

Determinación de sitios potenciales de recarga artificial de agua subterránea en cinco acuíferos de la Zona Metropolitana del Valle de México

Determination of potential sites for artificial groundwater recharge in five aquifers of the Metropolitan Area of the Valley of Mexico

ELIZABETH BOYÁS MARTÍNEZ¹,  0000-0001-5816-5033

MARÍA FERNANDA GONZÁLEZ MORA¹  0000-0002-9715-4772

JORGE PAREDES TAVARES¹,  0000-0002-1231-2824

¹ Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial, Ciudad de México, México.

Resumen

El grado de explotación en los acuíferos de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) está altamente vinculado a la expansión urbana, al avance de la frontera agrícola y a la deforestación; lo que ha provocado diferentes afectaciones ambientales y a la infraestructura.

El manejo de la recarga de los acuíferos (MAR) ha surgido como una herramienta de gestión consistente para reducir el grado de presión en las aguas subterráneas. Uno de los aspectos fundamentales para su implementación es identificar los sitios que favorecen la infiltración.

Mediante el álgebra de mapas y la intervención de seis factores (pendiente, uso de suelo, capacidad de infiltración, precipitación, densidad de drenaje y litología) se determinaron zonas potenciales para la recarga artificial en cinco acuíferos que abastecen de agua subterránea a dicha zona metropolitana.

Las variables con más peso fueron la litología y el uso de suelo, los sitios con potencial de recarga alto se encuentran en las zonas de mayor elevación, en las Sierras del Ajusco y Chichinautzin. La categoría “Medio” predomina con 44,2 % de la superficie, le siguen las categorías “Alto” con 19,1 %, “Bajo” con 17,7 %, “Muy bajo” con 13,7 %, y “Muy alto” con el 5,2 % del área.

Palabras clave: recarga de agua subterránea, SIG, álgebra de mapas, MIF, Valle de México

Fechas • Dates

Recibido: 2020.10.20
Aceptado: 2021.03.04
Publicado: 2021.12.01

Autor/a para correspondencia Corresponding Author

Jorge Paredes Tavares
jparedes@centrogeo.edu.mx

Abstract

The degree of exploitation in the aquifers of the Metropolitan Area of the Valley of Mexico (ZMVM) is highly linked to the urban sprawl, the expansion of the agricultural frontier and deforestation, causing different environmental and infrastructural impacts.

The managed aquifer recharge (MAR) has emerged as an administration tool to reduce pressure on groundwater. One of the fundamental aspects to its implementation is identifying the sites which favor infiltration.

Through map algebra and the intervention of six factors (slope, land use, infiltration capacity, precipitation, drainage density and lithology), we defined potential areas for artificial recharge in five aquifers that supply groundwater to that metropolitan area.

The most important factors were lithology and land use; the highest potential areas are in the higher elevations in Sierra del Ajusco and Sierra de Chichinautzin. "Medium" category predominates with 44,2 % of the area, followed by the "High" categories with 19,1 %, "Low" with 17,7 %, "Very Low" with 13,7 %, and "Very high" with 5,2 % of the area.

Keywords: potential groundwater recharge, GIS, map algebra, MIF, Valley of Mexico.

1. Introducción

El agua subterránea es considerada un recurso estratégico debido que, a diferencia del agua superficial, suele presentar un alto grado de estabilidad ante las variaciones estacionales del clima. Generalmente, tiene mejores condiciones de calidad ya que los estratos de roca y capas de suelo atenúan el paso de agentes contaminantes, y es en muchas partes del mundo, la única fuente de abastecimiento en épocas de sequía (Landa et al., 2008).

La pérdida de zonas de recarga en acuíferos con intensos procesos de urbanización es un fenómeno cada vez más frecuente (Pan et al., 2011; Mishra et al., 2014; Prabhakar & Tiwari, 2015; Han et al., 2017; Tsai et al., 2017), lo que reduce la disponibilidad de agua subterránea per cápita y pone en riesgo el desarrollo de las actividades económicas.

Un ejemplo de esto es la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), la cual se ha expandido de forma acelerada (Pradilla et al., 2015), y donde el suministro de agua es uno de los problemas más apremiantes que enfrenta la población. La extracción intensiva de agua subterránea ha generado ritmos de abatimiento piezométrico que alcanzan hasta 1,5 metros por año en algunas zonas (Solano-Rojas et al., 2015), lo que ha provocado que cuatro de los cinco acuíferos que conforman el área de estudio se encuentren en estado de sobreexplotación.

Lo anterior genera subsidencia en el terreno, agrietamientos, conflictos sociales y políticos, aumento en el consumo energético, entre otras problemáticas (Kloster & Alba, 2007; Campos-Cabral & Ávila-García, 2015; Valek et al., 2017; Alonso, 2020), por lo que las autoridades se han visto forzadas a importar el agua de otras regiones.

Según datos de la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2018), solo el 78 % del abastecimiento en el área de estudio proviene del propio Valle de México (68 % de agua subterránea, 3 % manantiales y 7 % reúso). El resto del agua que es requerida para atender a los 22,8 millones de habitantes y suministrar los 641 hm³/año para los usos agrícola, industrial y de otros servicios (Peña,

2019) es transportada desde el acuífero del Valle de Toluca mediante el Sistema Lerma (aportando el 5 % del caudal) y de las subcuencas del Sistema Cutzamala (17 % del volumen restante).

Las estrategias adoptadas para revertir los problemas de escasez de agua en la región son variadas (Birkle et al., 1995; Escolero et al., 2017; Gispert et al., 2018; Vázquez-Guillén & Auvinet-Guichard, 2019), entre ellas destacan las enfocadas en incrementar artificialmente la recarga del agua subterránea. Uno de los ejemplos más representativos es el proyecto “suelo de conservación” de la subcuenca del río Eslava (IMTA, 2010), mediante el cual se construyeron 64 presas de gaviones sobre escurrimientos y 5 000 tinajas ciegas en laderas.

De acuerdo con Escolero, en el año 2010, el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (Sacmex) construyó 24 presas de gaviones en la alcaldía Tlalpan y en el Parque Nacional Desierto de los Leones. Mientras que, en 2017, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) instaló un sistema de recarga mediante la construcción de 22 presas de gaviones en la cuenca del río Magdalena.

Así mismo, han surgido propuestas para la construcción de pozos profundos que inyecten agua directamente en el acuífero; por ejemplo, en la zona del antiguo Lago de Texcoco, donde propuso instalar un sistema de recarga de agua proveniente de un módulo de tratamiento terciario. De igual forma, en la región de El Caracol, municipio de Ecatepec, se analizó la factibilidad de recargar el acuífero Cuautitlán-Pachuca con el efluente de un sistema de tratamiento avanzado y la construcción de 40 pozos de inyección apoyados por seis pozos de monitoreo, de los cuales se logró instalar dos pozos de recarga y cuatro de monitoreo.

Por su parte, en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) Cerro de la Estrella, se instaló una batería de nueve pozos de absorción que actualmente se encuentran fuera de operación (Juárez, 2018).

Estos planteamientos se caracterizan por su enfoque local. Sin embargo, no se registran estudios regionales que tomen en cuenta las diferentes unidades administrativas del agua subterránea que intervienen en el suministro de recursos hídricos de la ZMVM, para así identificar las zonas con mejores aptitudes para la implementación de sistemas de recarga artificial. En especial, aquellos que requieran menor inversión de instalación y mantenimiento.

Los sistemas anteriormente mencionados forman parte de lo que actualmente se conoce como manejo de la recarga de acuíferos (MAR, Managed Aquifer Recharge), que agrupa los distintos métodos de infiltración inducida. Entre ellos se encuentran los sistemas de almacenamiento de agua en el acuífero y recuperación (ASR, Aquifer Storage Recovery) y los sistemas de almacenamiento de agua en un acuífero, transferencia y recuperación (ASTR, Aquifer Storage Transfer and Recovery). El primero consiste en recargar agua a través de un pozo que también se utiliza para recuperar el agua infiltrada; en el segundo caso, se inyecta agua a través de un pozo, pero el agua infiltrada se recupera en un pozo distinto al de la recarga (Dillon et al., 2009; Stefan & Ansems, 2018; Dillon et al., 2019).

Otros sistemas de recarga son los pozos secos y de absorción, tanques de percolación, galerías filtrantes, estanques, bancos y dunas de infiltración, captura de agua de lluvia para su posterior infiltración, tratamiento de agua mediante las capas de suelo, entre otros. Estos métodos se pueden clasificar en superficiales, subsuperficiales y directos (perforación profunda); y son elegidos

en función del presupuesto, dimensiones de los predios en los que se realizan, calidad del agua a infiltrar, uso de suelo, tipo de acuíferos y las características climáticas (Page et al., 2018).

Las variables involucradas en estos sistemas de recarga cambian dependiendo de la información disponible y del objetivo del estudio. No obstante, la literatura muestra un conjunto de ellas que son recurrentes (Tabla 1) y que están relacionadas con aspectos geológicos, geohidrológicos, climáticos, de uso de suelo y geomorfológicos. La jerarquía otorgada a dichas variables cambia dependiendo del método. En muchos casos se basa en el conocimiento de los expertos, en otros, se asignan los pesos de acuerdo con la influencia que tienen las variables entre sí, es decir, cuanto más influye una variable sobre el resto, mayor es su peso asignado (Magesh et al., 2012; Alonso, 2020), este enfoque es conocido como factor de influencia múltiple (MIF, Multiple Influence Factor).

Adicionalmente, autores como Senanayake et al. (2016b) proponen asignar los pesos basándose en estudios similares realizados previamente; mientras que Singh et al. (2019) otorga la ponderación de sus variables mediante tres métodos distintos, 1) enfoque MIF, 2) enfoque promedio ensamblado, en donde el peso es igual al valor promedio de 10 estudios similares y 3) obtiene los pesos a partir del promedio de los dos métodos anteriores.

Tabla 1. Ponderación relativa de las variables que inciden en el proceso de la recarga artificial de agua subterránea.

Variables	Ponderación relativa de diversos autores				
	Alonso (2020)	Singh et al. (2019)	Senanayake et al. (2016)	Peña et al. (2016)	Magesh et al. (2012)
Litología	0,22	0,22	0,15	0,22	0,25
Pendiente	0,14	0,16	0,11	0,35	0,16
Precipitación	0,11	-	0,15	-	0,09
Uso de Suelo	0,12	0,20	0,10	0,08	0,22
Densidad de Drenaje	0,11	0,12	0,10	-	0,09
Elementos Estructurales	0,16	-	-	-	-
Profundidad del agua subterránea	0,14	-	-	-	-
Aspecto	-	0,13	-	-	-
Capacidad de Infiltración	-	0,12	0,14	0,04	0,06
Geomorfología	-	-	0,12	0,15	
Densidad de fracturas	-	-	0,13	0,15	0,13

Fuente: Elaboración propia con base en (Magesh et al., 2012; Peña et al., 2016; Senanayake et al., 2016a; Singh et al., 2019; Alonso, 2020).

La forma más común de procesar las variables espaciales consideradas en este tipo de estudios es mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Estos se han convertido en una herramienta menos costosa y más sencilla de emplear que los métodos convencionales (geofísicos, geológicos y edafológicos), ya que permiten el manejo eficiente de grandes datos espaciales (Machiwal et al., 2011). También hacen posible la modelización de capas asociadas a entidades territoriales desde un enfoque algebraico (Cordeiro et al., 2009). A este proceso se le conoce como álgebra de mapas y permite generar nuevas variables espaciales a partir de los datos de entrada (Mennis et al., 2005).

En este estudio se utilizó un enfoque integral basado en el uso de álgebra de mapas y el enfoque MIF para identificar zonas potenciales de recarga de agua subterránea en acuíferos que forman parte de la ZMVM, utilizando las variables de litología, uso de suelo, pendiente, precipitación, capacidad de infiltración y densidad de drenaje.

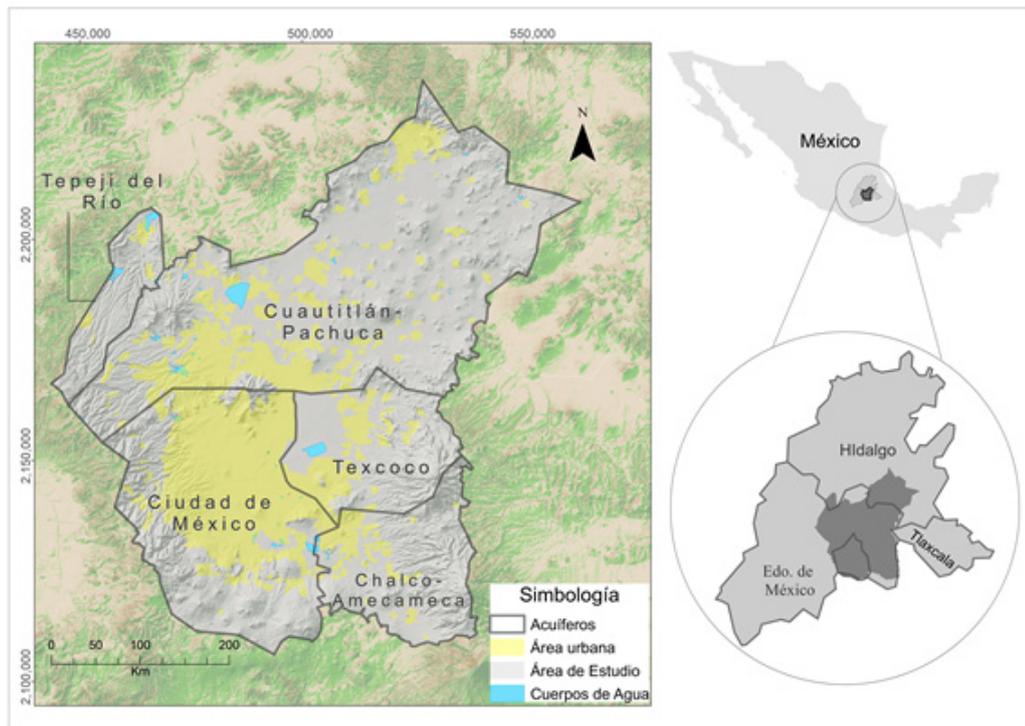
2. 2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

La zona de estudio se ubica en la región centro de México comprendida por las 16 alcaldías de la Ciudad de México, 51 municipios del Estado de México y 11 municipios del Estado de Hidalgo. De acuerdo con el Censo de Población y Vivienda (Inegi, 2010a) en esta área habitan 20 millones 506 mil 355 personas. Se encuentra dentro de las subprovincias fisiográficas Llanuras de Querétaro e Hidalgo y Lagos y volcanes de Anáhuac, subdivisiones de la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico. Sus límites se conforman por la Sierra las Navajas al Norte, Sierra de Santa Catarina al Sur, Sierra Nevada al Sureste y Sierra de Chichinautzin al Suroeste (Figura 1).

El área está constituida por cinco acuíferos: Chalco-Amecameca, Cuautitlán-Pachuca, Tepeji del Río, Texcoco y Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM). Los cuales son parte de la Región Hidrológica Administrativa XIII “Aguas del Valle de México” y en conjunto registran un volumen concesionado de agua subterránea de 1921,04 hm³ anuales. Los acuíferos de Chalco-Amecameca, Cuautitlán-Pachuca, Texcoco y ZMCM registran déficits de -22 920 000 m³, -106 040 000 m³, -101 460 000 m³, -591 180 000 m³ respectivamente (Conagua, 2018).

Figura 1. Ubicación del área de estudio.



Fuente: Elaboración propia con base en Inegi, 2010.

Las diferencias altitudinales en la región van desde los 2100 msnm a los 4057 msnm. Las pendientes varían entre 1 y 41 grados de inclinación, lo que genera altos contrastes en el relieve. Las morfologías predominantes son relieve montañoso, planicie pluviolacustre, piedemonte y planicie lacustre. En cuanto a la precipitación, se registran rangos de lluvia que oscilan entre los 400 y 1300 mm anuales. Los valores más bajos se observan en las zonas con menor altitud (en el centro y en la porción noreste) y la mayor precipitación ocurre en las zonas montañosas. El clima más representativo es el templado subhúmedo con excepción de las áreas montañosas que poseen un clima frío y semifrío subhúmedo.

En cuanto al uso de suelo, la agricultura es la categoría con mayor extensión territorial con el 42 % del área de estudio; se concentra principalmente en Hidalgo y la periferia del Estado de México. El uso de suelo urbano construido es el segundo con mayor presencia (22,1 %), el cual cubre la Ciudad de México y la zona conurbada del Estado de México. Ambos usos representan el 64,1 % del total del área de estudio.

La presencia de bosque, matorral, pastizal y vegetación secundaria se encuentra asociada a sistemas montañosos como Sierra de las Cruces, Sierra Nevada, Sierra de Santa Catarina y Sierra de Guadalupe. En conjunto, estos usos representan el 33,6 %. La Sierra de Guadalupe es considerada un área de conservación ecológica y su preservación depende tanto del Estado de México como de la Ciudad de México. De acuerdo con Conabio (2018) se registran un total de 41 zonas que requieren de protección ambiental, de las cuales 11 pertenecen a la Ciudad de México, una al Estado de Hidalgo y el resto al Estado de México.

2.2. Metodología

La metodología empleada se basa en el análisis y evaluación de diversas variables que intervienen en el proceso de recarga de agua subterránea y toma como referencia el trabajo realizado por Singh *et al.* (2019). Se parte de 4 ejes: la selección de parámetros, la determinación de pesos a partir de la evaluación de criterios MIF, la reclasificación de los valores de acuerdo con su nivel de contribución a la recarga artificial y la superposición de las capas mediante la herramienta “*raster calculator*” del software ArcMap 10.4.1. Estos pasos se esquematizan en la Figura 2 y se detallan a continuación.

2.2.1. Selección de parámetros

La selección de los parámetros para determinar las zonas potenciales de recarga subsuperficial de los acuíferos en el área de estudio se basó en el análisis del estado del arte y en la disponibilidad de datos, del cual resultan los siguientes 6 parámetros (Figura 3).

Litología. Se asoció la información geológica generada por el Inegi y del Servicio Geológico Mexicano (SGM, 1997, 2002), con los valores de conductividad hidráulica (K) reportados en estudios técnicos publicados por Conagua.

Uso de suelo y vegetación. Se obtuvo de la carta de uso de suelo y vegetación serie VI a escala 1:250 000 de Inegi (2017).

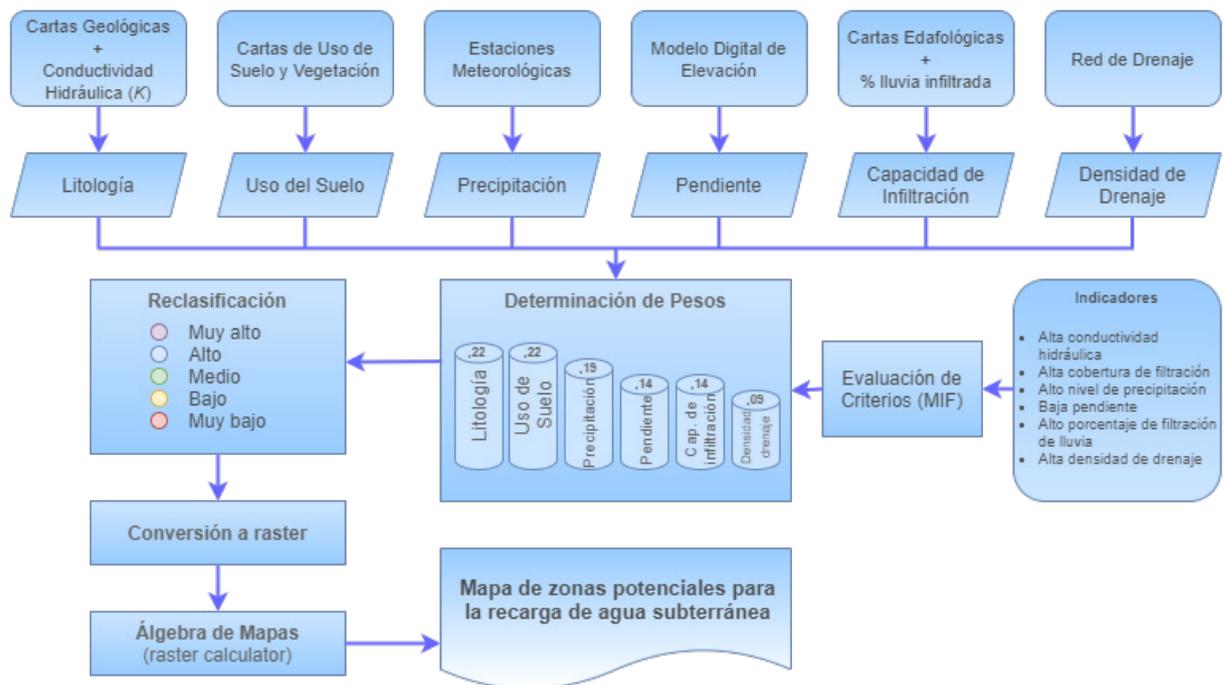
Precipitación. Generado a partir de la interpolación de datos climáticos publicados por el Servicio Meteorológico Nacional (Cicese, 2020).

Pendiente. Se obtuvo a partir del Continuo de Elevación Mexicano (Inegi, 2013), mediante la herramienta “*slope*” de ArcMap y se clasificó en función de los grados de inclinación.

Capacidad de infiltración. Determinada a partir de los valores de textura correspondientes a los tipos de suelo definidos en las cartas edafológicas del Inegi (2014).

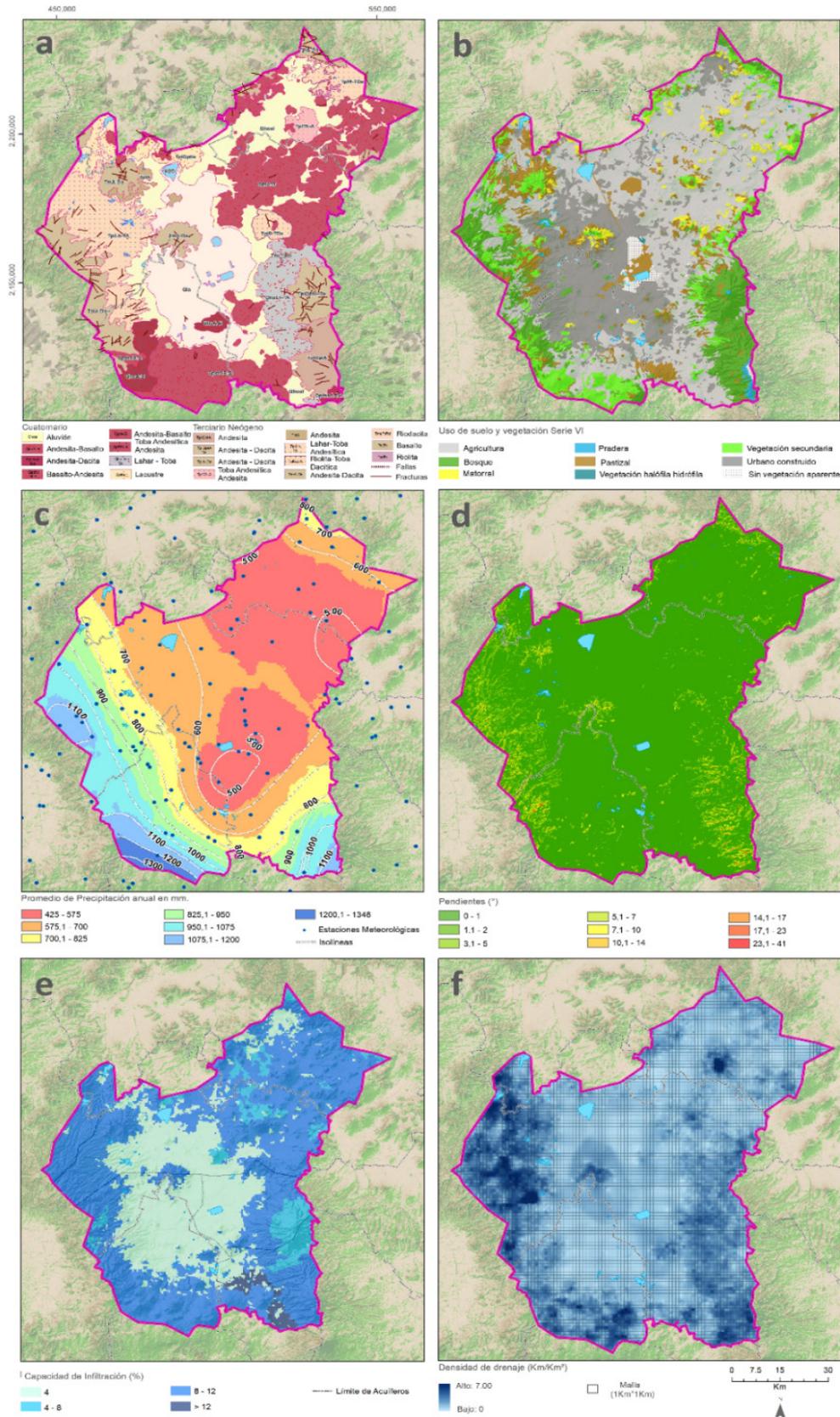
Densidad de drenaje. Se generó a partir de la red hidrográfica 1:50 000 de Inegi (2010b) sobre la que se construyó una malla de 1 km x 1 km para determinar la longitud de drenaje por unidad de área.

Figura 2. Esquema metodológico.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Parámetros seleccionados para determinar las zonas potenciales de recarga subsuperficial.

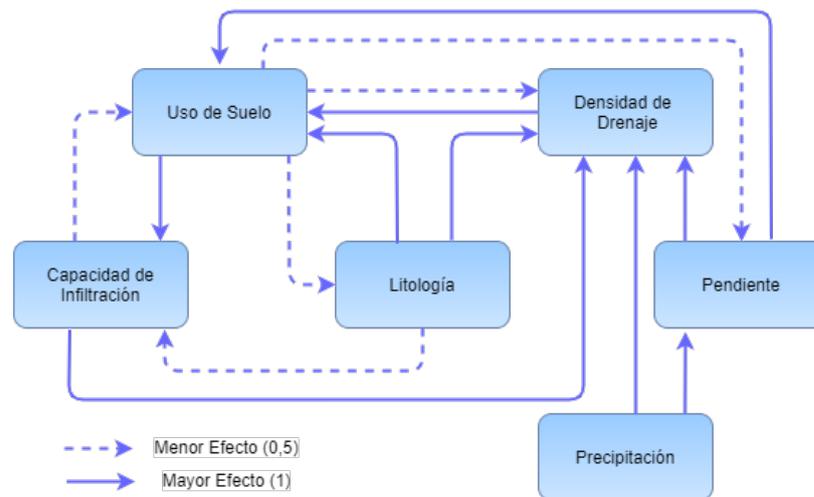


(a) Litología, (b) Usos de suelo, (c) Precipitación, (d) Pendiente, (e) Capacidad de infiltración y (f) Densidad de drenaje.
 Fuente: Elaboración propia con datos de SGM,1997; Inegi, 2010; Inegi,2013; Inegi, 2017; SMN, 2020.

2.2.2. Pesos

Los pesos se asignaron a través del enfoque MIF, mediante el cual se esquematizan la interrelación de los parámetros seleccionados para ponderar de acuerdo con la importancia y el número de vínculos existentes entre ellos (Shaban *et al.*, 2006; Magesh *et al.*, 2012; Yeh *et al.*, 2016; Singh *et al.*, 2019). En la Figura 4 se representa con una flecha continua las interacciones de mayor influencia, las cuales tienen un valor de 1. Mientras que en una flecha discontinua se representan las interacciones con una influencia menor y cuyo peso es de 0,5.

Figura 4. Esquema de interacciones de las variables que intervienen en el proceso de la recarga artificial de agua subterránea



Fuente: Elaboración propia con base en Singh *et al.*, 2019.

El peso de cada criterio (W_f) se calculó como una suma de puntos de acuerdo con la cantidad y relevancia de interacciones que un elemento ejerce sobre otros, y el peso relativo (W_{fr}) es el resultado del promedio ponderado (Tabla 2). Por ejemplo, la litología se relaciona con el uso de suelo y con la densidad de drenaje con una línea continua, mientras que con la capacidad de infiltración presenta una línea discontinua, por lo tanto, la influencia de la litología con las demás variables es de 2,5.

Tabla 2. Determinación de pesos por interacciones entre variables.

Variable	Interacciones	W_f	W_{fr}
Litología	$(1 \times 0,5) + (1 \times 1) + (1 \times 1)$	2,5	0,22
Uso de Suelo	$(3 \times 0,5) + (1 \times 1)$	2,5	0,22
Precipitación	(2×1)	2	0,19
Pendiente	$(1 \times 0,5) + (1 \times 1)$	1,5	0,14
Capacidad de infiltración	$(1 \times 0,5) + (1 \times 1)$	1,5	0,14
Densidad de drenaje	(1×1)	1	0,09
Σ		11	1,00

Fuente: Elaboración propia con base en Singh *et al.*, 2019.

2.2.3. III. Reclasificación

Para cada variable se definieron rangos de valor o clases en función de su aportación a la recarga de agua subterránea. En el caso de la litología, se asoció a los tipos de roca presentes en el área de estudio a través de valores de conductividad hidráulica anteriormente reportados (Vázquez & Palomera, (1989) Leyva, (2010) Paredes, (2010) y Suárez, (2019). Esto para identificar las unidades geológicas que permiten en mayor medida el flujo del agua subterránea (Tabla 3).

Tabla 3. Conductividad hidráulica por tipo de litología.

Edad		Clave	Descripción	Conductividad Hidráulica K (m/s)
Cenozoico	Pleistoceno-Holoceno	Qhoal	Aluvión	$2,0 \times 10^{-5}$
		Qla	Arcillas, limos, turbas	$5,5 \times 10^{-9}$
		QhoA-B	Andesita-Basalto	$5,0 \times 10^{-4}$
		QpthoADa	Andesita-Dacita	$3,7 \times 10^{-5}$
		QpthoB-A	Basalto-Andesita	$4,0 \times 10^{-5}$
		QptA-B	Andesita-Basalto	$2,0 \times 10^{-5}$
		QptTA-A	Toba Andesítica-Andesita	$2,0 \times 10^{-5}$
		QhoLh-TA	Lahar-Toba	$2,0 \times 10^{-5}$
	Plioceno	TplQptla	Lacustre	$5,0 \times 10^{-7}$
		TplQptA	Andesita	$4,0 \times 10^{-5}$
		TplQptADa	Andesita-Dacita	$4,0 \times 10^{-5}$
		TplA-Da	Andesita-Dacita	$4,0 \times 10^{-5}$
		TplTA-A	Toba Andesítica-Andesita	$2,0 \times 10^{-8}$
		TplA	Andesita	$2,0 \times 10^{-8}$
		TplLh-TA	Lahar Toba-Andesítica	$7,0 \times 10^{-6}$
		TplR-Tda	Riolita Toba Dacítica	$2,0 \times 10^{-8}$
	Mioceno	TmA-Da	Andesita-Dacita	$7,0 \times 10^{-6}$
		Ts(B)	Basalto	$2,0 \times 10^{-8}$
		Ts(R)	Riolita	$2,0 \times 10^{-8}$

Fuente: Elaboración propia con base en Vázquez & Palomera, 1989; Leyva, 2010; Paredes, 2010; Suárez, 2019.

Los rangos o clases de cada variable se reclasificaron con valores entre 1 y 5, donde el 1 corresponde a aquellas características que menos contribuyen al proceso de recarga y 5 a las que más la favorecen. Los rangos reclasificados y su grado de contribución a la recarga se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Reclasificación de valores por variable.

Variable	Rango/clase	Valor reclasificado	Contribución a la recarga de agua subterránea
Litología	Materiales lacustres.	1	Muy bajo
	Rocas volcánicas compactas.	2	Bajo
	Lahar, aluvión.	3	Medio
	Tobas y pumicitas intercaladas con derrames lávicos.	4	Alto
	Rocas volcánicas fisuradas.	5	Muy alto
Uso de Suelo	Asentamientos humanos y cuerpos de agua.	1	Muy bajo
	Bosque, vegetación halófila y secundaria.	2	Bajo
	Suelo desnudo, pastizales, pradera y matorral.	3	Medio
	Agricultura.	4	Alto
Precipitación (mm)	0 - 600	1	Muy bajo
	601 - 725	2	Bajo
	726 - 900	3	Medio
	901 - 1075	4	Alto
	> 1075	5	Muy alto
Pendiente (°)	> 33	1	Muy bajo
	25,1 - 33	2	Bajo
	16,1 - 25	3	Medio
	8,1 - 16	4	Alto
	0 - 8	5	Muy alto
Capacidad de infiltración	0 - 4	2	Bajo
	4 - 8	3	Medio
	8 - 12	4	Alto
	> 12	5	Muy alto
Densidad de drenaje (km / km ²)	0 - 1,5	1	Muy bajo
	1,5 - 2,9	2	Bajo
	2,9 - 4,2	3	Medio
	4,2 - 5,6	4	Alto
	> 5,6	5	Muy alto

Fuente: Elaboración propia.

2.2.4. Superposición de capas

Las capas vectoriales se convirtieron a formato ráster con un tamaño de píxel de 250 m x 250 m y se utilizó la ecuación 1 para multiplicar el puntaje de las capas reclasificadas (r) por el peso asignado (p) en función de las interacciones identificadas mediante el enfoque MIF.

$$ZPR = Li_r \times Li_p + Us_r \times Us_p + Pr_r \times Pr_p + P_r \times P_p + CI_r \times CI_p + Dd_r \times Dd_p \text{ Ec. 1}$$

Donde:

ZPR= Zonas potenciales de recarga artificial

Li= litología

Us= uso de suelo

Pr= precipitación

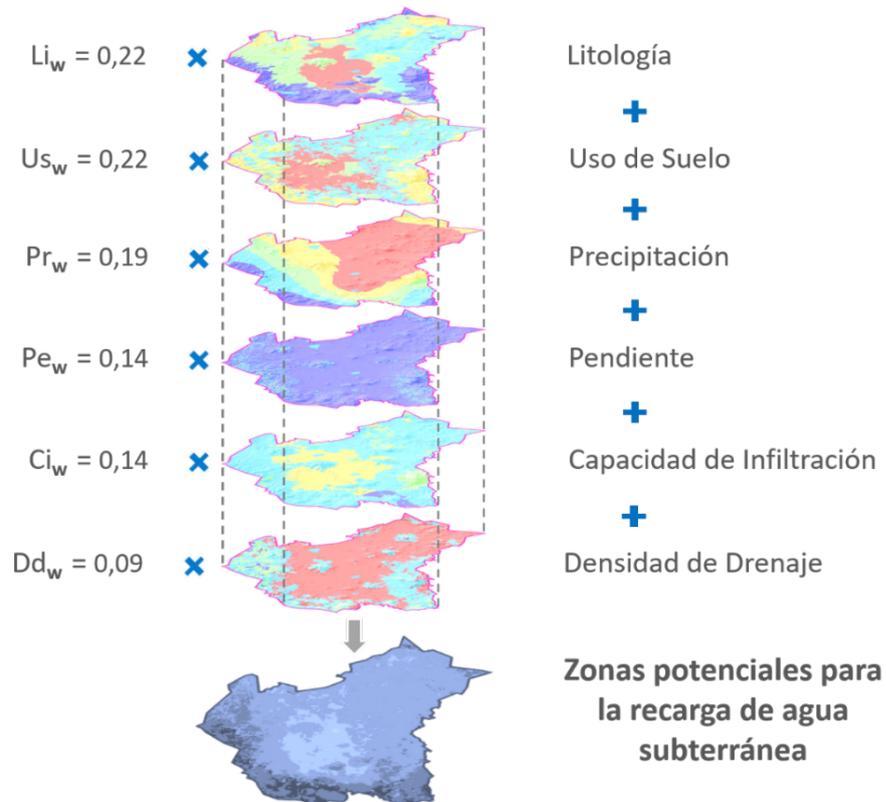
P= pendiente

CI= capacidad de infiltración

Dd= densidad de drenaje

El resultado de la superposición de capas es el mapa de las zonas potenciales de recarga artificial de agua subterránea (Figura 5).

Figura 5. Superposición de capas de las variables determinantes para la ubicación de zonas potenciales para la recarga de agua subterránea.

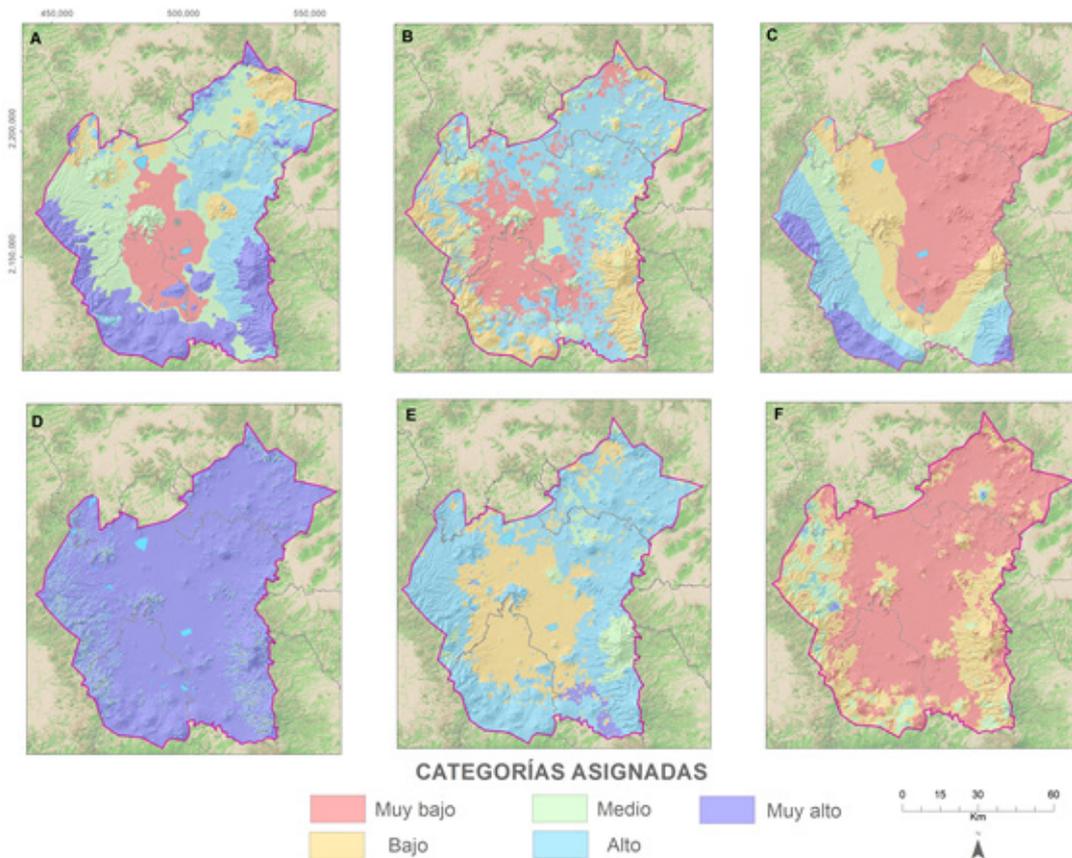


Fuente: Elaboración propia.

3. Resultados

Los archivos ráster reclasificados a partir del puntaje asignado y del número de interacciones con el resto de los parámetros, muestran las zonas del área de estudio que contribuyen en mayor o menor medida a la recarga de agua subterránea. Cada parámetro se describe a continuación (Figura 6).

Figura 6. Valores reclasificados por variable.



(a) Litología, (b) Usos de suelo, (c) Precipitación, (d) Pendiente, (e) Capacidad de infiltración y (f) Densidad de drenaje. Fuente: Elaboración propia.

3.1. Litología

El mapa de litología está clasificado en cinco categorías. En donde la asignación más alta corresponde a la litología con mayor conductividad hidráulica (5×10^{-4} m/s) ubicada en la Sierra de Chichinautzin, Sierra de las Cruces, Monte Tláloc, Sierra Nevada y Sierra de Santa Catarina.

Respecto a las zonas con categoría media se localizan en el pie de monte de la Sierra de las Cruces, en la Sierra de Guadalupe, en porciones del Estado de México, así como algunos municipios del Estado de Hidalgo. Los materiales de esta zona cuentan con un valor de K que varía entre $2,0 \times 10^{-5}$ m/s y 7×10^{-6} m/s. Por último, los sitios con valores menores de conductividad hidráulica ($5,5 \times 10^{-9}$ m/s) corresponden al antiguo Lago de Texcoco y presenta un material compuesto de arcillas, limos y turbas.

3.2. *Uso de suelo*

En el caso del uso de suelo, destaca el área urbana que cubre la mayor parte del territorio de la Ciudad de México y se extiende a diversos municipios del Estado de México. En esta zona, la contribución a la recarga por infiltración de agua pluvial es la más baja. Las zonas con cobertura natural se encuentran en la parte alta de las sierras circundantes; mientras que las zonas agrícolas se ubican al sur de la Ciudad de México, en gran parte del Estado de Hidalgo, en la zona Nororiente del Estado de México y al piedemonte de la Sierra Nevada. Las zonas agrícolas tienen un valor alto debido a que en estas se pueden implementar acciones para fomentar la recarga, a diferencia de las boscosas, en las que se busca mantener las condiciones naturales.

3.3. *Precipitación*

Corresponde a la entrada de agua al sistema. Los valores más bajos (menores a 600 mm anuales) abarcan desde la porción noreste hasta el centro del área de estudio. Por su parte, la mayor contribución, con un promedio de lluvia superior a los 1075 mm anuales, se localizan en la Sierra de Chichinautzin (en la porción sur) y en la Sierra de las Cruces.

3.4. *Pendiente*

La pendiente es una variable que influye directamente en el movimiento del agua sobre la superficie del terreno; las altas favorecen el escurrimiento y reducen la infiltración. Los valores más bajos de este parámetro corresponden a zonas con pendientes mayores a 33°, ubicadas en las laderas sur de Sierra de las Cruces y al poniente de Monte Tláloc. Mientras que los más altos corresponden a las pendientes del rango de 0 a 8°, localizados donde antiguamente se encontraba el Lago de Texcoco y lo que actualmente corresponde al área urbana de la ZMVM.

3.5. *Capacidad de infiltración*

Este parámetro está definido por la textura del suelo, la cual determina la facilidad con la que el agua superficial pasa al subsuelo. A las unidades con textura fina (suelos con capacidad de infiltración lenta) se les asignó valores bajos, al igual que a las zonas urbanas; ubicadas principalmente en la porción central del área de estudio. Mientras que, los valores altos predominan en toda la zona de estudio y con valores muy altos al poniente de la Sierra Nevada.

3.6. *Densidad de drenaje*

Muestra la capacidad del territorio para drenar el agua superficial con relación a la longitud de los cauces en km por cada km². Entre mayor sea la densidad de drenaje, el escurrimiento se verá favorecido y se reducirá la infiltración. Por un lado, la mayor parte del territorio presenta una muy baja y baja densidad de drenaje, con una longitud menor de 2,9 km por km². Por otro, se aprecian zonas con contribución alta y muy alta representadas con tonos de azul, ubicados en la Sierra de las Cruces y la Sierra de Chichinautzin, con densidades mayores a 4,2 km por km².

3.7. *Zonas potenciales para la recarga de agua subterránea*

El resultado de la sobreposición de las seis capas raster mediante álgebra de mapas fue un archivo con cinco clases definidas con intervalos iguales. Las cuales se reclasificaron en las siguientes

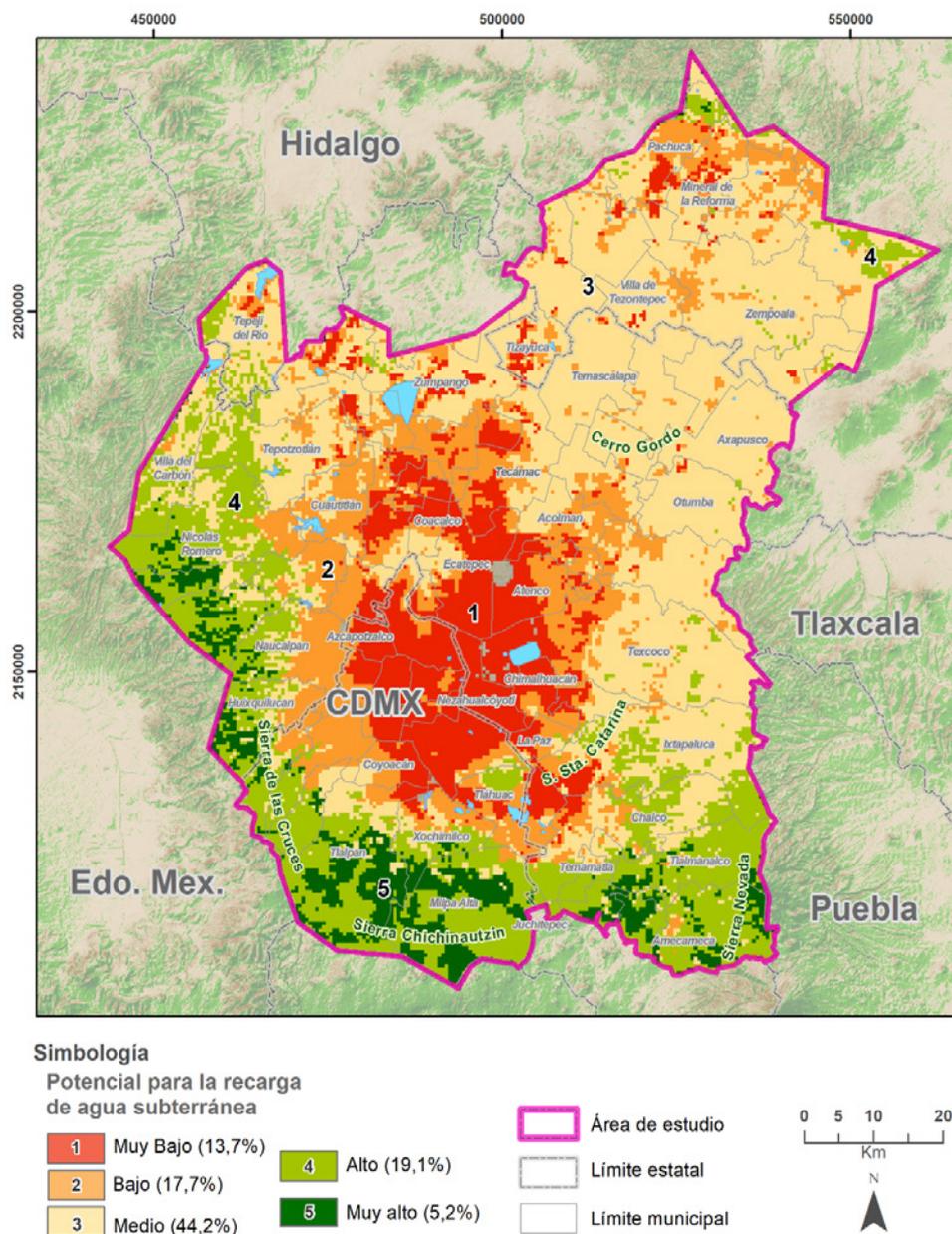
categorías: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto (Figura 7). La Tabla 4 muestra la ponderación para cada rango de valores y su categoría correspondiente.

Tabla 4. Categorías de las zonas potenciales de recarga subterránea.

Rango de valores	Ponderación	Categoría
1,55 – 2,12	1	Muy bajo
2,13 – 2,69	2	Bajo
2,70 – 3,26	3	Medio
3,27 – 3,83	4	Alto
3,83 – 4,40	5	Muy alto

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Mapa de zonas potenciales de recarga de agua subterránea.



Fuente: Elaboración propia.

La categoría predominante en la contribución a la recarga es “Medio”, con una cobertura del 44,2 % de la superficie. Se extiende principalmente hacia el noreste y este del área de estudio, en los acuíferos de Cuautitlán-Pachuca y de Texcoco.

La categoría “Alto” es la segunda en nivel de cobertura con el 19,1 %, abarca la parte sur de los acuíferos Chalco-Amecameca y Ciudad de México; y la mayor parte de la Sierra de las Cruces, Sierra Nevada y Sierra de Chichinautzin. Los polígonos con categoría “Bajo” se concentran principalmente en la periferia de la zona urbana de la ZMVM y el porcentaje respecto a la superficie de contribución es del 17,7 %.

Por su parte, los polígonos clasificados como “Muy bajo” se concentran principalmente en la zona urbana al centro del área de estudio. Con presencia en dirección norte-sur y abarca los municipios de Ecatepec, Chimalhuacán, Nezahualcóyotl, Coyoacán, Azcapotzalco y Tláhuac. Esta categoría cubre el 13,7 % del área de estudio.

Por último, las zonas clasificadas como “Muy alto” cubren el 5,2 % del área. Se localizan en los lugares con mayor elevación, como la Sierra de las Cruces, Juchitepec, Amecameca de Juárez, Ayapango y Tlalmanalco. Los polígonos con mayor tamaño se ubican en la Sierra Chichinautzin, en el Ajusco y Milpa Alta.

4. Discusión

El proceso de recarga del agua subterránea está determinado por diversas variables, no todas contribuyen del mismo modo ni tienen el mismo grado de importancia, algunas favorecen el escurrimiento y otras la infiltración. La selección de variables en esta investigación estuvo determinada por la cantidad de agua que entra al sistema y la facilidad con la que esta puede infiltrarse, percolar e incorporarse al flujo subterráneo.

El estado del arte muestra otras variables utilizadas en distintos lugares del mundo pero que no fueron incluidas en este estudio. Una de ellas es la orientación de laderas, cuya influencia en el proceso de recarga en la ZMVM requiere de mayor conocimiento, ya que, al estar situada en una región tropical, la radiación afecta las laderas con dirección norte en verano y las laderas con dirección sur en invierno. Es así, que la convierte en una variable dinámica que no afecta a la orografía de la misma forma que como ocurre en países situados en latitudes medias.

En cuanto a la asignación de pesos, la técnica MIF resultó conveniente para la ponderación de las capas utilizadas, asignándole más peso a las variables que tienen un mayor número de interacciones. Lo cual, en combinación con el álgebra de mapas a través de los SIG ha facilitado las tareas que tradicionalmente se realizaban mediante campañas de campo (Hammouri et al., 2012), y que implicaba mayor uso de recursos y tiempo de ejecución.

En contraparte, entre las limitaciones que puede presentar la técnica MIF está la de simplificar o reducir las relaciones entre los parámetros, lo que puede derivar en una asignación de pesos inexacta. Lo mismo ocurre con la reclasificación de los rangos o las clases, ya que, si no se conoce el área de estudio a profundidad los valores definidos pueden contener imprecisiones, las cuales son susceptibles a incrementarse en función de las fórmulas utilizadas en el álgebra de mapas.

Los resultados obtenidos coinciden con investigaciones previas del mismo corte tanto en el área de estudio, como en otros acuíferos. Estos se mencionan a continuación y en ellos se concluye que las variables más relevantes son la litología y el uso de suelo. En el caso de la litología, Mukherjee *et al.* (2012) y Singh *et al.* (2019) encontraron que las zonas con alto potencial para la recarga se encuentran en las planicies aluviales conformadas por materiales con alta permeabilidad. Mientras que en la investigación realizada por Bhattacharya *et al.* (2021) los valores altos coinciden con las zonas con una alta permeabilidad secundaria, definida por la densidad de fallas y fracturas.

En la zona de estudio, Leyva (2010) menciona que las rocas que se encuentran en la zona sur de la Ciudad de México, en particular en Sierra de Chichinautzin, Sierra Nevada y algunas zonas de la Sierra de las Cruces; presentan un alto grado de permeabilidad, lo que favorece la recarga del acuífero. Esto coincide con los resultados aquí expuestos, donde los sitios con más potencial se encuentran al sur y al poniente de la ZMVM; y los de menor potencial están en las planicies lacustres del centro del valle, donde se han depositado limos y arcillas que limitan la infiltración.

Sobre el uso de suelo, en los estudios realizados por Magesh *et al.* (2012), Anbarasu *et al.* (2020) las zonas con alto potencial de recarga de agua subterránea están fuertemente influenciados por las zonas agrícolas. Por su parte, en la investigación realizada por Selvam *et al.* (2014) los asentamientos urbanos delinearon las zonas con bajo potencial; mientras que en el estudio de Fagbohun (2018) lo hicieron los polígonos de suelo desnudo.

Para el Valle de México, Aragón (2019) y Alonso (2020) determinaron que la categoría urbana no debe considerarse dentro de la delimitación de zonas de recarga o se le debe asignar los valores más bajos. Esto concuerda con las zonas del área de estudio que presentan el potencial de recarga muy bajo y bajo, y que está determinado por la dificultad que representa intervenir el territorio urbanizado para potenciar la recarga. No obstante, algunos píxeles ubicados en áreas urbanizadas en el sureste de la Ciudad de México tienen valores de contribución media, esto podría deberse al peso asignado a variables como pendiente y densidad de drenaje; que en la planicie suelen tener pesos altos y que al coincidir con litología con mayor conductividad incrementa la categoría en esas zonas.

Por su parte, el valor asignado a las zonas boscosas fue bajo. Esto se debe a que los polígonos con potencial muy alto para la recarga tendrían que ser sometidos a ciertos procesos de preparación del suelo para incrementar los volúmenes de infiltración mediante recarga subsuperficial. En este sentido, las áreas boscosas ya cumplen con su función como zonas de recarga y se debería de promover su conservación. Lo anterior explica por qué la agricultura recibió una categoría alta, ya que en dichas zonas resulta más conveniente modificar el terreno para fomentar la recarga.

Cabe destacar que la mayoría de las zonas identificadas con alto potencial de recarga se encuentran dentro de los polígonos de suelo de conservación. Sin embargo, esta categoría no los exenta de experimentar cambios de uso de suelo por el avance de la frontera agrícola, los asentamientos irregulares y la tala clandestina. Por lo que se recomienda incrementar los incentivos de protección de espacios naturales, como el pago por servicios ambientales para conservar y recuperar la vocación natural de estas zonas.

Esto resulta particularmente complejo, ya que, por sus dimensiones, la ZMVM extrae agua de acuíferos que se encuentran en diferentes entidades federativas para abastecer a la población y a los sectores productivos. Por otra parte, los suelos de conservación son administrados por gobier-

nos locales, cuyos instrumentos legales y prioridades sobre el manejo de los recursos hídricos y usos de suelo suelen ser incompatibles. (Dgcorena, 2013).

La finalidad de este tipo de investigaciones es apoyar al proceso de planeación territorial señalando los sitios óptimos para establecer medidas que contribuyan a disminuir el grado de explotación de los acuíferos. Al mismo tiempo reducir los costos que implicaría implementar grandes proyectos sobre todo el territorio.

5. Conclusiones

El conocimiento sobre el potencial de recarga de agua subterránea es un requisito indispensable para garantizar la sustentabilidad hídrica de la ZMVM. Los diversos proyectos realizados en el área de estudio reflejan la importancia que ha adquirido este tema en las últimas décadas. Sin embargo, la mayor parte de ellos se centran en propuestas locales, pasando por alto la importancia de la visión regional, aspecto que fue fundamental en la investigación, y a través de la cual se generaron las siguientes conclusiones.

La metodología empleada resultó ser una herramienta eficaz en la evaluación de los valores potenciales de recarga a nivel regional y demuestra su utilidad en el proceso de planeación territorial.

Se clasificó el territorio de acuerdo con su potencial para favorecer la recarga de agua subterránea. Las zonas más favorables corresponden a la categoría “muy alto”, que cubre el 5,2 % del total y la categoría “alto” con un porcentaje del 19,1 %. La categoría “medio” es la predominante en términos de extensión con el 44,2 % del territorio; mientras que las categorías con menor potencial son “bajo” con 17,7 % y “muy bajo” con 13,7 %. Los sitios con potencial muy alto se ubican en las sierras al sur y poniente del área de estudio.

Los parámetros con mayor importancia fueron la litología y el uso de suelo, con un peso de 0,22 para cada uno. Los valores de K de las rocas reportados en la bibliografía fueron determinantes para la ponderación de la litología. Por su parte el uso de suelo con mayor peso es el agrícola, ya que en este se plantea implementar acciones dirigidas a aumentar los procesos de recarga, con lo que se propone preservar, las masas forestales en su estado actual.

El parámetro más susceptible de ser modificado por las actividades humanas es el uso de suelo, y a su vez, al ser alterado puede modificar los resultados obtenidos. Al respecto, la gestión del uso de suelo de las zonas de recarga recae principalmente en las administraciones locales, lo que requiere un trabajo de Gestión Integrada de Recursos Hídricos para involucrar a los diferentes actores con injerencia en el sistema, y no restringir las medidas únicamente a los límites político-administrativos de cada municipio o estado.

Finalmente, se plantea profundizar en las investigaciones de los acuíferos que forman parte de la Región “Agua del Valle de México”, para proyectar sus tendencias de abatimiento y recarga, y tomar medidas preventivas que reviertan su sobreexplotación o que eviten esta condición en el futuro.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) y al Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial (CentroGeo) por su apoyo para la realización de este estudio.

Contribución de autorías

El artículo es producto de un trabajo colectivo entre los autores. Elizabeth Boyás: Investigación, metodología, redacción, edición; María Fernanda González: Investigación, metodología, redacción, cartografía, edición; Jorge Paredes: Conceptualización, redacción, supervisión, revisión.

Financiación

La investigación se realizó gracias al financiamiento recibido por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) con número de clave: 2019-000037-02NACF; al programa de Especialidad en Geomática del CentroGeo, y al proyecto No. 154 "Observatorio Metropolitano" del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Conflicto de intereses

Los autores de este trabajo declaran que no existe ningún tipo de conflicto de interés.

Bibliografía

- Alonso, A. (2020). *Estudio de factibilidad hidrogeológica para la recarga de acuíferos en la Zona Sur de la Cuenca de México* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Anbarasu, S., Brindha, K., & Elango, L. (2019). Multi-influencing factor method for delineation of groundwater potential zones using remote sensing and GIS techniques in the western part of Perambalur district, southern India. *Earth Science Informatics*, 13 (2), 1-16. doi: 10.1007/s12145-019-00426-8
- Aragón, E. (2019). *La Recarga Artificial del Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: Ubicación de Sitios Potenciales y Retos para su Gestión, a través del Análisis Espacial* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México.
- Bhattacharya, S., Das, S., Das, S., Kalashetty, M., & Warghat, S. R. (2021). An integrated approach for mapping groundwater potential applying geospatial and MIF techniques in the semiarid region. *Environment, Development and Sustainability*, 23 (2), 1-16. doi: 10.1007/s10668-020-00593-5
- Birkle, P., Torres, V., & González, E. (1995). Evaluación preliminar del potencial de acuíferos profundos en la cuenca del valle de México. *Tecnología y ciencias del agua*, 10 (3), 47-53. Recuperado de <http://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/732/719>
- Campos-Cabral, V., & Ávila-García, P. (2015). Conflictos sociales por el trasvase del Río Temascaltepec, cuarta etapa del sistema Cutzamala. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 12 (2), 147-164. doi: 10.22231/asyd.v12i2.145
- Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (Cicese). (2020). *Datos climáticos diarios del Clicom del SMN*.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [Conabio]. (2018). *Base de datos geográficos de Áreas Naturales Protegidas Estatales y del D.F.* [Map]. Recuperado de http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadata/gis/anpe09gw.xml?_xsl=/db/met
- Comisión Nacional del Agua [Conagua]. (2018). *Estadísticas del Agua en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- Cordeiro, J. P. C., Câmara, G., De Freitas, U. M., & Almeida, F. (2009). Yet another map algebra. *Geoinformatica*, 13 (2), 183-202. doi: 10.1007/s10707-008-0045-4
- Dirección General de la Comisión de Recursos Naturales [Dgcorena]. (2013). *Suelo de conservación y biodiversidad*. Recuperado de <http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sedema/images/archivos/noticias/primer-informe-sedema/capitulo-03.pdf>

- Dillon, P. J., Pavelic, P., Page, D., Beringen, H., & Ward, J. (2009). Managed aquifer recharge. *An introduction waterlines report series*, 13, 1-64. Recuperado de https://recharge.iah.org/files/2016/11/MAR_Intro-Waterlines-2009.pdf
- Dillon, P., Stuyfzand, P., Grischek, T., Lloria, M., Pyne, R. D. G., Jain, R. C., Bear, J., Schwarz, J., Wang, W., & Fernandez, E. (2019). Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, 27 (1), 1-30. doi: 10.1007/s10040-018-1841-z
- Escolero, O., Gutiérrez, C. & Edgar, M. (Eds.). (2017). *Manejo de la recarga de acuíferos: Un enfoque hacia Latinoamérica*. Estado de Morelos, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Recuperado de https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/manejo-recarga-acuíferos-ehl.pdf
- Fagbohun, B. J. (2018). Integrating GIS and multi-influencing factor technique for delineation of potential groundwater recharge zones in parts of Ilesha schist belt, southwestern Nigeria. *Environmental earth sciences*, 77 (3), 69. doi: 10.1007/s12665-018-7229-5
- Gispert, M. Í., Hernández, M. A. A., Climent, E. L., & Flores, M. F. T. (2018). Rainwater harvesting as a drinking water option for Mexico City. *Sustainability*, 10 (11), 3890. doi: 10.3390/su10113890
- Hammouri, N., El-Naqa, A., & Barakat, M. (2012). An integrated approach to groundwater exploration using remote sensing and geographic information system. *Journal of Water Resource and Protection*, 4 (9), 717-724. doi: 10.4236/jwarp.2012.49081
- Han, D., Currell, M. J., Cao, G., & Hall, B. (2017). Alterations to groundwater recharge due to anthropogenic landscape change. *Journal of Hydrology*, 554, 545-557. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.09.018
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua [Imta]. (2010). *Recarga Inducida del Acuífero del Valle de México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Recuperado de <https://www.imta.gob.mx/gaceta/anteriores/g36-04-2010/gaceta-imta-36.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [Inegi]. (2010a). *Censo de Población y Vivienda*.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [Inegi]. (2010b). *Red Hidrográfica* (2.^a ed.) [Map]. Recuperado de www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/default.html#Mapa
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [Inegi]. (2013). *Continuo de Elevaciones Mexicano Nacional*.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [Inegi]. (2014). *Conjunto de datos edafológicos* [Map]. Recuperado de www.inegi.org.mx/temas/edafologia/default.html#Mapa
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [Inegi]. (2017). *Uso de suelo y vegetación* [Map]. Recuperado de www.conabio.gob.mx/informacion/metadata/gis/usv250s6gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- Juárez, A. (abril de 2018). "Recarga artificial en el Valle de México: Experiencias y retos". En *3as. Jornadas Técnicas de Gestión de Acuíferos y Recarga Artificial*. Conferencia llevada a cabo en Ciudad de México, México. Recuperado de http://www.agua.unam.mx/JornadasAcuíferos2018/assets/Recarga_Artificial_en_el_Valle_de_Mexico_Experiencias_y_retos.pdf
- Kloster, K., & Alba, F. de. (2007). El agua en la ciudad de México y el factor de fragmentación política. *Perfiles latinoamericanos*, 14 (29), 137-159. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/115/11502905.pdf>
- Landa, R., Magaña, V., & Neri, C. (2008). *Agua y clima: Elementos para la adaptación al cambio climático*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de <https://www.atmosfera.unam.mx/wp-content/uploads/2017/12/agua-y-clima.pdf>
- Leyva, E. (2010). *Acuíferos semiconfinados y su modelación: Aplicaciones al cuífero de la zona metropolitana de la Ciudad de México* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
- Machiwal, D., Jha, M. K., & Mal, B. C. (2011). Assessment of Groundwater Potential in a Semi-Arid Region of India Using Remote Sensing, GIS and MCDM Techniques. *Water Resources Management*, 25, 1359-1386. doi: 10.1007/s11269-010-9749-y
- Magesh, N., Chandrasekar, N., & Soundranayagam, J. P. (2012). Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geoscience Frontiers*, 3 (2), 189-196. doi: 10.1016/j.gsf.2011.10.007
- Mennis, J., Viger, R., & Tomlin, C. D. (2005). Cubic map algebra functions for spatio-temporal analysis. *Cartography and Geographic Information Science*, 32 (1), 17-32. doi: 10.1559/1523040053270765

- Mishra, N., Khare, D., Gupta, K. K., & Shukla, R. (2014). Impact of land use change on groundwater—A review. *Adv Water Resour Protect*, 2, 28-41. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/279951307_Impact_of_Land_Use_Change_on_Groundwater_-_A_Review/link/559f723408ae03c44a5cf96c/download
- Mukherjee, P., Singh, C. K., & Mukherjee, S. (2012). Delineation of groundwater potential zones in arid region of India—A remote sensing and GIS approach. *Water resources management*, 26 (9), 2643-2672. doi: 10.1007/s11269-012-0038-9
- Page, D., Bekele, E., Vanderzalm, J., & Sidhu, J. (2018). Managed aquifer recharge (MAR) in sustainable urban water management. *Water*, 10 (3), 239. doi: 10.3390/w10030239
- Pan, Y., Gong, H., ZHou, D., Li, X., & Nakagoshi, N. (2011). Impact of land use change on groundwater recharge in Guishui River Basin, China. *Chinese Geographical Science*, 21 (6), 734-743. doi: 10.1007/s11769-011-0508-7
- Paredes, J. (2010). *Determinación del índice de vulnerabilidad de contaminación del acuífero del Valle de Toluca mediante la adecuación del método SINTACS* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma del Estado de México, Estado de México.
- Peña, L. C. B., López, D. A. S., Cejudo, L. C. A., Santander, Á. P., Olavee, M. E. T., & Olivass, A. G. (2016). Identificación de áreas potenciales de recarga hídrica en el acuífero Cuauhtémoc (Chihuahua), mediante una evaluación espacial multi criterio. En *Estudios territoriales en México: Percepción remota y sistemas de información espacial*, 339-362. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/309118247_Identificacion_de_areas_potenciales_de_recarga_hidrica_en_el_acuifero_Cuauhtemoc_Chihuahua_mediante_una_evaluacion_espacial_multicriterio/link/57ffab5408aebab2012bc142/download
- Peña, S. (2019). Condiciones hídricas en la Cuenca del Valle de México / Water conditions in the Valley of Mexico Basin. *Tecnología y ciencias del agua*, 10 (2), 98-127. doi: 10.24850/j-tyca-2019-02-04
- Prabhakar, A., & Tiwari, H. (2015). Land use and land cover effect on groundwater storage. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1 (4), 45. doi: 10.1007/s40808-015-0053-y
- Pradilla, E., Pino, R. A., Moreno, F. de J., Díaz, L. O., Hernández, C., Nemeth, F. G., Santiago, C., & Valderrama, C. (2015). *Zona Metropolitana del Valle de México: Cambios demográficos, económicos y territoriales*. Proyecto Conacyt-UAM México DF.
- Selvam, S., Magesh, N. S., Sivasubramanian, P., Soundranayagam, J. P., Manimaran, G., & Seshunarayana, T. (2014). Deciphering of groundwater potential zones in Tuticorin, Tamil Nadu, using remote sensing and GIS techniques. *Journal of the Geological Society of India*, 84 (5), 597-608.
- Senanayake, I. P., Dissanayake, D. M. D. O. K., Mayadunna, B. B., & Weerasekera, W. L. (2016a). An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques. *Geoscience Frontiers*, 7 (1), 115-124. doi: 10.1016/j.gsf.2015.03.002
- Servicio Geológico Mexicano, & Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (1997). *Cartas Geológico-Mineras y Geoquímicas* (1ª Edición) [Map]. Recuperado de http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/88_F14-11_GM.pdf
- Servicio Geológico Mexicano, & Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2002). *Carta Geológico-Mineras y Geoquímicas* (1.ª ed.) [Map]. Recuperado de http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/89_E14-2_GM.pdf
- Shaban, A., Khawlie, M., & Abdallah, C. (2006). Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: The case of Occidental Lebanon. *Hydrogeology Journal*, 14 (4), 433-443. doi: 10.1007/s10040-005-0437-6
- Singh, S. K., Zeddies, M., Shankar, U., & Griffiths, G. A. (2019). Potential groundwater recharge zones within New Zealand. *Geoscience Frontiers*, 10 (3), 1065-1072. doi: 10.1016/j.gsf.2018.05.01
- Solano-Rojas, D., Cabral-Cano, E., Hernández-Espriú, A., Wdowinski, S., DeMets, C., Salazar-Tlaczani, L., Falorni, G., & Bohane, A. (2015). La relación de subsidencia del terreno InSAR-GPS y el abatimiento del nivel estático en pozos de la zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67 (2), 273-283. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=94340680010>
- Stefan, C., & Ansems, N. (2018). Web-based global inventory of managed aquifer recharge applications. *Sustainable Water Resources Management*, 4 (2), 153-162. doi: 10.1007/s40899-017-0212-6
- Suárez, P. (2019). *Modelo matemático de flujo del acuífero de Texcoco, como una herramienta de gestión y planificación hídrica para el desarrollo sustentable de la región* (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

- Tsai, J.-P., Chang, L.-C., Chang, P.-Y., Lin, Y.-C., Chen, Y.-C., Wu, M.-T., & Yu, H.-L. (2017). Spatial-temporal pattern recognition of groundwater head variations for recharge zone identification. *Journal of Hydrology*, 549, 351-362. doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.03.047
- Valek, A. M., Sušnik, J., & Grafakos, S. (2017). Quantification of the urban water-energy nexus in México City, México, with an assessment of water-system related carbon emissions. *Science of the Total Environment*, 590, 258-268. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.234
- Vázquez, R., & Palomera, J. (1989). Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 28 (2), 133-190. doi: 10.22201/igeof.00167169p.1989.28.2.1026
- Vázquez-Guillén, F., & Auvinet-Guichard, G. (2019). Injection into the shallow aquifer-aquitard system beneath Mexico City for counteracting pore pressure declines due to deeper groundwater withdrawals: Analysis of one injection well. *Geofísica internacional*, 58 (1), 81-99. doi: 10.22201/igeof.00167169p.2019.58.1.2069
- Yeh, H.-F., Cheng, Y.-S., Lin, H.-I., & Lee, C.-H. (2016). Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan. *Sustainable Environment Research*, 26 (1), 33-43. doi: 10.1016/j.serj.2015.09.005