

Eje 1

**Urbanización, cambio de uso de suelo y
resiliencia hídrica**

Capítulo 1.1

Urbanización irregular y residuos de la construcción: Amenaza hidrogeológica en la represa La Rucia, Tonalá

Bautista Díaz Jaime Paul¹

Flores Gómez Gustavo²

González Pérez Mario Guadalupe³

DOI: <https://doi.org/10.61728/AE20259419>



¹ Estudiante de la Maestría en Geología del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. e-mail: jaime.bautista1826@alumnos.udg.mx

² Profesor del Centro Universitario de Tlajomulco de la Universidad de Guadalajara. e-mail: gustavo.flores2192@alumnos.udg.mx

³ Profesor-Investigador del Centro Universitario de Tonalá de la Universidad de Guadalajara. e-mail: mario.gperez@academicos.udg.mx

1. Introducción

Los procesos de urbanización irregular que se dan en las zonas urbanas, en particular en las periferias, frecuentemente se asientan en zonas con vulnerabilidad hidrológica, ya sea en zonas bajas, continuas a cuerpos de agua como humedales, cuencas topográficas o antiguos bancos de materiales. En tales sitios, los gobiernos locales suelen asignar los usos de suelo como reserva natural, zonas de recarga acuífera o de reserva territorial con el fin de evitar desarrollos habitacionales. Por tales motivos y debido a factores socioeconómicos, las personas que se asientan en estos sitios lo hacen de manera irregular. Una de las prácticas de nivelación de terreno para estos sitios es la recepción de desechos antropogénicos, proveniente del material de despalde o desechos sólidos de la industria de la construcción o minería, que en los suelos constituye una manifestación directa de la alteración antrópica derivada del proceso de urbanización descontrolada (Mena, 2019).

Cuando estos residuos son dispuestos inadecuadamente sobre o dentro del suelo, ya sea como rellenos o parte de procesos de urbanización informal, generan lo que técnicamente se denomina relleno antropogénico. Esta condición altera sustancialmente las propiedades del suelo original, afectando su estructura, capacidad de infiltración, estabilidad mecánica y potencial contaminante (SEMARNAT, 2023). Se definen como suelos naturales aquellos materiales edáficos que se encuentran en la superficie terrestre y que no han sido alterados de manera significativa por la acción humana, es decir, que mantienen sus características originales, producto exclusivamente de procesos naturales (Lozada y Davila, 2020). Estos suelos no han sido intervenidos mediante prácticas como la urbanización, rellenos artificiales, excavaciones, actividades agrícolas intensivas o disposición de residuos, lo que garantiza que sus propiedades se mantengan en un estado relativamente prístino.

Desde una perspectiva geotécnica y ambiental, la acumulación de materiales antropogénicos puede alterar significativamente las propie-

dades físico-mecánicas del suelo, afectando su capacidad portante, la permeabilidad, la compresibilidad y su estabilidad general. Dichos cambios generan condiciones de riesgo, especialmente en zonas donde no se realiza un control técnico sobre el tipo, cantidad o disposición de los materiales depositados (Hu et al., 2019). Como consecuencia, se interrumpe el intercambio natural entre la atmósfera, la biosfera y la geosfera, afectando procesos fundamentales como la recarga de acuíferos, la regulación del escurrimiento superficial y la retención de humedad, además de alterar la dinámica del ciclo hidrológico en la zona intervenida (Ortiz et al., 2020). En zonas donde no se lleva un control adecuado de estos materiales, se pueden crear condiciones insalubres, favorecer la proliferación de vectores de enfermedades y disminuir la calidad del agua subterránea debido a filtraciones de lixiviados (Gonzalez, 2020).

La tendencia en los estudios acerca de la urbanización irregular y los rellenos antropogénicos coinciden en que estos procesos reducen la infiltración, aumentan el escurrimiento y alteran la recarga de acuíferos, comprometiendo la seguridad hídrica. A pesar de la diversidad de enfoques desde estudios locales con trabajo de campo hasta modelaciones globales, se coincide en la necesidad de integrar análisis geotécnicos, hidrogeológicos y territoriales para comprender la magnitud de las transformaciones y diseñar estrategias de mitigación. Los vacíos persisten en la evaluación a largo plazo de la resiliencia de acuíferos y en la eficacia de soluciones basadas en la naturaleza para revertir las alteraciones hidrogeológicas asociadas a la urbanización irregular.

Procesos de urbanización y rellenos antropogénicos

Diversos estudios han documentado cómo la expansión urbana no planificada genera transformaciones significativas en los suelos y cuerpos de agua. Investigaciones en China (Hu et al., 2019; Liao et al., 2021), México (Mane, 2019; Padilla y Juárez, 2023; Nájera, 2024), Cuba (González, 2020) y Colombia (Hernando et al., 2021; Monroy, 2022) coinciden en que los rellenos antrópicos empleados para nivelar terrenos provocan pérdida de funciones edáficas, impermeabilización y reducción de la infiltración natural. Estos cambios, evidenciados mediante imágenes

satelitales y cartografía temática, han reducido cuerpos de agua (Lozada y Mejía, 2012; Lozada y Dávila, 2020) y deteriorado humedales y microcuencas (Chávez, 2022; Asselen et al., 2024). A nivel global, Hasanlou et al. (2021) y Alessia et al. (2024) muestran que el fenómeno se repite en distintas latitudes, desde Europa hasta Sudamérica.

Escurrimiento superficial e infiltración

La relación entre infiltración, escurrimiento y urbanización es uno de los ejes centrales. Estudios en Argentina (Bottan et al., 2023), Portugal (Lopes et al., 2021), Turquía (Öztürk et al., 2024) y Etiopía (Melese et al., 2022) destacan cómo la pérdida de permeabilidad incrementa el riesgo de inundaciones y erosión. Investigaciones en ambientes kársticos (Li et al., 2020; Jafarzadeh et al., 2024) subrayan la vulnerabilidad de acuíferos ante la contaminación y la reducción de recarga. Asimismo, se reconoce que los suelos desnudos o compactados presentan menor capacidad de infiltración (Mulla et al., 2024), mientras que la infraestructura verde y pavimentos permeables ofrecen alternativas para restaurar parcialmente el ciclo hidrológico urbano (Öztürk et al., 2024; Singh y Gulliver, 2024).

Recarga freática y vulnerabilidad de acuíferos

El tema de la recarga de acuíferos se aborda ampliamente en contextos latinoamericanos (Sandoval et al., 2018; Valladares, 2022; Maddio et al., 2023) y globales (Dillon, 2018; Reinecke et al., 2021; Moeck et al., 2024). Se ha demostrado que las condiciones climáticas, la cobertura vegetal y la litología condicionan la infiltración y, en consecuencia, la recarga freática (Baker et al., 2024). En México, López (2017) y el IMEPLAN (2023) identifican zonas críticas de recarga y vulnerabilidad hídrica en la Zona Metropolitana de Guadalajara. En Túnez, Abidi et al. (2024) advierten sobre los riesgos para los acuíferos mediterráneos. La evidencia converge en que los cambios de uso de suelo y los rellenos antropogénicos comprometen la sostenibilidad hídrica a largo plazo.

Permeabilidad y caracterización geotécnica

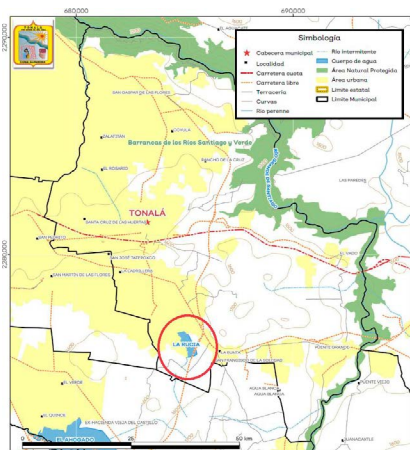
Una línea transversal de investigación es la medición de la permeabilidad del suelo. Desde estudios pioneros (Binh et al., 2021) hasta aplicaciones recientes en México, Perú y Chile (Amaya et al., 2021; Donato, 2022; González, 2020), se han utilizado ensayos de carga constante/variable, modelos matemáticos y técnicas de computación para estimar la conductividad hidráulica. Investigaciones en contextos urbanos (Losada et al., 2017; Geomex, 2023) han permitido elaborar cartografías de permeabilidad, mostrando grandes contrastes espaciales. Estudios recientes aplican modelos predictivos avanzados (Pham et al., 2021; Islam et al., 2022) y análisis de interacción química y estructural en suelos (Momenia et al., 2020; Ma et al., 2021), aportando una visión más integral de la capacidad de infiltración y sus alteraciones por intervención humana.

Rellenos antropogénicos Presa La Rucia, Tonalá, Jalisco

Este es el caso de la zona sur del municipio de Tonalá, Jalisco, donde se encuentra la presa La Rucia (Figura 1), la cual funciona principalmente como control de avenidas pluviales, y que está contigua a una zona de humedales (Gobierno de Tonalá, 2023), donde se ha registrado una transformación en los últimos 20 años, provocada por el crecimiento de la marcha urbana en sus alrededores (Figuras 1 y 2).

Figura 1

*Ubicación de la presa La Rucia, al sur del municipio de Tonalá, Jal.
(Gobierno de Tonalá, 2023)*

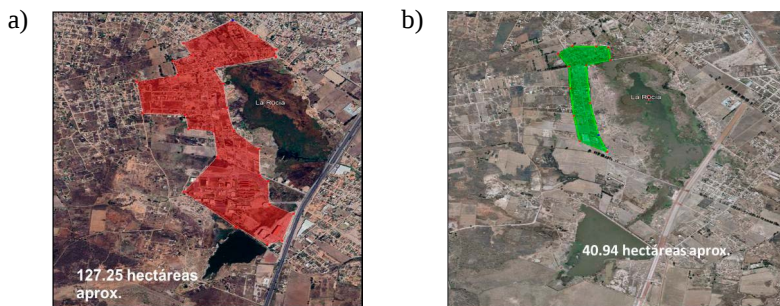


Fuente: Elaboración propia con imágenes y herramientas de Google Earth, Google, 2024

Figura 2

a) Urbanización zona de estudio 2009.

b) Imagen 15 Urbanización zona de estudio, 2024.



Fuente: Elaboración propia con imágenes y herramientas de Google Earth, Google, 2024

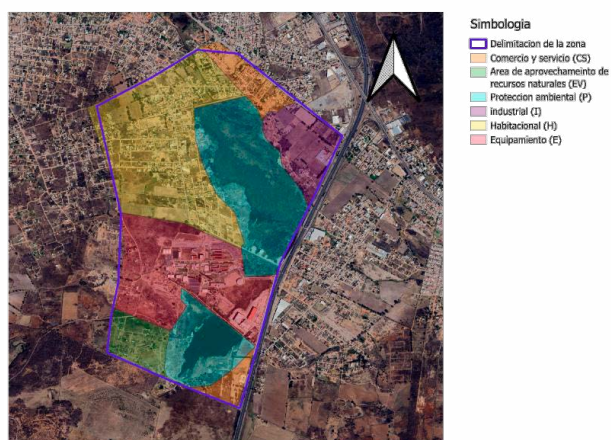
De acuerdo con registros del Archivo Histórico del Gobierno Municipal de Tonalá (2024), las actuales presas La Rucia y El Cajón formaban parte originalmente de un sistema de humedales interconectados dentro de la misma microcuenca, caracterizado por una alta susceptibilidad a eventos de inundación. Con el objetivo de mitigar este riesgo y regular los excedentes hídricos durante la temporada de lluvias, se construyó

infraestructura hidráulica entre los años 1960 y 1966, destinada a la conformación y operación de presas de almacenamiento y control de escurrimientos.

De acuerdo al Programa Municipal de Desarrollo Urbano del municipio de Tonalá (2024), se identifican las siguientes categorías de uso de suelo en la zona: protección ambiental, habitacional, comercio y servicios, industrial y equipamiento, destacando una importante superficie de urbanización en las zonas de protección ambiental, así como usos de suelos habitacional y de equipamiento en zonas que forman parte de la cuenca de la presa, así como de los humedales (Figura 3).

Figura 3

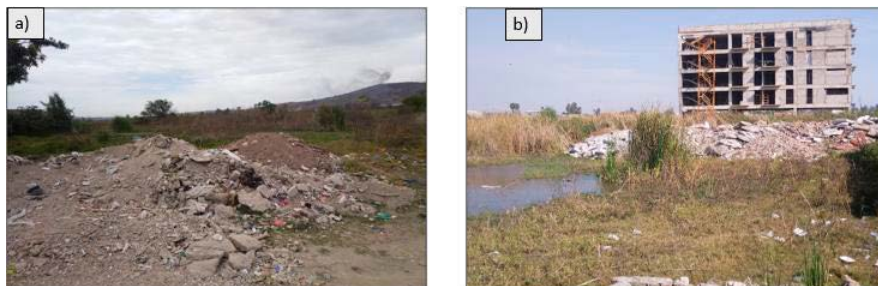
Representación cartográfica la clasificación de utilización de suelo en la zona



Fuente: Elaboración propia, 2025

Esta área ha experimentado un acelerado proceso de urbanización en las últimas décadas (IMEPLAN, 2023), lo que ha tenido un impacto significativo en el medio ambiente. La presa La Rucia, correspondiente originalmente a un extenso pantano conectado a la presa El Cajón. Con el tiempo, esta área ha experimentado una transformación significativa a causa del relleno con residuos antropogénicos, principalmente provenientes de materiales de construcción (Figura 4), lo que ha modificado drásticamente las características de la superficie del terreno.

Figura 4
Rellenos antropogénicos dispuestos en la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia, 2025

Mediante el análisis de imágenes satelitales históricas, se estima una reducción aproximada del 30 % en la superficie del cuerpo de agua. De acuerdo con información de la Comisión Nacional del Agua y el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), el cuerpo de agua ha experimentado un deterioro asociado a las condiciones y cambios en la zona (CONAGUA, 2023; CENAPRED, 2023). La alteración en las propiedades del suelo causada por estos rellenos puede modificar significativamente su capacidad de absorción, lo que genera un incremento en el escurrimiento superficial y una disminución en la recarga freática. Este proceso de transformación ha modificado sustancialmente el paisaje original de la región, alterando tanto su dinámica hidrológica como sus características geológicas.

2. Metodología

El impacto del cambio en los patrones de filtración de la superficie del suelo debido a su alteración se abordó en 3 fases (Figura 5): delimitación del área alterada con rellenos antropogénicos y selección de sitios de muestreo; trabajos en campo que incluyeron inspección geológica de sedimentos, muestreo de suelo y rocas, ejecución de ensayos de permeabilidad de LeFranc; clasificación geotécnica y geológica de muestras de suelo en laboratorio, integración de resultados en base de datos geográfica, aplicación de modelo de índice de infiltración en sistema de información geográfica. El análisis del impacto generado por la modificación en los patrones de filtración de la superficie del suelo se estructuró en tres fases.

La primera correspondió a la delimitación del área intervenida mediante rellenos antropogénicos y a la selección de los sitios de muestreo. La segunda incluyó los trabajos de campo, que abarcaron la inspección geológica de sedimentos, el muestreo de suelos y rocas, así como la ejecución de ensayos de permeabilidad tipo Lefranc. La tercera fase comprendió la clasificación geotécnica y geológica de las muestras en laboratorio. Los resultados fueron en un sistema de información geográfica (SIG) para conformar el modelo de índice de infiltración.

Figura 5
Esquema de metodología de estudio



Fuente: Elaboración propia, 2025

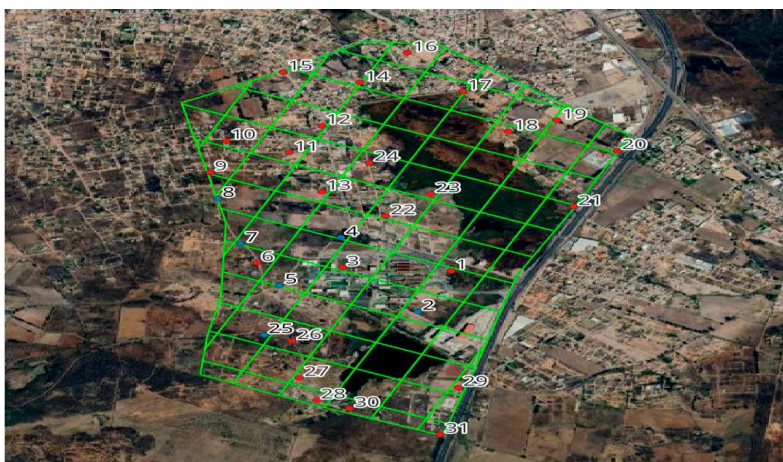
Delimitación del área y selección de sitios de muestreo

La delimitación de la zona de estudio se definió a partir de criterios geográficos, topográficos y de uso del suelo, determinados mediante inspección in situ. La elección de los vértices del polígono respondió a la ubicación de elementos físicos y antrópicos relevantes, entre ellos vías de comunicación, cuerpos de agua, cambios significativos en el relieve y límites administrativos establecidos en el plan de ordenamiento territorial vigente (Ayuntamiento de Tonalá, 2024).

La selección de los puntos de muestreo se fundamentó en la información obtenida durante los recorridos geológicos de reconocimiento, complementados con excavaciones exploratorias y observaciones directas de sedimentos y afloramientos rocosos superficiales. El plan de mues-

treo consideró la subdivisión del polígono de estudio, con una extensión aproximada de 300 hectáreas, en 100 cuadrantes de alrededor de 4 hectáreas cada uno. Esta segmentación se diseñó para cubrir de manera sistemática la totalidad de la superficie y garantizar la representatividad de las distintas condiciones del terreno (Figura 6). Se buscó seleccionar sitios con materiales superficiales originales y rellenos antropogénicos en zonas no autorizadas para su uso de suelo habitacional, así como el tipo de material predominante, la textura del suelo, la resistencia a la excavación, la pendiente del terreno y las características superficiales. El criterio de clasificación se estableció mediante los siguientes criterios:

Figura 6
Selección de puntos de muestreo en el polígono de la zona



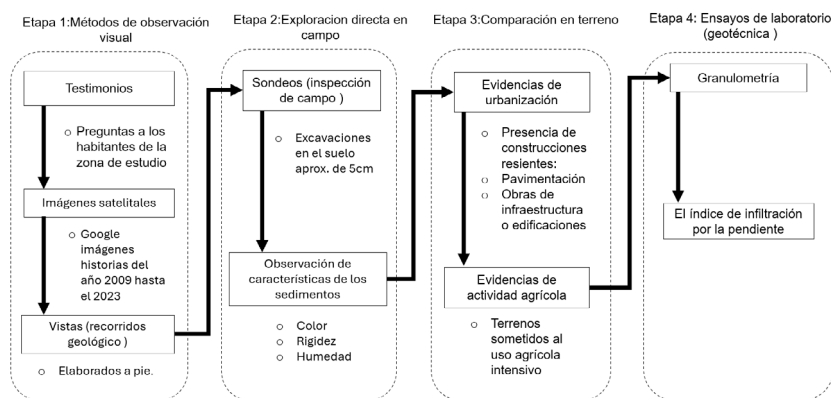
Fuente: Elaboración propia, 2024.

1. Suelo de relleno antropogénico: Depósitos definidos de origen antrópico, asociados principalmente a actividades de relleno y nivelación del terreno, así como acumulaciones de materiales de construcción. Se registraron 25 puntos de muestreo correspondientes a este tipo de suelo, distribuidos predominantemente en los sectores norte, poniente, centro y sur del polígono. En la cartografía, estos puntos se presentaron en color rojo para facilitar su identificación visual.
2. Suelos naturales: Depósitos no modificados ni intervenidos de manera

directa por actividades humanas recientes. Se identificaron 6 puntos de muestreo en sectores específicos del poniente, centro y sur del área de estudio, representados en color azul en la cartografía.

La distinción entre suelos naturales y aquellos modificados por actividades humanas, conocidos como suelos o rellenos antropogénicos, es un aspecto clave en estudios geotécnicos, ambientales y de planificación territorial. Para llevar a cabo esta diferenciación, propuso una metodología integral que combinó diversas técnicas y fuentes de información. Entre estas fuentes y técnicas se incluyen observaciones directas en campo, análisis históricos, interpretación visual, recolección de testimonios locales y pruebas de laboratorio. En la Figura 7 se presenta el procedimiento metodológico detallado paso a paso para la caracterización de ambos tipos de suelo.

Figura 7
*Metodología para la clasificación de suelos superficiales
como antropogénicos y naturales.*



Fuente: Elaboración propia, 2024.

En la segunda fase, una vez seleccionados los sitios de muestreo, se tomaron 31 muestras de suelo mediante sondeos a cielo abierto y se ejecutaron ensayos de permeabilidad en sitio mediante el método de *Le Franc*, empleando las modalidades de carga constante y carga variable.

Estos ensayos permiten estimar la permeabilidad en formaciones de suelo saturadas o parcialmente saturadas, a través de la inyección controlada de agua en un sondeo de diámetro reducido. La prueba consistió en mantener un nivel de agua constante dentro del sondeo previamente acondicionado, mediante la inyección continua de agua a caudal controlado. El procedimiento incluyó: limpieza y saturación inicial del pozo de prueba (Figura 8A), colocación de un dispositivo de medición para registrar la altura piezométrica (Figura 8B), establecimiento del nivel de carga hidráulica constante (Figura 8C) y registro del volumen de agua inyectada por unidad de tiempo hasta alcanzar la estabilización del caudal (Figura 8D).

Figura 8

Selección de puntos de muestreo en el polígono de la zona



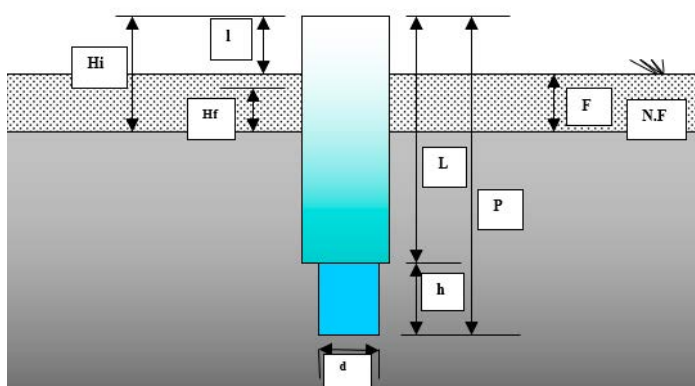
Fuente: Elaboración propia, 2024.

Para suelos con muy altas velocidades de filtración, predominan arenas y gravas; se ejecuta la prueba de carga constante. En esta modalidad, la permeabilidad k se determinó mediante la aplicación de la ecuación (1):

$$k = \frac{V}{A \cdot t} * \frac{L}{H} \quad (1)$$

donde k es el coeficiente de permeabilidad (m/s), V el volumen inyectado (m^3), H la carga hidráulica aplicada (m), L es la longitud del ademe, A es el área transversal de ademe (m^2), t es el tiempo de inyección de agua (m^3). (Figura 9).

Figura 9
Esquema de ensayo de permeabilidad en campo



Fuente: Elaboración propia, 2024.

En los sitios donde se presentaron suelos con muy bajas velocidades de filtración, donde predominan suelos finos como son los limos y arcillas, se empleó la técnica de ensayo de carga variable; en este caso, el procedimiento se efectuó permitiendo la disminución natural del nivel de agua en el sondeo tras una carga inicial aplicada. Se registraron descensos piezométricos en intervalos regulares de tiempo. La permeabilidad se estimó a partir de la curva de abatimiento del nivel de agua en función del tiempo, empleando la Ecuación 2.

$$k = \frac{d^2 \ln\left(\frac{2L}{d}\right)}{(8)(L)(t)} \ln\left(\frac{h_i}{h_f}\right) \quad (2)$$

donde k es el coeficiente de permeabilidad (m/s), L la longitud de hincado del ademe (m), h_i la carga hidráulica inicial (m), h_f la carga hidráulica final (m), d es el diámetro transversal de ademe (m), t es el tiempo de registro del ensayo de agua (seg.).

Análisis de muestras en laboratorio

Las muestras obtenidas en los sondeos superficiales fueron sometidas a un proceso de clasificación conforme al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (ASTM D2487-17, ASTM, 2017). Para este propósito, se realizaron ensayos granulométricos mediante tamizado (ASTM D6913/D6913M-17, 2017), con el fin de determinar la distribución de tamaños de partícula. Complementariamente, se aplicaron pruebas de límites de consistencia (límite líquido y límite plástico) siguiendo la metodología de Atterberg (ASTM D4318-17), lo que permitió establecer la plasticidad y el comportamiento cohesivo de los materiales. Los resultados de ambas técnicas se integraron para definir la categoría geotécnica de cada muestra, generando información esencial para la interpretación de las propiedades hidráulicas de los suelos superficiales en la zona de estudio

3. Resultados

Los resultados de las campañas de exploración en sitio, ensayos de permeabilidad y caracterización de las muestras de suelo se compilaron en una base de datos geográfica, la cual sirvió para poder hacer el análisis espacial e integrarlos al modelo de índice de filtración, para poder determinar las alteraciones en los patrones de escorrentía superficial y subterránea.

En el sector norte y a lo largo de la carretera Oriente, dentro del municipio de Tonalá y en las inmediaciones de la presa La Rucia, las excavaciones con una profundidad promedio de 43 cm revelaron la presencia de rellenos antropogénicos dispuestos por capas, así como escombros de construcción, principalmente residuos de la construcción (Figura 10). Estos hallazgos coinciden con testimonios de los habitantes actuales de la zona. En la parte poniente, las excavaciones mostraron materiales no originarios del sitio, consistentes en rellenos antropogénicos y escombros, tal como se corroboró mediante la revisión de imágenes satelitales históricas.

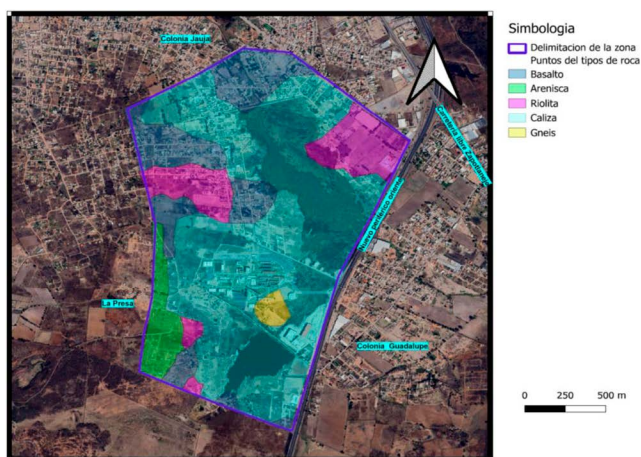
Figura 10
Clasificación de los suelos superficiales de acuerdo a su origen
antropogénico o natural



Fuente: Elaboración propia, 2025

Los resultados de las inspecciones geológicas en el trabajo de campo determinaron que las principales unidades litológicas corresponden a roca caliza, basalto, riolita y areniscas (Figura 11).

Figura 11
Unidades litológicas superficiales determinadas en inspecciones in situ



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Basado en el modelo matemático, el modelo de *Grem Ampt* en índice de infiltración I' (Montiel, 2019) se considera como el producto del coeficiente de permeabilidad k y la pendiente S , ecuación (3). Se buscó determinar las alteraciones en los patrones de infiltración que se tienen por la sustitución de suelos naturales por los rellenos antropogénicos.

$$I' = (K)(S) \quad (3)$$

La pendiente se obtuvo a partir de curvas de nivel disponibles en los modelos digitales de elevación del INEGI (2025) (Figura 12a), permitieron representar de manera detallada la morfología del terreno (Figura 12b).

Figura 12a
Curvas de nivel.

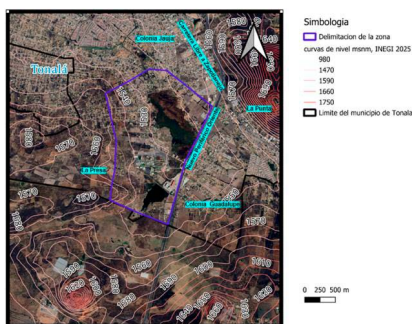
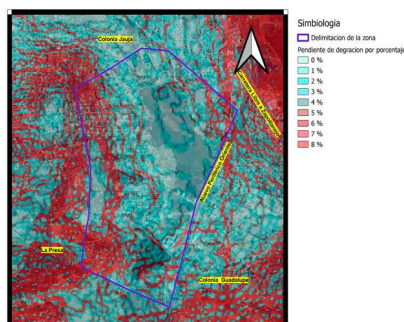


Figura 12b
Modelo digital de pendientes de terreno en porcentaje



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de INEGI, 2025.

Los ensayos de permeabilidad arrojaron valores comprendidos entre 0.0013 cm/s y >0.0117 cm/s, como se detalla en la Tabla X. En la Figura XI se presentan los resultados interpolados mediante el uso de un sistema de información geográfica (SIG). Para este proceso se aplicó el método de interpolación Inverse Distance Weighting (IDW), seleccionado por su capacidad para estimar valores continuos a partir de puntos muestreados en campo. Esta técnica permitió generar una superficie continua que refleja la variación espacial de la permeabilidad, representada en escala gráfica. La cartografía resultante facilitó la identificación de zonas con mayor o menor capacidad de infiltración dentro del área de estudio. Las

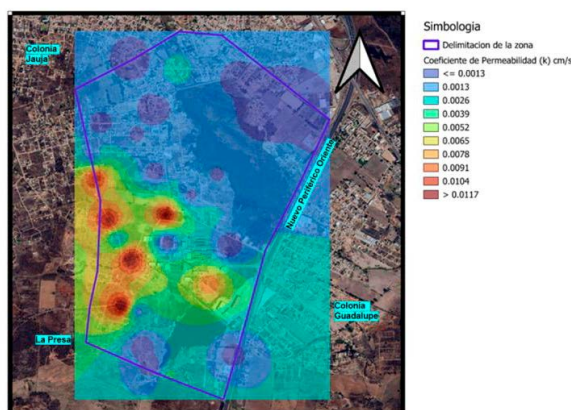
zonas representadas en variantes de azul corresponden a permeabilidad ≤ 0.005 cm/s, posiblemente compuestas por suelos arcillosos o compactados; las zonas en rojo, con permeabilidad hasta 0.0117 cm/s, indicativas de suelos más arenosos o menos intervenidos (Tabla 1).

Tabla 1
Resultados de los ensayos de permeabilidad k in situ.

Sitio de muestreo	Coefficiente de permeabilidad (k)(cm/s)	Sitio de muestreo	Coefficiente de permeabilidad (k)(cm/s)
1	0.000039	16	0.00208
2	0.009	17	0.00083
3	0.000077	18	0.00022
4	0.012	19	0.00028
5	0.013	20	0.00056
6	0.00283	21	0.002
7	0.012	22	0.001
8	0.011	23	0.0011
9	0.00184	24	0.0024
10	0.00065	25	0.013
11	0.00106	26	0.019
12	0.00025	27	0.00012
13	0.00037	28	0.00039
14	0.00333	29	0.00074
15	0.00022	30	0.0041
		31	0.0028

Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura 13
Cartografía a partir de los ensayos de permeabilidad en la zona de estudio.

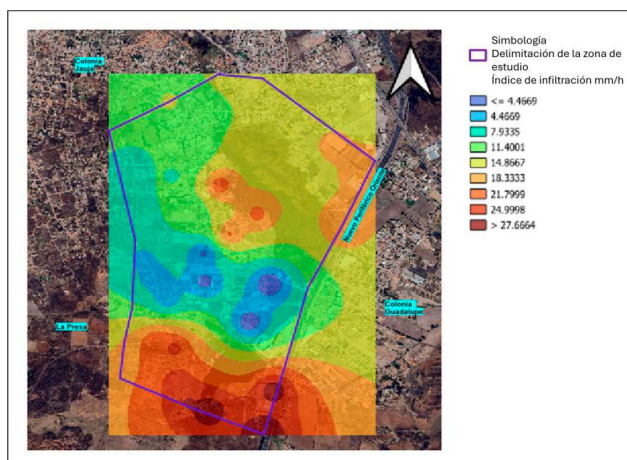


Fuente: Elaboración propia

El análisis espacial del índice de infiltración permitió identificar una variabilidad significativa en la zona de estudio, con valores que oscilaron entre < 4.4669 mm/h y > 27.6664 mm/h. En el mapa temático generado (Fig. 15), las áreas representadas en tonos verdes corresponden a las zonas de baja capacidad de absorción, posiblemente asociadas con suelos compactados, sellados o con limitada permeabilidad. En contraste, las áreas en tonos rojos evidencian una alta capacidad de infiltración, característica de suelos más porosos o con cobertura vegetal natural que favorece la percolación del agua. La transición gradual entre ambas categorías confirma la heterogeneidad hidrogeológica del terreno, lo que constituye un insumo relevante para la delimitación de áreas críticas de escurrimiento superficial, así como para la identificación de sectores con potencial de recarga acuífera.

Figura 14

Resultados de la integración de las pendientes de terreno y los coeficientes de permeabilidad en el Índice de infiltración



Fuente: Elaboración propia

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos del índice de infiltración en la zona de estudio son consistentes con lo señalado en investigaciones previas sobre la influencia de los procesos de urbanización y compactación del suelo en

la reducción de la capacidad de absorción (Ortiz et al., 2020; Lozada y Dávila, 2020). Las áreas con valores inferiores a 4.4669 mm/h reflejan condiciones similares a las reportadas en contextos urbanos donde el sellado superficial limita la infiltración y aumenta el escurrimiento superficial, tal como lo describe Horton (Montiel) en su modelo de infiltración decreciente en función del tiempo. Esta heterogeneidad espacial, expresada en el gradiente de colores del mapa, coincide con lo documentado en estudios de recarga de acuíferos en ambientes semiurbanos (Abidi et al., 2024; Maddio et al., 2023), donde la coexistencia de suelos compactados y zonas naturales genera patrones contrastantes de absorción. En este sentido, los resultados obtenidos no solo confirman la variabilidad hidrogeológica local, sino que también aportan información clave para la gestión de riesgos hídricos y la identificación de áreas con potencial de recarga.

A partir de los ensayos de las muestras de suelo, se determinó que el área de estudio está constituida en un 85.7 % de suelo por relleno antropogénico y solamente un 14.3 % de suelo natural. Los resultados de la caracterización granulométrica de los suelos superficiales evidenciaron el predominio de arcillas limosas (64.5 %), materiales de baja permeabilidad que limitan los procesos de infiltración. En menor proporción se identificaron arenas (19.3 %), cuya variación en compactación influye en sus condiciones de drenaje. Asimismo, se registró la presencia de gravas (6.5 %), que aportan soporte estructural localizado, y de limos y suelos franco-arenosos (6.4 %), caracterizados por su baja cohesión y un drenaje intermedio. Los análisis mediante ponderación de estas variables al proceso de infiltración natural con herramientas GIS obtuvieron reducciones en los índices de filtración de hasta 75 %, lo cual podría también explicar volúmenes adicionales de escurrimiento aguas debajo de la presa La Rucia que han ocasionado desbordamientos en la cuenca del Arroyo de en Medio.

Uno de los principales problemas derivados de esta transformación es la reducción en la capacidad de filtración de agua hacia los cuerpos acuíferos, lo que limita la recarga natural y compromete la disponibilidad del recurso hídrico a mediano y largo plazo. A ello se suma el incremento del escurrimiento superficial, que favorece la erosión, el desbordamiento de

cauces y la ocurrencia de inundaciones en áreas bajas. Estas alteraciones no solo afectan el equilibrio hidrogeológico, sino que también implican una pérdida significativa de servicios ecosistémicos, entre ellos la regulación hídrica, la retención de sedimentos, la mejora en la calidad del agua y la resiliencia del entorno urbano frente a eventos hidrometeorológicos extremos. En consecuencia, el deterioro de la capacidad de infiltración representa un factor crítico que incide en la sostenibilidad ambiental y en la gestión integral del territorio. En el contexto de la Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG), los resultados obtenidos guardan similitud con lo documentado en estudios regionales que destacan la disminución progresiva de la capacidad de infiltración como consecuencia del sellado urbano y la expansión irregular del suelo. De acuerdo con el IMEPLAN (2023), la acelerada urbanización sobre áreas de recarga ha generado una reducción significativa en la disponibilidad media anual de los acuíferos locales, situación que ha derivado en problemas de sobreexplotación de pozos, abatimiento piezométrico. Investigaciones recientes (Lozano-Trejo et al., 2020) también advierten que la cobertura con pavimentos, rellenos antrópicos y asentamientos informales en zonas de llanura y piedemonte limita los procesos de recarga, incrementando el escurrimiento superficial y con ello el riesgo de inundaciones en cuencas como El Ahogado. Estos hallazgos confirman que la heterogeneidad espacial de la infiltración, observada en el mapa de la zona de estudio al sur del municipio de Tonalá, no es un fenómeno aislado, sino parte de una problemática estructural en Guadalajara vinculada al modelo de crecimiento urbano y a la falta de planeación hidrológica en el uso del territorio.

Referencias

- Abidi, J. H., Elzain, H. E., Sabarathinam, C., Mejdoub El Fehri, R., Farhat, B., Ben Mammou, A., Waterloo, M. J., Yassin, M. A., & Senapathi, V. (2024). Integrated approach to understand the multiple natural and anthropogenic stresses on intensively irrigated coastal aquifer in the Mediterranean region. *Environmental Research*, 245, 118757. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118757>

- Amaya Navarrete, M. E., Botero Jaramillo, E., & Ovando Shelley, E. (2021). *Permeabilidad de arcillas del antiguo lago de Texcoco estabilizadas químicamente con óxido de calcio*. <https://ru.dgb.unam.mx/server/api/core/bitstreams/69e17fc7-85f2-4448-b41a-e197912d15c5/content>
- ASTM International. (2017). ASTM D2487-17. *Standard practice for classification of soils for engineering purposes* (Unified Soil Classification System). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2487-17>
- ASTM International. (2017). ASTM D6913/D6913M-17. *Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D6913_D6913M-17
- Ayuntamiento de Tonalá. (2024). *Plan de ordenamiento territorial vigente*. <https://mujer.tonala.gob.mx/wp-content/uploads/2022/07/PMD-yG-Tonala.pdf>
- Binh, T. P., Ly, H. B., Al-Ansari, N., & Ho, L. S. (2021). A comparison of Gaussian Process and M5P for prediction of soil permeability coefficient. *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(6), 4285–4299. <https://doi.org/10.1155/2021/3625289>
- Baker, A., Shanafield, M., Timms, W., Andersen, M. S., Priestley, S., & Melo Zurita, M. (2024). An underground drip water monitoring network to characterize rainfall recharge of groundwater at different geologies, environments, and climates across Australia. *Journal of Hydrology*, 635, 130111. <https://doi.org/10.5194/gi-13-117-2024>
- Bottan, J., Delgado, L., & Gaspari, F. (2023). *Análisis de la respuesta hidrológica de una cuenca serrana bonaerense ante diferentes eventos pluviales y cambio de uso del suelo*. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/160976/Documento_completo.pdf?sequence=1
- Castro-Garzón, H., Sánchez Céspedes, J. M., & Rivas Trujillo, E. (2021). *Efectos ambientales: análisis de los impactos presentes en un cuerpo de agua urbano en la ciudad de Villavicencio* (Meta, Colombia)/Environmental effects: Analysis of the impacts present in an urban body of water in the city of Villavicencio (Meta, Colombia). *Revista Boletín Redipe*, 10(12), 445-456. <https://doi.org/10.36260/rbr.v10i12.1601>

- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). (2021). *Metodología para el ordenamiento del territorio con base en el mapa nacional de susceptibilidad a inestabilidad de laderas*. https://www1.cenapred.unam.mx/DIR_INVESTIGACION/2021/1er_Trimestre/FRACCION_XLI/DSyPG/2020_Metodologia_para_el_Ordenamiento_del_Territorio.pdf
- Chávez Cárdenas, S. M. (2022). *Plan de gestión ambiental para los parques: Maldonado, La Libertad y Sucre en la ciudad de Riobamba, provincia de Chimborazo*. Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Repositorio Institucional ESPOCH. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/21129>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019). *Estadísticas del agua en México*. CONAGUA. https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2019
- Comisión Nacional del Agua. (2020). *Programa Nacional Hídrico 2020–2024*. https://datos.conagua.gob.mx/DatosAbiertos/PNH_Resumen.pdf
- De León Valladares, R. (2022). *Modelo espacial de recarga del acuífero citrícola sur, mediante un balance hídrico*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Forestales- <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/24677>
- Dillon, P., Stuyfzand, P., Grischek, T., Lluria, M., Pyne, R. D. G., Jain, R. C., Bear, J., Schwarz, J., Wang, W., Fernandez, E., Stefan, C., Pettenati, M., van der Gun, J., Sprenger, C., Massmann, G., Scanlon, B. R., Xanke, J., Jokela, P., Zheng, Y., ... Sapiaño, M. (2018). Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, 27(1), 1–30. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z>
- Geomex. (s. f.). *Generadores de estimaciones de obra México (Geomex): Información hidrológica, conductividad hidráulica ZMG*. Consulta Pública IMEPLAN. <https://consultapublica.imeplan.mx/POTmet/downloads/EstudioHidrologia.pdf>
- Erazo Nájera, L. Y. (2024). *Hacia una valoración económica de los residuos de construcción en Cuernavaca, Morelos Trabajo terminal, Universidad Autónoma del Estado de Morelos*. Repositorio Institucional UAEM. <http://riaa.uaem.mx/handle/20.500.12055/4423>

- Fierro Losada, J. A., Parra Gómez, A. F., & Vásquez Olaya, C. A. (2017). *Determinación del coeficiente de permeabilidad de las comunas 1, 3 y 5 del municipio de Girardot - Cundinamarca* Trabajo de grado, Universidad Piloto de Colombia. Repositorio Institucional Unipiloto. <https://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/5643/TRABAJO%20FINAL.pdf?sequence=1>
- Generadores de estimaciones de obra México (Geomex) (2023). *Información hidrológica, conductividad hidráulica ZMG*. Consulta Pública IMEPLAN. <https://consultapublica.imeplan.mx/POTmet/downloads/EstudioHidrologia.pdf>
- Gobierno de Tonalá. (2023). *Archivos históricos del municipio de Tonalá*. https://sic.cultura.gob.mx/ficha.php?table=archivo&table_id=561
- Gobierno del Municipio de Tonalá. (2024). *Programa Municipal de Desarrollo Urbano de Tonalá, Jalisco: Utilización del suelo*. <https://portal-transparencia.tonala.gob.mx/wp-content/uploads/2024/06/Programa-Municipal-Desarrollo-Urbano.pdf>
- González González, R. (2020). Ciudad de Camagüey: Un desafío para el uso del agua. *Revista Cubana de Medio Ambiente*, 6(2), 15–24. <https://doi.org/10.29105/contexto15.22-2>
- Hemati, M., Hasanlou, M., Mahdianpari, M., & Mohammadimanesh, F. (2021). A systematic review of Landsat data for change detection applications: 50 years of monitoring the Earth. *Remote Sensing*, 13(15), 2869. <https://doi.org/10.3390/rs13152869>
- Hernández López, Á. (2017). *Métodos geofísicos para la determinación de características de acuíferos para su recarga artificial mediante lagunas de infiltración*. Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería. <https://hdl.handle.net/20.500.14330/TES01000758337>
- Huaraca, L. D. R. (2022). *Nivel de permeabilidad del suelo areno-arcilloso como fuente de captación natural para acuíferos de abastecimiento de agua potable, Huancayo*. [Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil, Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería y Arquitectura]. Repositorio institucional Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/91267>

- Hu, L., Dai, K., Xing, C., Li, Z., Tomás, R., Clark, B., Shi, X., Chen, M., Zhang, R., Qiu, Q., & Lu, Y. (2019). Land subsidence in Beijing and its relationship with geological faults revealed by Sentinel-1 InSAR observations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 82, 101928. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.05.019>
- Risalve Huaraca, L. D. R. (2022). *Nivel de permeabilidad del suelo areno-arcilloso como fuente de captación natural para acuíferos de abastecimiento de agua potable, Huancayo*. [Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil, Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería y Arquitectura]. Repositorio institucional Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/91267>
- Instituto Metropolitano de Planeación (IMEPLAN). (2023). *Información de hidrogeología de agua subterránea: Área metropolitana de Guadalajara*. <https://consultapublica.imeplan.mx/POTmet/downloads/EstudioHidrologia.pdf>
- Islam, S., Islam, J., & Hoque, N. M. R. (2022). Improvement of consolidation properties of clay soil using fine-grained construction and demolition waste. *Heliyon*, 8(10), e11029. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11029>
- Instituto Nacional Estadística y Geología (INEGI) (2025). *Datos vectoriales topográficos curvas de nivel*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/espacioydatos/>
- Jafarzadeh, A., Matta, A., Vedadi Moghadam, S., Dessouky, S., Hutchinson, J., & Kapoor, V. (2024). Evaluation of stormwater runoff pollutant distributions combined with land use information in a regional karst aquifer in Texas, USA. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196, 1124. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-13308-4>
- Liao, M., Zhang, R., Lv, J., Yu, B., Pang, J., Li, R., Xiang, W., & Tao, W. (2021). Subsidence monitoring of fill area in Yan'an New District based on Sentinel-1A time series imagery. *Remote Sensing*, 13(15), 3044. <https://doi.org/10.3390/rs13153044>
- Li, G., Rubinato, M., Wan, L., Wu, B., Luo, J., Fang, J., & Zhou, J. (2020). Preliminary characterization of underground hydrological processes under multiple rainfall conditions and rocky desertification degrees in karst regions of Southwest China. *Water*, 12(2), 594. <https://doi.org/10.3390/w12020594>

- Lozada-Grajales, R. M., & Menchaca-Dávila, S. (2020). Degradación ambiental e inundaciones en La Lagunilla, Xalapa, Veracruz, México / Environmental degradation and floods in La Lagunilla, Xalapa, Veracruz, México. *UVserva Observatorio del Agua para el Estado de Veracruz*, (10), 179. <https://doi.org/10.25009/uvserva.v0i10.2738>
- Lopes, C. S., Paiva, V. H., Vaz, P. T., Pais de Faria, J., Calado, J. G., Pereira, J. M., & Ramos, J. A. (2021). Ingestion of anthropogenic materials by yellow-legged gulls (*Larus michahellis*) in natural, urban, and landfill sites along Portugal in relation to diet composition. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 19046–19063. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12161-5>
- Lozano-Trejo, S., Olazo-Aquino, J., Pérez-León, M. I., Castañeda-Hidalgo, E., Díaz-Zorrilla, G. O., & Santiago-Martínez, G. M. (2020). Infiltración y escurrimiento de agua en suelos de una cuenca en el sur de México. *Terra Latinoamericana*, 38(1), 57–66. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i1.443>
- Ma, J., Lv, X.-L., Zhang, X., Han, S.-Z., Wang, Z.-D., Li, L., Sun, H.-T., Ma, L.-X., Cheng, Z.-L., Shao, J.-W., Chen, C., Zhao, Y.-H., Sui, L., Liu, L.-N., Qian, J., Wang, W., & Liu, Q. (2021). Identification of a new orthonairovirus associated with human febrile illness in China. *Nature Medicine*, 27, 434–439. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-01228-y>
- Maddio, R. A., Dufilho, A. C., & Gandini, M. L. (2023). Estimación de la recarga potencial de agua subterránea de un acuífero mediante teledetección y sistemas de información geográfica / Estimation of potential groundwater recharge of an aquifer through remote sensing and geographical information systems. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 50. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S2422-57032023000100067&script=sci_arttext&tlng=en
- Mena, J. E. (2019). The Metropolitan Zone of the Valley of Mexico: Formal arrangements and fragmentation. *Economía, Sociedad y Territorio*, 19(60), 241–271. <https://doi.org/10.22136/est20191335>
- Melese, T., & Belay, T. (2021). Groundwater potential zone mapping using analytical hierarchy process and GIS in Muga Watershed, Abay Basin, Ethiopia. *Geohealth*, 5(10), e202100068. <https://doi.org/10.1002/gch2.202100068>

- Moeck, C., Collenteur, R. A., Berghuijs, W. R., Luijendijk, E., & Gurdak, J. J. (2024). Una evaluación global de la respuesta de la recarga de aguas subterráneas a la variabilidad de la infiltración en escalas temporales mensuales a decenales. *Water Resources Research*, 60(6), e2023WR035828. <https://doi.org/10.1029/2023WR035828>
- Momeni, M., Bayat, M., & Ajalloeian, R. (2020). Laboratory investigation on the effects of pH-induced changes on geotechnical characteristics of clay soil. *Geomechanics*, 25(2), 188-196. <https://doi.org/10.1080/17486025.2020.1716084>
- Mustafa, M., Bayat, M., & Ajalloeian, R. (2020). Laboratory investigation on the effects of pH-induced changes on geotechnical characteristics of clay soil. *Geomechanics*, 25(2), 188-196. <https://doi.org/10.1080/17486025.2020.1716084>
- Monroy Hernández, J. (2022). Transformación del paisaje y pérdida del servicio ecosistémico de regulación hídrica en cuencas urbanas: Casos microcuencas Tintal y Torca en la ciudad de Bogotá, Colombia. *Revista de Geografía Norte Grande*, 82, 249–268. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022022000200249>
- Montiel Gonzaga, R., Prado Hernández, J. V., Vázquez Peña, M. A., Ibáñez Castillo, L. A., & Pascual Ramírez, F. (2019). Evaluación del escurrimiento superficial de los modelos de Curva Numérica y Green-Ampt en la cuenca río Chapingo, México. *Terra Latinoamericana*, 37, 291–301. <https://doi.org/10.28940/terra.v37i3.484>
- Mulla, D., Galzki, J., Hanson, A., & Simunek, J. (2024). Measuring and modeling soil moisture and runoff at solar farms using a disconnected impervious surface approach. *Vadose Zone Journal*. <https://doi.org/10.1002/vzj2.20335>
- Navarro Lozada, F. A., & Mejía Vitta, J. A. (2012). *Comparación entre la permeabilidad en campo y permeabilidad en laboratorio de suelos contaminados con hidrocarburos*. Tesis de maestría, Universidad Pontificia Bolivariana. Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga. <http://hdl.handle.net/20.500.11912/2159>
- Ortiz, A., Constantino, M., Mendiola, F., Alzati, P., & Hernández, R. (2020). Alternativas para contrarrestar los efectos del sellado antropogénico del suelo. Pádi. *Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 9(18), 43–52. <https://doi.org/10.29057/icbi.v8i15.5241>

- Öztürk, Ş., Yılmaz, K., Dinçer, A. E., & Kalpakcı, V. (2024). Effect of urbanization on surface runoff and performance of green roofs and permeable pavement for mitigating urban floods. *Journal of Environmental Management*, 356, 119876. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06688-w>
- Padilla-Romero, A., & Hernández-Juárez, M. (2023). Cambio de uso de suelo por la construcción del NAICM en Texcoco, Estado de México. *Terra Latinoamericana*, 41, e1608. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1608>
- Pham, B. T., Ly, H.-B., Al-Ansari, N., & Ho, L. S. (2021). A comparison of Gaussian process and M5P for prediction of soil permeability coefficient. *Scientific Programming*, 2021, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2021/3625289>
- Pica, A., Lämmle, L., Burnelli, M., Del Monte, M., Donadio, C., Faccini, F., Lazzari, M., Mandarino, A., Melelli, L., Perez Filho, A., Russo, F., Stamatopoulos, L., Stanislao, C., & Brandolini, P. (2024). Urban geomorphology methods and applications as a guideline for understanding the city environment. *Land*, 13(7), 907. <https://doi.org/10.3390/land1307090>
- Reinecke, R., Müller Schmied, H., Trautmann, T., Andersen, L. S., Burek, P., Flörke, M., Gosling, S. N., Grillakis, M., Hanasaki, N., Koutroulis, A., Pokhrel, Y., Thiery, W., Wada, Y., Yusuke, S., & Döll, P. (2021). Uncertainty of simulated groundwater recharge at different global warming levels: A global-scale multi-model ensemble study. *Earth System Dynamics*, 12(1), 1–20. <https://doi.org/10.5194/hess-25-787-2021>
- Sandoval, E., Baldo, G., Núñez, J., Oyarzún, J., Fairley, J. P., & Ajami, H. (2018). Groundwater recharge assessment in a rural, arid, mid-mountain basin in North-Central Chile. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 15, 171–184. <https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1545095>
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2024). *Residuos*. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap7_residuos.pdf
- Singh, R., & Gulliver, J. S. (2024). Corrigendum to Understanding the role of biofilms and estimation of life-span: A tire-derived aggregates-based underground stormwater treatment system. *Ecological Engineering*, 206, 107021. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121716>

Van Asselen, S., Erkens, G., Keogh, M. E., & Stuurman, R. (2024). Shallow-subsidence vulnerability in the city of New Orleans, southern USA. *Hydrogeology Journal*, 32, 867–889. <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02762-y>