticas y lavas fracturadas, cubierto por un acuitardo lacustre compresible de extensión y espesor variable.

El objetivo de este trabajo es proporcionar un enfoque práctico pero robusto para estimar la distribución temporal y espacial de la recarga de agua subterránea en regiones con escasez de datos, con su aplicación en la CM. Para ello utilizamos datos diarios de precipitación acumulada en 24 horas derivados de percepción remota y modelos globales, como Climate Hazards Center InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS), Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) desarrollado por la Oficina de Asimilación y Modelado Global de la NASA, Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) un producto de reanálisis global acoplado (tercera generación) de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP); temperatura de la base de datos Daily Surface Weather and Climatological Summaries (DAYMET) generada por la NASA para Norteamérica; uso del suelo del producto Climate Change Initiative Land Cover (CCI-LC), un conjunto de datos producido por la ESA (European Space Agency) obtenidos por sensores remotos y algoritmos de

Machine Learning; y propiedades del suelo de la base de datos global SoilGrids, un producto de datos de suelos global generado en ISRIC — World Soil Information. Esta información se utilizó como datos de entrada del Soil Water Balance (SWB) (Dripps y Bradbury 2007 ; Westenbroek et al. 2010, Westenbroek et al. 2018) del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS), el cual es un modelo hidrológico distribuido de escala diaria que se utiliza para determinar la recarga del agua subterránea y otros componentes del balance.

## Materiales y Métodos

La recarga potencial diaria de agua subterránea en la Cuenca de México se estimó utilizando el Modelo Soil Water Balance (SWB) versión 2.0 (Westenbroek et al. 2018), disponible en <https://github.com/smwesten-usgs/swb2> (último acceso: 2022- 07-11). SWB es un modelo determinístico, cuasi tridimensional y distribuido que fue desarrollado por el Servicio Geológico y de Historia Natural de Wisconsin (WGNHS) y mejorado por el Servicio Geológico de EE. UU. Para estimar los componentes del balance hídrico en un paso de tiempo diario usando una versión modificada del enfoque de balance de humedad del suelo de Thornthwaite-Mather (Thornthwaite and Mather 1957). SWB v2.0 es la evolución del modelo de balance de agua del suelo desarrollado por Dripps y Bradbury (2007) y ha sido mejorado para facilitar el ingreso de datos y la estimación de la infiltración neta.

El modelo toma en cuenta los procesos de precipitación, evapotranspiración, interceptación, escurrimiento superficial, almacenamiento de humedad del suelo y deshielo, mediante el uso de un sistema de información geográfica (SIG). El modelo asume que la infiltración neta en el intervalo de tiempo analizado se da cuando la humedad en el suelo excede el valor total del agua almacenada en este, que depende de la capacidad de campo, el punto de marchitamiento permanente y la profundidad efectiva de enraizamiento de la vegetación (Westenbroek et al. 2018). Los procesos hidrológicos se calculan en orden secuencial, desde las capas superiores hasta las más profundas del suelo. Las principales limitaciones del enfoque SWB es que no se toma en cuenta la recarga proveniente de la irrigación y de las fugas de las redes de agua potable.

La metodología propuesta para la simulación y análisis de recarga potencial en la CM se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 1.

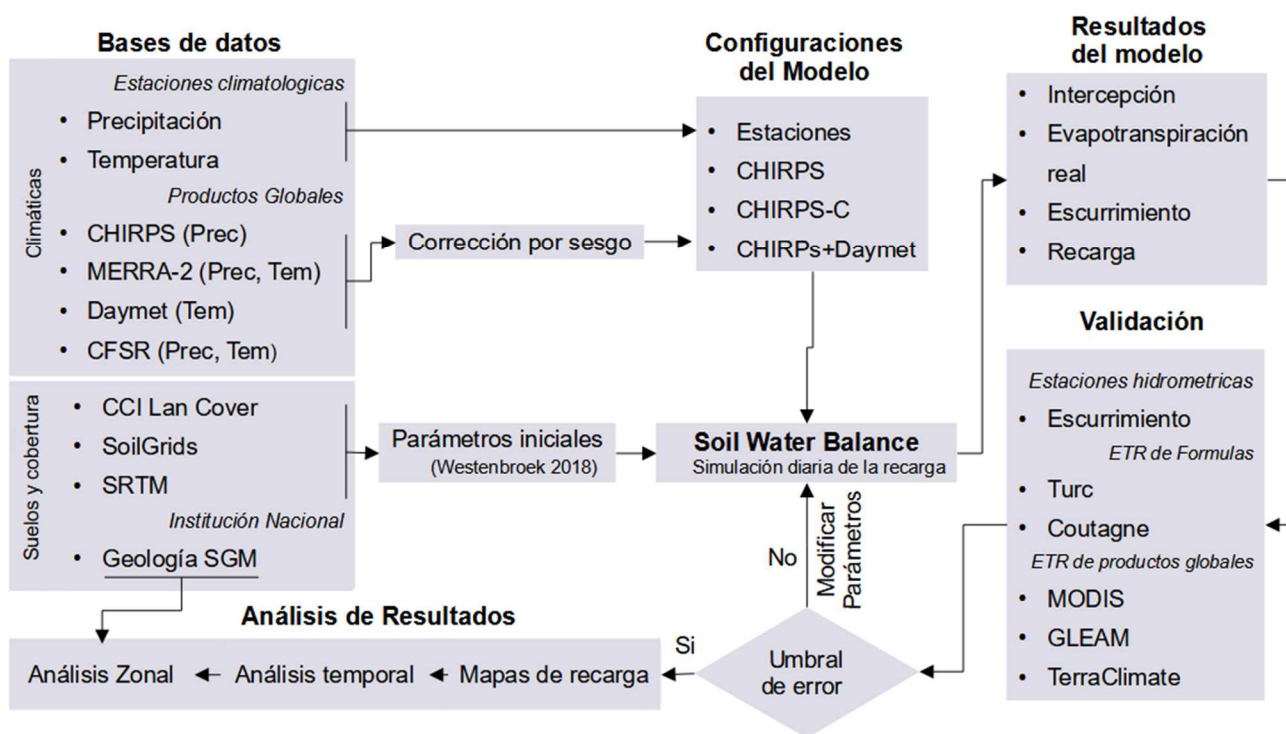


Figura 1: Diagrama de flujo de trabajo seguido para la estimación de la recarga vertical en los acuíferos de la CM.

En el modelo SWB las entradas y salidas de agua dentro de cada celda de la malla se determinan con base en los datos de las variables climáticas de entrada y las características del paisaje; la recarga se calcula como la diferencia entre el cambio en la humedad del suelo y estas entradas y salidas de agua (ecuación 1):

$$\text{Recarga} = (\text{Prec} + \text{deshielo} + \text{flujo de entrada}) - (\text{intercepción} + \text{flujo de salida} + \text{ET}) - \text{D humedad del suelo} \quad (1)$$

Cada uno de los componentes del balance hídrico presentes en la ecuación 2 es manejado por uno o más módulos dentro del modelo SWB. Los componentes específicos del equilibrio hídrico se analizan brevemente a continuación.

## Resultados y Discusión

### Variación espacial de la RRAS en la CM

La recarga potencial anual media para el periodo de 2000-2021 para cada una de las configuraciones del modelo se muestra en la Figura 31. La recarga anual promedio espacial considerando los cuatro modelos Local (M1), CHIRPS (M2), CHIRPSC (M3) y CHIRPS-Daymet (M4) fueron 40, 49, 43 y 48 mm/año (equivale a una tasa de recarga potencial de 12.46, 14.78, 13.08 y 14.62 m<sup>3</sup>/s), y medianas de 23, 21, 19, 27 mm/año (7, 6.4, 5.78, 6.21 m<sup>3</sup>/s), respectivamente. Por otro lado, en la Figura 32 se presenta la distribución espacial del

porcentaje de precipitación que se convierte en recarga potencial. Virtualmente, no existe precipitación que se convierta en recarga en la Ciudad de México y área metropolitana. En contraste, más del 20% de la precipitación en la Sierra de las Cruces y Sierra Nevada se convierte en recarga potencial. Las medias de recarga/precipitación a nivel de cuenta se estimaron en 5.6, 7.0, 6.0 y 6.7%, para el modelo Local (M1), CHIRPS (M2), CHIRPS-C (M3) y CHIRPS-Daymet (M4) de la precipitación, respectivamente (figura 2).

### Variación temporal de la RRAS en la CM

Los valores anuales de los componentes del balance hídrico del suelo estimados por el modelo SWB considerando el área total de la CM para las configuraciones del modelo Local (M1), CHIRPS (M2), CHIRPS-C (M3) y CHIRPS-Daymet (M4) para todo el periodo de análisis (Tabla 11), se presentan en la Figura 23, en donde los valores medios de precipitación son de 730, 687, 690 y 687 mm respectivamente. El año de menor precipitación en el periodo de análisis fue el 2005 con valores de 563, 521, 543 y 521 mm respectivamente, mientras que el año con mayor precipitación fue el año 2018 con un valor medio de 900 mm anuales para la CM registrado por la base de datos CHIRPS. Los valores de ETR son de 489, 464, 477 y 493 mm respectivamente, en donde los años de menor y mayor ETR corresponden con los de la precipitación, en donde en el año 2005 tenemos un valor mínimo de ETR de 358, 386, 370 y 392 mm, respectivamente, y el máximo en el año 2018 con un valor de 660 mm para la configuración M4 de CHIRPS-Daymet. Por su parte el escurrimiento directo medio que se presentó es de 200, 163, 174 y 158 mm (equivalente a un gasto de 61, 43, 53 y 48 m<sup>3</sup>/s) respectivamente. Por último la recarga vertical presento valores medios de 41, 49, 43 y 48 mm (equivalente a una tasa de recarga de 12.46, 14.78, 13.08 y 14.62 m<sup>3</sup>/s) respectivamente para el área total de la CM (figura 3).

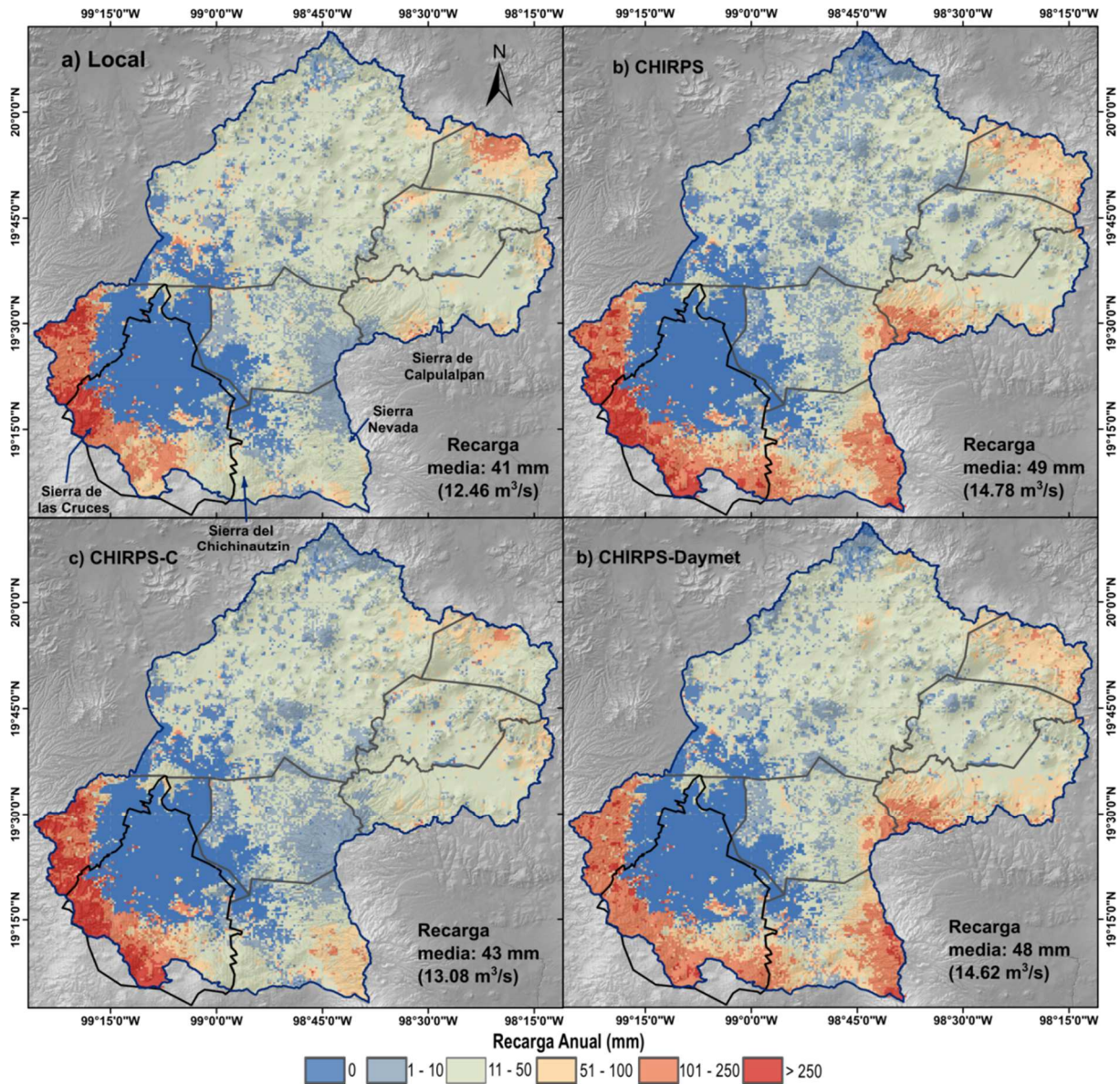


Figura 2: Distribuciones espaciales de la recarga potencial media anual en todo el período de simulación de cada una de las cuatro configuraciones del modelo.

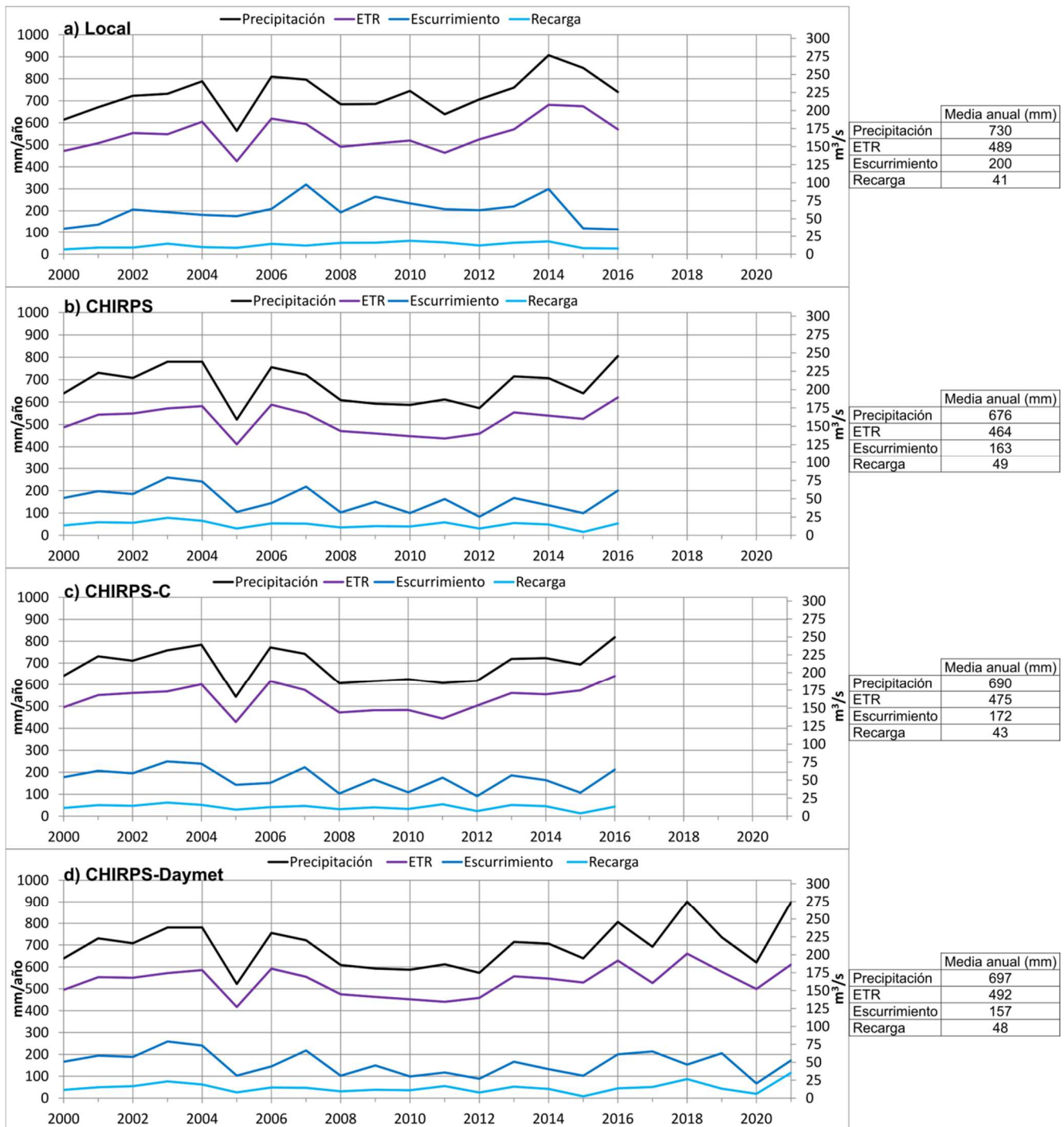


Figura 3: Componentes del balance hídrico del suelo para la CM par las configuraciones del modelo a) Local (M1), b) CHIRPS (M2), c) CHIRPS-C (M3) y d) CHIRPS-Daymet (M4).

Los valores de recarga estimados utilizando los datos de teledetección y los productos globales dieron como resultado patrones espaciales y tasas similares en aquellas zonas con una alta densidad de estaciones climatológicas (Figura 24 a la Figura 30). La falta de pluviómetros en la Sierra Nevada y la Sierra de Calpulalpan derivó en discrepancias de ~20-50 mm entre las configuraciones con datos de entrada de modelos globales, sensores remotos y las series de



datos locales, lo que ocasiona que al aplicar la corrección del sesgo a la precipitación de CHIRPS se presente ese mismo problema, ya que se subestima la precipitación en esas zonas, lo que se ve reflejado en una subestimación de la recarga.

En esta investigación se estimó que la recarga anual media sobre la CM representa del 2 al 13 % de la precipitación anual, con un valor medio de ~6.5 %, que son tasas de recarga similares a las estimadas por Carrera y Gaskin (2008). El año 2015 representó la peor condición de recarga durante el período analizado, mientras que los años de 2018 y 2021 mostraron que al presentarse valores de precipitación cercanos a 900 mm, la recarga potencial se ve incrementada en alrededor del 100 % de la recarga media del periodo analizado. Sin embargo, las extracciones anuales de agua subterránea representan más de cuatro veces el volumen de recarga potencial calculado, e incluso más de 10 veces para el año 2015. El bombeo excesivo de agua subterránea representa uno de los problemas más importantes para la seguridad hídrica de la CM (Escolero et al. 2016) ya que esta condición ha derivado en abatimiento de los niveles piezométricos y altas tasas de subsidencia diferencial (Carrera-Hernández and Gaskin 2007b; Chaussard et al. 2021; Hernández-Espriú et al. 2014). Además, el aumento de la temperatura, el crecimiento de los núcleos urbanos en la parte sur de la Ciudad de México y el cambio climático probablemente reducirán la recarga potencial a largo plazo.

## Conclusiones

La recarga media anual espacial de 2000-2021 considerando los modelos Local (M1), CHIRPS (M2), CHIRPS-C (M3) y CHIRPS-Daymet (M4) fue de 40, 49, 43 y 48 mm/año (equivalente a una tasa de recarga de 12.46, 14.78, 13.08 y 14.62 m<sup>3</sup>/s), y medianas de 23, 21, 19, 27 mm/año (7, 6.4, 5.78, 6.21 m<sup>3</sup>/s), respectivamente. Todas las configuraciones del modelo coincidieron en que el suroeste de la CM, a lo largo de la Sierra de las Cruces y la Sierra de Chichinautzin, representa el área dominante de recarga de agua subterránea, mientras que la recarga potencial en una gran parte de la Ciudad de México y su región metropolitana del norte es despreciable.

Nuestros resultados sugieren que la precipitación de la base de datos de CHIRPS y la temperatura del aire máxima y mínima de Daymet son adecuadas para modelar el proceso de recarga potencial en el área de estudio mediante el Modelo CHIRPS-Daymet (M4). Como se demostró, las estimaciones de recarga de aguas subterráneas utilizando datos de sensores remotos y productos globales derivaron en patrones y tasas regionales similares a las de aquellas áreas con una alta densidad de estaciones climatológicas terrestres.

## Referencias Bibliográficas

- 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.
- Chaussard, E. et al. 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).

- Dripps, W R, and K R Bradbury. 2007. "A Simple Daily Soil – Water Balance Model for Estimating the Spatial and Temporal Distribution of Groundwater Recharge in Temperate Humid Areas." : 433–44.
- Hernández-Espriú, A., Reyna-Gutiérrez, JA, Sánchez-León, E., Cabral-Cano, E., Carrera-Hernández, J., Martínez-Santos, P., & Colombo, D. (2014). El modelo DRASTIC-Sg: una extensión del enfoque DRASTIC para el mapeo de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas en acuíferos sujetos a subsidencia diferencial del terreno, con aplicación a la Ciudad de México. *Revista de Hidrogeología* , 22 (6), 1469.
- Konikow, Leonard F., and Eloise Kendy. 2005. "Groundwater Depletion: A Global Problem." *Hydrogeology Journal* 13(1): 317–20.
- Singh, Ajay. 2022. "Long-Term (44 Years) Regional Groundwater Recharge Estimation for Agricultural Sustainability." *Natural Resources Research* 31(1): 301–14.
- Thornthwaite, C.W., and J.R. Mather. 1955. "The Water Balance." *The water balance: Centerton, N.J., Laboratory of Climatology, Publications in Climatology, v. 8, no. 1:* 1–104.
- Westenbroek, Stephen M. et al. 2010. "SWB — A Modified Thornthwaite-Mather Soil-Water-Balance Code for Estimating Groundwater Recharge." *U.S. Geological Survey Techniques and Methods* 6-A31: 60.
- Westenbroek, Stephen M., John A. Engott, Victor A. Kelson, and Randall J. Hunt. 2018. *U.S. Geological Survey SWB Version 2.0--A Soil-Water-Balance Code for Estimating Net Infiltration and Other Water-Budget Components.* <https://pubs.usgs.gov/tm/06/a59/tm6a59.pdf>.
- World Resources Institute, & International Institute for Environment. 1990. "World Resources: A Report by the World Resources Institute and the International Institute for Environment and Development." Basic Books.