

DOI: 10.24850/j-tyca-18-01-03

Artículos

**Identificación de zonas potenciales de recarga y
priorización de técnicas de infiltración mediante
Análisis Multicriterio: caso del acuífero Valle de León,
México**

**Identification of Potential Recharge Zones and
Prioritization of Infiltration Techniques Using
Multicriteria Analysis: Case of the León Valley Aquifer,
Mexico**

José Arturo Espinoza-Bonilla¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7689-5544>

Alejandro Fidel Flamenco-Sandoval², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7700-8591>

Xitlali Virginia Delgado-Galván³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7283-0239>

¹Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México, ja.espinozabonilla@ugto.mx

²Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México, flamenco@ugto.mx



³Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México, xdelgado@ugto.mx

Autor para correspondencia: José Arturo Espinoza-Bonilla, arturoesbon@gmail.com

Resumen

Con el objetivo de identificar de manera objetiva las acciones adaptativas de recarga más viables como medidas para disminuir la sobreexplotación de acuíferos en sitios altamente dependientes de las aguas subterráneas, se realizó un análisis multicriterio para identificar las zonas potenciales de recarga del acuífero Valle de León (AVL), así como las acciones de recarga más viables para contribuir a disminuir su sobreexplotación. Se evaluaron los parámetros biofísicos de geología/litología, geomorfología, pendiente del terreno, densidad de drenaje, uso de suelo/cobertura vegetal, tipo de suelo, densidad de lineamientos y precipitación. Posteriormente, se desarrolló una matriz de viabilidad para proponer las acciones de recarga más factibles en las zonas con alta aptitud para la recarga natural. Los resultados destacan la identificación de una superficie de 453.01 km², principalmente en la región de Los Altos de Jalisco, con alta capacidad de infiltración y percolación al acuífero. Entre las acciones de recarga más viables se incluyen terrazas, zanjas, tinajas, cuencas y estanques de infiltración, pozos de recarga someros, represas de control/gaviones de pequeña escala y liberación controlada. Se espera que los resultados faciliten la toma de decisiones en la gestión hídrica del AVL, proporcionando un marco metodológico para priorizar zonas y acciones

adaptativas de recarga con mayor eficiencia. Además, la metodología desarrollada, replicable en otras regiones con escasez de agua, puede contribuir a la planificación de estrategias sostenibles orientadas a reducir la sobreexplotación de acuíferos en contextos similares.

Palabras clave: capa acuífera, agua subterránea, gestión de los recursos hídricos, conservación del agua, sistema de información geográfica, toma de decisiones, Valle de León, México.

Abstract

With the aim of objectively identifying the most viable adaptive recharge actions as measures to reduce aquifer overexploitation in areas highly dependent on groundwater, a multicriteria analysis was conducted to identify potential recharge zones of the Valle de León aquifer (AVL), as well as the most feasible recharge actions to help mitigate its overexploitation. Biophysical parameters were evaluated, including geology/lithology, geomorphology, terrain slope, drainage density, land use/vegetation cover, soil type, lineament density, and precipitation. Subsequently, a feasibility matrix was developed to propose the most suitable recharge actions in areas with high natural recharge potential. The results highlight the identification of an area of 453.01 km², primarily located in the Los Altos de Jalisco region, with high infiltration and percolation capacity into the aquifer. Among the most viable recharge actions are terraces, trenches, infiltration pits, basins, and ponds, shallow recharge wells, small-scale check dams/gabions, and controlled release. These findings are expected to support decision-making in AVL water management by providing a methodological framework to prioritize areas and adaptive recharge actions with greater efficiency. Furthermore, the

developed methodology, which is replicable in other water-scarce regions, may contribute to the planning of sustainable strategies aimed at reducing aquifer overexploitation in similar contexts.

Keywords: aquifers, groundwater, water resources management, water conservation, geographical information systems, decision making, Valle de León, Mexico.

Recibido: 05/11/2025

Aceptado: 11/04/2026

Publicado ahead of print: 19/05/2026

1. Introducción

Distintas ciudades de México han basado su desarrollo en la implementación de grandes obras de infraestructura hidráulica para asegurar una oferta constante de agua. Sin embargo, dicho modelo de gestión ha generado en muchos casos más conflictos por el recurso, además de plantear desafíos para resolver problemas con el abastecimiento de agua a largo plazo debido al cambio climático. Ejemplo de ello, son los pozos profundos de extracción de agua; megaproyectos que acarrear graves problemas relacionados sobre todo con la explotación intensiva de los acuíferos (National Ground Water Fundation, 2022), como la disminución del nivel freático, la reducción del gasto, la disminución de fuentes de agua superficiales, la subsidencia del terreno, o problemas relacionados con la contaminación del agua subterránea inducida por el propio acuífero, a causa de la extracción de aguas más profundas y químicamente evolucionadas. En lo que respecta a México,

país en su mayoría semidesértico, la sobreexplotación de acuíferos supone un problema grave.

Según datos proporcionados por la propia CONAGUA (2022), de los 653 acuíferos de México, el número de estos con un déficit hídrico hasta el año 2019 ha oscilado anualmente entre 100 y 115. Sin embargo, factores como la gran variabilidad espacial y temporal del agua, el aumento en la demanda del recurso, o la implementación de políticas públicas que incentivan la extracción intensiva de agua subterránea, ha orillado a que existan regiones en una situación extrema, como es el caso del estado de Guanajuato, donde 19 de sus 20 acuíferos se encuentran en condición de sobreexplotación (Congreso del Estado de Guanajuato, 2023), o sin disponibilidad para otorgar nuevas concesiones, en términos de la CONAGUA; destacando el caso de la ciudad de León, donde la demanda de agua es cubierta en un 99% por los acuíferos de la región (SAPAL, 2023), concretamente el AVL, el cual presentaba en el año 2024 una sobreexplotación de 61,638,096 m³ (CONAGUA, 2024).

Ante este panorama en la ciudad de León y su acuífero, aunado a los problemas asociados al modelo tradicional de gestión basado en megaproyectos, en años recientes ha comenzado a crecer, por parte de autoridades, académicos y usuarios del agua, el interés por adoptar un modelo de gestión hídrica que apueste por la implementación de acciones adaptativas y descentralizadas como fuente alternativa de agua (Gobierno del Estado de Guanajuato, 2011; Tagle et al., 2018; Tagle-Zamora, 2020; Tagle et al., 2020; Ayuntamiento de León, 2022). Estas acciones resultan más resilientes que los modelos ortodoxos frente a los cambios hidroclimáticos del entorno (Figuroa, 2020) y son capaces de adaptarse a nuevas condiciones sociales, institucionales y medioambientales.

En el caso de las acciones encaminadas a disminuir la sobreexplotación del acuífero Valle de León (AVL), se han implementado medidas como ecotecnias, cosecha de lluvia u obras de intercepción e infiltración. No obstante, la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) sigue siendo un paradigma que aún no ha sido ampliamente adoptado ni respaldado por los tomadores de decisiones en materia de gestión hídrica como modelo dentro de la política hídrica estatal y municipal. Por lo que, con frecuencia, estas acciones son percibidas como alternativas poco realistas, con un alto grado de incertidumbre respecto a los beneficios potenciales de su implementación, así como sobre su viabilidad social, ambiental, hidrológica y técnica, e incluso sobre su utilidad real para atender las necesidades hídricas de los sitios en los que se implementan (Godínez, 2022). Limitando en consecuencia, los beneficios que se puedan derivar de su instrumentación, así como la posibilidad de obtener mayor apoyo económico e institucional para iniciar, dar continuidad o replicar a mayor escala este tipo de medidas; que, hasta el momento, parecen haber sido implementadas con carácter experimental y a muy pequeña escala.

De acuerdo con Hani et al. (2023), al momento de contemplar la implementación de acciones de recarga hídrica, es necesario considerar distintos factores que tendrán una fuerte influencia en la viabilidad de su implementación en locaciones específicas; entre los principales se incluyen la fuente de agua de recarga y su calidad, los usos que tiene el agua del acuífero que se busca recargar, los costos de implementación de las tecnologías (Dillon et al., 2014), la disponibilidad de agua de recarga, la identificación de sitios con potencial de recarga, los diferentes métodos y tecnologías de recarga, el diseño de las estructuras, el diseño de planes de monitoreo, mantenimiento y reparación (Salameh et al., 2019), o la

regulación propia del sitio en el que se busque implementar el proyecto (Yuan et al., 2016). Sin embargo, de entre todos ellos, la selección de sitios de recarga adecuados se considera uno de los pasos cruciales, pues este influirá no solo en la selección de las técnicas de recarga apropiadas, sino que regirá también su proceso de implementación y subsecuente éxito (Hani et al., 2023).

Con fundamento en lo anterior, el artículo tiene como objetivo el desarrollo de un análisis de viabilidad multicriterio que integra factores técnicos, económicos y operativos, el cual contempla la identificación de zonas con potencial de recarga mediante la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), aportando así información relevante para la planificación de estrategias de recarga hídrica en el AVL. Al identificar con precisión las zonas con alto potencial para la recarga natural y aquellas que, aunque menos aptas, podrían mejorarse mediante acciones de restauración y conservación; y, por otro, la selección objetiva de las técnicas de infiltración más viables para su implementación en el área de estudio, mediante un análisis multicriterio que considera tanto las características físicas y climáticas óptimas para su aplicación como los factores asociados al costo-beneficio y a la complejidad del diseño y mantenimiento de las acciones.

Con ello, se pretende demostrar la factibilidad y pertinencia de impulsar la adopción de un modelo adaptativo de gestión hídrica que incluya la construcción de obras descentralizadas orientadas a la captación e infiltración de agua de lluvia, como medida para disminuir el déficit del acuífero ante un panorama de cambio climático y de incremento en la demanda hídrica por parte de sus diversos usuarios; tal como ha ocurrido exitosamente en sitios con problemáticas similares (v.g. Pizarro

et al., 2004; Gale, 2005; Cordoval & Aquino, 2009; Ojeda-Olivares et al., 2017; Silva-Hidalgo, 2017).

2. Metodología

2.1. Área de estudio

El AVL se localiza en el centro de la República Mexicana, en el extremo occidental del estado de Guanajuato, entre los paralelos 20°52' y 21°21' latitud norte y los meridianos 101°25' y 101°50' de longitud oeste, cubriendo una superficie de 1,336 km², aproximadamente (Conagua, 2024). El acuífero es de tipo libre y limita al norte con los acuíferos Ocampo y Cuenca Alta del Río Laja; al este, con Silao-Romita; y al sur, con Río Turbio y La Muralla (figura 1). Geopolíticamente, el AVL comprende casi en su totalidad el municipio de León, porciones menores de Silao, Romita, y San Francisco del Rincón, así como áreas exiguas de San Felipe, Guanajuato, y Purísima del Rincón. Relativo a su clima, en la porción norte predomina un clima templado subhúmedo, con una precipitación anual de entre 700 y 800 mm, mientras que en el centro y sur del acuífero predomina un clima semiseco con una precipitación que ronda los 700 mm anuales (CONAGUA, 2024).

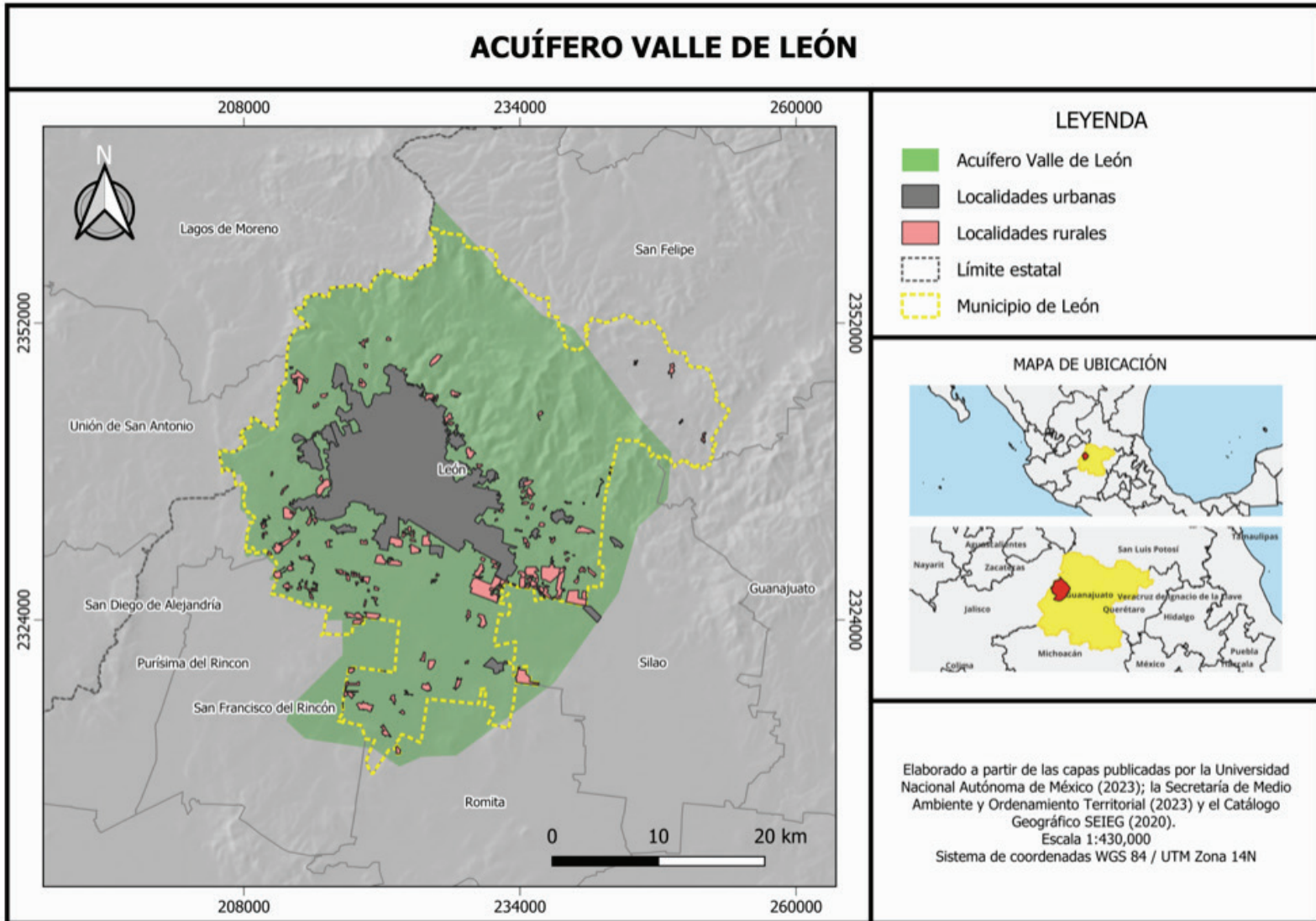


Figura 1. Área de estudio

2.2. Delimitación de zonas potenciales de recarga hídrica

Dentro de la literatura especializada, tanto la delimitación de zonas de recarga hídrica, como la determinación de aquellas ubicaciones con las características físicas óptimas para la implementación de acciones de captación y recarga han sido ampliamente identificadas mediante la utilización de sensores remotos y tecnología SIG (Jena et al., 2020). Asimismo, dentro de las distintas técnicas y herramientas utilizadas en investigaciones afines al estudio de las aguas subterráneas y a la distribución de zonas potenciales de recarga, como modelos de regresión logística, modelos de frecuencia de ratio, modelos de decisión multicriterio, modelos matemáticos y otras técnicas geoestadísticas y geoespaciales, (Biswajit et al., 2019; Ibrahim et al., 2022), destaca el Análisis de Decisión Multicriterio (MCDA), conocido también como Modelo de Decisión Multicriterio o Evaluación Multi-Criterio (EMC), siendo una técnica utilizada con frecuencia para delimitar zonas con potencial de recarga de agua subterránea (Biswajit et al., 2019).

A partir de una extensa revisión de la literatura desarrollada por Rahman et al. (2012), se ha postulado que, en general, el proceso para identificar zonas idóneas para la implementación de acciones de manejo de recarga de acuíferos se compone fundamentalmente de cinco pasos: selección de áreas factibles, clasificación de capas temáticas, estandarización de los mapas, ponderación de los criterios, y finalmente, superposición de los mapas. Por lo tanto, la metodología propuesta en la presente investigación para la identificación de zonas de recarga en el AVL se compone de las siguientes etapas: 1) identificación de los criterios que determinan la recarga al AVL; 2) generación de capas temáticas de

aquellos criterios que determinan la recarga al AVL; 3) reclasificación de las capas temáticas de acuerdo con su aptitud para la recarga; 4) ponderación de los criterios de acuerdo con su importancia en el proceso de recarga; y 5) generación del mapa de zonas potenciales de recarga hídrica para el AVL mediante la superposición ponderada de las capas temáticas reclasificadas.

2.2.1. Identificación de los criterios

Para la identificación y selección de los factores biofísicos que serán evaluados se tomarán en consideración el comportamiento hidrológico del acuífero (v.g. tipo de acuífero, nivel piezométrico o existencia de obras de extracción o recarga), las variables climáticas, geomorfológicas o antrópicas ya conocidas directamente relacionadas con la infiltración y recarga al acuífero, así como aquellos criterios que han sido utilizados ampliamente para la identificación de zonas de recarga (Biswajit et al., 2019; Achu et al., 2019; Jena et al., 2020; Zghibi et al., 2020; Ibrahim et al., 2022; Alam et al., 2022; Zimik et al., 2022).

En el AVL se han incorporado anteriormente, de manera aislada y en número muy reducido, pequeñas obras de recarga, como tinas ciegas, zanjas filtrantes y bordos de tierra, las cuales debido a su limitada aplicación se considera que aún no desempeñan un papel determinante en la recarga del acuífero. Aunado a estas características, para la selección de los criterios se consideró, por una parte, la marcada variabilidad de la pendiente en la zona de estudio, que va desde áreas planas en el valle hasta zonas escarpadas al norte del acuífero, la cual influye directamente en los procesos de drenaje y escorrentía; así como la diversidad de unidades edáficas presentes y sus distintas propiedades

hidrológicas; la complejidad geológica y la presencia de importantes sistemas de fallas y fracturas; la existencia de unidades geomorfológicas con diferente comportamiento hidrológico respecto a la infiltración; y, finalmente, la diversidad de usos del suelo y de cobertura vegetal en el área de estudio.

A partir de lo anterior, se reconocen ocho criterios como relevantes en el proceso de recarga: pendiente del terreno, tipo de suelo, litología, geomorfología, densidad de drenaje, uso de suelo y cobertura vegetal, precipitación y densidad de lineamientos. Cabe señalar que, si bien la profundidad del nivel estático es un criterio importante para evaluar si el agua infiltrada alcanza efectivamente el acuífero, se descartó su consideración en el caso del AVL, ya que la intensa extracción de agua subterránea ha provocado la formación de un cono de abatimiento significativo en su región central, lo que reduce su relevancia como indicador para identificar zonas de recarga natural o inducida al acuífero.

2.2.2. Generación de capas temáticas

Las capas temáticas serán construidas a partir de los procesos de fotointerpretación, así como de escaneo, georectificación, digitalización o extracción de capas a partir mapas preexistentes; ya que muchos de estos mapas son publicados por diferentes organizaciones gubernamentales y son de fácil acceso. Será sumamente útil también la utilización de manera conjunta de información obtenida a través de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica (SIG); los cuales posibilitarán la generación de cartografía a partir de datos geográficos conocidos que ingresamos al software, o mediante la utilización de las distintas herramientas de geoprocésamiento integradas en los propios SIG.

Para el AVL, los mapas de uso de suelo y cobertura vegetal, tipo de suelo, geomorfología y precipitación se elaboraron a partir de las capas temáticas correspondientes publicadas en el Subsistema de Información Geográfica, Medio Ambiente, Ordenamiento Territorial y Urbano (SIGMAOT; SMAOT, 2023). La capa de uso de suelo y cobertura vegetal es representativa del año 2018, mientras que la información de precipitación corresponde a las isoyetas de las normales climatológicas 1990–2020 de la CONAGUA. La capa de pendientes fue generada a partir del mosaico elaborado con el Modelo Digital de Elevación (MDE) de INEGI (resolución de 5 metros). El mapa de litología se elaboró a partir de las cartas geológicas F14-7 y F14-10 del Servicio Geológico Mexicano (2024). Mientras que las capas de densidad de drenaje y densidad de lineamientos se generaron en ArcGIS 10.4.1 utilizando el MDE y aplicando la herramienta *Line Density*.

Una vez generada, la capa de pendientes fue reclasificada en 10 categorías siguiendo los criterios seguidos por la FAO en su guía para la descripción de suelos (FAO, 2009), identificándose pendientes más escarpadas al norte del acuífero y pendientes más suaves en la región de las planicies aluviales. Respecto al tipo de suelo, se identifican como suelos dominantes el Feozem háplico (41.94%), con textura franca a franco-arcillosa y alto contenido de materia orgánica (INEGI, 1998), y el Vertisol pélico (35.80%), caracterizado por arcillas expansivas que dificultan la infiltración. En menor proporción se encuentran Regosol éutrico (6.13%), Planosol éutrico (4.79%); Litosol (3.90%); Feozem lúvico (2.38%); Castañozem cálcico (1.92%); Luvisol órtico (1.49%); Chernozem lúvico (0.51%); Planosol mólico (0.48%); Castañozem lúvico (0.27%); Feozem calcárico (0.25%); y Fluvisol éutrico (0.13%).

La geología del acuífero está conformada principalmente por el Basalto Dos Aguas y el Basalto El Cubilete, ambos con presencia de un fracturamiento importante que favorece la infiltración de agua (SGM, 2024). Otras unidades presentes con buena permeabilidad son la Andesita Bernalejo, la Ignimbrita Cuatralba y la unidad de Aluvi3n. En contraste, las unidades impermeables corresponden a la Piroxenita San Juan de Otates, el Complejo Volcanosedimentario Sierra de Guanajuato, el Conjunto Plut3nico La Luz, el Granito Comanja, el Conglomerado Guanajuato y el Gabro Arperos (Hern3ndez-Laloth, 1991).

Con respecto a la geomorfolog3a se reconocen tres paisajes principales: la Sierra de Guanajuato, abrupta y con fuerte escurrimiento superficial; los Altos de Jalisco, con lomas fracturadas que favorecen la infiltraci3n; y la zona del Baj3o o Planicies de Silao, de baja pendiente y drenaje deficiente (Hern3ndez-Laloth, 1991; CONAGUA, 2024).

La capa de densidad de drenaje se construy3 utilizando una red de drenaje generada a partir del MDE. Identific3ndose una red hidrogr3fica de 2,124 km de longitud sobre 1,336 km² de superficie, lo que arroja una densidad media de 1.59 km/km². Las zonas de menor densidad (0–1 km/km²) corresponden al Valle de Le3n, mientras que valores intermedios (1–2 km/km²) se ubican en los Altos de Jalisco y la franja de transici3n hacia la Sierra de Guanajuato (Zghibi et al., 2020).

Respecto al uso de suelo y cobertura vegetal, predominan la agricultura de temporal (389.7 km²) y los asentamientos humanos (293.03 km²). Tambi3n se registran matorral subtropical (174.64 km²), agricultura de riego (151.47 km²), pastizales naturales e inducidos (200.37 km²), adem3s de fragmentos de bosque de encino, matorral crasicaule y cuerpos de agua. Los rangos principales de precipitaci3n para

el AVL son >800 mm en la Sierra de Guanajuato, ~ 800 mm en la franja de transición y zona sur (La Muralla), y 700 mm en el valle central.

Por último, el mapa de densidad de lineamientos fue generado a partir de la capa de fallas y fracturas publicada en el SIGMAOT, identificándose 187 km de lineamientos, con una densidad media de 140 m/km². La mayor concentración se presenta en la Sierra de Guanajuato y Altos de Jalisco, mientras que el Valle de León carece de ellos. La figura 2 integra las capas temáticas generadas para el análisis multicriterio.

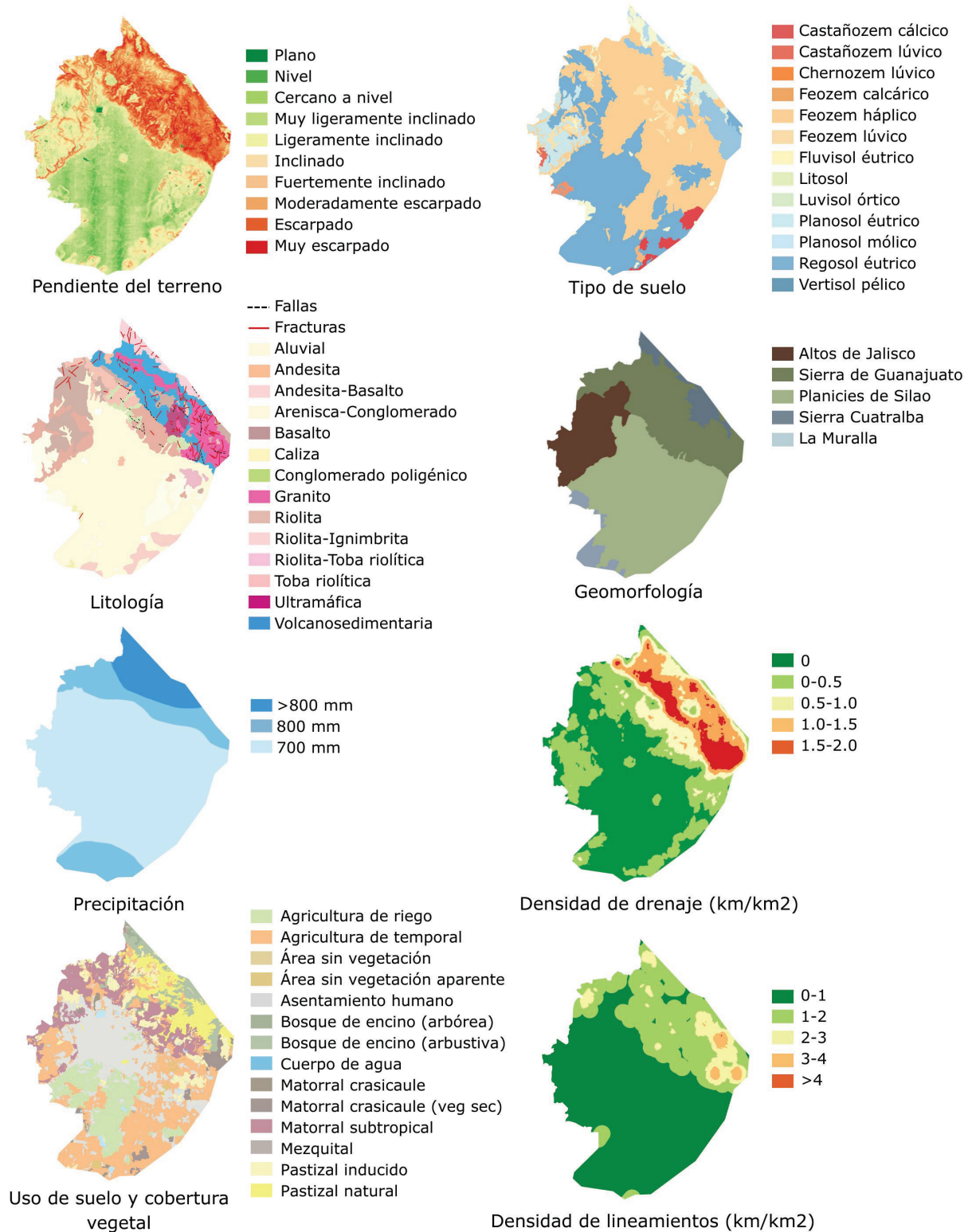


Figura 2. Capas temáticas.

2.2.3. Reclasificación de capas temáticas

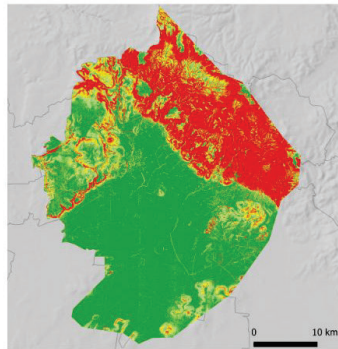
Para la normalización de las capas temáticas se tomaron en consideración las características biofísicas específicas del área de estudio, los criterios y rangos utilizados en la literatura para la reclasificación de los distintos factores de acuerdo con su aptitud para favorecer la recarga de agua subterránea (Chowdhury et al., 2010; Singh et al., 2013; Peñuela et al., 2013; Kaliraj et al., 2014; Boughariou et al., 2015; Bravo et al., 2015; Kumar et al., 2016; Biswajit et al., 2019; Achu et al., 2019; Jena et al., 2020; Zghibi et al., 2020; Ibrahim et al., 2022; Alam et al., 2022; Zimik et al., 2022), la experiencia de los investigadores, y el conocimiento de los actores locales involucrados en el estudio, quienes en muchos casos poseen un conocimiento profundo de la hidrología y de las características físicas del territorio.

En concordancia con lo anterior y con el objetivo de normalizar los mapas, para el AVL se ha optado por mantener una reclasificación a cinco clases, al ser un esquema utilizado exitosamente por distintos autores (Matus et al., 2009; Bravo et al., 2015; Kumar et al., 2016; Biswajit et al., 2019; Zghibi et al., 2020; Alam et al., 2022), no obstante, ello no implica que en la zona de estudio se presenten necesariamente los parámetros biofísicos de las cinco clases. Las clases propuestas oscilan de 1 a 5 o de menor capacidad para permitir la recarga a mayor capacidad para permitir la recarga, siendo estas: 1) Muy baja; 2) Baja; 3) Moderada; 4) Alta; y 5) Muy alta aptitud para la recarga hídrica. En la tabla 1 se muestran los distintos factores y sus clases para la reclasificación, mientras que en la figura 3 se presentan las distintas capas temáticas reclasificadas.

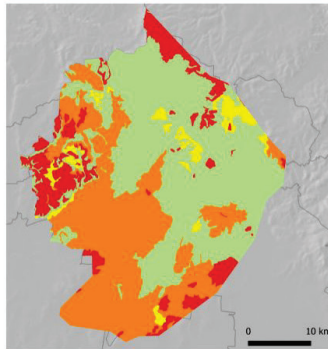
Tabla 1. Criterios reclasificados de acuerdo con su aptitud para la recarga hídrica.

| | Factores | Aptitud para la recarga |
|----------------------------------|--|--------------------------------|
| Rango de la pendiente (°) | 0 - 2.86 | 5 |
| | 2.86 - 5.71 | 4 |
| | 5.71 - 8.53 | 3 |
| | 8.53 - 11.31 | 2 |
| | >11.31 | 1 |
| Tipo de suelo | Feozem háplico, Regosol éutrico, Chernozem lúvico, Fluvisol éutrico. | 4 |
| | Feozem lúvico, Feozem calcárico, Luvisol órtico. | 3 |
| | Vertisol pélico. | 2 |
| | Planosol éutrico, Planosol mólico, Castañozem cálcico, Castañozem lúvico, Litosol. | 1 |
| Litología | Basalto (fracturado). | 5 |
| | Aluvial, Andesita, Arenisca-Conglomerado, Riolita, Riolita-Ignimbrita, Toba riolítica. | 4 |
| | Caliza, Riolita-Toba riolítica. | 3 |
| | Andesita-Basalto, Conglomerado poligénico, Granito, Ultramáfica, Volcanosedimentarias. | 2 |
| Paisaje geomorfológico | Altos de Jalisco. | 5 |
| | Planicies de Silao (Zona del Bajío). | 4 |
| | Sierra Cuatralba, La Muralla. | 2 |
| | Sierra de Guanajuato. | 1 |

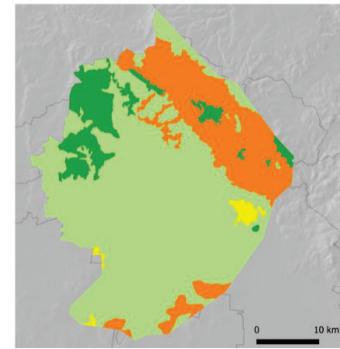
| Factores | | Aptitud para la recarga |
|---|--|-------------------------|
| Densidad de drenaje (km/km²) | 0-1 | 5 |
| | 1 - 2 | 4 |
| | 2 - 3 | 3 |
| | 3 - 4 | 2 |
| | > 4 | 1 |
| Uso de suelo y cobertura vegetal | Bosque de encino con vegetación primaria y vegetación secundaria arbórea; Bosque de encino con vegetación secundaria arbustiva y herbácea. | 5 |
| | Matorral crasicaule; Matorral crasicaule con vegetación secundaria; Matorral subtropical; Pastizal natural; Pastizal inducido. | 4 |
| | Agricultura de riego; Agricultura de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes. | 3 |
| | Área sin vegetación; Área sin vegetación aparente; Mezquital. | 2 |
| | Asentamiento humano; cuerpo de agua. | 1 |
| Precipitación | >800 | 5 |
| | 800 | 4 |
| | 700 | 4 |
| Densidad de lineamientos (km/km²) | 1.5 - 2.0 | 5 |
| | 1.0 - 1.5 | 4 |
| | 0.5 - 1.0 | 4 |
| | 0 - 0.5 | 3 |
| | 0 | 1 |



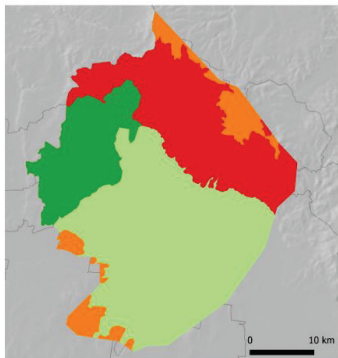
Pendiente



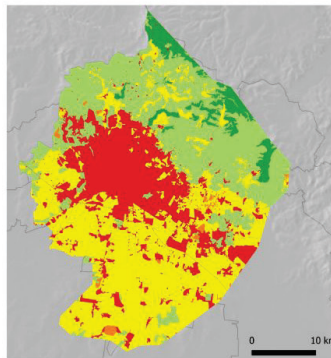
Tipo de suelo



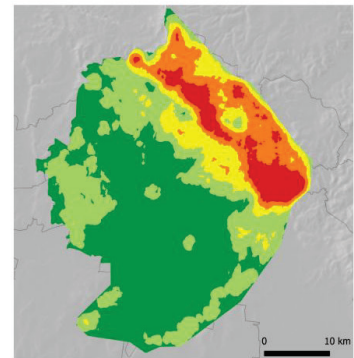
Litología



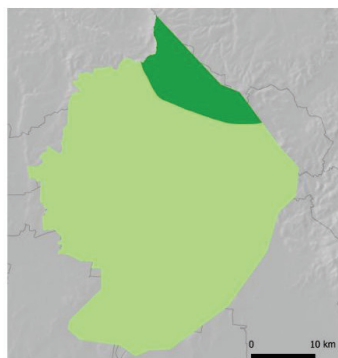
Rasgos
geomorfológicos



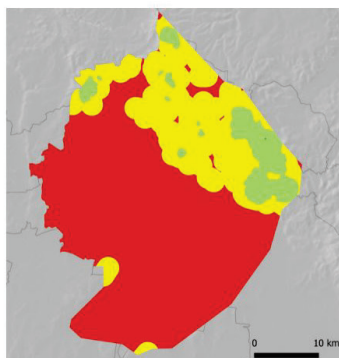
Uso de suelo y
vegetación



Densidad de drenaje



Precipitación



Densidad de
lineamientos

Aptitud para la recarga



Figura 3. Capas temáticas reclasificadas se acuerdo con su aptitud para la recarga hídrica.

2.2.4. Ponderación de los criterios

La ponderación de los criterios se lleva a cabo mediante la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), desarrollado por Saaty (1980), el cual es una herramienta de toma de decisiones para problemas complejos con múltiples criterios, que se fundamenta en la comparación de los factores de control a través de una matriz de comparación por pares (Biswajit & Subodh, 2019). Dicha matriz se construye a partir de los factores que determinan la recarga hídrica, utilizando una escala de importancia de 1 a 9 (Tabla 2), la cual describe la influencia relativa de los parámetros, donde 1 denota igual importancia y 9 representa una influencia extrema de un parámetro sobre otro en el proceso de recarga subterránea (Zghibi et al., 2020).

Los pesos se asignan con base en la respuesta de los factores o capas temáticas frente a la recarga de agua subterránea, considerando la opinión de los investigadores y de los expertos que participan en el análisis (Chowdhury et al., 2009; Kumar, Kant, & Jhariya, 2016).

Tabla 2. Escala de importancia 1-9 propuesta por Thomas Saaty.
Recuperada de Alam et al. (2022).

| Escala | Valor inverso | Valor decimal | Descripción de las preferencias |
|--------|---------------|---------------|----------------------------------|
| 1 | 1/1 | 1.000 | Igual importancia |
| 2 | 1/2 | 0.500 | Igual a moderada importancia |
| 3 | 1/3 | 0.333 | Moderada importancia |
| 4 | 1/4 | 0.250 | Moderada a fuerte importancia |
| 5 | 1/5 | 0.200 | Fuerte importancia |
| 6 | 1/6 | 0.167 | Fuerte a muy fuerte importancia |
| 7 | 1/7 | 0.143 | Muy fuerte importancia |
| 8 | 1/8 | 0.125 | Muy fuerte a extrema importancia |
| 9 | 1/9 | 0.111 | Extrema importancia |

Para comprobar la consistencia de las ponderaciones se estimará el índice de consistencia (CI) y la razón de consistencia (CR) (Biswajit & Subodh, 2019), los cuales están dados por las ecuaciones 1 y 2.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1} \quad (1)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

Donde:

CI = índice de consistencia

λ_{\max} = eigenvalor principal de la matriz

n = número de variables (capas temáticas)

CR = ratio de consistencia

RI = valor de índice aleatorio

De acuerdo con Saaty (1990) para que las decisiones sean consistentes el valor de CI es 0; sin embargo, esta consistencia podría ser tolerable mientras $CR < 0.1$. Asimismo, el valor aceptable de CR cambiará con base a las dimensiones de la matriz, siendo de $CR < 0.05$ para matrices 3x3; $CR < 0.09$ para matrices 4x4; y de $CR < 0.1$ para matrices mayores (Saaty, 1980). Por lo tanto, si el valor CR es mayor que 0.1 (10%), los juicios de comparación por pares deberán de evaluarse nuevamente (Zghibi et al., 2020).

Con el objetivo de optimizar esta etapa, se propone utilizar el software libre AHP-OS desarrollado por Goepel (2018); ya que entre sus funciones se encuentra la generación automática de la matriz de comparación por pares, la normalización de la matriz, la verificación de la consistencia, y el desarrollo del ranking general de prioridad (Goepel, 2018), además de ser un software accesible, fácil de usar y utilizado exitosamente en trabajos relevantes de priorización de indicadores (Chan et al., 2019).

Para el AVL, la comparación de los criterios fue realizada por seis académicos de la Universidad de Guanajuato, expertos en hidrología, geología y gestión integral del agua, y familiarizados con el área de estudio. Si bien los resultados del análisis mostraron un consenso bajo

entre los participantes (50.2%), se obtuvo una razón de consistencia (*CR*) aceptable, menor a 0.1 para cada participante y menor a 0.015 para todo el grupo. La importancia relativa de los distintos criterios se presenta en la Figura 4.

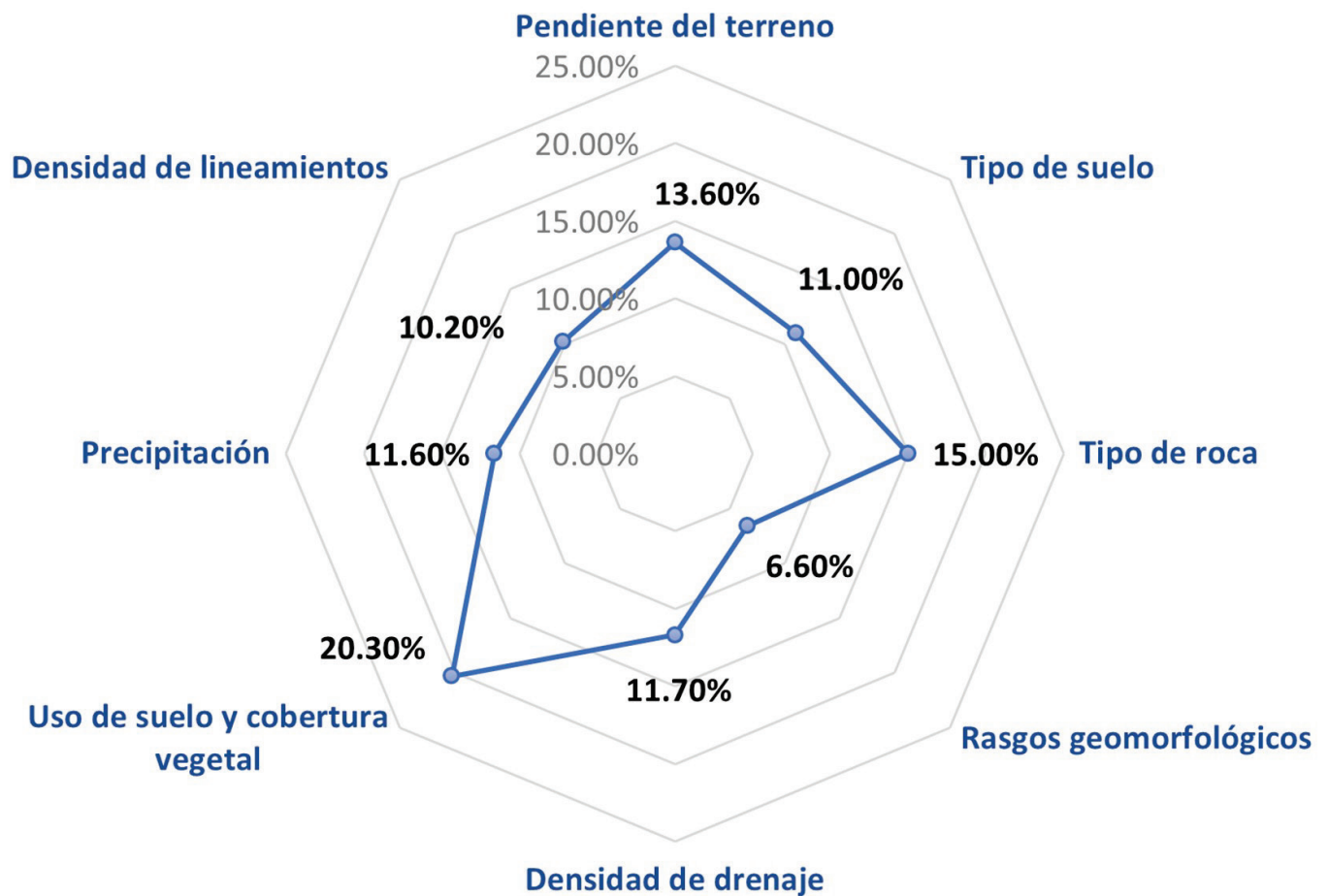


Figura 4. Peso relativo de los ocho criterio biofísicos dentro del proceso de recarga al AVL.

2.2.5. Generación del mapa de zonas potenciales de recarga hídrica

Determinados los pesos de las capas temáticas, se ha procedido a delimitar las zonas de recarga hídrica, lo cual implica la integración (superposición ponderada) de las capas temáticas reclasificadas usando el método de superposición ponderada (Chowdhury et al., 2010; Singh et al., 2013; Bravo et al., 2015; Kumar et al., 2016; Achu et al., 2019; Biswajit et al., 2019; Jena et al., 2020; Zghibi et al., 2020; Alam et al., 2022; Zimik et al., 2022), el cual consiste en una sumatoria lineal ponderada, que integra y depende de los pesos de cada factor, y está dada por la ecuación 3.

$$SI = \sum W_i S_i \quad (3)$$

Donde:

SI = índice de aptitud para la recarga hídrica

W_i = peso del factor

S_i = valor de aptitud para la recarga del factor

Para llevar a cabo dicho proceso se ha utilizado la herramienta *Weighted Overlay* incorporada en ArcGIS 10.4.1; redondeando a la baja hasta el entero más cercano el valor de las influencias, ya que estas se expresan solo mediante valores enteros (Esri, 2024). Como resultado de la aplicación de este proceso se ha generado la capa en formato raster de aptitud para la recarga hídrica, a partir del cual se ha construido su respectivo mapa, mostrando la aptitud para la recarga hídrica en distintas

zonas del área de estudio de acuerdo con la escala de aptitud (1-5) con la que fueron reclasificadas las capas temáticas.

2.3. Propuesta de las acciones adaptativas de recarga hídrica más viables para mitigar la sobreexplotación del AVL

Las técnicas de recarga se han clasificado en cinco grandes categorías (Zhang et al., 2020): 1) Métodos de dispersión (distribución); 2) modificaciones a canales; 3) pozos y perforaciones; 4) infiltración ribereña; y 5) captación de escorrentía. Si bien en la literatura se ofrecen algunas consideraciones generales para identificar las técnicas más pertinentes para un determinado sitio; como que los pozos de recarga serán preferibles en zonas urbanas o para acuíferos confinados (Zheng et al., 2021), resulta necesario considerar en la mayor de las posibilidades, las características biofísicas más relevantes presentes en la zona de estudio, las particularidades de cada tecnología, así como los distintos parámetros sugeridos en la literatura para la elección óptima de las acciones (Dillon, 2005; NRMCC, EPHC, NHMRC, 2009).

Con el objetivo de identificar la opción más viable entre distintas acciones, los autores Dillon (2005) y Dillon et al (2009) han empleado un modelo cuantitativo fundamentado en la asignación de calificaciones (número de asteriscos/estrellas) a cada opción dentro de su portafolio de opciones de proyectos potenciales de abastecimiento de agua, entre los que se incluyen proyectos de recarga. La calificación se ha asignado de acuerdo con el grado en que cada opción contribuye a lograr los objetivos sociales o ambientales establecidos para estos. De manera similar, en la investigación desarrollada por Espinoza (2022), se llevaron a cabo

procesos de evaluación y determinación de las acciones de recarga hídrica más viables de implementar en una cuenca a partir de la asignación de una calificación a cada una de las características más relevantes dentro de las distintas tecnologías y seleccionando únicamente aquellas acciones con mayor calificación media entre las distintas opciones. Recuperando este modelo que ha demostrado ser útil y práctico, se ha propuesto conducir un análisis similar para la identificación y elección de las acciones adaptativas de recarga que se propondrá implementar en el AVL.

Para dicho fin se conducirá la evaluación y calificación individual de las principales técnicas de recarga hídrica en un rango de 1 a 5 (estrellas) de acuerdo con su viabilidad y afinidad con el área de estudio y con los objetivos esperados con la implementación de estas acciones en el marco de la gestión adaptativa e integrada del agua. Esto con el objeto de conducir un análisis cuantitativo mediante una matriz de viabilidad; proponiéndose para ser implementadas únicamente aquellas acciones con mayor calificación entre las distintas opciones, y siendo, por lo tanto, las alternativas más viables y realistas para el AVL. Los parámetros que se evalúan son: clima (incluye precipitación); suelo; uso de suelo y cobertura vegetal; geología (se considera la hidrología, el tipo de acuífero, unidades litológicas y lineamientos); topografía (se considera la pendiente del terreno y los rasgos geomorfológicos); posibles conflictos sociales derivados de su implementación; dificultad técnica (se considera la dificultad y el conocimiento técnico relativo para su diseño, instrumentación y mantenimiento); costo-beneficio; rendimiento (se considera también la fiabilidad de la acción); y calidad del agua recuperada.

Finalmente, una vez identificadas las acciones más viables para la recarga del AVL, se llevará a cabo la identificación de los sitios óptimos

para su construcción mediante un análisis multicriterio. Para ello, se tomarán en cuenta los parámetros de pendiente del terreno, tipo de suelo y uso del suelo, al tratarse de factores relevantes de la superficie del terreno para definir las ubicaciones adecuadas para la implementación de las obras de recarga. Delimitando únicamente aquellas zonas donde los tres factores presenten los parámetros óptimos y sugeridos en la literatura para la implementación de las acciones. Para llevar a cabo dicho análisis se ha empleado la herramienta *Weighted Overlay* incorporada en ArcGIS 10.4.1, utilizando como insumos las capas temáticas de pendiente del terreno, uso de suelo y cobertura vegetal, y tipo de suelo. Como pesos relativos de cada factor se ha asignado una ponderación de 40%, 30%, y 30%, respectivamente.

3. Resultados

3.1. Zonas potenciales de recarga hídrica

Como resultado de la identificación de las zonas potenciales de recarga hídrica para el AVL se ha determinado que de los 1,336 km² de superficie del acuífero, 195.42 km² (14.70%) corresponden a la zona urbana de la ciudad de León, la cual no presenta capacidad de infiltrar agua hacia el acuífero; mientras que 1,139.51 km² (85.30%) de la superficie del acuífero sí presenta las condiciones biofísicas para llevar a cabo el proceso de infiltración y percolación.

El mapa de aptitud para la recarga hídrica al AVL (figura 5) ha demostrado la ausencia de zonas con muy alta y muy baja aptitud para la recarga hídrica al acuífero (tabla 3). Identificándose la predominancia de una aptitud moderada en 679.53 km² (59.63% de la superficie del

acuífero con posibilidad de recarga); cuya mayor extensión se ubica en la Sierra de Guanajuato, con porciones importantes también en el flanco occidental y el extremo sur del acuífero. Le sigue una aptitud alta en 453.01 km² (39.75% de la superficie con posibilidad de recarga), distribuida sobre todo en la zona noroeste del acuífero, en la región de Los Altos de Jalisco, así como en la mitad meridional del área de estudio, la cual corresponde a las planicies aluviales del Valle de León; y finalmente 6.98 km² (0.61% de la superficie con posibilidad de recarga) con aptitud baja para la recarga, esto en sitios aislados, muy escarpados y de extensión menor en la Sierra de Guanajuato.

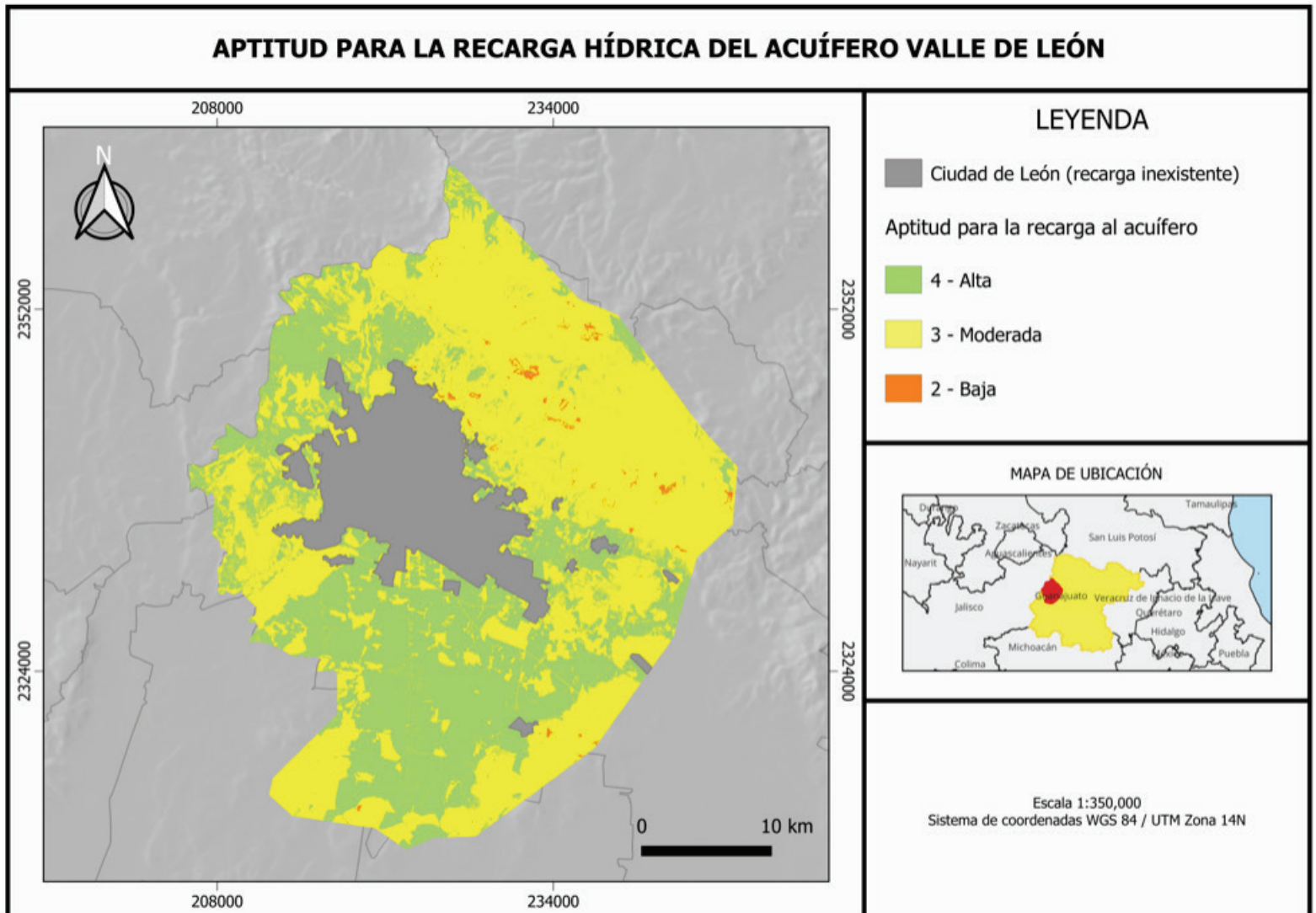


Figura 5. Mapa de aptitud para la recarga hídrica del AVL.

Tabla 3. Superficie ocupada por nivel de aptitud.

| Nivel de aptitud | Área (km ²) | % (de la superficie con posibilidad de recarga) |
|------------------|-------------------------|---|
| Muy alta | 0.00 | 0.00 |
| Alta | 453.01 | 39.75 |
| Moderada | 679.53 | 59.63 |
| Baja | 6.98 | 0.61 |
| Muy baja | 0.00 | 0.00 |

Dentro de la superficie de 453.01 km² con alto potencial de recarga hídrica se han delimitado y propuesto cinco polígonos con superficies mayores a 10 km², cuya extensión y alta aptitud para la recarga los convierte en sitios de interés para la implementación de un proyecto de recarga de acuíferos que incluya acciones encaminadas a captar e infiltrar agua de lluvia para la mitigación en la sobreexplotación del AVL (figura 6).

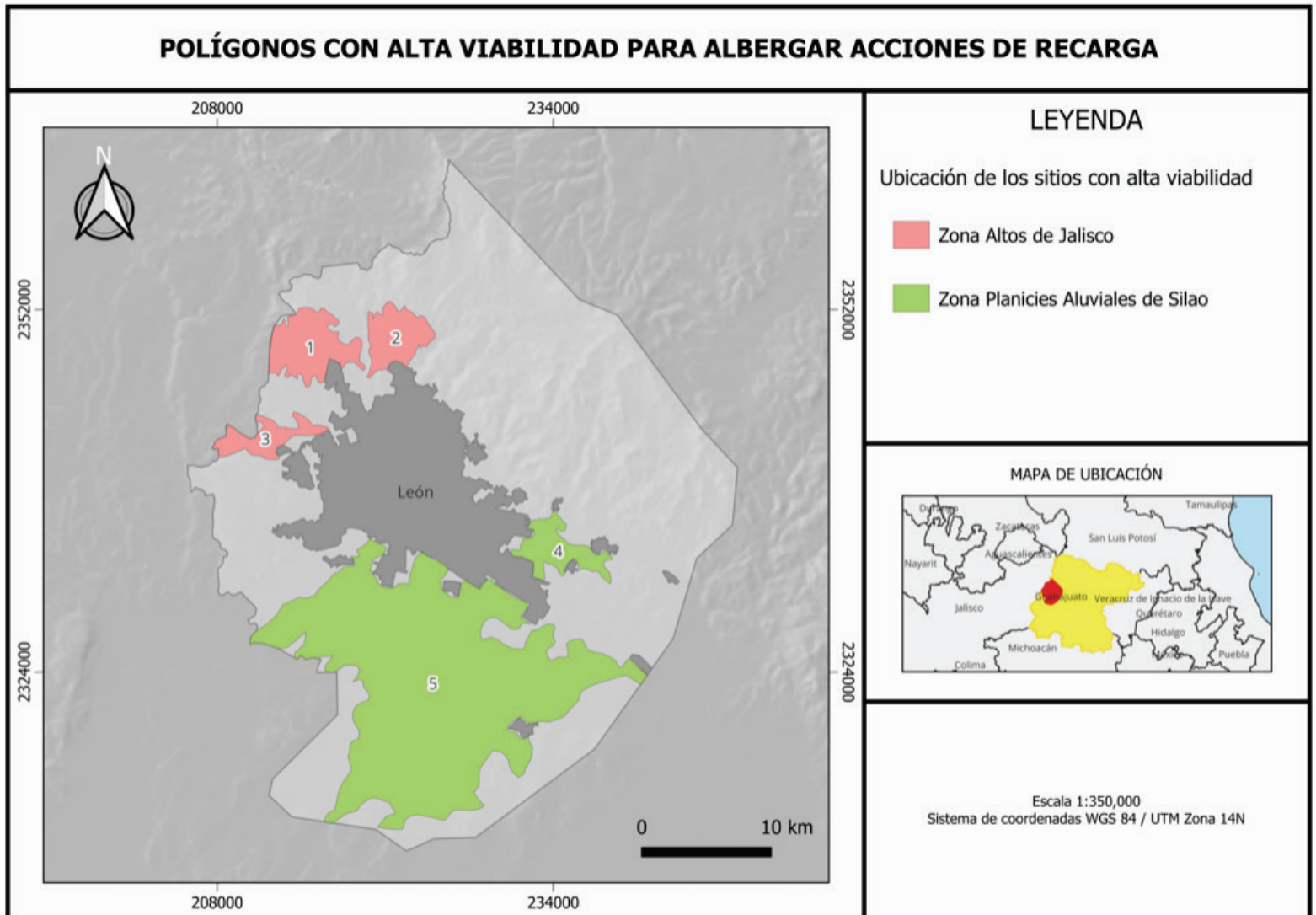


Figura 6. Polígonos con alta viabilidad para albergar acciones de recarga hídrica para el AVL.

3.2. Propuesta de acciones de captación y recarga para el AVL

Se ha explicado la necesidad de comparar las características superficiales e hidrológicas presentes en el área de estudio con las características sugeridas en la literatura para la implementación exitosa de las distintas técnicas de recarga, así como de tomar en cuenta las características particulares de cada técnica para identificar las acciones de captación y recarga más viables para el área de estudio. Conduciendo dicho análisis para el AVL, se identifica que en los polígonos con alta aptitud para la recarga (figura 6) predominan tres climas: Cw0 (templado subhúmedo), (A)C(w0)(w) (semicálido subhúmedo) y BS1kw(w) (semiseco semicálido). Con una precipitación media anual de 700–800 mm y temperatura de 17–19 °C, la mayoría de las técnicas de captación y recarga resultan viables, salvo la infiltración ribereña (RBF), que, aunque puede implementarse como infiltración ribereña de temporal asociada a eventos de escorrentía ordinarios o extraordinarios, se sugiere su implementación preferentemente en sitios con flujo perenne (Dobhal et al., 2019); y la infiltración interdunar, propia de ambientes costeros (Mendoza, 2017).

En cuanto a suelos, en los polígonos de estudio predominan el Feozem háplico y Vertisol pélico. Aunque el primero presenta texturas francas o franco-arcillosas, semejantes al tipo HSG-C (50% arena y 20–40% arcilla) en el cual se han implementado la mayoría de las técnicas de recarga a nivel mundial (Alam et al., 2021), el segundo, con alto contenido de arcilla, se aleja de estas condiciones. Con base en ello, la mayoría de las técnicas pueden aplicarse, sobre todo en los suelos Feozem presentes en el AVL; para las técnicas de almacenamiento de agua en un

acuífero y recuperación (ASR) y almacenamiento de agua en un acuífero, transferencia y recuperación (ASTR), la textura del suelo, así como otras características superficiales no representarán una condicionante al tratarse de pozos profundos (Technische Universität Dresden, 2018). Otro caso particular es de las técnicas de infiltración interdunar y presas de arena, las cuales presentan una afinidad particularmente baja al área de estudio para este y el resto de los factores biofísicos evaluados.

Respecto a la cobertura vegetal y usos de suelo, la mayoría de las acciones son compatibles con el área de estudio, sobre todo en áreas con matorral subtropical, pastizal inducido y bosque de encino. No obstante, las técnicas de tratamiento suelo-acuífero (TSA) e inundación controlada requieren grandes extensiones (Alam et al., 2021), lo que reduce su viabilidad. Por otra parte, ya se ha mencionado la preferencia de implementar RBF en sitios con flujo perenne (Dobhal et al., 2019), e infiltración interdunar en ambientes costeros (Mendoza, 2017).

Como acuífero libre, en los polígonos aluviales (4 y 5) son viables TSA y riego; mientras que en polígonos basálticos y andesíticos (1–3) con fracturamiento y buena permeabilidad, son más aptas las cuencas y estanques de infiltración, gaviones, pozos someros y captación de lluvia. En contraste, presas de arena (Mendoza, 2017; Maddrell et al., 2013), presas subsuperficiales (Ministry of the Environment, 2004), inundación controlada, y RBF presentan baja afinidad por sus requerimientos hidrológicos. Con relación a la topografía los polígonos 1–3 tienen pendientes de 2–10° (3.5–17.6%), adecuadas para múltiples técnicas como estanques, gaviones y captación de lluvia; mientras que en polígonos 4–5 predominan pendientes planas (<1°), favorables para TSA, riego e inundación controlada (Tahoe Regional Planning Agency, 2014; California Department of Transportation, 2020; Alam et al., 2021).

En relación con los posibles conflictos sociales derivados de su implementación, se destaca que cualquier intervención puede generar conflictos asociados con la propiedad de la tierra, los derechos de agua o los usos compartidos (Gale, 2005). No obstante, las técnicas extensivas o de gran infraestructura, como TSA, inundación controlada, riego, gaviones de gran tamaño, presas subsuperficiales, ASR/ASTR y RBF tienden a presentar mayores niveles de conflictividad (Technische Universität Dresden, 2018) en comparación con las acciones a pequeña escala, tales como los pozos someros, los estanques de infiltración y la captación de lluvia. En este sentido, estas últimas resultan más viables para el AVL.

En dificultad técnica serán más sencillas de implementar, y por consiguiente preferibles para el AVL, las terrazas, zanjas, tinas, estanques de infiltración, gaviones pequeños, pozos someros, presas de arena y riego (Alam et al., 2021); moderadamente complejas, la inundación controlada, presas subsuperficiales y liberación controlada; mientras que las más complejas serían TSA, RBF y ASR/ASTR (Maddrell et al., 2013; Mendoza, 2017; Dobhal et al., 2019).

Similar al criterio anterior, el mayor rendimiento, entendido como la eficacia de una intervención para infiltrar agua en el subsuelo en relación con el agua disponible o invertida, corresponde a ASR/ASTR, seguido de presas de gaviones de grandes dimensiones, estanques de infiltración, RBF, liberación controlada y TSA; mientras que acciones como riego, presas de arena, presas subsuperficiales, pozos someros y captación de lluvia tienen menor rendimiento. Sobre la calidad del agua, en general será moderada para todas las técnicas, pues el almacenamiento superficial favorece el riesgo de contaminación, mientras que con el ASR/ASTR existe riesgo de infiltrar agua contaminada

directamente al acuífero (Alam et al., 2021). Las técnicas que particularmente mejoran la calidad del agua son TSA (Casanova et al., 2016), RBF (Mendoza, 2017), y presas subsuperficiales (Ministry of the Environment, 2004).

Finalmente, la calificación asignada al criterio costo-beneficio dependerá de la complejidad técnica del diseño, la implementación y el mantenimiento, así como del costo de implementación y del rendimiento de la técnica. Las técnicas de mayor rendimiento, pero con alta dificultad (TSA, ASR/ASTR, RBF) presentan menor costo-beneficio; mientras que aquellas de menor rendimiento, pero con simplicidad constructiva y de operación (riego, presas de gaviones de pequeña dimensiones, estanques, presas de arena, pozos someros, captación de lluvia), resultan más favorables, y, en consecuencia, preferibles para ser implementadas en el AVL. Los resultados obtenidos para las distintas acciones se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Viabilidad de distintas acciones de recarga para implementarse en el AVL.

| Tecnología | Clima | Suelo | Uso de suelo y cobertura vegetal | Geología / hidrología | Topografía | Posibles conflictos sociales | Dificultad técnica | Costo-beneficio | Rendimiento | Calidad del agua recuperada | Calificación (viabilidad) |
|---|-------|-------|----------------------------------|-----------------------|------------|------------------------------|--------------------|-----------------|-------------|-----------------------------|---------------------------|
| Cuencas y estanques de infiltración | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★ | ★★★★ | ★★★ | ★★★ | 4.1 |
| TSA | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★ | ★★ | ★★★ | ★★★★ | ★★★★★ | 3.9 |
| Inundación controlada | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★ | ★★★ | ★★★★ | ★★ | ★★★ | ★★★ | ★★ | ★★★ | 3.3 |
| Riego | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★ | ★★★★ | ★★★★★ | ★★ | ★★ | 3.9 |
| Represas de control / gaviones (grandes dimensiones) | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★★ | ★★ | ★★ | ★★★ | ★★★★ | ★★★ | 3.7 |
| Represas de control / gaviones (pequeñas dimensiones) | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★ | ★★★★ | ★★ | ★★★ | 4.0 |
| Presas de arena | ★★★★ | ★★ | ★★★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★ | ★★★★ | ★★★★ | ★★ | ★★★ | 3.2 |
| Presas subsuperficiales | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★ | ★★★★★ | ★★ | ★★★ | ★★ | ★★ | ★★★★ | 3.5 |
| Liberación controlada | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★★ | ★★★ | ★★★ | ★★★★ | ★★★★ | ★★★ | 4.0 |
| ASR / ASTR | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★ | ★ | ★★ | ★★★★★ | ★★★ | 3.8 |
| Pozos de recarga someros | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★ | ★★★★ | ★★ | ★★★ | 4.0 |
| RBF | ★★ | ★★★★ | ★★ | ★ | ★★★★★ | ★★ | ★ | ★★ | ★★★★ | ★★★★ | 2.7 |
| Filtración interdunar | ★★ | ★★ | ★★★ | ★★ | ★ | ★★ | ★★ | ★★★ | ★★★★ | ★★★★ | 2.5 |
| Zanjas, tinas, terrazas, etc. | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★★ | ★★★★ | ★★★★★ | ★★★★★ | ★★ | ★★★ | 4.2 |

Se identifican cinco técnicas con una calificación de 4 o superior: acciones de captación de agua de lluvia (terrazas, zanjas y tinajas), cuencas y estanques de infiltración, represas de control/gaviones de pequeñas dimensiones, liberación controlada y pozos de recarga someros. Siendo las acciones de captación de agua de lluvia las técnicas con mayor viabilidad para el área de estudio, al obtener una calificación de 4.2 sobre 5. Las acciones con una viabilidad moderada al obtener una calificación de entre 3 y 3.9 son el TSA, riego, ASR/ASTR, represas de control/gaviones de grandes dimensiones, presas subsuperficiales, inundación controlada, y presas de arena. Mientras que las acciones con menor viabilidad, al obtener una calificación entre 2 y 2.9, son la infiltración ribereña (RBF) y la filtración interdunar.

3.3. Sitios óptimos para la implementación de zanjas, tinajas, terrazas y estanques de infiltración

Se ha identificado que los polígonos 1-3 presentan las condiciones óptimas de uso de suelo y cobertura vegetal, pendiente de terreno, y tipo de suelo, para la implementación de cuencas/estanques de infiltración y acciones de captación de agua de lluvia (terrazas, zanjas y tinajas). Aunque en los polígonos 4 y 5 también es posible encontrar sitios aislados y muy concretos que cumplen con las condiciones biofísicas para la implementación de estas acciones, se considera que la extensión despreciable de dichos sitios los vuelve poco viables para la implementación de un proyecto a gran escala de manejo de recarga de acuíferos que incluya estanques, o acciones como terrazas, zanjas o tinajas.

Para la implementación de cuencas y estanques de infiltración se han seleccionado aquellos sitios con una pendiente de 5 a 40%, suelo tipo

Feozem háplico, y una cobertura vegetal de matorral subtropical, pastizal inducido, matorral crasicaule y pastizal natural. Mientras que, para la implementación de zanjas, tinas y terrazas, se han seleccionado los sitios con pendiente de 0.5 a 5%, suelo tipo Feozem háplico, y una cobertura vegetal de matorral subtropical, pastizal inducido, matorral crasicaule y pastizal natural.

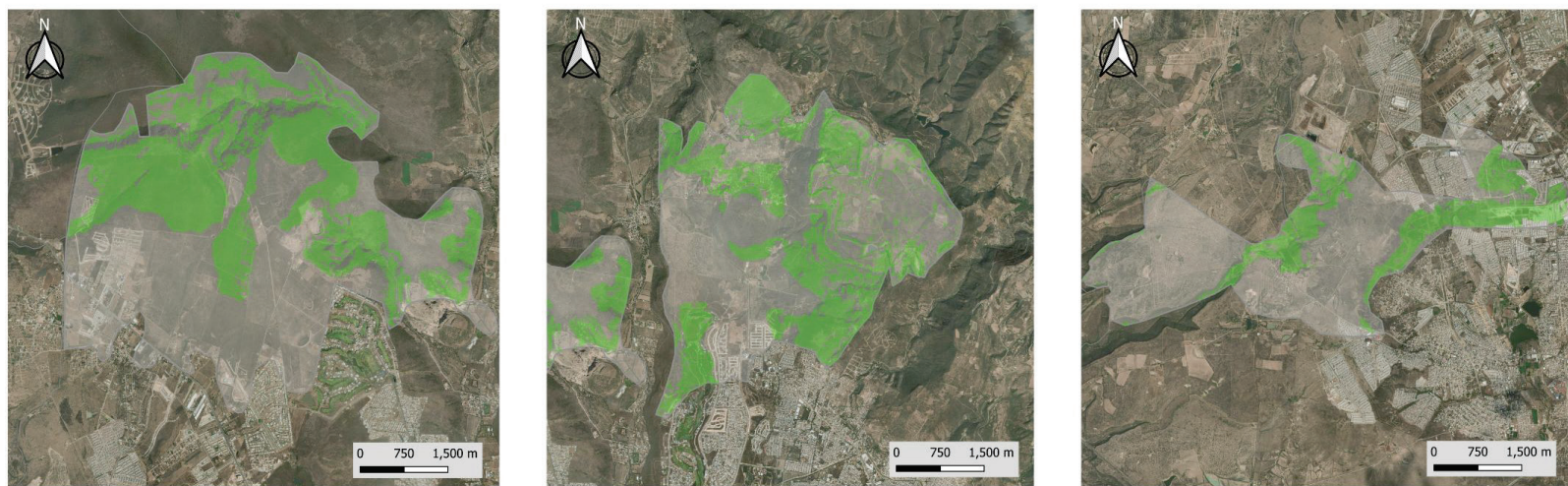


Figura 7. Ubicación óptima para la implementación de zanjas, tinas y terrazas en los polígonos 1-3.

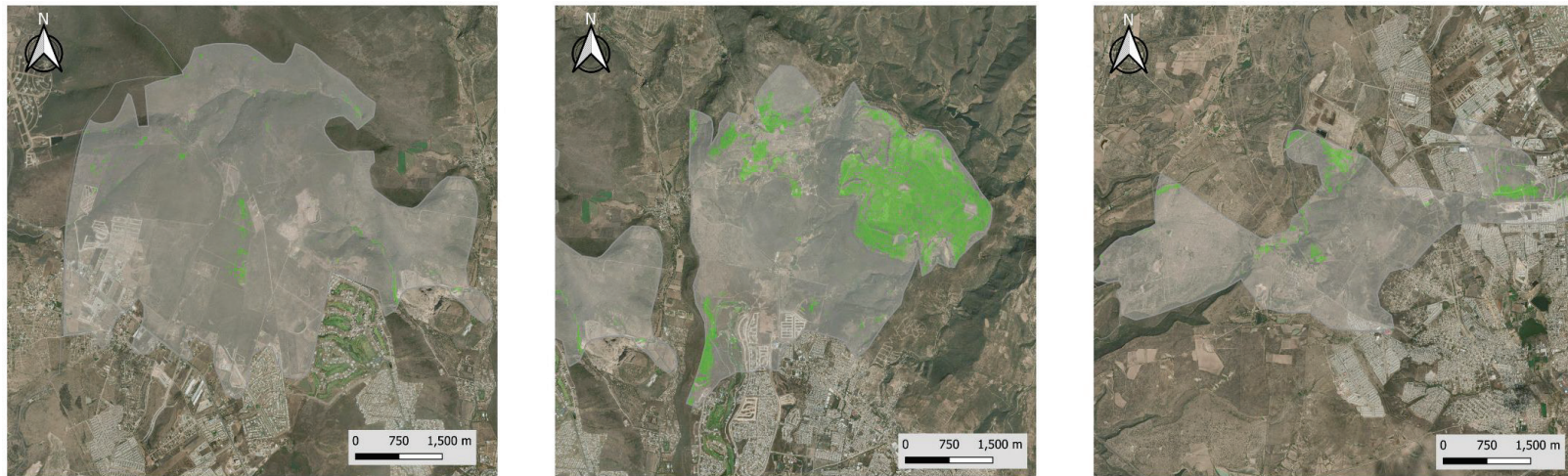


Figura 8. Ubicación óptima para la implementación de estanques de infiltración 1-3.

Bajo estos criterios, se han identificado 0.25 km² (25 ha) en el polígono 1, 3.85 km² (385 ha) en el polígono 2, y 0.52 km² (52 ha) en el polígono 3 para la implementación óptima de cuencas y estanques de infiltración; mientras que se han identificado 9.60 km² (960 ha) en el polígono 1, 6.52 km² (652 ha) en el polígono 2, y 3.2 km² (320 ha) en el polígono 3 para la implementación óptima de tinas, zanjas y terrazas.

Lo anterior representa una extensión acumulada, dentro de los límites del AVL, de 19.32 km² (1,932 ha) para la construcción de acciones como tinas, zanjas y terrazas (figura 7) y 4.62 km² (462 ha) para la construcción de estanques de infiltración (figura 8). Lo que implica la existencia de una superficie total de 23.94 km² (2,394 ha) del AVL, en la que se podrían implementar zanjas, tinas, terrazas y estanques de infiltración, encaminadas a mitigar la sobreexplotación del acuífero.

4. Discusión

En 1991, Hernández-Laloth propuso un modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del sistema acuífero del Valle de León, el cual continúa siendo utilizado por la CONAGUA como referencia fundamental para su encuadre hidrogeológico (véase CONAGUA, 2024). En dicho estudio, el autor identificó mediante el análisis de la litología, la topografía, las mediciones piezométricas, los manantiales, los pozos brotantes y el flujo base, que la región ubicada al noroeste del AVL representaba la zona con mayor potencial de recarga. Más recientemente, la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG, 2018) elaboró un mapa de zonas de recargas de acuíferos del estado de Guanajuato, considerando variables como la pendiente, la textura del suelo, la conductividad hidráulica, la litología y la densidad de drenaje. En dicho estudio se identificaron áreas poco extensas con alto potencial de recarga al suroeste del acuífero, en los márgenes del río Turbio, así como zonas con potencial medio en la porción occidental.

Destaca que los resultados obtenidos en la presente investigación coinciden con la zonificación de áreas de recarga propuesta por Hernández-Laloth (1991); sin embargo, presentan ligeras discrepancias con el mapa elaborado por la CEAG, particularmente en la zona sur del acuífero, en los márgenes del río Turbio, donde no se identificaron áreas con alta aptitud para la recarga. Derivado de lo anterior, se considera pertinente que, en estudios orientados específicamente a determinar la viabilidad de la implementación de acciones locales y de pequeña escala para la recarga hídrica, se elabore cartografía con un mayor nivel de detalle, así como integrar en el análisis multicriterio la mayor cantidad posible de factores determinantes en los procesos de infiltración, tales

como los rasgos geomorfológicos, la cobertura vegetal, el uso de suelo y la distribución espacial de la precipitación en el área de estudio.

Los resultados obtenidos han demostrado, por un lado, la utilidad de los sensores remotos, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y los métodos de análisis multicriterio (MCDA) como herramientas eficaces para la delimitación de zonas potenciales de recarga y la identificación de sitios viables para la implementación de acciones de captación e infiltración. Asimismo, resaltan su pertinencia como soporte técnico para el diseño de políticas públicas orientadas a la adopción de sistemas adaptativos de recarga, los cuales podrían contribuir a mitigar la presión sobre el acuífero.

Por otro lado, los resultados evidencian la importancia de actualizar periódicamente la zonificación de las áreas de recarga, dado que algunos de los parámetros considerados son de carácter dinámico y, en muchos casos, dependen directamente de la actividad antropogénica, como el uso de suelo y la cobertura vegetal, los cuales pueden cambiar en periodos relativamente cortos de tiempo y, en consecuencia, alterar la delimitación de las zonas de recarga. Relativo al análisis multicriterio, se consideró la participación de seis expertos para la ponderación de las capas temáticas, partiendo del supuesto de que un mayor número de especialistas reduce el sesgo en las ponderaciones. No obstante, dicho sesgo no puede eliminarse por completo y representa una limitación inherente a este tipo de análisis.

Cabe destacar que, si bien las etapas metodológicas propuestas en esta investigación para identificar las acciones y los sitios más viables pueden desarrollarse con distintos niveles de profundidad técnica en función de las capacidades y los objetivos específicos de cada proyecto, resultará conveniente llevar a cabo campañas de exploración de campo

que permitan corroborar variables in situ que confirmen la aplicabilidad de las técnicas de recarga propuestas, como la capacidad de infiltración del suelo y la conductividad hidráulica a saturación (mediante el uso de infiltrómetros, permeámetros o anillos). Estas mediciones serían de particular utilidad en caso de que se busque estimar la recarga potencial al acuífero derivada de las acciones propuestas. Asimismo, como etapa posterior a la identificación de las zonas de recarga y de las acciones más viables, se recomienda la realización de simulaciones hidrológicas que permitan evaluar si el agua derivada de las acciones de recarga propuestas alcanza efectivamente el acuífero o permanece en la zona no saturada, lo cual contribuiría a incrementar la confiabilidad de los resultados y la efectividad de las intervenciones planteadas.

Finalmente, se propone como línea de investigación la exploración de esquemas de incentivos y mecanismos de financiamiento orientados a facilitar la implementación de acciones de recarga en el AVL, tales como programas de pago por servicios ambientales, mecanismos de compensación ambiental o esquemas comunitarios.

5. Conclusiones

Se ha propuesto una metodología compuesta de cinco etapas para identificar las zonas potenciales de recarga hídrica al AVL mediante un análisis multicriterio: 1) identificación de criterios que determinan la recarga hídrica, 2) desarrollo de capas temáticas para los criterios identificados, 3) reclasificación de las capas temáticas de acuerdo con su aptitud para la recarga, 4) ponderación de los criterios para definir su importancia en el proceso de recarga, y 5) superposición de las capas

temáticas reclasificadas considerando su ponderación para determinar las zonas de recarga.

Para el caso de estudio del AVL, los resultados del análisis AHP demostraron que el parámetro de mayor relevancia en el proceso de recarga al AVL es el uso de suelo y cobertura vegetal (20.3%), seguido de la litología (15.0%), pendiente del terreno (13.6%), densidad de drenaje (11.7%), precipitación (11.6%), tipo de suelo (11.0%), densidad de lineamientos (10.2%), y rasgos geomorfológicos (6.6%).

El mapa de aptitud para la recarga hídrica al AVL demuestra la existencia de 453.01 km² de superficie con alto potencial de recarga hídrica, ubicada en su mayoría en la región de Los Altos de Jalisco y en las planicies aluviales del Valle de León; identificado así los sitios en los que se podrían instrumentar acciones de recarga que incrementen la capacidad de infiltración natural actual. Así como 679.53 km² con capacidad media, en los cuales, si bien las condiciones naturales no presentan la mayor capacidad de recarga, podrían implementarse medidas que mejoren las condiciones actuales y, en consecuencia, la capacidad de recarga.

Se identifica que las acciones de captación de agua de lluvia (terrazas, zanjas y tinas), y cuencas y estanques de infiltración, son las acciones más viables para ser implementadas como medidas para mitigar la sobreexplotación del AVL, seguido de represas de control/gaviones de pequeñas dimensiones, liberación controlada y pozos de recarga someros.

Se sugiere que los resultados obtenidos aportan una base sólida para la planificación de estrategias de gestión hídrica en el AVL, al identificar mediante un análisis multicriterio las zonas con alto potencial para la recarga natural y aquellas que, aunque menos aptas, podrían mejorarse mediante acciones de restauración y conservación. La

metodología aplicada, sustentada en investigaciones afines, la utilización de herramientas tecnológicas avanzadas, y la experiencia de expertos en hidrología y gestión hídrica familiarizados con el área de estudio, proporciona un enfoque integral y replicable en otros sitios con problemáticas similares, lo que facilita la toma de decisiones informadas para la conservación y recuperación del recurso hídrico. Este estudio representa, por lo tanto, un avance significativo en los esfuerzos por migrar hacia una gestión sustentable del agua en la región, aportando elementos útiles para llevar a cabo la selección objetiva de acciones adaptativas de captación e infiltración hídrica, y disminuir con ello el estrés hídrico de aquellos centros urbanos altamente dependientes de las aguas subterráneas.

6. Agradecimientos

A la Universidad de Guanajuato, así como a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI).

7. Financiamiento

Se reconoce la beca otorgada por SECIHTI en el marco de la Convocatoria de Becas Nacional (Tradicional) 2022-2 con clave 2022-000018-02NACF, la cual contribuyó a la realización de este trabajo; no obstante, el presente artículo no contó con financiamiento específico para su desarrollo.

8. Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés relacionados con la presente investigación.



9. Declaración de uso de IA

Los autores declaran la utilización de la herramienta de inteligencia artificial ChatGPT de manera limitada y exclusivamente para la revisión de estilo y mejora puntual de la redacción del manuscrito. Esta herramienta no fue empleada para la generación de contenido, análisis o conclusiones, los cuales son responsabilidad íntegra de los autores.

10. Referencias

- Achu, A., Reghunath, R., & Thomas, J. (2019). Mapping of groundwater recharge potential zones and identification of suitable site-specific recharge mechanisms in a tropical river basin. *Earth Systems and Environment*, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s41748-019-00138-5>
- Alam, F., Azmat, M., Zarin, R., Ahmad, S., Raziq, A., Hsu-Wen, V., Kim-Anh, N., & Yuei-An, L. (2022). Identification of potential natural aquifer recharge sites in Islamabad, Pakistan, by integrating GIS and RS techniques. *Remote Sensing*, 14, 1–26. <https://doi.org/10.3390/rs14236051>
- Alam, S., Borthakur, A., Ravi, S., Gebremichael, M., & Mohanty, S. (2021). Managed aquifer recharge implementation criteria to achieve water sustainability. *Science of the Total Environment*, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144992>
- Ayuntamiento de León. (2022). *Programa de gobierno municipal de León, Guanajuato, 2021-2024. –versión integral–*. Ayuntamiento de León. https://iplaneg.guanajuato.gob.mx/seieg/wp-content/uploads/2022/05/Programa_de_Gobierno_de_Leon_2021_2024__Aprobado_por_Ayto_16dic__1642188454.pdf

Ayuntamiento de León. (2022, 8 de junio). Contarán comunidades rurales con 32 bordos más para captación de agua. Prensa León. <https://enterate.leon.gob.mx/contaran-comunidades-rurales-con-32-bordos-mas-para-captacion-de-agua/>

Biswajit, D., & Subodh, C. (2019). Assessment of groundwater recharge and its potential zone identification in groundwater-stressed Goghat-I block of Hugli District, West Bengal, India. *Environment, Development and Sustainability*, 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00457-7>

Boughariou, E., Saidi, S., Eddine, A., Khanfir, H., Zarehloul, Y., & Bouri, S. (2015). Mapping recharge potential zones and natural recharge calculation: Study case in Sfax region. *Arabian Journal of Geosciences*, 8, 5203–5221. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1512-x>

Bravo, L., Sáenz, D., Alatorre, L., Priego, Á., Torres, M., & Granados, A. (2015). Identificación de áreas potenciales de recarga hídrica al acuífero Cuauhtémoc (Chihuahua), mediante una evaluación espacial multi-criterio. *Memorias de resúmenes en extenso SELPER-XXI-México-UACJ-2015*, 1–6. https://www.researchgate.net/publication/302509208_Identificacion_de_areas_potenciales_de_recarga_hidrica_al_acuifero_Cuauhtemoc_Chihuahua_mediante_una_evaluacion_espacial_multi-criterio

California Department of Transportation. (2020). *Infiltration basin. Design guidance*. Caltrans Division of Design. <https://dot.ca.gov/-/media/dot-media/programs/design/documents/8-dg-infiltration-basins-a11y.pdf>

- Casanova, J., Devau, N., & Pattenati, M. (2016). Managed aquifer recharge: An overview of issues and options. En A. Jakerman, O. Barreteau, R. Hunt, J. Rinaudo, & A. Ross (Eds.), *Integrated groundwater management* (pp. 413-434). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9_16
- Chan, P., & Myeong-Hun, L. (2019). Prioritizing sustainable city indicators for Cambodia. *Urban Science*, 3(104), 1–32. <https://doi.org/10.3390/urbansci3040104>
- Chowdhury, A., Jha, M., & Chowdary, V. (2010). Delineation of groundwater recharge zones and identification of artificial recharge sites in West Medinipur District, West Bengal, using RS, GIS and MCDM techniques. *Environmental Earth Sciences*, 59, 1209–1222. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0110-9>
- Chowdhury, A., Jha, M., Chowdary, V., & Mal, B. (2009). Integrated remote sensing and GIS-based approach for assessing groundwater potential in West Medinipur district, West Bengal, India. *International Journal of Remote Sensing*, 30(1), 231–250. <https://doi.org/10.1080/01431160802270131>
- CEAG, Comisión Estatal del Agua de Guanajuato. (2018). Zonas de recarga de acuíferos del estado de Guanajuato. https://agua.guanajuato.gob.mx/espacioacuoso/pdf/3_poster_zonas_de_recarga.pdf
- CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2022). *Estadísticas del agua en México 2021*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://files.conagua.gob.mx/conagua/publicaciones/Publicaciones/EAM%202021.pdf>

CONAGUA, Comisión Nacional del Agua. (2024). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de León (1113), Estado de Guanajuato*. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/guanajuato/DR_1113.pdf

Congreso del Estado de Guanajuato. (2023). *Dictamen que la Comisión de Desarrollo Urbano y Obra Pública presenta al Pleno del Congreso, de la propuesta de punto de acuerdo formulada por la diputada Irma Leticia González Sánchez integrante del Grupo Parlamentario del Partido Morena a efecto de exhortar a los 46 ayuntamientos del Estado de Guanajuato, para que fomenten la cultura del cuidado del agua entre sus ciudadanos, y a la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato para que revise, evalúe, actualice y dé seguimiento al Programa Estatal Hidráulico (ELD 315/LXV-PPA)*. <https://congresogto.s3.amazonaws.com/uploads/dictamen/archivo/6038/65131021.pdf>

Cordoal, L., & De Alquino, P. (2009). *Barraginhas: Água de chuva para todos* (1ª ed.). Embrapa Informação Tecnológica. <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/256599/1/ABCBarraginhasaguadechuvaparatodosed012009.pdf>

Dillon, P. (2005). Future management of aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, 13, 313–316. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0413-6>

- Dillon, P., Pavelic, P., Page, D., Beringen, H., & Ward, J. (2009). *Managed aquifer recharge: An introduction*. National Water Commission. https://recharge.iah.org/files/2016/11/MAR_Intro-Waterlines-2009.pdf
- Dillon, P., Vanderzalam, J., Sidhu, J., Page, D., & Chadha, D. (2014). *A water quality guide to managed aquifer recharge in India*. Department of Foreign Affairs and Trade/UNESCO. <https://recharge.iah.org/files/2016/11/A-Water-Quality-Guide-to-MAR-in-India-2014.pdf>
- Dobhal, R., Uniyal, D., Chandra, N., Grischek, T., & Sandhu, C. (2019). *Guidelines on bank filtration for water supply in India*. Department of Science & Technology (DST).
- Espinoza, J. (2022). *Diseño de obra civil como aplicación de la gestión de recarga de acuíferos en la comunidad El Laurel, Guanajuato*. Universidad de Guanajuato, División de Ingenierías. <https://www.repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/6280>
- Esri, Environmental Systems Research Institute. (2024, 9 de noviembre). *Weighted overlay (Spatial Analyst)*. Resources ArcGIS Pro. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/weighted-overlay.htm>
- FAO, Food and Agriculture Organization. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b54d0348-dfce-413c-bd5d-142b3a14a049/content>

Figueroa, D. (2020). El ITESO lidera proyecto para diseñar modelos de gestión del agua para cinco ciudades. *ITESO, Universidad Jesuita de Guadalajara*.

https://www.iteso.mx/web/general/detalle?group_id=22113815

Gale, I. (2005). *Strategies for managed aquifer recharge (MAR) in semi-arid areas*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).

<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000143819>

Gobierno del Estado de Guanajuato. (2011). *Plan estatal de desarrollo 2030*.

https://iplaneg.guanajuato.gob.mx/ped2040/doc/Antecedentes/PE D2030_s%C3%ADntesis.pdf

Gobierno del Estado de Guanajuato. (2011). *Programa estatal de cambio climático Guanajuato*. Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato.

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/316782/PEACC_Guanajuato.pdf

Godinez, J. (2022). *Paradigm lost – On the value of lost causes in transforming cities and water systems' development pathways*. IHE Delft Institute for Water Education.

<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000382416>

Goepel, K. (2018). Implementation of an online software tool for the Analytical Hierarchy Process (AHP-OS). *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 10(3), 469–487.

<https://doi.org/10.13033/ijahp.v10i3.590>

- Hani, H., Nour El Din, M., Khalifa, A., & Elalfy, E. (2023). Development of suitability map for managed aquifer recharge: Case study, West Delta, Egypt. *Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 72(6), 868–884. <https://doi.org/10.2166/aqua.2023.177>
- Hernández-Laloth, N. (1991). *Modelo conceptual del funcionamiento hidrodinámico del sistema acuífero del Valle de León*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería.
- Ibrahim, M., & Shatnawi, A. (2022). Delineating potential sites for artificial groundwater recharge using a mathematical approach to remote sensing and GIS techniques. *Water Supply*, 22(4), 4230–4246. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.046>
- INEGI, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (1998). *Estudio hidrológico del Estado de Guanajuato*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825222253/702825222253_1.pdf
- Jena, S., Kumar, R., Ramadas, M., Prasad, B., & Kishore, S. (2020). Delineation of groundwater storage and recharge potential zones using RS-GIS-AHP: Application in arable land expansion. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 1–53. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100354>
- Kaliraj, S., Chandrasekar, N., & Magesh, N. (2014). Identification of potential groundwater recharge zones in Vaigai upper basin, Tamil Nadu, using GIS-based analytical hierarchical process (AHP) technique. *Arabian Journal of Geosciences*, 1–17. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-0849-x>

- Kumar, T., Kant, A., & Jhariya, D. (2016). Multi-criteria decision analysis for planning and management of groundwater resources in Balod District, India. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5462-3>
- Maddrell, S., & Neal, I. (2013). *Building sand dams: A practical guide*. Excellent Development. https://www.imembersdb.com/iMembersDB/Accounts/10651/Downloads/0/Technical_Guides/building-sand-dam.pdf
- Matus, O., Faustino, J., & Jiménez, F. (2009). *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica. Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. <https://cenida.una.edu.ni/relectronicos/REN10M433.pdf>
- Mendoza, E. (2017). Clasificación de tecnologías MAR. En Ó. Escolero, C. Gutiérrez, & E. Mendoza (Eds.), *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (pp. 81–99). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. <https://www.gob.mx/imta/documentos/manejo-de-la-recarga-de-acuiferos-un-enfoque-hacia-latinoamerica>
- Ministry of the Environment. (2004). *Model project to combat desertification in NARE village, Burkina Faso. Technical report of the subsurface dam*. Global Environmental Issues Division, Ministry of the Environment, Overseas Environmental Cooperation Center. https://www.env.go.jp/earth/report/h16-08/eng/PDF/full_e.pdf
- National Ground Water Foundation. (2022). *Groundwater overuse and depletion*. <https://groundwater.org/threats/overuse-depletion/>

- NRMMC, EPHC, & NHMRC. (2009). *National water quality management strategy: Australian guidelines for water recycling: Managing health and environmental risks (Phase 2) managed aquifer recharge*. Australian Government.
<https://recharge.iah.org/files/2016/11/Australian-MAR-Guidelines-2009.pdf>
- Ojeda-Olivares, E., Belmonte-Jiménez, S., & Ladrón de Guevara-Torres, M. (2017). Evaluación de obras de recarga hídrica construidas por comunidades autóctonas en la subcuenca del Valle de Ocotlán, Oaxaca, México. En Ó. Escolero, C. Gutiérrez, & E. Mendoza (Eds.), *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (pp. 103-137). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).
<https://www.gob.mx/imta/documentos/manejo-de-la-recarga-de-acuíferos-un-enfoque-hacia-latinoamerica>
- Peñuela, L., & Carrillo, J. (2013). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: Centro-sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones Geográficas*, (81), 18–32. <https://doi.org/10.14350/rig.30518>
- Pizarro, R., Flores, J., Sangüesa, C., Martínez, E., & García, J. (2004). *Manual de opciones tecnológicas. Diseño de obras para la conservación de agua y suelos*. Sociedad Estándares de Ingeniería para Aguas y Suelos Ltda. https://www.cuhs.utralca.cl/exccta/Docs/pdf/Publicaciones/libros/disenio_de_obras_para_la_conservacion_de_aguas_y_suelos.pdf

- Rahman, M., Rusteberg, B., Gogu, R., Ferreira, J., & Sauter, M. (2012). A new spatial multi-criteria decision support tool for site selection for implementation of managed aquifer recharge. *Journal of Environmental Management*, 99, 61–75. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.003>
- Saaty, T. (1980). *The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill.
- Salameh, E., Abdallat, G., & van der Valk, M. (2019). Planning considerations of managed aquifer recharge (MAR) projects in Jordan. *Water*, 11(182), 1–18. <https://doi.org/10.3390/w11020182>
- SMAOT, Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial. (2023). Subsistema de información geográfica, medio ambiente y ordenamiento territorial y urbano (SIGMAOT). <http://mapas.ecologia.guanajuato.gob.mx/sigmaot/>
- SGM, Servicio Geológico Mexicano. (2024, 5 de mayo). GeoInfoMex. <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/#>
- Silva-Hidalgo, H., González-Núñez, M., Pinales, A., & Villalobos, A. (2017). 7. Proyecto de manejo de recarga de acuíferos en los Ojos del Chuvíscar, Chihuahua, México. En Ó. Escolero, C. Gutiérrez, & E. Mendoza (Eds.), *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica* (pp. 191-225). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). <https://www.gob.mx/imta/documentos/manejo-de-la-recarga-de-acuiferos-un-enfoque-hacia-latinoamerica>

- Singh, A., Panda, S., Kumar, K., & Shekmar, C. (2013). Artificial groundwater recharge zones mapping using remote sensing and GIS: A case study in Indian Punjab. *Environmental Management*, 52, 61–71. <https://doi.org/10.1007/s00267-013-0101-1>
- SAPAL, Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León. (2023, 12 de diciembre). Acceso universal al agua. <https://www.sapal.gob.mx/proyecto-prioritario?id=63013>
- Tagle, D., & Azamar, A. (2020). Beneficios asociados al uso de ecotecias en comunidades rurales de Guanajuato, México. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 33(1), 112–132.
- Tagle, D., Azamar, A., & Caldera, A. (2018). Cosecha de agua de lluvia como alternativa para la resiliencia hídrica en León, Guanajuato: Una reflexión desde la nueva cultura del agua. *Expresión Económica*, 40, 5–23. <https://doi.org/10.32870/eera.vi40.939>
- Tagle-Zamora, D. (2020). Contribuciones socio-hídricas de los sistemas de captación de agua de lluvia en Guanajuato, México. *WATERLAT-GOBACIT*, 7(4), 38–67. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6944214>
- Tahoe Regional Planning Agency. (2014). *The Tahoe Regional Planning Agency (TRPA) Best Management Practices (BMP) Handbook*. Kingsbury, United States: The Tahoe Regional Planning Agency. https://tahoebmp.org/Documents/BMPHandbook/BMP_Handbook.pdf
- Technische Universität Dresden. (2018, 16 de mayo). *Innovative groundwater solutions (INOWAS)*. MAR METHODS. <https://www.inowas.com/mar-methods/>

- Yuan, J., Van Dyke, M., & Huck, P. (2016). Water reuse through managed aquifer recharge (MAR): Assessment of regulations/guidelines and case studies. *Water Quality Research Journal of Canada*, 51(4), 357–376. <https://doi.org/10.2166/wqrjc.2016.022>
- Zghibi, A., Mirchi, A., Haythem, M., Merzougui, A., Zouhri, L., Taupin, J.-D., ... Tarhouni, J. (2020). Using analytical hierarchy process and multi-influencing factors to map groundwater recharge zones in a semi-arid Mediterranean coastal aquifer. *Water*, 12, 1–27. <https://doi.org/10.3390/w12092525>
- Zhang, H., Xu, Y., & Kanyere, T. (2020). A review of the managed aquifer recharge: Historical development, current situation and perspectives. *Physics and Chemistry of the Earth*, 118–119, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102887>
- Zheng, Y., Ross, A., Villholth, K., & Dillon, P. (2021). *Managing aquifer recharge: A showcase for resilience and sustainability*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379962>
- Zimik, H., Angchuk, T., Kumar, A., Ranjan, R., Wanjari, N., & Basnett, S. (2022). GIS-based identification of potential watershed recharge zones using analytic hierarchy process in Sikkim Himalayan region. *Applied Water Science*, 12(248), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01758-5>