Estrategia de gestión ambiental para la conservación de zonas potenciales de recarga de acuíferos en la vereda Barandillas, Zipaquirá

Mayury Yuleimi Méndez Bernal

Universitaria Agustiniana - Uniagustiniana

Facultad de Ingeniería

Especialización en Gestión Ambiental para el Desarrollo Sostenible

Bogotá, D.C.

2026

Estrategia de gestión ambiental para la conservación de zonas potenciales de recarga de acuíferos en la vereda Barandillas, Zipaquirá

Mayury Yuleimi Méndez Bernal

Laura Carolina Díaz Ospina

Tutora

Trabajo para optar al título de Especialista en Gestión Ambiental para el Desarrollo Sostenible

Universitaria Agustiniana - Uniagustiniana

Facultad de Ingeniería

Especialización en Gestión Ambiental para el Desarrollo Sostenible

Bogotá, D.C.

2026

Dedicatoria

A mi familia por su paciencia y apoyo.

Agradecimientos

Agradezco a la Universitaria Agustiniana y a la docente orientadora por el acompañamiento académico brindado durante el desarrollo del proyecto. También agradezco a las personas e instituciones que facilitaron información técnica y cartográfica para el análisis ambiental de la vereda Barandillas.

Tabla de contenido

Resumen (Abstract) 11

Abstract (Resumen) 12

Introducción 13

Planteamiento del problema 14

Descripción del problema 14

Formulación del problema 16

Justificación 17

Objetivos 19

Objetivo General 19

Objetivos Específicos 19

Marco Teórico 20

Ciclo hidrológico y agua subterránea 20

Acuíferos, infiltración y recarga 21

Hidrogeología de las zonas de recarga 22

Zonas potenciales de recarga 23

Factores que condicionan la recarga 23

Metodología para la delimitación de zonas potenciales de recarga según la Resolución 0017 de 2026 24

Impactos de las actividades antrópicas sobre las zonas de recarga hídrica 26

Evaluación de impactos ambientales sobre las zonas de recarga hídrica 28

Gestión ambiental del recurso hídrico subterráneo 29

Diseño metodológico 32
Tipo de enfoque 32
Población 32
Muestra y técnica de muestreo 33
Técnicas e instrumentos de recolección de datos 33
Cuadro del diseño metodológico 36
Desarrollo del estudio 37
Localización del área de estudio 37
Identificación de zonas potenciales de recarga 39
Insumos 39
Procesamiento de variables biofísicas y geoestructurales 40
Normalización de variables 42
Ponderación multicriterio CRITIC-AHP 43
Cálculo del índice de zonas potenciales de recarga 45
Reclasificación del índice 45
Evaluación de aspectos e impactos ambientales 46
Identificación de actividades antrópicas 46
Evaluación de impactos mediante matriz de Arboleda 49
Resultados y análisis de resultados 51
Resultado del índice de zonas potenciales de recarga 51
Zonas potenciales de recarga identificadas 51
Análisis de las actividades antrópicas sobre las zonas de recarga 53
Matriz de evaluación de impactos ambientales 56

Priorización de impactos 59
Propuesta de mejora 61
Estrategia de gestión ambiental para conservación de zonas potenciales de recarga .. 61
Objetivo de la estrategia 61
Alcance 61
Soporte normativo de la estrategia 62
Línea base para la formulación de la estrategia 63
Programas de gestión ambiental propuestos 64
Priorización de acciones 68
Conclusiones 69
Recomendaciones 71
Referencias 73
Anexos 77
Anexo A. Mapas de las variables procesadas 77

Lista de Figuras

Figura 1 Ciclo hidrológico 21

Figura 2 Localización de la vereda Barandillas en el municipio de Zipaquirá 38

Figura 3 Ubicación del área de estudio sobre imagen satelital 39

Figura 4 Cobertura vegetal del área de estudio 47

Figura 5 Mapa continuo del índice de zonas potenciales de recarga IZPR 52

Figura 6 Mapa de zonas de recarga potenciales para la vereda Barandillas 53

Figura 7 Relación entre actividades antrópicas y zonas potenciales de recarga 54

Figura 8 Ráster de cobertura normalizado 77

Figura 9 Ráster de densidad de drenaje normalizado 78

Figura 10 Ráster ITH normalizado 79

Figura 11 Ráster de infiltración del suelo normalizado 80

Figura 12 Ráster litológico normalizado 81

Figura 13 Rásteres estructurales normalizados 82

Lista de Tablas

Tabla 1 Componentes y subcomponentes descritos en la metodología 25

Tabla 2 Cuadro del diseño metodológico 36

Tabla 3 Insumos cartográficos utilizados en el estudio 40

Tabla 4 Variables aplicadas para la identificación de zonas potenciales de recarga 41

Tabla 5 Ejemplo de transformación de valores de 1 a 5 hacia escala 0 a 1 42

Tabla 6 Pesos objetivos obtenidos mediante el método CRITIC 43

Tabla 7 Matriz de comparación por pares AHP utilizada para el juicio experto 44

Tabla 8 Pesos subjetivos AHP y verificación de consistencia 44

Tabla 9 Pesos finales integrados CRITIC-AHP 45

Tabla 10 Rangos de reclasificación del índice de zonas potenciales de recarga 46

Tabla 11 Actividades antrópicas consideradas en la evaluación de impactos 48

Tabla 12 Criterios utilizados para la valoración de impactos ambientales 49

Tabla 13 Rangos de interpretación de la calificación ambiental 50

Tabla 14 Área por categoría de recarga potencial 51

Tabla 15 Identificación de aspectos e impactos ambientales evaluados 57

Tabla 16 Valoración de impactos ambientales mediante metodología de Arboleda 58

Tabla 17 Priorización de impactos ambientales identificados 59

Tabla 18 Normatividad de soporte para la estrategia de gestión ambiental 62

Tabla 19 Resumen de línea base para la estrategia de gestión ambiental 64

Tabla 20 Programa 1 - Conservación de zonas de recarga potencial alta y media 65

Tabla 21 Programa 2 - Manejo agropecuario sostenible en zonas de recarga 65

Tabla 22 Programa 3 - Control de impermeabilización y expansión urbana 66

Tabla 23 Programa 4 - Restauración de suelos desnudos y degradados 66

Tabla 24 Programa 5 - Gestión en zonas industriales, comerciales y de actividades extractivas 67

Tabla 25 Programa 6 - Seguimiento, educación ambiental y participación comunitaria 67

Tabla 26 Priorización de acciones de la estrategia de gestión ambiental 68

Resumen (Abstract)

El presente trabajo formuló una estrategia de gestión ambiental para la conservación de zonas potenciales de recarga de acuíferos en la vereda Barandillas, municipio de Zipaquirá, Cundinamarca. El estudio se desarrolló a partir de información secundaria, cartografía temática y análisis espacial en Sistemas de Información Geográfica. La identificación de zonas potenciales de recarga se realizó con base en la metodología adoptada por la Resolución 0017 de 2026 y la Guía Metodológica para la Identificación de Zonas Potenciales de Recarga de Acuíferos, integrando variables de litología, cobertura de la tierra, suelos, fallas, densidad de lineamientos, densidad de drenaje, conectividad e Índice Topográfico de Humedad (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2026). Los criterios fueron normalizados en escala 0 a 1 y ponderados mediante la combinación de los métodos CRITIC y AHP. El índice final presentó valores entre 0,0638 y 0,7371, por lo cual se identificaron categorías de recarga potencial muy baja, baja, media y alta, sin presencia de categoría muy alta. Posteriormente, se analizaron las actividades antrópicas presentes en el área y se valoraron sus impactos potenciales mediante la matriz de Arboleda González (2008). Los resultados permitieron priorizar impactos asociados a impermeabilización, compactación del suelo, degradación de coberturas, contaminación difusa y alteración de la infiltración. Finalmente, se propusieron lineamientos de manejo, conservación, restauración y seguimiento ambiental orientados a proteger las zonas de mayor potencial de recarga y mayor presión antrópica.

Palabras clave: zonas potenciales de recarga, agua subterránea, gestión ambiental, matriz de Arboleda, Barandillas.

Abstract (Resumen)

The present study formulated an environmental management strategy for the conservation of potential aquifer recharge zones in the Barandillas village, municipality of Zipaquirá, Cundinamarca. The study was developed using secondary information, thematic cartography, and spatial analysis in Geographic Information Systems. The identification of potential recharge zones was carried out based on the methodology adopted by Resolution 0017 of 2026 and the Methodological Guide for the Identification of Potential Aquifer Recharge Zones, integrating variables such as lithology, land cover, soils, faults, lineament density, drainage density, connectivity, and the Topographic Wetness Index (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2026). The criteria were normalized on a scale from 0 to 1 and weighted through the combination of the CRITIC and AHP methods. The final index presented values between 0.0638 and 0.7371; therefore, very low, low, medium, and high potential recharge categories were identified, with no presence of the very high category. Subsequently, the anthropogenic activities present in the area were analyzed, and their potential impacts were assessed using the Arboleda González matrix (2008). The results made it possible to prioritize impacts associated with impermeabilization, soil compaction, vegetation cover degradation, diffuse pollution, and alteration of infiltration processes. Finally, management, conservation, restoration, and environmental monitoring guidelines were proposed to protect the areas with the highest recharge potential and the greatest anthropogenic pressure.

Keywords: potential recharge zones, groundwater, environmental management, Arboleda matrix, Barandillas.

Introducción

El agua subterránea constituye una reserva estratégica para el abastecimiento humano, el desarrollo productivo y la regulación de los ecosistemas, especialmente en territorios donde las fuentes superficiales presentan alta presión por variabilidad climática, crecimiento urbano y transformación del uso del suelo. En este contexto, la identificación y conservación de zonas potenciales de recarga de acuíferos se convierte en una herramienta técnica para orientar decisiones de gestión ambiental y ordenamiento territorial.

La vereda Barandillas, ubicada en el municipio de Zipaquirá, presenta condiciones geológicas, geomorfológicas y de cobertura que pueden favorecer procesos de infiltración hacia el subsuelo. Sin embargo, en el mismo territorio se desarrollan actividades antrópicas como cultivos, ganadería, áreas industriales o comerciales, tejido urbano, canales modificados y zonas asociadas a intervención del suelo, las cuales pueden generar presión sobre la capacidad de infiltración y sobre la calidad potencial del agua que ingresa al sistema subterráneo.

El presente trabajo se desarrolló con base en la metodología establecida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el IDEAM y el Servicio Geológico Colombiano para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos adoptada bajo la Resolución 0017 de 2026 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2026). La aplicación se apoyó en herramientas SIG, análisis multicriterio, ponderación mediante CRITIC y AHP, y evaluación de impactos ambientales mediante la matriz de Arboleda González (2008). El documento presenta el desarrollo del estudio, los resultados obtenidos, el análisis de las presiones antrópicas y una propuesta de mejora orientada a la conservación de las zonas de recarga identificadas. El alcance

del estudio se centra en la delimitación espacial de zonas potenciales de recarga y en la formulación de lineamientos de gestión ambiental.

Planteamiento del problema

Descripción del problema

El recurso hídrico subterráneo constituye un componente esencial para la sostenibilidad ambiental y el desarrollo territorial, especialmente en zonas donde el abastecimiento de agua depende de los procesos de infiltración y recarga de acuíferos. En Colombia, la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) reconoce el agua subterránea como un elemento estratégico para garantizar la disponibilidad del recurso en el tiempo (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). A nivel internacional, la gestión del recurso hídrico se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, particularmente con el ODS 6 y el ODS 15. La relación entre ambos objetivos busca que la protección de los ecosistemas terrestres como bosques, humedales y zonas de páramo permitan asegurar la disponibilidad de agua en los acuíferos, ya que mediante su conservación se garantiza la continuidad de los procesos de infiltración y recarga, asegurando la integridad del recurso hídrico subterráneo (CEPAL, 2018).

Actualmente, la Sabana de Bogotá atraviesa una crisis de seguridad hídrica manifestada en periodos de racionamiento y una presión creciente sobre las fuentes superficiales. En 2024, la sequía agravada por el fenómeno de El Niño redujo de manera crítica los niveles de los embalses que abastecen la región, evidenciando la fragilidad de un modelo de suministro sustentado exclusivamente en fuentes superficiales y acelerando la búsqueda de alternativas en el recurso hídrico subterráneo (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2025). La vereda

Barandillas, en el municipio de Zipaquirá, refleja esta vulnerabilidad de manera crítica, ya que, si bien cuenta con un acueducto local, este presenta un servicio intermitente que no cubre la demanda poblacional, lo que ha llevado tanto a los habitantes del sector como a quienes desarrollan actividades económicas en la vereda a optar por la extracción directa de agua subterránea mediante la perforación de pozos profundos (Alcaldía Municipal de Zipaquirá, 2020).

La vereda Barandillas posee condiciones geológicas que sugieren la presencia de potencial acuífero. Al encontrarse ubicada en el flanco izquierdo del Sinclinal Suesca-Teusacá, afloran en su territorio formaciones de interés hidrogeológico cuya dirección de flujo se dirige hacia el centro del sinclinal, donde existe un alto aprovechamiento del recurso mediante la perforación de pozos, particularmente en el municipio de Tocancipá (Pérez Vega, 2021). Adicionalmente, el territorio presenta características biofísicas de piedemonte andino que favorecen los procesos de infiltración, como coberturas vegetales permanentes y suelos con permeabilidad activa. Sin embargo, también se evidencian actividades antrópicas como la minería subterránea y a cielo abierto, la agricultura intensiva de tomate y flores, la avicultura, la ganadería y la expansión urbana, las cuales generan presiones constantes sobre el recurso hídrico subterráneo y pueden deteriorar las zonas de recarga, provocando desde la remoción de la capa vegetal y la compactación del suelo, hasta el riesgo de contaminación difusa por el uso de agroquímicos y la disposición de residuos orgánicos.

A pesar de esta importancia y evidencia de potencial afectación sobre el recurso subterráneo, la información técnica disponible se limita a estudios regionales como el POMCA del Río Bogotá (2019) a escala 1:25.000, desarrollados con metodologías generales, los cuales resultan insuficientes para identificar con precisión las áreas de recarga a nivel local

(Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2019) y determinar estrategias de gestión para conservación de estas zonas. Frente a este vacío, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2026) expidió la Resolución 0017, la cual establece la guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2026). No obstante, al ser una norma de expedición reciente, su aplicación en contextos locales es aún inexistente, dejando a zonas como Barandillas en un estado de vulnerabilidad técnica.

Por lo tanto, la presente investigación busca implementar esta nueva metodología para identificar las zonas potenciales de recarga a un nivel de detalle mayor, verificar cómo las actividades antrópicas intervienen estas zonas críticas y establecer lineamientos o estrategias de gestión que contribuyan a la conservación del recurso hídrico subterráneo. La información generada puede servir como insumo base para la integración del POT de Zipaquirá y el POMCA del río Bogotá como instrumentos de gestión del territorio, dando cumplimiento a los lineamientos de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico y contribuyendo al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6 y 15 de la Agenda 2030.

Formulación del problema

¿Cómo podrían gestionarse las zonas potenciales de recarga de acuíferos en la vereda Barandillas del municipio de Zipaquirá de manera que se favorezca su conservación frente a las condiciones actuales del territorio?

Justificación

La presente investigación busca generar información técnica útil para fortalecer la gestión del recurso hídrico subterráneo a escala local, a partir de la delimitación de las zonas potenciales de recarga de acuíferos en la vereda Barandillas. En este sentido, el estudio busca contribuir al cierre de vacíos de información que aún existen entre los lineamientos técnicos definidos a nivel nacional y su aplicación en territorios específicos (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Desde el punto de vista técnico, la aplicación de la metodología establecida en la Resolución 0017 de 2026 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible permite avanzar en la identificación de zonas potenciales de recarga con un mayor nivel de detalle que el ofrecido por estudios regionales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2026). Esto favorece una mejor comprensión de la distribución espacial de las áreas con mayor capacidad de infiltración y de su relación con los usos actuales del suelo en el territorio.

Además, el estudio no solo delimita estas zonas, sino que también las relaciona con las actividades antrópicas presentes en la vereda Barandillas, lo que permite orientar acciones de manejo y conservación. De esta manera, la investigación no solo genera cartografía temática de detalle, sino que se enfoca en la formulación de una estrategia de gestión ambiental para la conservación de las zonas identificadas, ajustada a las condiciones reales del territorio.

En términos de planificación, los resultados del estudio pueden convertirse en un insumo técnico para apoyar la toma de decisiones, al aportar información de mayor detalle que puede complementar los análisis incluidos en instrumentos como el Plan de Ordenamiento Territorial (POT) del municipio de Zipaquirá y el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del río Bogotá

(POMCA). Esto favorece una mejor articulación entre el conocimiento técnico y los procesos de planificación del territorio.

Finalmente, la investigación se alinea con la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010) y con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente el ODS 6, enfocado en la gestión sostenible del agua, y el ODS 15, orientado a la conservación de los ecosistemas terrestres. Desde esta perspectiva, se reconoce que los acuíferos activos en zonas como la vereda Barandillas cumplen una función de regulación hídrica al amortiguar los periodos de sequía y aportar al suministro cuando las fuentes superficiales disminuyen. Por ello, conservar su función de recarga constituye una estrategia de adaptación climática de largo plazo, en relación con el ODS 13 (CEPAL, 2018). En consecuencia, el estudio aporta tanto al conocimiento técnico del territorio como a la generación de alternativas basadas en evidencia para la conservación y el manejo sostenible del recurso hídrico subterráneo.

Objetivos

Objetivo General

Formular una estrategia de gestión ambiental para la conservación de las zonas potenciales de recarga de acuíferos en la vereda Barandillas del municipio de Zipaquirá como base para el manejo sostenible del recurso hídrico subterráneo en el territorio.

Objetivos Específicos

Determinar las zonas potenciales de recarga de acuíferos en la vereda Barandillas aplicando la metodología establecida en la Resolución 0017 de 2026 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Evaluar los impactos potenciales de las principales actividades antrópicas presentes en la vereda Barandillas sobre las zonas potenciales de recarga de acuíferos determinadas, mediante la aplicación de una matriz sencilla de identificación y valoración de aspectos e impactos ambientales.

Establecer una estrategia de conservación para ecosistemas estratégicos que garanticen la integridad de los procesos de infiltración y recarga hídrica.

Marco Teórico

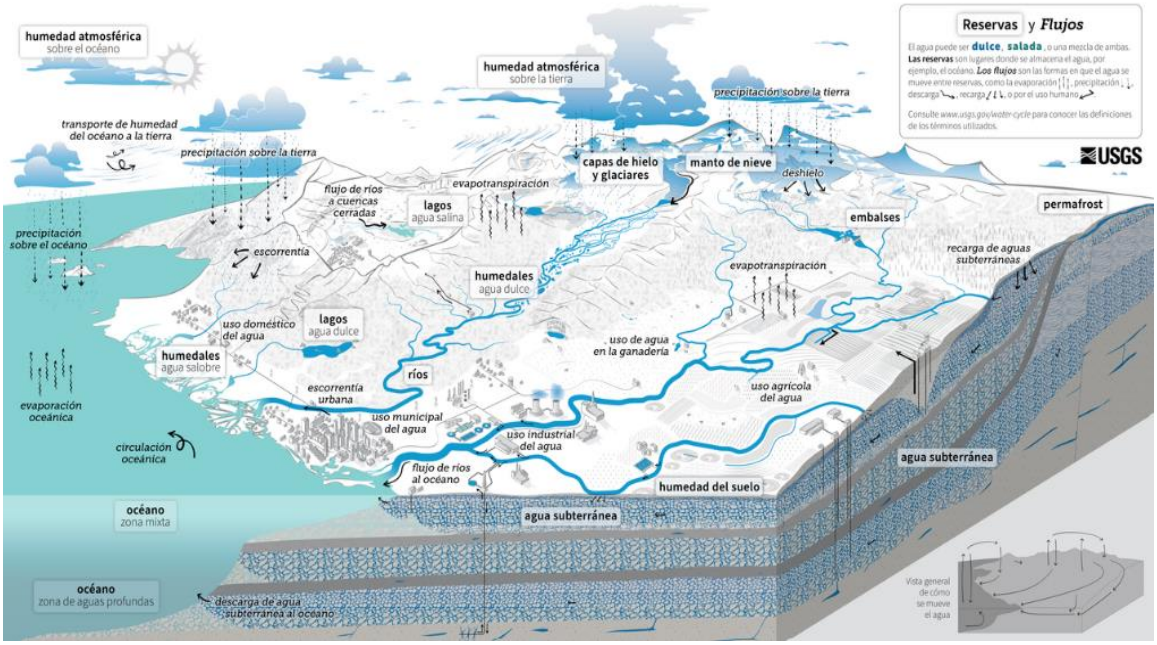
Ciclo hidrológico y agua subterránea

El agua subterránea forma parte del ciclo hidrológico y participa activamente en los intercambios de agua entre la atmósfera, la superficie terrestre y el subsuelo. Dentro de este ciclo, el agua puede infiltrarse en el terreno, recargar los acuíferos, circular de forma subterránea y posteriormente retornar a la superficie a través de manantiales, ríos, humedales u otras formas de descarga. En consecuencia, el agua subterránea no constituye un sistema aislado, sino un componente dinámico del funcionamiento hidrológico del territorio (U.S. Geological Survey, 2019a).

La importancia del agua subterránea radica en que representa una reserva estratégica para el abastecimiento humano, la producción agrícola, la industria y el mantenimiento de ecosistemas. Además, por su capacidad de almacenamiento y amortiguación, cumple una función relevante frente a periodos de sequía y variabilidad climática. Por ello, su gestión no debe limitarse al aprovechamiento del recurso, sino que debe incorporar el conocimiento y la protección de los procesos que permiten su recarga natural (UNESCO, 2022).

Figura 1

Ciclo hidrológico



Nota. Diagrama que muestra el ciclo global del agua. Fuente: Tomado de U.S. Geological Survey (2022).

Acuíferos, infiltración y recarga

Un acuífero es una formación geológica capaz de almacenar y transmitir agua subterránea en cantidades aprovechables. La presencia de agua en el subsuelo depende de las características de los materiales geológicos, especialmente de su porosidad, permeabilidad y continuidad espacial, así como de la existencia de estructuras o discontinuidades que faciliten o limiten el flujo del agua (U.S. Geological Survey, 2019a).

La infiltración corresponde al proceso mediante el cual el agua que alcanza la superficie terrestre penetra en el suelo. Parte de esa agua puede permanecer en las capas más someras del terreno, mientras que otra fracción puede infiltrarse a mayor profundidad hasta contribuir a la

recarga de los acuíferos. Este proceso no ocurre de manera uniforme en todo el territorio, ya que depende de factores como la textura del suelo, la cobertura de la tierra, la pendiente, la litología y las condiciones estructurales del medio físico (U.S. Geological Survey, 2019b).

En este contexto, la recarga de acuíferos puede entenderse como el ingreso de agua al subsuelo que alimenta la zona saturada. Por tanto, la identificación de áreas favorables para la infiltración constituye un paso fundamental para reconocer el potencial de recarga del territorio, aun cuando no siempre implique la cuantificación directa del volumen recargado. Esta precisión es importante, porque diferencia los estudios de delimitación espacial de las zonas potenciales de recarga de aquellos orientados a estimar tasas o volúmenes de recarga (U.S. Geological Survey, 2019b).

Hidrogeología de las zonas de recarga

La hidrogeología de zonas de recarga parte del ciclo hidrológico subterráneo como fundamento teórico. Según Todd y Mays (2004), el agua subterránea ocurre en dos zonas fundamentales, la zona no saturada o vadosa, donde coexisten agua y aire en los poros del suelo, y la zona saturada, donde toda la porosidad está ocupada por agua bajo presión hidrostática positiva. La recarga de acuíferos ocurre cuando el agua de precipitación atraviesa la zona vadosa y alcanza el nivel freático. El agua subterránea no constituye un sistema aislado, sino un componente dinámico del territorio que cumple una función estratégica para el abastecimiento humano, la producción agrícola y el mantenimiento de ecosistemas, siendo especialmente relevante como reservorio de amortiguación frente a periodos de sequía y variabilidad climática (UNESCO, 2022).

Zonas potenciales de recarga

Las Zonas Potenciales de Recarga Hídrica (ZPRH) son aquellas superficies del territorio donde las condiciones litológicas, edafológicas, de cobertura vegetal y topográficas favorecen la infiltración del agua hacia los acuíferos. Custodio y Llamas (1996) definen las zonas de recarga como áreas de entrada preferencial de agua al sistema subterráneo, diferenciando entre recarga directa (por infiltración vertical de precipitación), recarga indirecta (a través de lechos de ríos y corrientes superficiales) y recarga inducida (derivada de intervenciones antrópicas). La identificación de estas zonas no tiene como propósito cuantificar la recarga, sino delimitar espacialmente las áreas donde las condiciones del medio ofrecen mayor aptitud para que este proceso ocurra, lo cual constituye el tipo de estudio que desarrolla la presente investigación (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2026).

Factores que condicionan la recarga

La recarga depende de la interacción de diferentes componentes del medio físico. Entre los factores que suelen condicionar la infiltración y la recarga se encuentran la litología y estructura geológica, dado que materiales más permeables como aluviones, areniscas fracturadas y calizas kársticas permiten mayor infiltración, en contraste con materiales más finos o compactos como arcillas o rocas ígneas, y las zonas de falla y fractura suelen actuar como conductos preferenciales de recarga. La pendiente topográfica también es determinante, ya que las áreas de menor pendiente favorecen la acumulación del agua y su infiltración, mientras las zonas empinadas generan mayor escorrentía superficial. El tipo de suelo y cobertura vegetal incide igualmente, pues los suelos de textura gruesa como arenas y gravas presentan alta permeabilidad, y el bosque nativo incrementa la retención de agua y disminuye la evapotranspiración, favoreciendo la recarga (Bolaños-Chavarría et al., 2022).

La precipitación también es un factor climático de primera importancia. En Colombia, la gran diversidad pluviométrica genera diferencias significativas en la recarga entre regiones (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2026).

Metodología para la delimitación de zonas potenciales de recarga según la Resolución 0017 de 2026

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, con el apoyo del Servicio Geológico Colombiano (SGC), el IDEAM y el IGAC, adoptó mediante la Resolución 0017 del 14 de enero de 2026 la Guía Metodológica para la Identificación de Zonas Potenciales de Recarga de Acuíferos, la cual constituye el instrumento técnico de referencia obligatoria para la identificación de estas zonas en el territorio colombiano (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2026).

Esta normativa reconoce dichas áreas como de especial importancia ecológica y establece una metodología basada en la integración de variables biofísicas agrupadas en dos componentes principales que son suelo y geología. A su vez, estos componentes se subdividen en variables como la cobertura de la tierra, el relieve, el grupo textural del suelo, el drenaje natural, la litología y la incidencia de estructuras geológicas, las cuales permiten caracterizar la capacidad del territorio para favorecer la infiltración y el almacenamiento del agua en el subsuelo.

Los componentes y subcomponentes considerados en la metodología se presentan a continuación.

Tabla 1

Componentes y subcomponentes descritos en la metodología

Componente	Subcomponente	Variables principales
Suelo	Cobertura de la tierra	Tipo de cobertura de la tierra
	Relieve	Densidad de drenaje Índice Topográfico de Humedad
	Suelos	Grupo Textural (GT) Drenaje Natural (DN)
Geología	Litología	Tipo de roca o sedimento y características texturales
	Incidencia geoestructural	Densidad de lineamientos por unidad de área (ponderación por tipo de lineamiento y tipo de falla).

Nota. Componentes y subcomponentes descritos en la metodología nacional. Fuente: Adaptado de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2026).

El procedimiento propuesto por la guía se fundamenta en un análisis multicriterio que integra las variables mediante la asignación de valores de aptitud de recarga de acuerdo con sus características físicas y estructurales. Esta integración se realiza a través de una sumatoria lineal ponderada, expresada de manera general como:

$$IZPR = \Sigma(Wj \times Sj)$$

Los pesos se determinan mediante la combinación de métodos objetivos, como CRITIC, y subjetivos, como AHP, mientras que las calificaciones permiten expresar el aporte de cada unidad espacial al proceso de recarga. Como resultado, el territorio se clasifica en diferentes categorías de potencial de recarga, que van desde muy baja hasta muy alta.

En este contexto, la metodología constituye una herramienta técnica que facilita el análisis del recurso hídrico subterráneo a partir de la integración de información secundaria y el uso de técnicas de análisis espacial, permitiendo generar insumos para la comprensión del comportamiento del sistema y su relación con las características del territorio.

Finalmente, la guía establece que la metodología puede escalarse para su aplicación a niveles de mayor detalle e incorpora una fase de verificación en campo y validación con información complementaria, como datos de manantiales, isotopía e hidroquímica, cuando estos se encuentren disponibles (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2026).

Impactos de las actividades antrópicas sobre las zonas de recarga hídrica

Las zonas de recarga hídrica desempeñan un papel fundamental en la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo, al permitir la infiltración del agua desde la superficie hacia los acuíferos. Estos procesos dependen de condiciones naturales como la geología, el tipo de suelo, la cobertura vegetal y la pendiente; sin embargo, también pueden verse significativamente alterados por las actividades antrópicas desarrolladas en el territorio. En este sentido, la intervención humana puede modificar tanto la cantidad como la calidad del agua que ingresa al subsuelo, afectando la dinámica natural de los sistemas hidrogeológicos (Custodio & Llamas, 1996).

Las actividades antrópicas generan impactos ambientales que pueden clasificarse como directos o indirectos, dependiendo de su relación con el medio. En el caso de las zonas de recarga, los impactos directos suelen estar asociados a la modificación física del suelo, mientras que los indirectos se relacionan con procesos de contaminación y cambios en la dinámica hidrológica. Estos impactos inciden principalmente en la reducción de la infiltración, la alteración de la conductividad hidráulica del suelo y la introducción de contaminantes al sistema acuífero (Fetter, 2000).

Uno de los principales impactos sobre las zonas de recarga es la impermeabilización del suelo, derivada de procesos de urbanización, construcción de vías e infraestructura. Este fenómeno reduce significativamente la capacidad del terreno para permitir la infiltración del agua, aumentando la escorrentía superficial y disminuyendo la recarga efectiva del acuífero. Como

resultado, se altera el balance hídrico local y se incrementa la vulnerabilidad del sistema frente a eventos de sequía (Freeze & Cherry, 1979).

De manera similar, las actividades agropecuarias intensivas pueden generar impactos relevantes sobre las zonas de recarga. La compactación del suelo por el tránsito de maquinaria o el pisoteo de ganado disminuye la porosidad y la conductividad hidráulica, reduciendo la capacidad de infiltración. Adicionalmente, el uso de fertilizantes y plaguicidas puede dar lugar a procesos de contaminación difusa, en los cuales sustancias como nitratos y fosfatos son transportadas hacia el subsuelo, afectando la calidad del agua subterránea (FAO, 2011).

En el contexto de actividades extractivas, como la minería, los impactos sobre las zonas de recarga pueden ser aún más complejos. La remoción de la cobertura vegetal, la alteración de la estructura del suelo y la modificación de las condiciones geológicas pueden interrumpir los flujos naturales de infiltración. Asimismo, la generación de residuos y lixiviados puede introducir contaminantes al sistema, afectando tanto la calidad como la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo (Younger et al., 2002).

Otro aspecto relevante es la disposición inadecuada de residuos sólidos y orgánicos, la cual puede generar procesos de lixiviación de contaminantes hacia el subsuelo, especialmente en áreas con alta permeabilidad. Este tipo de impacto es particularmente significativo en zonas rurales donde no existen sistemas adecuados de manejo de residuos, lo que incrementa el riesgo de afectación a las zonas de recarga (UNEP, 2016).

En conjunto, estos impactos evidencian que las zonas de recarga hídrica no solo dependen de sus condiciones naturales, sino también de la forma en que el territorio es utilizado y gestionado. Por esta razón, resulta necesario evaluar de manera sistemática las actividades antrópicas presentes

en el área de estudio y sus efectos sobre el recurso hídrico subterráneo, con el fin de orientar acciones de manejo y conservación.

En este contexto, la evaluación de aspectos e impactos ambientales se convierte en una herramienta fundamental para identificar, analizar y valorar los efectos de las actividades humanas sobre las zonas de recarga, permitiendo establecer criterios técnicos para la toma de decisiones y la formulación de estrategias de gestión ambiental orientadas a la protección del recurso hídrico subterráneo.

Evaluación de impactos ambientales sobre las zonas de recarga hídrica

La evaluación de impactos ambientales constituye una herramienta fundamental para analizar los efectos que las actividades antrópicas generan sobre los componentes del medio, en particular sobre las zonas de recarga hídrica. Este proceso permite no solo identificar los impactos, sino también valorarlos en función de su importancia, considerando aspectos como su magnitud, extensión, duración y reversibilidad, lo cual facilita la toma de decisiones orientadas a la gestión ambiental del territorio (Conesa Fernández-Vítora, 1997).

En el ámbito de la evaluación ambiental, se han desarrollado diferentes metodologías que permiten establecer relaciones entre las actividades humanas y los factores ambientales afectados. Entre estas se encuentran las matrices de tipo causa-efecto, como la propuesta por Leopold et al. (1971), así como enfoques más estructurados como los planteados por Conesa Fernández-Vítora (1997), los cuales permiten sistematizar la identificación y valoración de impactos a partir de criterios definidos.

Dentro de estos enfoques, las metodologías basadas en matrices cualitativas han demostrado ser especialmente útiles en estudios a escala local, donde la disponibilidad de información detallada puede ser limitada y se requiere una interpretación integral del territorio. En

este contexto, el enfoque propuesto por Arboleda González (2008) se presenta como una alternativa técnica para la valoración de impactos, al integrar criterios de probabilidad y severidad en un esquema de calificación ambiental.

La metodología se fundamenta en la obtención de una calificación ambiental (Ca), expresada mediante la fórmula propuesta por el método EPM o método Arboleda:

$$Ca = C\ (P\ [7{,}0 \times E \times M + 3{,}0 \times D])$$

Donde C corresponde a la clase del impacto, positiva o negativa; P corresponde a la presencia o probabilidad de ocurrencia; E representa la evolución o velocidad con la que se manifiesta el impacto; M corresponde a la magnitud o grado de alteración generado; y D corresponde a la duración o permanencia temporal del impacto. A partir de la integración de estas variables, la metodología permite obtener un valor numérico que facilita la jerarquización de los impactos según su importancia relativa (Arboleda González, 2008).

Este enfoque resulta pertinente para el análisis de zonas de recarga hídrica, ya que permite relacionar de manera estructurada las actividades antrópicas presentes en el territorio con sus posibles efectos sobre los procesos de infiltración y sobre la calidad del agua subterránea. De esta manera, la valoración mediante matrices tipo Arboleda constituye un soporte conceptual para el análisis de la interacción entre el uso del suelo y el recurso hídrico subterráneo, facilitando la identificación de áreas críticas y la priorización de acciones orientadas a su manejo y conservación.

Gestión ambiental del recurso hídrico subterráneo

La gestión ambiental del recurso hídrico subterráneo constituye un proceso orientado a la planificación, uso, conservación y control de las actividades que inciden sobre los acuíferos, con el fin de garantizar su disponibilidad y calidad en el tiempo. Este enfoque reconoce que el agua subterránea no depende únicamente de las condiciones naturales del territorio, sino también de la

forma en que este es utilizado, por lo que resulta necesario integrar criterios técnicos, ambientales y de planificación en su manejo (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

En este marco, la gestión del recurso hídrico subterráneo se encuentra estrechamente relacionada con la conservación de los servicios ecosistémicos de regulación hídrica, los cuales sostienen los procesos de infiltración y recarga, y permiten la estabilidad del sistema hidrogeológico. En particular, las zonas de recarga de acuíferos desempeñan un papel fundamental al facilitar el almacenamiento del agua en el subsuelo y su disponibilidad en el tiempo, especialmente en periodos de déficit hídrico (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

La normativa ambiental colombiana reconoce estas áreas como de especial importancia ecológica, orientando su protección como base para la sostenibilidad del recurso hídrico (Congreso de la República de Colombia, 1993). Adicionalmente, las aguas subterráneas se encuentran interconectadas con otros sistemas ambientales, como humedales y ecosistemas asociados, los cuales cumplen funciones de regulación de caudales, mantenimiento de ciclos biogeoquímicos y soporte a la biodiversidad, generando beneficios directos para los sistemas sociales y económicos del territorio (Betancur-Vargas et al., 2017).

La implementación de medidas de conservación y uso sostenible del recurso hídrico subterráneo requiere articular la información técnica con los instrumentos de planificación vigentes. En el contexto regional, esto implica considerar las directrices establecidas por el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca del río Bogotá (POMCA), como instrumento de planificación ambiental a escala de cuenca que orienta la protección de áreas estratégicas, entre ellas las zonas de recarga hídrica (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2019).

A nivel local, la gestión del recurso hídrico subterráneo se integra en los procesos de ordenamiento territorial del municipio de Zipaquirá a través del Plan de Ordenamiento Territorial (POT), el cual permite incorporar criterios ambientales en la definición de usos del suelo y en la protección de áreas estratégicas. En este contexto, la identificación de zonas de recarga y la evaluación de impactos ambientales constituyen insumos técnicos clave para orientar la toma de decisiones frente a las dinámicas actuales del territorio (Congreso de la República de Colombia, 1997).

De esta manera, la gestión ambiental del recurso hídrico subterráneo se configura como un proceso dinámico que integra el conocimiento del sistema hidrogeológico, la conservación de los servicios ecosistémicos y la planificación del territorio, permitiendo orientar acciones de manejo y conservación, priorizar intervenciones y favorecer la sostenibilidad del recurso en función de las condiciones específicas de Zipaquirá.

Diseño metodológico

Tipo de enfoque

La investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, de tipo aplicado y con alcance descriptivo - analítico. El enfoque es cuantitativo pues el estudio parte de variables temáticas y cartográficas que serán valoradas, ponderadas e integradas mediante análisis espacial multicriterio para la delimitación de las zonas potenciales de recarga, y porque los impactos ambientales se cuantificarán mediante la Calificación Ambiental (Ca) propuesta por Arboleda González (2008). Su carácter aplicado se debe a que busca generar un insumo técnico ambiental orientado a la formulación de una estrategia de gestión concreta para la vereda Barandillas.

El alcance es descriptivo - analítico, ya que, por una parte, permite identificar y clasificar espacialmente las zonas potenciales de recarga y, por otra, analizar la relación entre dichas zonas y las actividades antrópicas presentes en el área para jerarquizar los impactos y priorizar las medidas de gestión. La base metodológica del estudio corresponde a la guía adoptada por la Resolución 0017 de 2026 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2026) para la identificación de zonas potenciales de recarga, y a la Metodología para la evaluación de impactos ambientales desarrollada por Arboleda González (2008).

Población

La población de estudio corresponde al área de análisis definida para la delimitación de las zonas potenciales de recarga en la vereda Barandillas, municipio de Zipaquirá, Cundinamarca, con una extensión aproximada de 450 hectáreas. El área territorial de análisis comprende la totalidad de la vereda, sobre la cual se identifican zonas con diferente potencial de recarga. No obstante, el análisis se centrará en las áreas clasificadas con potencial de recarga

medio, alto y muy alto, considerando de manera complementaria las zonas con potencial bajo y muy bajo, con el fin de comprender integralmente la distribución espacial del fenómeno en el territorio, siguiendo los lineamientos de clasificación propuestos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2026).

Muestra y técnica de muestreo

La presente investigación no contempla una muestra estadística, debido a que el análisis se desarrolla sobre la totalidad del área de estudio definida técnicamente para la delimitación de las zonas potenciales de recarga. Por tratarse de un estudio espacial basado en cartografía temática, información secundaria y análisis multicriterio, la unidad de análisis corresponde al área completa de la vereda Barandillas.

Asimismo, en esta fase de la investigación no se realizará un nuevo levantamiento directo en campo, dado que los insumos utilizados corresponden a capas temáticas previamente elaboradas a partir de información secundaria y de verificaciones de campo efectuadas por el autor en años anteriores. En consecuencia, el estudio se fundamenta en la integración, organización e interpretación de insumos cartográficos y técnicos ya disponibles para el área de estudio.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Para el desarrollo de la presente investigación se emplearán técnicas de recolección de datos basadas en la revisión documental, la recopilación de información secundaria, la interpretación cartográfica y la evaluación de impactos ambientales, en concordancia con los requerimientos de la metodología adoptada para la delimitación de las zonas potenciales de recarga y la formulación de la estrategia de gestión ambiental (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2026).

La guía metodológica establece que la identificación de las zonas potenciales de recarga se soporta en dos componentes principales, suelo y geología, divididos en subcomponentes y variables que deben ser integrados bajo una misma escala de análisis (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2026).

Para el componente suelos, se utilizará la cartografía temática del área de estudio a escala 1:10.000, elaborada a partir de la cartografía básica del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y complementada con verificaciones de campo. Para el componente cobertura de la tierra, se utilizará la cartografía temática del área de estudio a escala 1:10.000, elaborada con base en la metodología Corine Land Cover, nivel 3 de clasificación, y complementada con verificaciones de campo. Para el componente geológico, se utilizará la cartografía temática del área de estudio a escala 1:10.000, elaborada a partir de levantamientos geológicos previos que incluyeron verificación en campo, identificación de unidades litológicas y reconocimiento de rasgos estructurales.

Respecto a los drenajes y al modelo digital de elevación (DEM), se utilizará la cartografía oficial del IGAC a escala 1:10.000, junto con un modelo digital de elevación con tamaño de píxel entre 1 y 5 metros, lo cual permite un análisis detallado de las condiciones del relieve y su relación con los procesos de infiltración y recarga.

Para la evaluación de impactos ambientales, se empleará la matriz de valoración propuesta por Arboleda González (2008), la cual permite identificar y jerarquizar los impactos generados por las actividades antrópicas presentes en el área de estudio. Esta técnica resulta adecuada para estudios con información general del territorio, en los que la identificación de dichas actividades se realiza a partir de cartografía temática y fuentes secundarias, permitiendo

una valoración cualitativa estructurada en función de variables como la magnitud, la extensión, la duración, la evolución y la probabilidad de ocurrencia.

Adicionalmente, para la delimitación de las zonas potenciales de recarga se aplicará un análisis multicriterio que integra ponderaciones objetivas y subjetivas mediante los métodos CRITIC y AHP, respectivamente, lo cual permite asignar pesos a las variables de acuerdo con su importancia relativa dentro del sistema. Los principales instrumentos de recolección de datos o información serán las fichas de revisión documental, la cartografía base del IGAC, la cartografía temática de suelos, la cartografía de cobertura de la tierra, la cartografía geológica, la cartografía de drenajes, el modelo digital de elevación (DEM), así como las matrices de evaluación de impactos ambientales y las herramientas de análisis en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Posteriormente, la evaluación de impactos ambientales se realizará a partir de la superposición espacial entre la capa de cobertura de la tierra y la capa resultante de zonas potenciales de recarga, con el fin de identificar las principales actividades antrópicas presentes en el área de estudio. La capa de cobertura de la tierra, desarrollada bajo la metodología Corine Land Cover, permitirá reconocer categorías como territorios artificializados, zonas de extracción minera y áreas agrícolas, las cuales serán utilizadas como base para la identificación de impactos potenciales. A partir de esta relación espacial, se procederá a la valoración de los impactos mediante la matriz de Arboleda, permitiendo jerarquizar su importancia ambiental.

Finalmente, la información recopilada será organizada y procesada mediante herramientas SIG para la valoración, ponderación e integración espacial de las variables requeridas por la metodología, cuyos resultados servirán como base para la formulación de la

estrategia de gestión ambiental, priorizando los impactos más relevantes e incorporando criterios asociados a la normativa ambiental vigente aplicable.

Cuadro del diseño metodológico

A continuación, se presenta el cuadro de diseño metodológico para el desarrollo del proyecto.

Tabla 2

Cuadro del diseño metodológico

Objetivos específicos	Indicador	Técnica de recolección de datos o información	Instrumento de recolección de datos o información
Determinar las zonas potenciales de recarga de acuíferos en la vereda Barandillas aplicando la metodología establecida en la Resolución 0017 de 2026 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.	Mapa de zonas potenciales de recarga clasificado en: - Muy baja - Baja - Media - Alta - Muy alta	Revisión documental. Consolidación y validación de información técnica preexistente. Interpretación cartográfica. Análisis multicriterio (CRITIC y AHP). Análisis espacial en SIG.	Cartografía temática de suelos, cobertura de la tierra y geología escala 1:10.000. Cartografía de drenajes escala 1:10.000. Modelo digital de elevación (DEM) con tamaño de píxel 1 a 5 m. Tablas de atributos y matrices de ponderación. Software SIG.
Evaluar los impactos potenciales de las principales actividades antrópicas presentes en la vereda Barandillas sobre las zonas potenciales de recarga de acuíferos determinadas, mediante la aplicación de una matriz sencilla de identificación y valoración de aspectos e impactos ambientales.	Matriz de impactos ambientales valorados y clasificados según su importancia.	Interpretación cartográfica. Análisis de superposición espacial en SIG. Identificación de actividades antrópicas a partir de la cobertura de la tierra. Valoración de impactos.	Mapa de cobertura de la tierra (Corine Land Cover nivel 3). Mapa de zonas potenciales de recarga. Software SIG. Matriz de evaluación de impactos de Arboleda.
Establecer una estrategia de conservación para ecosistemas estratégicos que garanticen la integridad de los procesos de infiltración y recarga hídrica.	Impactos priorizados Propuesta de medidas de manejo y conservación.	Análisis de resultados. Jerarquización de impactos. Formulación de medidas de gestión ambiental.	Resultados del análisis de recarga. Matriz de impactos ambientales. Cuadro de Normativa ambiental vigente aplicable.

Nota. Diseño metodológico del estudio para la vereda Barandillas. Fuente: Elaboración propia (2026).

Desarrollo del estudio

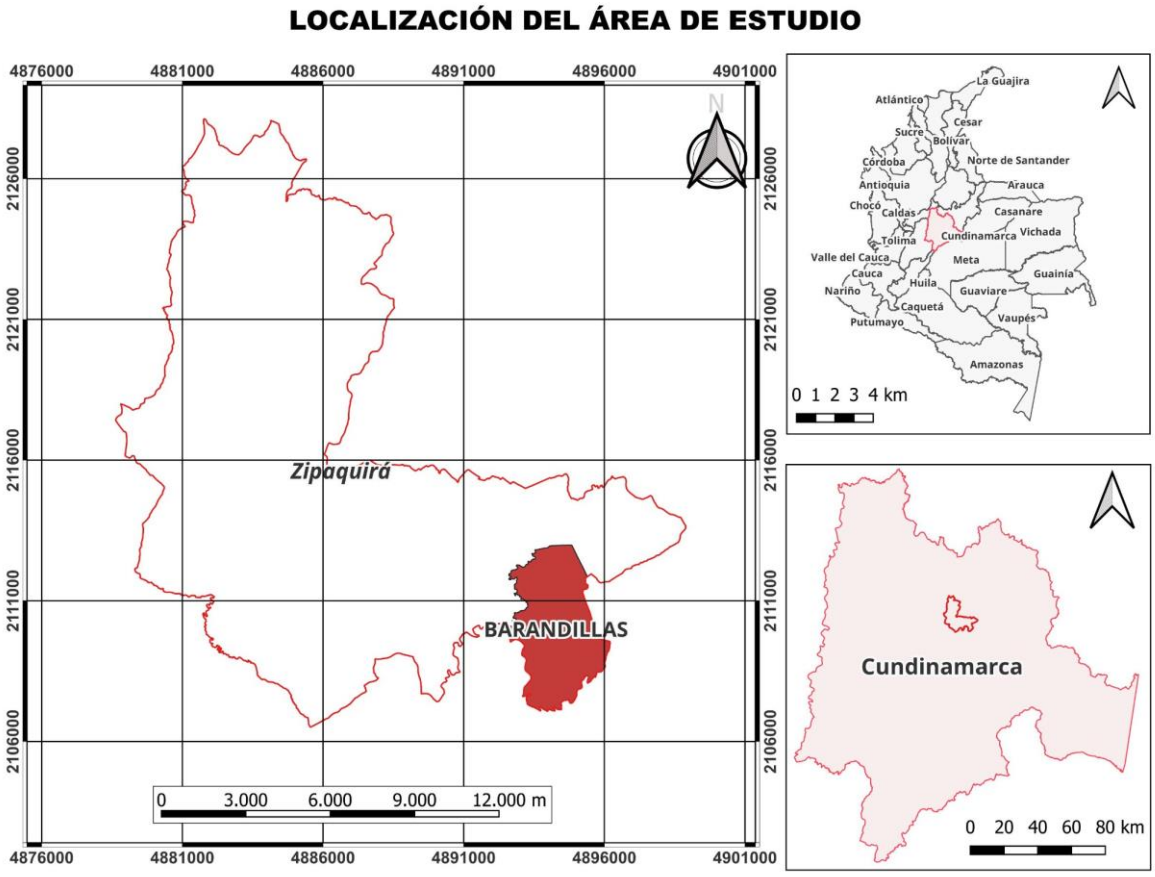
El estudio se orientó a la identificación de las zonas potenciales de recarga de acuíferos en la vereda Barandillas y a la evaluación de las presiones antrópicas que pueden incidir sobre su conservación. Para ello, se integraron variables biofísicas y geoestructurales mediante herramientas de análisis espacial en Sistemas de Información Geográfica, siguiendo la metodología nacional para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos adoptada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. El proceso se estructuró en tres momentos: organización de insumos cartográficos, construcción y normalización de variables, y generación del índice final mediante ponderación multicriterio.

Localización del área de estudio

El área de estudio corresponde a la vereda Barandillas, localizada en el municipio de Zipaquirá, departamento de Cundinamarca. La zona se ubica en un contexto de piedemonte andino asociado a la Sabana de Bogotá, con presencia de coberturas rurales, sectores agropecuarios, áreas con infraestructura productiva y zonas de transición hacia áreas urbanizadas. Esta ubicación resulta relevante para el análisis debido a la interacción entre condiciones naturales favorables para la infiltración y actividades humanas que pueden modificar la capacidad del territorio para conservar los procesos de recarga.

Figura 2

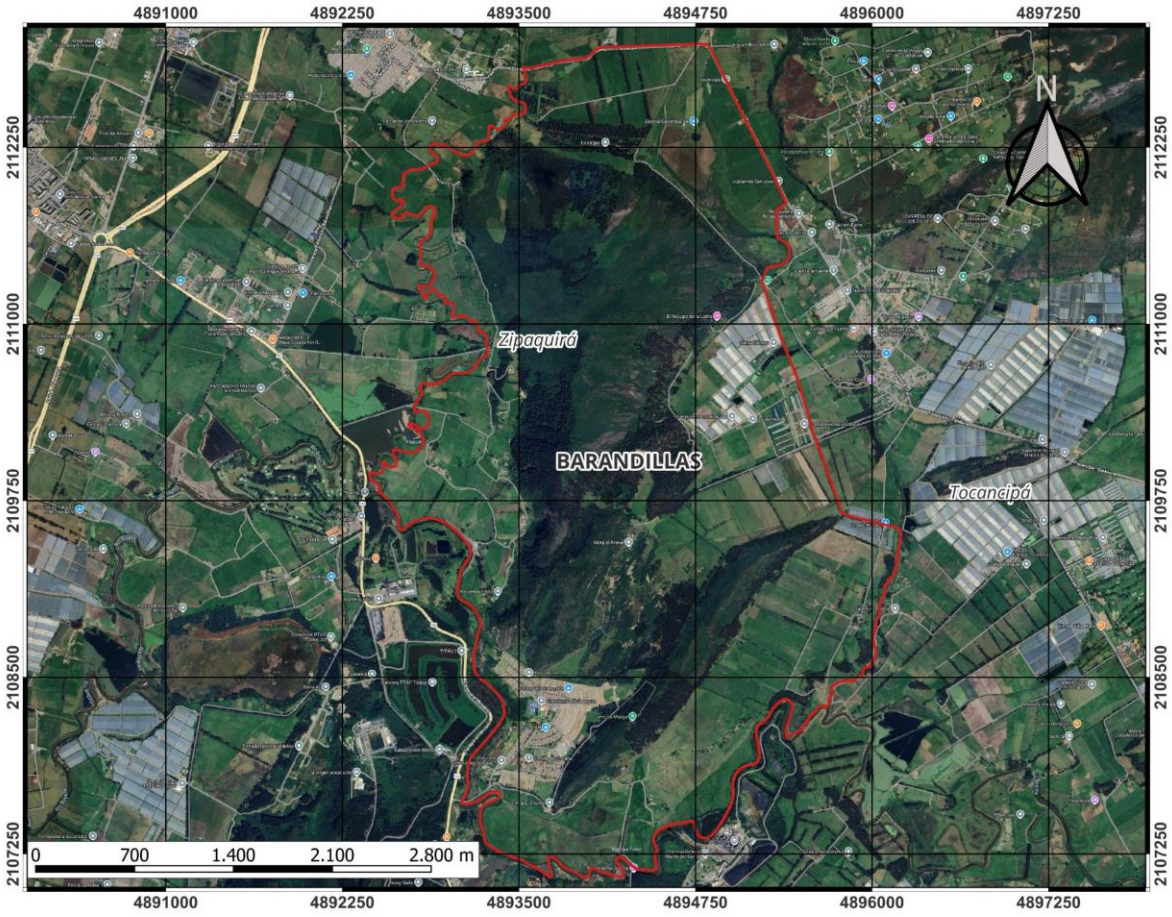
Localización de la vereda Barandillas en el municipio de Zipaquirá



Nota. Delimitación del área de estudio correspondiente a la vereda Barandillas dentro del municipio de Zipaquirá. Fuente: Elaboración propia (2026).

Figura 3

Ubicación del área de estudio sobre imagen satelital



Nota. Ubicación de la vereda Barandillas sobre imagen satelital, donde el polígono rojo identifica el área de estudio. Fuente: Elaboración propia (2026).

Identificación de zonas potenciales de recarga

Insumos

La identificación de las zonas potenciales de recarga se realizó a partir de información secundaria y cartografía temática disponible para el área de estudio. Los insumos fueron organizados en una base SIG, ajustados a un mismo sistema de referencia, recortados al polígono

de análisis y procesados con criterios homogéneos de resolución espacial. Esta estandarización permitió integrar variables de distinta naturaleza en un modelo multicriterio comparable.

Tabla 3

Insumos cartográficos utilizados en el estudio

Variable / insumo	Fuente o base utilizada	Escala / resolución	Uso dentro del estudio
Límite del área de estudio	Cartografía municipal y delimitación veredal	Escala local	Definición del polígono de análisis
Litología	Cartografía geológica y levantamientos previos del área	1:10.000	Clasificación de unidades litológicas según su potencial de infiltración
Cobertura de la tierra	Cartografía de cobertura adaptada a metodología Corine Land Cover	1:10.000	Identificación de coberturas y actividades antrópicas
Suelos	Cartografía de suelos y atributos de textura y drenaje natural	1:10.000	Cálculo del indicador de infiltración del suelo
Drenajes y canales	Cartografía base e interpretación SIG	1:10.000	Cálculo de densidad de drenaje y análisis de escorrentía superficial
Lineamientos y fallas	Cartografía geológica e interpretación estructural	1:10.000	Evaluación de densidad, conectividad y zona de daño
Modelo digital de elevación	MDT disponible para el área de estudio	1 a 5 m	Cálculo del índice topográfico de humedad y soporte del relieve
Actividades antrópicas	Cobertura de la tierra, imagen satelital e interpretación cartográfica	Escala local	Base para la matriz de evaluación de impactos ambientales

Nota. Insumos cartográficos empleados en el análisis espacial del área de estudio. Fuente: Elaboración propia (2026).

Procesamiento de variables biofísicas y geoestructurales

Las variables fueron procesadas conforme a los componentes definidos por la metodología nacional: componente suelo y componente geología. El componente suelo incluyó cobertura de la tierra, relieve y suelos, mientras que el componente geología integró litología e incidencia geoestructural. Cada variable fue clasificada de acuerdo con su contribución potencial al proceso

de infiltración y recarga, posteriormente normalizada a una escala común entre 0 y 1 para permitir su combinación mediante álgebra de mapas.

Tabla 4

Variables aplicadas para la identificación de zonas potenciales de recarga

Componente	Subcomponente	Variable procesada	Producto SIG generado
Suelo	Cobertura de la tierra	Tipo de cobertura y uso actual	Ráster de cobertura normalizado
Suelo	Relieve	Densidad de drenaje	Ráster de densidad de drenaje normalizado
Suelo	Relieve	Índice topográfico de humedad	Ráster ITH normalizado
Suelo	Suelos	Grupo textural y drenaje natural	Indicador de infiltración del suelo
Geología	Litología	Tipo de roca o depósito	Ráster litológico normalizado
Geología	Incidencia geoestructural	Densidad de lineamientos, conectividad y zona de daño de fallas	Rásteres estructurales normalizados

Nota. Variables biofísicas y geológicas utilizadas para la delimitación de zonas potenciales de recarga. Fuente: Elaboración propia (2026).

En la variable litología se valoraron las unidades geológicas de acuerdo con sus características texturales, tipo de material y capacidad potencial para permitir la infiltración. Esta variable tuvo un papel central en el análisis, debido a que en Barandillas afloran unidades rocosas y materiales que condicionan tanto la porosidad primaria como la permeabilidad secundaria asociada a fracturamiento.

La variable suelos se construyó a partir de la integración entre grupo textural y drenaje natural. El indicador final de infiltración del suelo fue calculado otorgando mayor peso al drenaje natural, debido a su relación directa con la facilidad de circulación del agua en el perfil edáfico. En consecuencia, el mapa de suelos utilizado en el modelo no representa únicamente la textura, sino una integración ponderada entre textura y drenaje.

La incidencia geoestructural fue incorporada mediante el análisis de lineamientos, fallas, conectividad y zonas de daño. Este componente se considera relevante porque las discontinuidades

pueden generar permeabilidad secundaria en rocas compactas, facilitando la infiltración a través de fracturas y zonas de debilidad estructural. Para el área de estudio se adoptó una dirección regional de esfuerzo máximo aproximada NW-SE a WNW-ESE, de acuerdo con el contexto estructural regional empleado durante el procesamiento de lineamientos.

Normalización de variables

Una vez calificadas las variables en sus respectivas escalas temáticas, se normalizaron a valores entre 0 y 1. Esta transformación permitió que todas las capas tuvieran la misma escala de comparación antes de ser ponderadas. Para las variables con calificación entre 1 y 5 se aplicó una transformación lineal, donde el valor 1 equivale a 0 y el valor 5 equivale a 1. La expresión aplicada fue:

$$\text{Valor normalizado} = (\text{Valor original} - 1) / 4$$

Este procedimiento permitió conservar los valores intermedios ponderados, como los obtenidos en el indicador de infiltración del suelo, sin forzar redondeos que pudieran alterar la variabilidad espacial de la variable.

Tabla 5

Ejemplo de transformación de valores de 1 a 5 hacia escala 0 a 1

Valor original	Valor normalizado
1,0	0,00
2,0	0,25
2,4	0,35
3,0	0,50
3,2	0,55
3,6	0,65
4,0	0,75
5,0	1,00

Nota. La normalización se aplicó para integrar las variables en el análisis multicriterio.

Fuente: Elaboración propia (2026).

Los mapas de las variables procesadas se presentan en el Anexo A, desde la Figura 8 hasta la Figura 13.

Ponderación multicriterio CRITIC-AHP

La ponderación de variables se realizó mediante la integración de un método objetivo y un método subjetivo. El método CRITIC permitió obtener pesos a partir de la variabilidad de cada criterio y del conflicto o independencia respecto a las demás variables. Por su parte, el Proceso Analítico Jerárquico permitió incorporar el juicio experto sobre la importancia relativa de las variables en el contexto específico de Barandillas. Finalmente, ambos resultados fueron integrados mediante promedio simple para obtener el peso final utilizado en la sumatoria lineal ponderada.

Tabla 6

Pesos objetivos obtenidos mediante el método CRITIC

Variable	Desviación estándar	Conflicto (1-r)	Peso CRITIC
Litología	0,1267	7,00	0,124
Cobertura	0,1549	6,47	0,141
Suelos	0,2438	5,16	0,177
Fallas / zona de daño	0,0244	7,04	0,028
Densidad de lineamientos	0,1679	6,25	0,148
Densidad de drenaje	0,1094	6,79	0,105
Conectividad	0,1561	5,43	0,121
ITH	0,1369	8,11	0,156
Total	-	-	1,000

Nota. Pesos objetivos calculados a partir de la matriz de correlación y análisis de componentes principales en ArcGIS. Fuente: Elaboración propia (2026).

Los resultados del método CRITIC indican que los mayores pesos objetivos correspondieron a suelos, ITH, densidad de lineamientos, cobertura y conectividad. Esto se explica porque estas variables presentaron mayor variación espacial o mayor contraste frente a otros criterios. La variable fallas o zona de daño obtuvo el menor peso objetivo, debido a que su variabilidad espacial fue reducida dentro del área analizada.

Tabla 7

Matriz de comparación por pares AHP utilizada para el juicio experto

Variable	Litología	Cobertura	Suelos	Fallas	Densidad lineamientos	Densidad de drenaje	Conectividad	ITH
Litología	1	3	3	7	2	5	5	4
Cobertura	1/3	1	1/2	5	1/2	3	3	2
Suelos	1/3	2	1	5	1/2	3	3	2
Fallas	1/7	1/5	1/5	1	1/7	1/3	1/2	1/4
Densidad lineamientos	1/2	2	2	7	1	4	3	3
Densidad de drenaje	1/5	1/3	1/3	3	1/4	1	1	1/2
Conectividad	1/5	1/3	1/3	2	1/3	1	1	1/2
ITH	1/4	1/2	1/2	4	1/3	2	2	1

Nota. Matriz de comparación por pares basada en juicio experto sobre las condiciones biofísicas y geoestructurales del área de estudio. Fuente: Elaboración propia (2026).

Tabla 8

Pesos subjetivos AHP y verificación de consistencia

Variable	Peso AHP
Litología	0,312
Cobertura	0,123
Suelos	0,147
Fallas / zona de daño	0,027
Densidad de lineamientos	0,206
Densidad de drenaje	0,052
Conectividad	0,051
ITH	0,082
Total	1,000
λmax	8,215
Índice de consistencia (IC)	0,031
Razón de consistencia (RC)	0,022

Nota. La matriz AHP presenta una razón de consistencia menor a 0,10, por lo que el juicio experto se considera aceptable. Fuente: Elaboración propia (2026).

La ponderación AHP priorizó la litología, la densidad de lineamientos, los suelos y la cobertura de la tierra. Esta decisión se fundamentó en las condiciones observadas para el área de estudio: presencia de afloramientos rocosos, importancia del fracturamiento para la permeabilidad

secundaria, papel del suelo en la infiltración y función de la cobertura vegetal en la retención de humedad y reducción de escorrentía superficial.

Tabla 9

Pesos finales integrados CRITIC-AHP.

Variable	Peso CRITIC	Peso AHP	Peso final
Litología	0,124	0,312	0,218
Cobertura	0,141	0,123	0,132
Suelos	0,177	0,147	0,162
Fallas / zona de daño	0,028	0,027	0,028
Densidad de lineamientos	0,148	0,206	0,177
Densidad de drenaje	0,105	0,052	0,079
Conectividad	0,121	0,051	0,086
ITH	0,156	0,082	0,119
Total	1,000	1,000	1,000

Nota. El peso final corresponde al promedio entre el peso objetivo CRITIC y el peso subjetivo AHP. Fuente: Elaboración propia (2026).

Cálculo del índice de zonas potenciales de recarga

El índice de zonas potenciales de recarga fue calculado mediante una sumatoria lineal ponderada, integrando cada ráster normalizado con su respectivo peso final. El resultado corresponde a un índice continuo entre 0 y 1, donde valores más altos representan condiciones biofísicas y geoestructurales más favorables para la recarga potencial de acuíferos.

La expresión aplicada fue la siguiente:

$$IZPR = (Litología \times 0{,}218) + (Cobertura \times 0{,}132) + (Suelos \times 0{,}162) + (Fallas \times 0{,}028) + (Densidad\ de\ lineamientos \times 0{,}177) + (Densidad\ de\ drenaje \times 0{,}079) + (Conectividad \times 0{,}086) + (ITH \times 0{,}119)$$

Reclasificación del índice

El ráster continuo del índice fue reclasificado en categorías de potencial de recarga. Para mantener una interpretación directa de la escala normalizada, se emplearon rangos absolutos entre

0 y 1. De esta forma, la categoría muy baja corresponde a valores entre 0,00 y 0,20; baja entre valores mayores a 0,20 y 0,40; media entre valores mayores a 0,40 y 0,60; alta entre valores mayores a 0,60 y 0,80; y muy alta entre valores superiores a 0,80 y 1,00. En el área de estudio no se presentó la categoría muy alta, debido a que el valor máximo del índice fue 0,73713.

Tabla 10

Rangos de reclasificación del índice de zonas potenciales de recarga

Rango IZPR	Categoría	Valor cartográfico
0,00 - 0,20	Recarga potencial muy baja	1
>0,20 - 0,40	Recarga potencial baja	2
>0,40 - 0,60	Recarga potencial media	3
>0,60 - 0,80	Recarga potencial alta	4
>0,80 - 1,00	Recarga potencial muy alta	5

Nota. Rangos de reclasificación del índice IZPR en categorías de recarga potencial. Fuente: Tomado de Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2026).

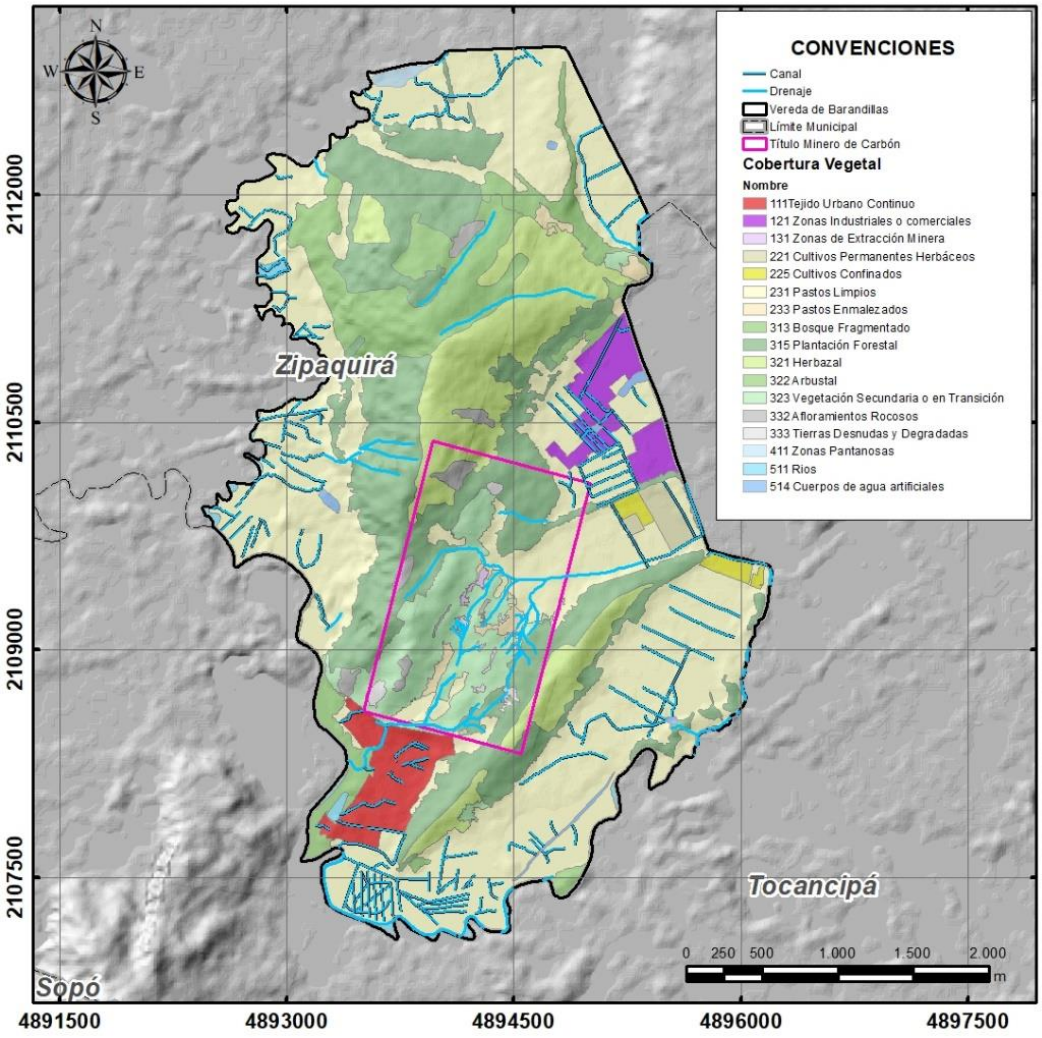
Evaluación de aspectos e impactos ambientales

Identificación de actividades antrópicas

La identificación de actividades antrópicas se realizó a partir de la capa de cobertura de la tierra, la interpretación cartográfica y la revisión del contexto espacial del área. Se reconocieron actividades agropecuarias, zonas de cultivos confinados y permanentes, sectores de tejido urbano continuo, zonas industriales o comerciales, tierras desnudas y degradadas, canales o drenajes modificados, áreas de pastos limpios asociadas a ganadería y actividad minera de carbón. Estas actividades fueron consideradas como presiones potenciales sobre las zonas de recarga debido a su capacidad de modificar la infiltración, aumentar la escorrentía, compactar el suelo, remover coberturas protectoras o generar fuentes de contaminación difusa o puntual.

Figura 4

Cobertura vegetal del área de estudio



Nota. Mapa elaborado mediante la metodología Corine Land Cover con identificación de actividades antrópicas. Fuente: Elaboración propia (2026).

Tabla 11

Actividades antrópicas consideradas en la evaluación de impactos

Actividad / cobertura	Aspecto ambiental asociado	Posible efecto sobre zonas de recarga
Pastos limpios con ganadería	Pisoteo, compactación del suelo y aporte de materia orgánica	Reducción de la infiltración, aumento de escorrentía superficial y posible alteración de la calidad del agua infiltrada
Cultivos confinados	Ocupación del suelo, modificación de cobertura y manejo agrícola intensivo	Reducción localizada de infiltración, aumento de escorrentía y presión sobre áreas con potencial de recarga
Cultivos permanentes herbáceos	Uso de fertilizantes, enmiendas y agroquímicos	Riesgo de contaminación difusa hacia zonas de infiltración y posible alteración de la calidad del agua que ingresa al subsuelo
Tejido urbano continuo	Impermeabilización del suelo y generación de escorrentía urbana	Disminución directa de la recarga potencial, aumento del flujo superficial y pérdida de áreas favorables para infiltración
Zonas industriales o comerciales	Sellamiento del suelo, manejo de residuos, sustancias o superficies duras	Riesgo de pérdida de infiltración, contaminación puntual y aumento de escorrentía superficial
Tierras desnudas y degradadas	Pérdida de cobertura vegetal y exposición directa del suelo	Erosión, menor retención de humedad, aumento de escorrentía y disminución de infiltración efectiva
Canales y drenajes modificados	Conducción acelerada del agua superficial	Menor tiempo de permanencia del agua en el terreno y reducción de la oportunidad de infiltración
Actividad minera de carbón	Remoción o alteración de cobertura vegetal, intervención del suelo y presencia de áreas asociadas al título minero	Disminución localizada de infiltración, aumento de escorrentía y pérdida de cobertura protectora en sectores intervenidos
Actividad minera de carbón	Manejo de aguas de mina, drenajes internos o escorrentía asociada a zonas intervenidas	Riesgo de arrastre de sólidos, alteración de drenajes superficiales y posible afectación de la calidad del agua que puede infiltrarse
Actividad minera de carbón	Infraestructura, vías internas, patios o zonas compactadas asociadas a la operación	Compactación del suelo, reducción de porosidad superficial y disminución de la capacidad de infiltración
Actividad minera de carbón	Intervención del macizo rocoso por labores subterráneas o zonas extractivas	Posible modificación localizada de condiciones de fracturamiento, flujo preferencial y tránsito del agua en el medio rocoso

Nota. Actividades antrópicas identificadas a partir de la interpretación cartográfica y la superposición espacial con las zonas potenciales de recarga. Fuente: Elaboración propia (2026).

Evaluación de impactos mediante matriz de Arboleda

La evaluación de impactos ambientales se desarrolló mediante la metodología de Arboleda González (2008), utilizando como referencia la calificación ambiental Ca. Esta valoración permitió jerarquizar los impactos potenciales derivados de la superposición entre actividades antrópicas y zonas potenciales de recarga. La fórmula aplicada fue:

$$Ca = C\ (P\ [7{,}0 \times E \times M + 3{,}0 \times D])$$

Donde C corresponde a la clase del impacto, positiva o negativa; P corresponde a la presencia o probabilidad de ocurrencia; E representa la evolución o velocidad con la que se manifiesta el impacto; M corresponde a la magnitud o grado de alteración generado; y D corresponde a la duración o permanencia temporal del impacto. En el presente estudio se trabajó con el valor absoluto de la calificación ambiental, debido a que los impactos evaluados corresponden a presiones negativas sobre las zonas potenciales de recarga.

Tabla 12

Criterios utilizados para la valoración de impactos ambientales

Criterio	Descripción	Escala aplicada
Presencia o probabilidad (P)	Posibilidad de que el impacto ocurra debido a la actividad identificada	0,10 a 1,00
Evolución	Velocidad con la que el impacto puede manifestarse	0,10 a 1,00
Magnitud (M)	Grado de alteración potencial sobre la infiltración o la calidad del agua de recarga	0,10 a 1,00
Duración (D)	Tiempo durante el cual puede mantenerse el efecto	0,10 a 1,00

Nota. Criterios empleados para la valoración de impactos ambientales sobre las zonas potenciales de recarga. Fuente: Adaptado de Arboleda González (2008).

Tabla 13

Rangos de interpretación de la calificación ambiental

Valor de Ca	Nivel de importancia
≤ 2,50	Poco significativo o irrelevante
>2,50 - 5,00	Moderadamente significativo o moderado
>5,00 - 7,50	Significativo o relevante
>7,50	Muy significativo o grave

Nota. Rangos para la interpretación de la calificación ambiental (Ca) según nivel de importancia del impacto. Fuente: Tomado de Arboleda González (2008).

Resultados y análisis de resultados

Resultado del índice de zonas potenciales de recarga

El mapa continuo del índice de zonas potenciales de recarga presentó valores entre 0,063 y 0,737 como se muestra en la Figura 5. Esto indica que, dentro del área evaluada, ningún sector alcanzó la categoría de recarga potencial muy alta, dado que el valor máximo se mantuvo por debajo del umbral de 0,80. Sin embargo, se identificaron sectores con recarga potencial alta, principalmente asociados a zonas donde coinciden condiciones favorables de litología, fracturamiento, cobertura y suelos.

Zonas potenciales de recarga identificadas

La reclasificación del índice permitió identificar cuatro categorías efectivas de recarga potencial: muy baja, baja, media y alta como se observa en la Figura 6. La categoría de recarga potencial media domina buena parte del área de estudio, mientras que la recarga potencial alta se concentra en sectores específicos donde se combinan condiciones estructurales favorables, presencia de drenajes y coberturas que permiten mayor retención de humedad. Las zonas de recarga baja y muy baja se relacionan con áreas donde las condiciones del suelo, la cobertura o las actividades antrópicas reducen la favorabilidad para la infiltración.

Tabla 14

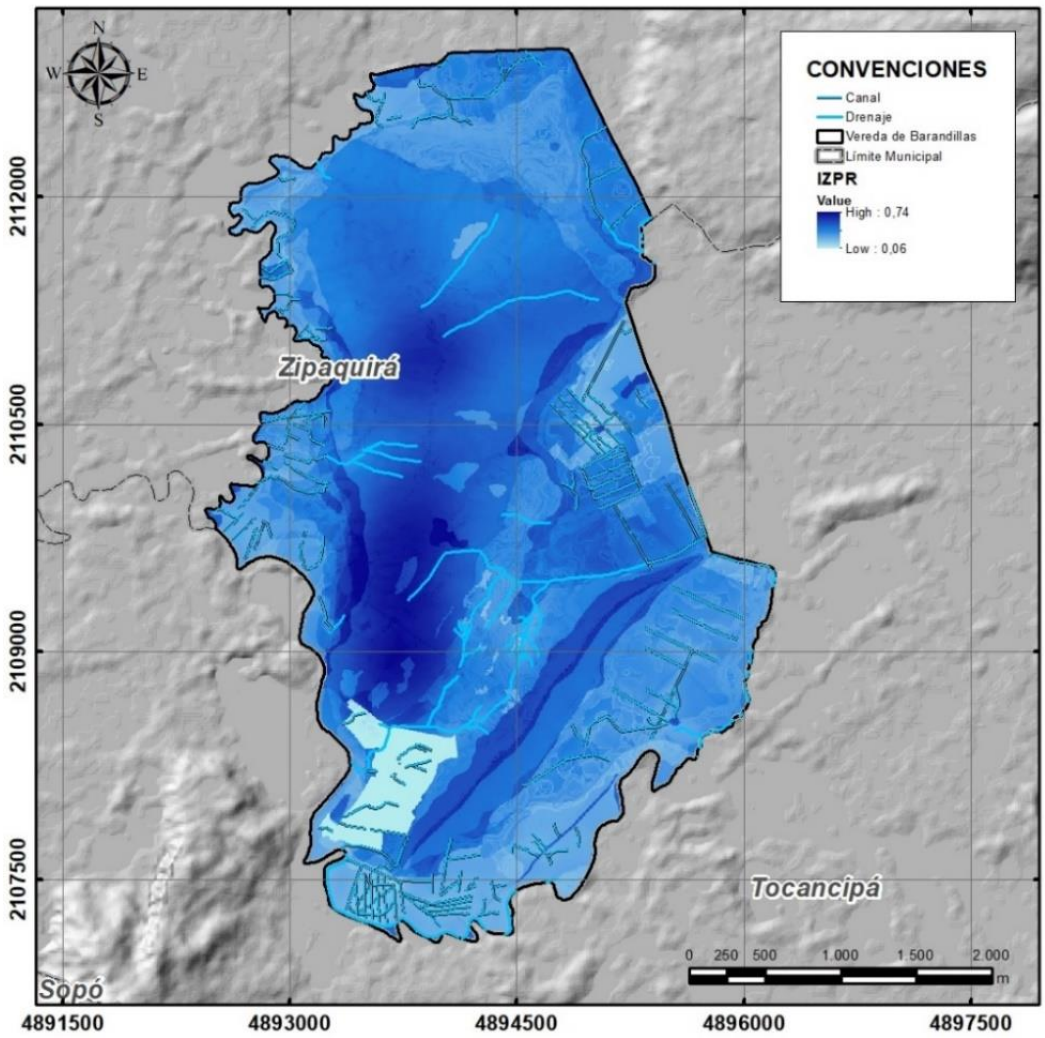
Área por categoría de recarga potencial

Categoría	Rango IZPR
Muy baja	0,00 - 0,20
Baja	>0,20 - 0,40
Media	>0,40 - 0,60
Alta	>0,60 - 0,80

Nota. La categoría muy alta no se presentó en el mapa final debido a que el índice máximo fue inferior a 0,80. Fuente: Elaboración propia (2026).

Figura 5

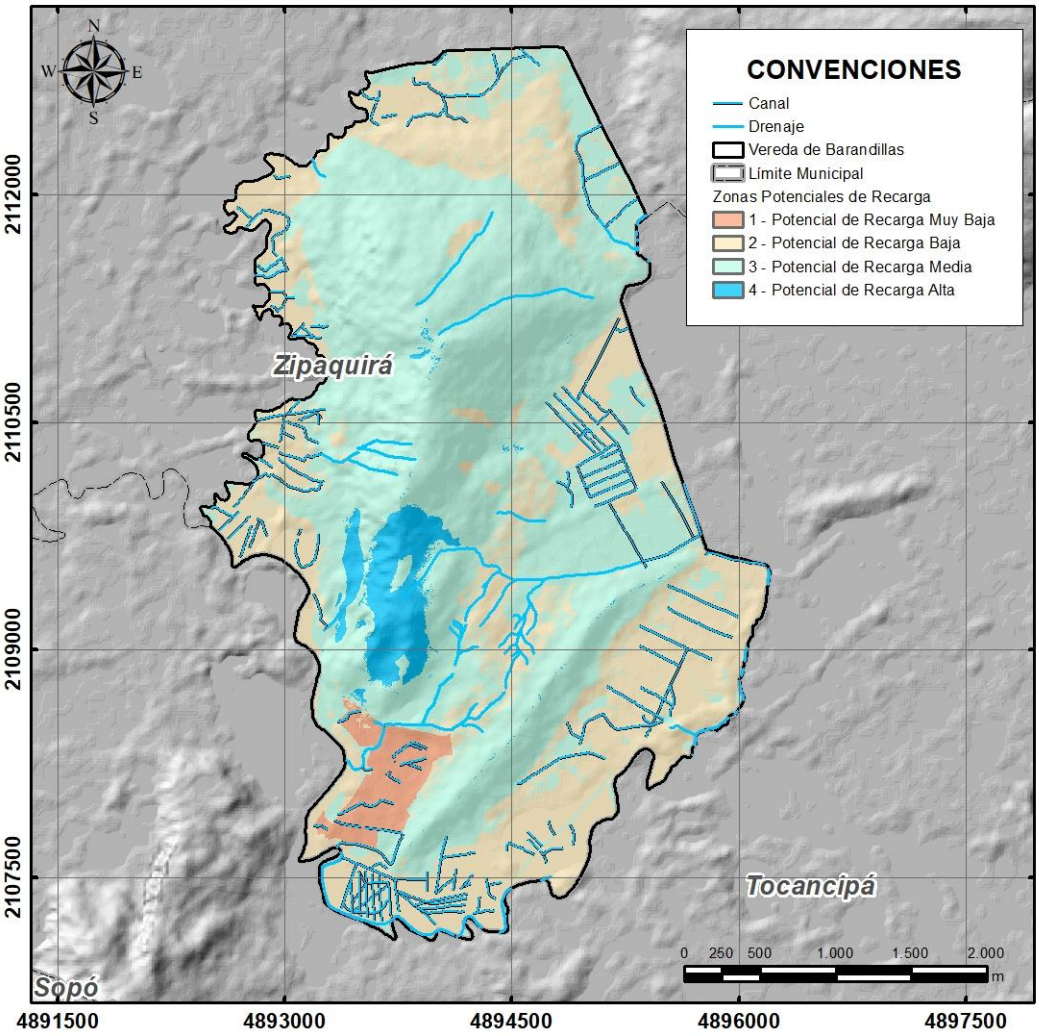
Mapa continuo del índice de zonas potenciales de recarga IZPR



Nota. Índice continúo calculado a partir de la integración de variables y análisis CRITIC-AHP en SIG. Fuente: Elaboración propia (2026).

Figura 6

Mapa de zonas de recarga potenciales para la vereda Barandillas



Nota. Mapa obtenido a partir de la reclasificación del índice IZPR en categorías de recarga potencial. Fuente: Elaboración propia (2026).

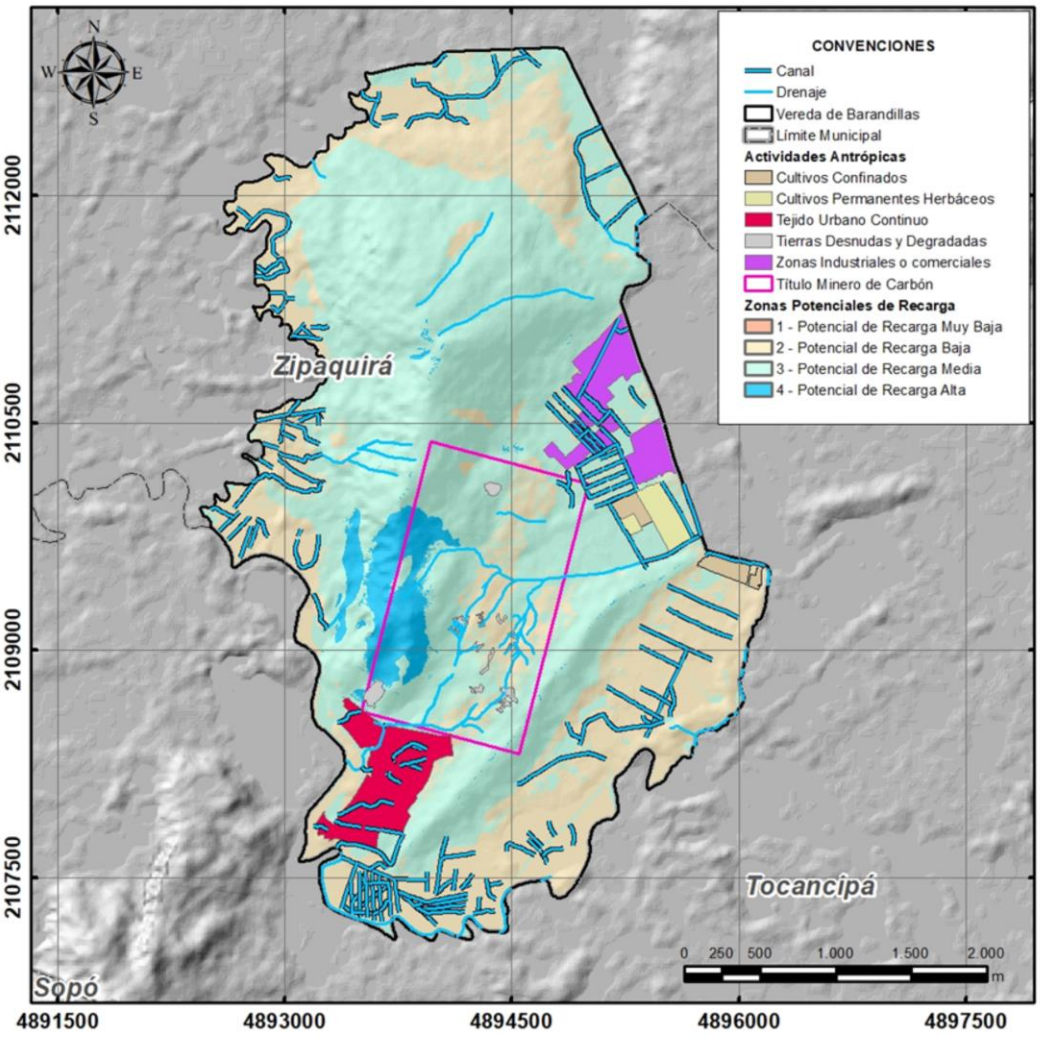
Análisis de las actividades antrópicas sobre las zonas de recarga

El análisis espacial de las zonas potenciales de recarga permitió identificar que las actividades antrópicas presentes en la vereda Barandillas se distribuyen sobre áreas clasificadas principalmente como recarga potencial baja, media y alta. Esta condición resulta relevante porque

las áreas de mayor potencial de recarga no se encuentran aisladas de la dinámica productiva del territorio y pueden modificar la cobertura, compactar el suelo, aumentar la escorrentía superficial o generar fuentes potenciales de contaminación.

Figura 7

Relación entre actividades antrópicas y zonas potenciales de recarga



Nota. Mapa construido a partir de las zonas potenciales de recarga, cobertura, canales, drenajes y actividades antrópicas identificadas. Fuente: Elaboración propia (2026).

En particular, se observan actividades agropecuarias, cultivos confinados, cultivos permanentes herbáceos, pastos limpios asociados a ganadería, tejido urbano continuo, zonas industriales o comerciales, tierras desnudas y degradadas, canales o drenajes modificados y actividad minera de carbón. Estas actividades fueron consideradas como presiones potenciales sobre las zonas de recarga debido a su capacidad de alterar las condiciones naturales que favorecen la infiltración del agua hacia el subsuelo.

En el caso de la ganadería desarrollada sobre pastos limpios, el principal efecto potencial se relaciona con la compactación del suelo por pisoteo, la disminución de la porosidad superficial y el aumento de la escorrentía. Los cultivos confinados y permanentes herbáceos pueden generar presiones asociadas a la modificación de coberturas, el manejo agrícola intensivo y el uso de fertilizantes o agroquímicos, lo cual puede incidir tanto en la infiltración como en la calidad del agua que alcanza el subsuelo. Por su parte, el tejido urbano continuo y las zonas industriales o comerciales representan presiones de mayor intensidad debido al sellamiento del suelo, la generación de superficies impermeables y el aumento de escorrentía superficial.

Las tierras desnudas y degradadas fueron consideradas como áreas de presión debido a la pérdida de cobertura vegetal, la exposición directa del suelo, el aumento de procesos erosivos y la reducción de la capacidad de retención de humedad. De igual manera, los canales y drenajes modificados pueden reducir el tiempo de permanencia del agua en el terreno, favoreciendo una conducción más rápida del flujo superficial y disminuyendo las oportunidades de infiltración.

La actividad minera de carbón también fue incorporada dentro del análisis por su presencia territorial en el área de estudio y por su relación potencial con la remoción o alteración de coberturas, la intervención del suelo, la presencia de infraestructura asociada, el manejo de aguas de mina y la posible modificación localizada de las condiciones de infiltración.

La superposición entre las actividades antrópicas y las zonas potenciales de recarga permitió identificar sectores donde las áreas de recarga media y alta coinciden con usos del suelo que pueden generar impermeabilización, compactación, pérdida de cobertura vegetal, alteración de drenajes, contaminación difusa o intervención minera. En este sentido, dichas áreas deben considerarse prioritarias para la gestión ambiental, debido a que presentan condiciones naturales favorables para la infiltración, pero al mismo tiempo se encuentran expuestas a presiones derivadas de las actividades productivas y de ocupación del territorio. Por tanto, el mapa de relación espacial entre actividades antrópicas y zonas potenciales de recarga constituye el soporte técnico para la valoración de impactos mediante la matriz de Arboleda y para la definición de medidas de manejo, conservación y seguimiento ambiental.

Matriz de evaluación de impactos ambientales

La matriz de Arboleda permitió valorar los impactos potenciales de las actividades antrópicas identificadas sobre las zonas potenciales de recarga. Los impactos fueron analizados principalmente en dos dimensiones: alteración de la capacidad de infiltración y riesgo de afectación de la calidad del agua infiltrada. La valoración se realizó considerando la condición espacial observada en el mapa de superposición entre actividades antrópicas y zonas de recarga.

Tabla 15

Identificación de aspectos e impactos ambientales evaluados

ID	Actividad	Aspecto ambiental	Impacto potencial
I1	Ganadería en pastos limpios	Pisoteo y compactación del suelo	Disminución de infiltración y aumento de escorrentía
I2	Ganadería en pastos limpios	Aporte de materia orgánica y nutrientes	Riesgo de alteración de calidad del agua infiltrada
I3	Cultivos confinados	Ocupación del suelo y manejo agrícola intensivo	Reducción localizada de infiltración natural
I4	Cultivos permanentes herbáceos	Uso de fertilizantes y agroquímicos	Riesgo de contaminación difusa
I5	Tejido urbano continuo	Impermeabilización del suelo	Disminución directa de la recarga y aumento de escorrentía
I6	Zonas industriales o comerciales	Sellamiento del suelo	Reducción de infiltración en zonas de recarga
I7	Zonas industriales o comerciales	Manejo de residuos, sustancias o vertimientos potenciales	Riesgo de contaminación puntual del agua de recarga
I8	Tierras desnudas y degradadas	Pérdida de cobertura vegetal	Erosión y disminución de infiltración efectiva
I9	Canales y drenajes modificados	Conducción rápida del agua superficial	Menor tiempo de permanencia del agua y reducción de infiltración
I10	Minería de carbón	Remoción o alteración de cobertura vegetal y suelo	Disminución localizada de infiltración y aumento de escorrentía superficial
I11	Minería de carbón	Manejo de aguas de mina, drenajes internos o escorrentía asociada a zonas intervenidas	Riesgo de arrastre de sólidos y alteración de la calidad del agua que puede infiltrarse
I12	Minería de carbón	Infraestructura, vías internas, patios o zonas compactadas asociadas a la operación	Compactación del suelo y reducción de la capacidad de infiltración
I13	Minería de carbón	Intervención del macizo rocoso por labores subterráneas o zonas extractivas	Posible modificación localizada de condiciones de fracturamiento, flujo preferencial y tránsito del agua

Nota. Aspectos e impactos ambientales identificados a partir de la relación espacial entre actividades antrópicas y zonas potenciales de recarga. Fuente: Elaboración propia (2026).

Tabla 16

Valoración de impactos ambientales mediante metodología de Arboleda

ID	P	E	M	D	Ca	Importancia
I1	0,90	0,70	0,70	0,70	4,98	Moderado
I2	0,70	0,50	0,50	0,50	2,27	Bajo o irrelevante
I3	0,85	0,60	0,60	0,60	3,67	Moderado
I4	0,70	0,50	0,60	0,60	2,73	Moderado
I5	1,00	1,00	0,90	1,00	9,30	Muy significativo
I6	1,00	0,80	0,80	1,00	7,48	Significativo
I7	0,75	0,80	0,80	0,80	5,16	Significativo
I8	0,85	0,60	0,60	0,60	3,67	Moderado
I9	0,75	0,50	0,50	0,60	2,66	Moderado
I10	0,75	0,50	0,60	0,60	2,93	Moderado
I11	0,70	0,60	0,70	0,70	3,53	Moderado
I12	0,75	0,60	0,60	0,70	3,46	Moderado
I13	0,50	0,50	0,70	1,00	2,73	Moderado

Nota. P: presencia; E: evolución; M: magnitud; D: duración; Ca: calificación ambiental.

Fuente: Elaboración propia (2026).

La matriz evidencia que el impacto de mayor importancia corresponde a la impermeabilización del suelo por tejido urbano continuo, clasificado como muy significativo. Los impactos asociados a las zonas industriales o comerciales se clasificaron como significativos, debido al sellamiento del suelo y al riesgo de contaminación puntual. Los impactos relacionados con ganadería, cultivos, tierras desnudas, canales modificados y minería de carbón se clasificaron principalmente como moderados, por lo que deben incorporarse dentro de medidas de manejo preventivo y seguimiento ambiental. El aporte de materia orgánica y nutrientes asociado a la ganadería presentó una importancia poco significativa o irrelevante.

Priorización de impactos

A continuación, se presenta la priorización de impactos ambientales obtenidos para la zona de estudio.

Tabla 17

Priorización de impactos ambientales identificados

Prioridad	Actividad	Impacto potencial	Ca	Importancia
1	Tejido urbano continuo	Disminución directa de la recarga y aumento de escorrentía	9,30	Muy significativo
2	Zonas industriales o comerciales	Reducción de infiltración en zonas de recarga	7,48	Significativo
3	Zonas industriales o comerciales	Riesgo de contaminación puntual del agua de recarga	5,16	Significativo
4	Ganadería en pastos limpios	Disminución de infiltración y aumento de escorrentía	4,98	Moderado
5	Cultivos confinados	Reducción localizada de infiltración natural	3,67	Moderado
6	Tierras desnudas y degradadas	Erosión y disminución de infiltración efectiva	3,67	Moderado
7	Minería de carbón	Riesgo de arrastre de sólidos y alteración de la calidad del agua que puede infiltrarse	3,53	Moderado
8	Minería de carbón	Compactación del suelo y reducción de la capacidad de infiltración	3,46	Moderado
9	Minería de carbón	Disminución localizada de infiltración y aumento de escorrentía superficial	2,93	Moderado
10	Cultivos permanentes herbáceos	Riesgo de contaminación difusa	2,73	Moderado
11	Minería de carbón	Posible modificación localizada de condiciones de fracturamiento, flujo preferencial y tránsito del agua	2,73	Moderado
12	Canales y drenajes modificados	Menor tiempo de permanencia del agua y reducción de infiltración	2,66	Moderado
13	Ganadería en pastos limpios	Riesgo de alteración de calidad del agua infiltrada	2,27	Poco significativo o irrelevante

Nota. La priorización de impactos ambientales se realizó con base en la calificación ambiental obtenida para cada actividad. Fuente: Elaboración propia (2026).

La priorización evidencia que las mayores presiones sobre las zonas potenciales de recarga se relacionan con la impermeabilización del suelo, el sellamiento de superficies y la posible contaminación puntual, principalmente asociadas al tejido urbano continuo y a las zonas

industriales o comerciales. Estos impactos obtuvieron las mayores calificaciones ambientales y, por tanto, requieren medidas prioritarias de prevención, control y seguimiento.

La compactación del suelo por ganadería, así como los impactos asociados a cultivos, minería de carbón, tierras desnudas y degradadas, canales modificados y manejo de aguas en zonas intervenidas, se clasificaron principalmente como moderados. Aunque presentan menor nivel de importancia frente a los impactos urbanos e industriales, deben ser considerados dentro de la propuesta de gestión ambiental, debido a que pueden generar efectos acumulativos cuando coinciden con zonas de recarga potencial media o alta.

Por lo cual, la estrategia de gestión ambiental debe orientar sus medidas hacia la prevención de nuevas áreas impermeabilizadas, el control de la escorrentía superficial, el manejo adecuado de residuos y aguas, la restauración de coberturas vegetales, la protección de drenajes y el seguimiento de las actividades productivas presentes en el territorio.

Propuesta de mejora

Estrategia de gestión ambiental para conservación de zonas potenciales de recarga

La propuesta de mejora se plantea como una estrategia de gestión ambiental orientada a conservar las zonas potenciales de recarga de acuíferos identificadas en la vereda Barandillas. Esta estrategia parte de los resultados del análisis multicriterio, del mapa final de recarga potencial, del análisis de actividades antrópicas y de la evaluación de impactos ambientales mediante el método de Arboleda. Su finalidad es orientar acciones de manejo, conservación, restauración y seguimiento en las áreas donde la función de recarga puede verse comprometida por actividades antrópicas, especialmente en sectores clasificados con recarga potencial media y alta.

La estrategia se presenta como una herramienta de gestión preventiva para apoyar la toma de decisiones a escala local. Por lo tanto, integra acciones dirigidas al control de la impermeabilización, manejo de escorrentía, protección de coberturas vegetales, restauración de suelos degradados, manejo ambiental de actividades productivas y fortalecimiento de la participación comunitaria.

Objetivo de la estrategia

Establecer lineamientos y programas de gestión ambiental para conservar las zonas potenciales de recarga de acuíferos en la vereda Barandillas, priorizando las áreas con recarga potencial media y alta que coinciden con presiones antrópicas, con el fin de contribuir a la protección preventiva del recurso hídrico subterráneo y a la seguridad hídrica local.

Alcance

La estrategia tiene un alcance preventivo, orientador y de gestión ambiental local. Se enfoca en la conservación de las zonas potenciales de recarga identificadas mediante análisis

espacial y en la reducción de las presiones derivadas de las actividades antrópicas presentes en el territorio. Las medidas propuestas se plantean como lineamientos de manejo aplicables a escala veredal y pueden servir como insumo para procesos de ordenamiento territorial, gestión comunitaria, priorización de áreas de conservación, manejo de actividades productivas y articulación con instrumentos como el POT municipal y el POMCA del río Bogotá.

Soporte normativo de la estrategia

Las zonas de recarga son reconocidas como áreas de especial importancia ecológica y, por tanto, deben ser objeto de acciones de conservación, manejo y protección preventiva. Por lo cual, para su adecuada gestión, la estrategia se soporta en el marco normativo colombiano relacionado con la protección del recurso hídrico subterráneo, las zonas de recarga de acuíferos, la planificación ambiental, el ordenamiento territorial y la gestión integral del agua.

Tabla 18

Normatividad de soporte para la estrategia de gestión ambiental

Instrumento	Relación con la estrategia
Ley 99 de 1993	Reconoce la protección de áreas de especial importancia ecológica y orienta la gestión ambiental del territorio.
Ley 388 de 1997	Permite incorporar determinantes ambientales y áreas de protección dentro del ordenamiento territorial municipal.
Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico	Orienta la gestión sostenible del agua mediante la articulación entre conocimiento técnico, planificación, conservación, uso eficiente y protección del recurso hídrico superficial y subterráneo.
Decreto 1076 de 2015	Compila disposiciones ambientales relacionadas con la protección de recursos naturales, cuerpos de agua, zonas de recarga y áreas de importancia ecológica.
Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos (PMAA)	Constituyen instrumentos de planificación para el conocimiento, manejo, seguimiento y protección de los acuíferos. Los resultados del presente estudio pueden servir como insumo preliminar para futuras acciones asociadas a la gestión de acuíferos.
Resolución 0017 de 2026 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Adopta la Guía Metodológica para la Identificación de Zonas Potenciales de Recarga de Acuíferos.
Guía Metodológica para la Identificación de Zonas Potenciales de Recarga de Acuíferos	Establece los componentes, variables y criterios técnicos para identificar zonas con potencial de recarga. Además, reconoce que la identificación de zonas potenciales puede complementar estudios posteriores de mayor detalle y otros instrumentos de gestión del agua subterránea.

Instrumento	Relación con la estrategia
POMCA del río Bogotá	Instrumento regional de planificación ambiental de la cuenca que puede incorporar insumos sobre áreas estratégicas de recarga.
POT del municipio de Zipaquirá	Instrumento local para integrar criterios de protección, manejo del suelo rural y gestión de áreas estratégicas.

Nota. Elaboración propia (2026).

Línea base para la formulación de la estrategia

La línea base de la estrategia se construye a partir de los principales resultados del estudio. El índice de zonas potenciales de recarga presentó valores entre 0,0638237 y 0,73713, por lo cual se identificaron categorías de recarga muy baja, baja, media y alta, sin presencia de la categoría muy alta. Las zonas de recarga media y alta se relacionan principalmente con condiciones litológicas y estructurales favorables, presencia de lineamientos, características del suelo y coberturas que contribuyen a la retención de humedad e infiltración.

El análisis de actividades antrópicas permitió reconocer presiones asociadas a ganadería en pastos limpios, cultivos confinados, cultivos permanentes herbáceos, tejido urbano continuo, zonas industriales o comerciales, tierras desnudas y degradadas, canales y drenajes modificados, así como actividad minera de carbón. La matriz de Arboleda indicó que el impacto de mayor importancia corresponde a la impermeabilización del suelo asociada al tejido urbano continuo, clasificado como muy significativo. Los impactos relacionados con zonas industriales o comerciales se clasificaron como significativos, mientras que los impactos asociados a ganadería, cultivos, tierras desnudas, canales modificados y actividad minera de carbón se clasificaron principalmente como moderados.

De acuerdo con lo anterior, la estrategia prioriza acciones preventivas y de manejo en las zonas de recarga media y alta que coinciden con estas presiones, especialmente aquellas orientadas a controlar la impermeabilización, reducir la escorrentía, proteger coberturas, manejar

adecuadamente residuos y aguas, restaurar suelos degradados y fortalecer el seguimiento ambiental.

Tabla 19

Resumen de línea base para la estrategia de gestión ambiental

Elemento de línea base	Resultado principal	Implicación para la gestión
Índice de recarga potencial	Rango entre 0,0638237 y 0,73713	No se identificó recarga muy alta; se priorizan zonas de recarga media y alta.
Variables con mayor peso final	Litología, densidad de lineamientos, suelos y cobertura	La gestión debe proteger suelos, coberturas y áreas estructuralmente favorables para la infiltración.
Zonas de recarga media y alta	Sectores asociados a condiciones favorables de infiltración	Prioridad para conservación, control de usos y seguimiento ambiental.
Actividades antrópicas críticas	Tejido urbano, zonas industriales/comerciales, ganadería, agricultura, actividad minera de carbón, tierras degradadas y canales modificados	Requieren medidas de prevención, manejo y seguimiento según su nivel de impacto.
Impactos más relevantes	Impermeabilización, sellamiento del suelo, contaminación puntual, compactación, erosión, reducción de infiltración y alteración de escorrentía	Deben orientar los programas de gestión ambiental y la priorización de acciones.

Nota. Elaboración propia (2026).

Programas de gestión ambiental propuestos

La estrategia se estructura en seis programas de manejo. Los programas de gestión ambiental se formulan con base en los impactos priorizados y en las condiciones espaciales identificadas en el mapa de zonas potenciales de recarga. Cada programa incluye objetivo, impactos atendidos, medidas propuestas, responsables sugeridos, indicadores y prioridad de implementación. Esta estructura facilita su incorporación en procesos de gestión ambiental local y seguimiento comunitario.

Tabla 20

Programa 1 - Conservación de zonas de recarga potencial alta y media

Elemento	Descripción
Objetivo	Conservar las áreas clasificadas con recarga potencial media y alta, priorizando aquellas que coinciden con coberturas protectoras, drenajes, lineamientos y suelos favorables para la infiltración.
Impactos atendidos	Pérdida de cobertura vegetal, disminución de infiltración, aumento de escorrentía y ocupación progresiva de áreas con potencial de recarga.
Medidas propuestas	Delimitar sectores prioritarios de conservación; evitar cambios de uso del suelo que reduzcan la infiltración; mantener coberturas vegetales protectoras; promover acuerdos comunitarios de protección; articular el mapa de recarga con instrumentos de planificación local.
Responsables sugeridos	Alcaldía municipal, autoridad ambiental, propietarios rurales, comunidad local y juntas de acción comunal.
Indicadores	Área de recarga media y alta protegida o priorizada; número de acuerdos comunitarios; número de acciones de conservación implementadas; porcentaje de coberturas protectoras mantenidas.
Prioridad	Alta

Nota. Elaboración propia (2026).

Tabla 21

Programa 2 - Manejo agropecuario sostenible en zonas de recarga

Elemento	Descripción
Objetivo	Reducir los efectos de la ganadería y los cultivos sobre la infiltración, la cobertura del suelo y la calidad potencial del agua que ingresa al subsuelo.
Impactos atendidos	Compactación del suelo, aumento de escorrentía, contaminación difusa por fertilizantes o agroquímicos y pérdida de cobertura protectora.
Medidas propuestas	Promover rotación de potreros; controlar la carga animal en zonas sensibles; proteger suelos húmedos y drenajes; implementar barreras vivas; fomentar buenas prácticas agrícolas; reducir el uso inadecuado de fertilizantes y agroquímicos; mantener franjas de protección cerca de drenajes y canales.
Responsables sugeridos	Productores agropecuarios, propietarios rurales, asistencia técnica municipal, autoridad ambiental y comunidad local.
Indicadores	Número de predios con buenas prácticas implementadas; hectáreas con manejo sostenible; número de franjas de protección establecidas; reducción de áreas con suelo desnudo o compactado.
Prioridad	Media - alta

Nota. Elaboración propia (2026).

Tabla 22

Programa 3 - Control de impermeabilización y expansión urbana

Elemento	Descripción
Objetivo	Prevenir el aumento de superficies impermeables en zonas de recarga potencial media y alta y reducir la escorrentía generada por áreas urbanizadas.
Impactos atendidos	Disminución directa de la recarga, aumento de escorrentía superficial, impermeabilización del suelo y alteración del drenaje natural.
Medidas propuestas	Restringir nuevas superficies impermeables en sectores prioritarios; promover sistemas urbanos de drenaje sostenible; implementar zanjas de infiltración, jardines de lluvia o superficies permeables donde sea viable; controlar vertimientos y conexiones inadecuadas; incorporar el mapa de recarga en decisiones de expansión urbana.
Responsables sugeridos	Alcaldía municipal, oficina de planeación, autoridad ambiental, urbanizadores, comunidad local y empresas de servicios públicos.
Indicadores	Área impermeabilizada controlada; número de sistemas de drenaje sostenible implementados; número de conceptos de planeación que incorporan el mapa de recarga; reducción de puntos críticos de escorrentía.
Prioridad	Muy alta

Nota. Elaboración propia (2026).

Tabla 23

Programa 4 - Restauración de suelos desnudos y degradados

Elemento	Descripción
Objetivo	Recuperar la cobertura vegetal y la capacidad de retención de humedad en áreas con suelos desnudos o degradados que coinciden con zonas potenciales de recarga.
Impactos atendidos	Erosión, pérdida de cobertura vegetal, disminución de infiltración efectiva, aumento de escorrentía y pérdida de humedad del suelo.
Medidas propuestas	Revegetalizar áreas degradadas; implementar obras sencillas de control de erosión; promover cobertura permanente del suelo; estabilizar taludes o superficies expuestas; priorizar la restauración en zonas de recarga media y alta.
Responsables sugeridos	Propietarios rurales, Alcaldía municipal, autoridad ambiental, comunidad local e instituciones educativas.
Indicadores	Hectáreas revegetalizadas; número de puntos erosivos intervenidos; porcentaje de recuperación de cobertura; número de jornadas de restauración realizadas.
Prioridad	Media – alta.

Nota. Elaboración propia (2026).

Tabla 24

Programa 5 - Gestión en zonas industriales, comerciales y de actividades extractivas

Elemento	Descripción
Objetivo	Reducir el riesgo de afectación de la infiltración y de la calidad del agua que puede ingresar al subsuelo en zonas industriales, comerciales y áreas asociadas a actividades extractivas presentes en la vereda Barandillas.
Impactos atendidos	Sellamiento del suelo, reducción de infiltración, contaminación puntual, manejo inadecuado de residuos y aguas, compactación localizada, aumento de escorrentía y alteración de coberturas en zonas intervenidas.
Medidas propuestas	Verificar el manejo adecuado de aguas de escorrentía y drenajes internos; evitar la disposición inadecuada de residuos, estériles o materiales sueltos en zonas de recarga media y alta; promover superficies con manejo de aguas lluvias; mantener o restaurar coberturas vegetales en áreas intervenidas; proteger drenajes y canales cercanos; incorporar el mapa de zonas potenciales de recarga como insumo para la planeación ambiental de actividades productivas.
Responsables sugeridos	Autoridad ambiental, Alcaldía municipal, responsables de actividades industriales o comerciales, titulares o responsables de actividades extractivas, propietarios rurales y comunidad local.
Indicadores	Número de puntos de manejo de agua verificados; número de hallazgos por disposición inadecuada de residuos o materiales; hectáreas revegetalizadas o protegidas; número de inspecciones a drenajes y canales; número de actividades productivas que incorporan el mapa de recarga como insumo de gestión.
Prioridad	Alta

Nota. Elaboración propia (2026).

Tabla 25

Programa 6 - Seguimiento, educación ambiental y participación comunitaria

Elemento	Descripción
Objetivo	Fortalecer el seguimiento ambiental, la apropiación comunitaria y la actualización de información relacionada con las zonas potenciales de recarga de acuíferos en la vereda Barandillas.
Impactos atendidos	Falta de seguimiento a cambios de uso del suelo, pérdida de coberturas, deterioro de drenajes, ocupación de zonas de recarga y baja apropiación social de las áreas estratégicas para la infiltración.
Medidas propuestas	Realizar jornadas comunitarias de socialización del mapa de recarga; promover educación ambiental sobre protección de zonas de recarga; implementar recorridos periódicos de verificación de coberturas, drenajes y zonas intervenidas; actualizar información sobre puntos de agua y actividades antrópicas; articular los resultados con Juntas de Acción Comunal, instituciones educativas y actores productivos.
Responsables sugeridos	Alcaldía municipal, autoridad ambiental, comunidad local, instituciones educativas, juntas comunitarias y actores productivos.
Indicadores	Número de jornadas de educación ambiental realizadas; número de participantes; número de recorridos de seguimiento; número de reportes comunitarios; actualización periódica del mapa de presiones antrópicas; número de actores vinculados a la estrategia.
Prioridad	Alta

Nota. Elaboración propia (2026).

Priorización de acciones

La priorización de acciones se definió con base en la matriz de valoración de impactos ambientales, el mapa de zonas potenciales de recarga y la relación espacial entre las actividades antrópicas y las zonas clasificadas con recarga media y alta. Esta priorización permite orientar la implementación gradual de la estrategia hacia los impactos de mayor importancia ambiental y hacia los sectores donde se requiere mayor seguimiento.

Tabla 26

Priorización de acciones de la estrategia de gestión ambiental

Prioridad	Acción estratégica	Justificación
1	Control de impermeabilización y expansión urbana	Atiende el impacto de mayor calificación ambiental, asociado a la disminución directa de recarga y aumento de escorrentía por tejido urbano continuo.
2	Gestión ambiental de zonas industriales y comerciales	Atiende impactos significativos relacionados con sellamiento del suelo, reducción de infiltración y riesgo de contaminación puntual.
3	Conservación de zonas de recarga media y alta	Protege sectores con condiciones favorables para la infiltración y evita que aumenten las presiones antrópicas.
4	Manejo agropecuario sostenible	Reduce compactación, escorrentía, pérdida de cobertura y contaminación difusa asociada a ganadería y cultivos.
5	Restauración de suelos desnudos y degradados	Recupera coberturas, mejora la retención de humedad y reduce procesos erosivos en zonas prioritarias.
6	Manejo preventivo de actividades extractivas y áreas intervenidas	Atiende impactos moderados relacionados con compactación, manejo de aguas, escorrentía y alteración localizada de coberturas.
7	Seguimiento, educación ambiental y participación comunitaria	Asegura continuidad, apropiación social, actualización de información y verificación de las medidas propuestas.

Nota. Elaboración propia (2026).

La priorización de acciones permite orientar la implementación de la estrategia hacia los impactos con mayor importancia ambiental, sin excluir aquellos clasificados como moderados que pueden generar efectos acumulativos en zonas de recarga potencial media y alta. En este sentido, las primeras acciones deben enfocarse en prevenir la impermeabilización, controlar el sellamiento de superficies, manejar adecuadamente residuos y aguas, proteger coberturas vegetales y fortalecer el seguimiento de actividades productivas presentes en el territorio.

Conclusiones

La aplicación de la metodología para la identificación de zonas potenciales de recarga permitió delimitar espacialmente las áreas con diferente aptitud de recarga en la vereda Barandillas, municipio de Zipaquirá. El índice final presentó valores entre 0,0638 y 0,7371, por lo cual se identificaron categorías de recarga potencial muy baja, baja, media y alta, sin presencia de categoría muy alta. Este resultado indica que, aunque el territorio presenta sectores favorables para la infiltración, ningún sector alcanzó valores superiores a 0,80 dentro de la escala empleada.

El análisis multicriterio permitió establecer que las variables con mayor influencia en la identificación de zonas potenciales de recarga fueron la litología, la densidad de lineamientos, los suelos, la cobertura de la tierra y el Índice Topográfico de Humedad. Estos resultados son coherentes con las condiciones del área de estudio, donde la presencia de unidades rocosas, fracturamiento, características del suelo y coberturas vegetales inciden directamente en la infiltración y en la posible circulación del agua hacia el subsuelo.

La evaluación de impactos mediante el método de Arboleda González (2008) permitió identificar que las mayores presiones sobre las zonas potenciales de recarga están asociadas a la impermeabilización del suelo por tejido urbano continuo, clasificada como muy significativa, y a las zonas industriales o comerciales, cuyos impactos se relacionan con el sellamiento del suelo y el riesgo de contaminación puntual. Estas actividades representan las principales amenazas para la conservación de los procesos de infiltración en el área de estudio.

Los impactos asociados a ganadería, cultivos, tierras desnudas y degradadas, canales modificados y minería de carbón fueron clasificados principalmente como moderados. Aunque presentan menor calificación ambiental que los impactos urbanos e industriales, requieren medidas de manejo preventivo y seguimiento, especialmente cuando se localizan sobre zonas de recarga

potencial media o alta, debido a que pueden generar efectos acumulativos sobre el suelo, la cobertura, la escorrentía y la calidad potencial del agua infiltrada.

La estrategia de gestión ambiental formulada constituye una herramienta preventiva para orientar la conservación de las zonas potenciales de recarga en la vereda Barandillas. Sus programas se enfocan en la protección de áreas de recarga media y alta, el manejo agropecuario sostenible, el control de impermeabilización y expansión urbana, la restauración de suelos degradados, la gestión de zonas industriales, comerciales y extractivas, y el seguimiento comunitario y ambiental del territorio.

Los resultados del estudio pueden servir como insumo técnico para la planificación ambiental local, especialmente en la articulación con el POT municipal, el POMCA del río Bogotá, la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico y futuros procesos relacionados con Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos. De esta manera, el trabajo aporta una base espacial y metodológica para orientar decisiones de conservación, manejo del suelo y protección preventiva del recurso hídrico subterráneo.

Recomendaciones

Se recomienda que resultados como el del presente estudio se incorporen como insumo técnico en los procesos de planificación ambiental y ordenamiento territorial del municipio de Zipaquirá, especialmente para la protección de las zonas clasificadas con recarga potencial media y alta. Estas áreas requieren ser consideradas dentro de las decisiones relacionadas con cambios de uso del suelo, expansión urbana, actividades productivas e intervenciones que puedan modificar la infiltración o aumentar la escorrentía superficial.

Las acciones de gestión ambiental deben concentrarse en los sectores donde las zonas de recarga media y alta coinciden con actividades antrópicas como tejido urbano, zonas industriales o comerciales, ganadería, cultivos, áreas degradadas, canales modificados y actividad minera de carbón. En estos sectores resulta prioritario controlar la impermeabilización del suelo, mejorar el manejo de aguas lluvias, conservar coberturas vegetales, proteger drenajes y evitar la disposición inadecuada de residuos o materiales que puedan afectar la calidad del agua que infiltra.

En las áreas agropecuarias, se recomienda fortalecer buenas prácticas orientadas a reducir la compactación del suelo y conservar la capacidad de infiltración. Entre ellas se incluyen el manejo adecuado de la carga animal, la rotación de potreros, el mantenimiento de coberturas, el uso responsable de fertilizantes y agroquímicos, y la protección de drenajes naturales o modificados. Estas medidas son importantes porque, aunque varios impactos fueron clasificados como moderados, pueden generar efectos acumulativos si se mantienen en el tiempo sobre zonas con potencial de recarga.

Para las zonas industriales, comerciales y extractivas presentes en el área de estudio, se recomienda promover medidas preventivas relacionadas con el manejo de escorrentía, control de aguas, protección de drenajes, disposición adecuada de residuos, restauración de coberturas y

seguimiento de áreas intervenidas. En el caso de la actividad minera de carbón, estas acciones deben integrarse de forma preventiva a la gestión ambiental del territorio, especialmente donde exista coincidencia con zonas de recarga potencial media o alta.

Como fase posterior, se recomienda desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual de la vereda Barandillas, que permita comprender con mayor detalle la dinámica del flujo subterráneo, la relación entre zonas de recarga, tránsito y descarga, y la conexión con los puntos actuales de aprovechamiento del recurso hídrico. Para ello, sería necesario actualizar el inventario de puntos de agua, incluyendo pozos, aljibes, manantiales, nacederos y captaciones, ya que estos pueden aportar información clave sobre posibles zonas de descarga, niveles de agua, usos actuales y condiciones generales del sistema.

Ese modelo hidrogeológico también permitiría evaluar con mayor precisión el potencial de aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo y validar si las condiciones locales podrían suplir parcial o totalmente posibles demandas de agua en el territorio. Para esto sería necesario complementar el inventario con mediciones de niveles, caudales, calidad fisicoquímica del agua y, de ser posible, información geofísica e hidrogeoquímica que permita mejorar la interpretación del sistema acuífero.

Finalmente, los resultados deberían articularse con instrumentos como el POT municipal, el POMCA del río Bogotá, los programas de uso eficiente y ahorro del agua, la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico y futuros procesos asociados a Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos. Esta articulación permitiría que el mapa de zonas potenciales de recarga no quede solo como un resultado académico, sino como una herramienta útil para la conservación, el seguimiento ambiental y la toma de decisiones sobre el recurso hídrico subterráneo en Barandillas.

Referencias

Alcaldía Municipal de Zipaquirá. (2020). *Plan de desarrollo Zipaquirá, ciudad de los servicios y las oportunidades 2020–2024* (Acuerdo Municipal 05 de 2020). https://www.zipaquira-cundinamarca.gov.co/planes/plan-de-desarrollo-2020--2024

Arboleda González, J. A. (2008). *Manual para la evaluación de impacto ambiental de proyectos, obras o actividades.* https://www.academia.edu/34461272/Manual_EIA_Jorge_Arboleda_1

Betancur-Vargas, T., Martínez-Uribe, C., García-Aristizábal, E. F., & Escobar-Martínez, J. F. (2017). Identificación y caracterización de flujos regionales de recarga de agua a un acuífero libre. *Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia*, (85), 70–85. https://doi.org/10.17533/udea.redin.n85a07

Bolaños-Chavarría, S., Betancur-Vargas, T., Salazar-Villegas, J. F., & Werner, M. (2022). Consideraciones sobre la oferta hídrica de los sistemas acuífero-humedal en la cuenca Magdalena-Cauca, Colombia, a partir de la interpretación de datos de los satélites GRACE. *Revista de Ciencias Ambientales, 57*(1), 1–24. https://doi.org/10.15359/rca.57-1.6

CEPAL. (2018). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe*. Naciones Unidas. https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/c41bc64e-b240-4f80-802d-4a60484a02e4/content

Conesa Fernández-Vítora, V. (1997). *Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental* (3.ª ed. rev. y amp.). Mundi-Prensa.

Congreso de la República de Colombia. (1993, 22 de diciembre). *Ley 99 de 1993, por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones*. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297

Congreso de la República de Colombia. (1997, 18 de julio). *Ley 388 de 1997, por la cual se modifica la Ley 9 de 1989 y la Ley 2 de 1991, y se dictan otras disposiciones*. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=339

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2019). *Plan de ordenación y manejo de la cuenca hidrográfica del río Bogotá (POMCA río Bogotá 2019)* (Resolución CAR 957 de 2019). https://www.car.gov.co/vercontenido/3691

Custodio, E., & Llamas, M. R. (1996). *Hidrología subterránea* (2.ª ed.). Ediciones Omega.

Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2025). *Informe de gestión EAAB-ESP 2024*. https://www.acueducto.com.co/wps/wcm/connect/EAB2/fa63d559-94fd-4e5a-a556-ec772e18c27f/MPFD0801F08+Informe+de+Gestion+EAAB-ESP+2024+VF.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPACE.Z18_K862HG82NOTF70QEKDBLFL3000-fa63d559-94fd-4e5a-a556-ec772e18c27f-pi.409S

FAO. (2011). *The state of the world's land and water resources for food and agriculture (SOLAW): Managing systems at risk* [El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura SOLAW: gestión de sistemas en riesgo]. FAO & Earthscan. https://www.fao.org/4/i1688e/i1688e.pdf

Fetter, C. W. (2000). *Applied hydrogeology* [Hidrogeología aplicada] (4th ed.). Prentice Hall.

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater* [Agua subterránea]. Prentice Hall. https://gw-project.org/books/groundwater/

Leopold, L. B., Clarke, F. E., Hanshaw, B. B., & Balsley, J. R. (1971). *A procedure for evaluating environmental impact* [Procedimiento para evaluar el impacto ambiental] (Geological Survey Circular 645). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/cir645

Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis* [Ecosistemas y bienestar humano: síntesis]. Island Press. https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2026). *Resolución 0017 de 2026, por la cual se adopta la Guía metodológica para la identificación de zonas potenciales de recarga de acuíferos*. https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-0017-de-2026/

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Política nacional para la gestión integral del recurso hídrico (PNGIRH)*. https://archivo.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/plan-hidrico-nacional/Politica-nacional-Gestion-integral-de-recurso-Hidrico.pdf

Pérez Vega, A. (2021). *Potencial hidrogeológico del sinclinal Suesca-Teusacá (sector central) como fuente de abastecimiento en el municipio de Tocancipá, Cundinamarca (Colombia)* [Tesis de maestría, Universidad Antonio Nariño]. http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/5204

Todd, D. K., & Mays, L. W. (2004). *Groundwater hydrology* [Hidrología del agua subterránea] (3rd ed.). Wiley.

UNEP. (2016). *UNEP Frontiers 2016 report: Emerging issues of environmental concern* [Informe Fronteras 2016 del PNUMA: temas emergentes de preocupación ambiental]. United Nations Environment Programme. https://wesr.unep.org/media/docs/assessments/UNEP_Frontiers_2016_report_emerging_issues_of_environmental_concern.pdf

UNESCO. (2022). *The United Nations world water development report 2022: Groundwater: Making the invisible visible* [Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2022: aguas subterráneas: hacer visible el recurso invisible]. UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380721

U.S. Geological Survey. (2019a, 16 de octubre). *Aquifers and groundwater* [Acuíferos y agua subterránea]. U.S. Department of the Interior. https://www.usgs.gov/water-science-school/science/aquifers-and-groundwater

U.S. Geological Survey. (2019b, 8 de junio). *Infiltration and the water cycle* [La infiltración y el ciclo del agua]. U.S. Department of the Interior. https://www.usgs.gov/water-science-school/science/infiltration-and-water-cycle

U.S. Geological Survey. (2022, 13 de octubre). *El ciclo del agua - The water cycle.* Fotografía. U.S. Department of the Interior. https://www.usgs.gov/media/images/el-ciclo-del-agua-water-cycle-spanish-png

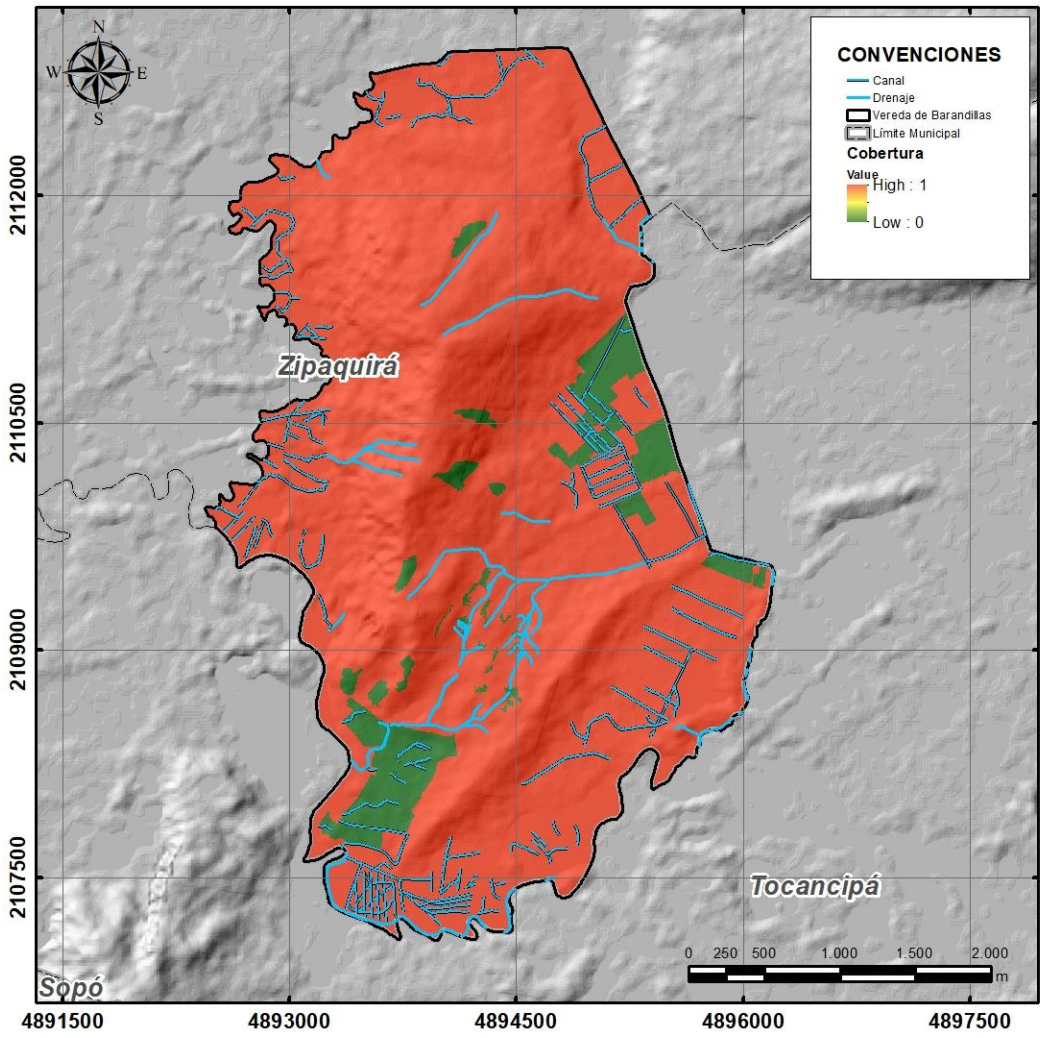
Younger, P. L., Banwart, S. A., & Hedin, R. S. (2002). *Mine water: Hydrology, pollution, remediation* [Agua de mina: hidrología, contaminación y remediación]. Kluwer Academic Publishers.

Anexos

Anexo A. Mapas de las variables procesadas

Figura 8

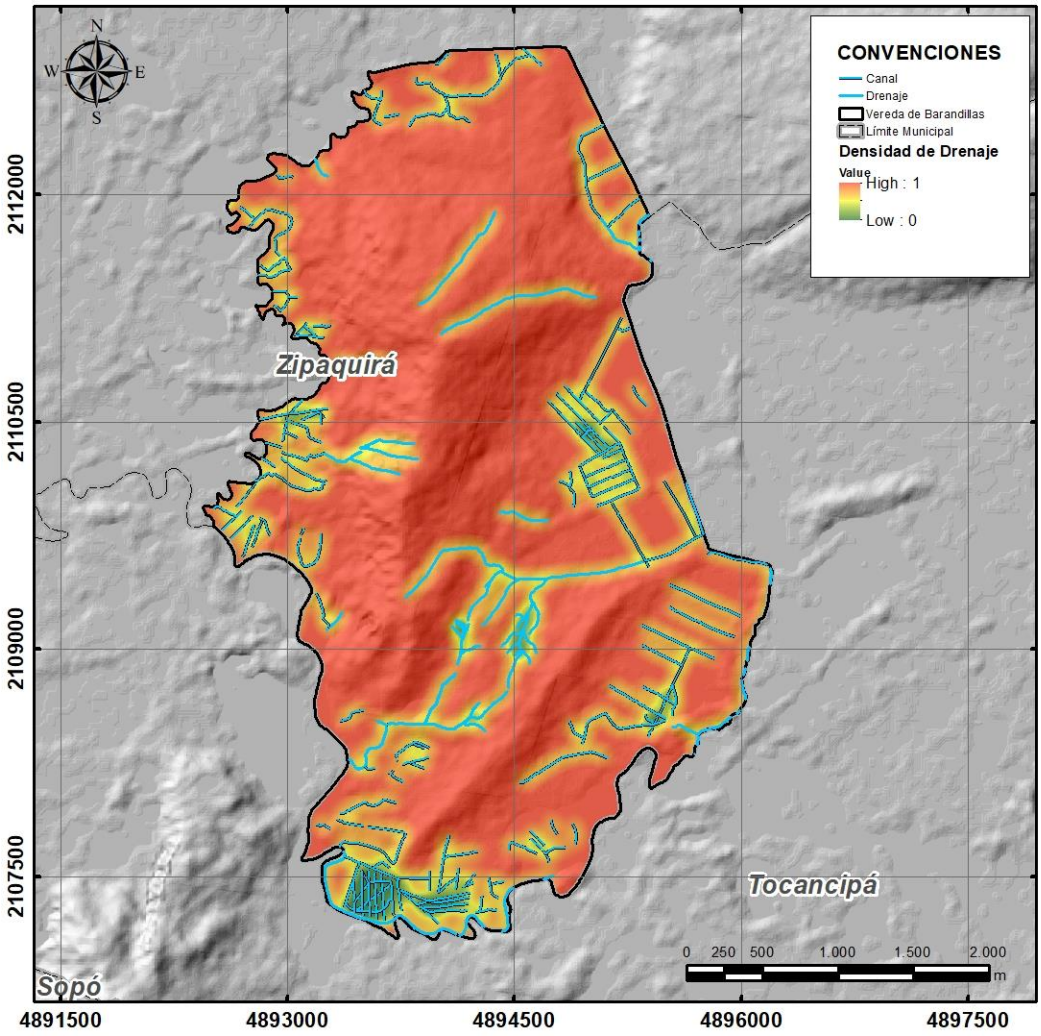
Ráster de cobertura normalizado



Nota. Elaboración propia (2026).

Figura 9

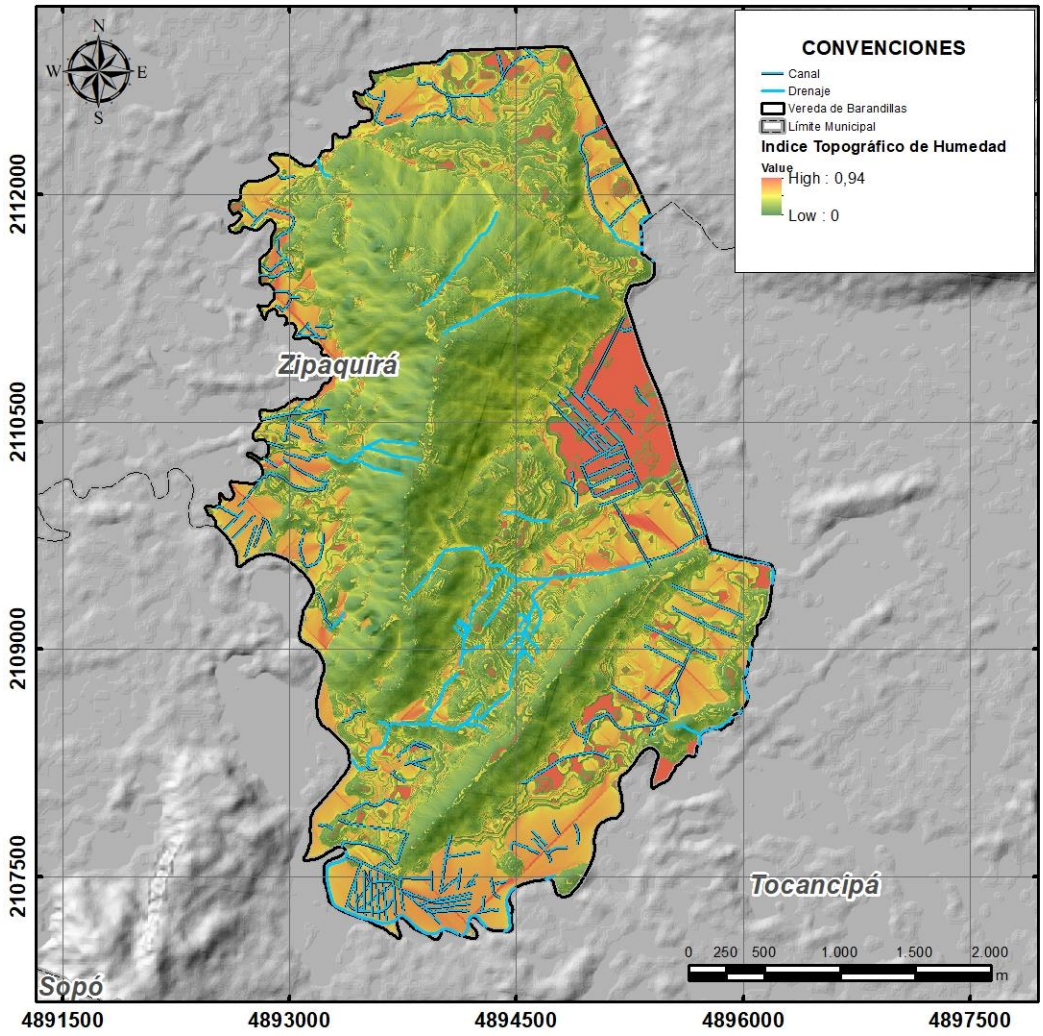
Ráster de densidad de drenaje normalizado



Nota. Elaboración propia (2026).

Figura 10

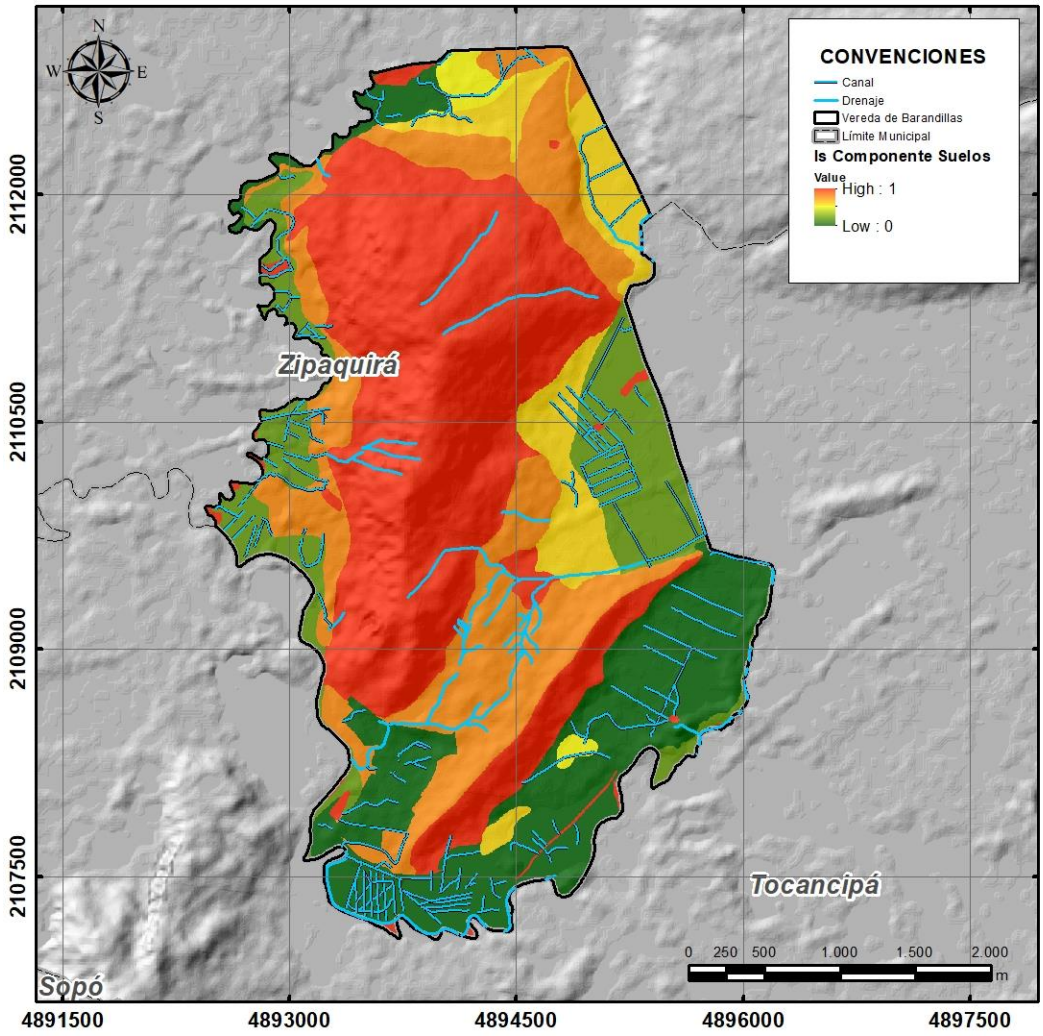
Ráster ITH normalizado



Nota. Elaboración propia (2026).

Figura 11

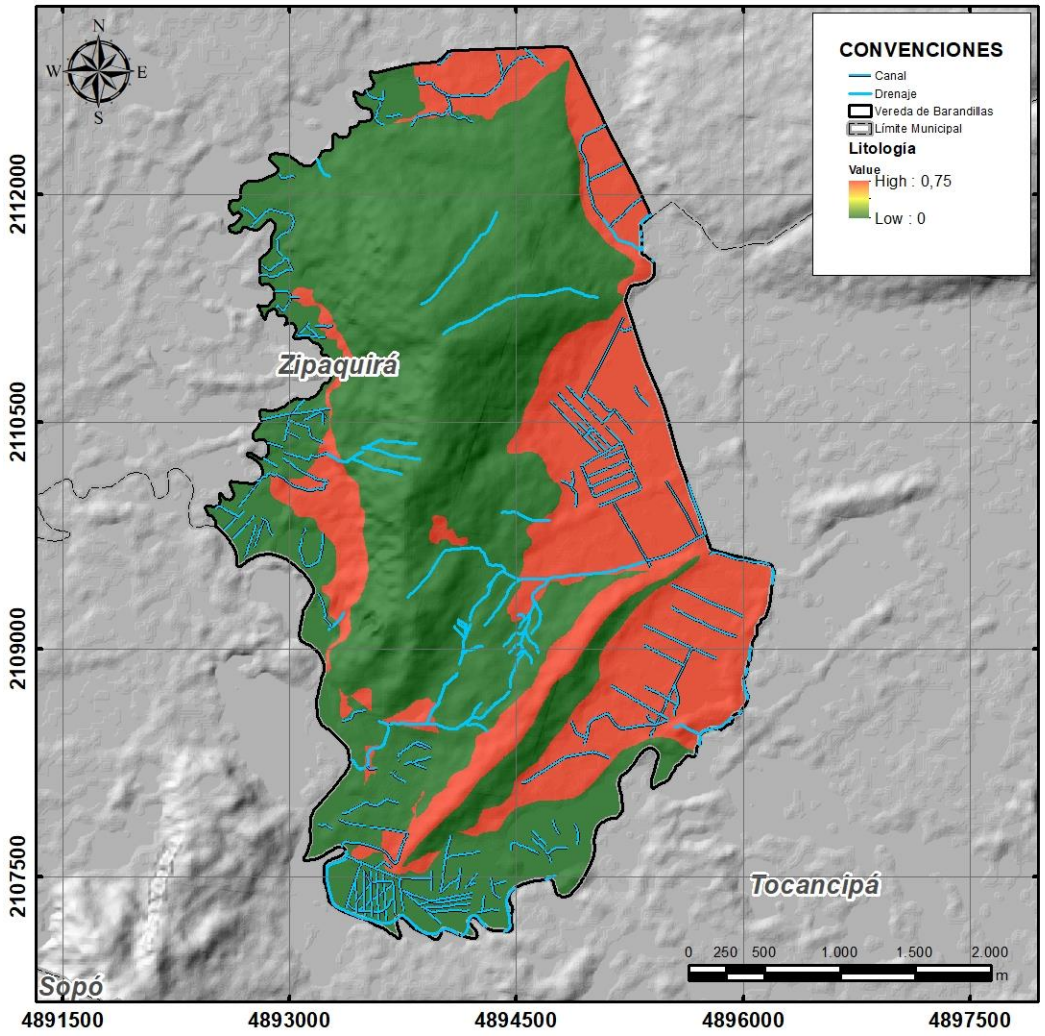
Ráster de infiltración del suelo normalizado



Nota. Elaboración propia (2026).

Figura 12

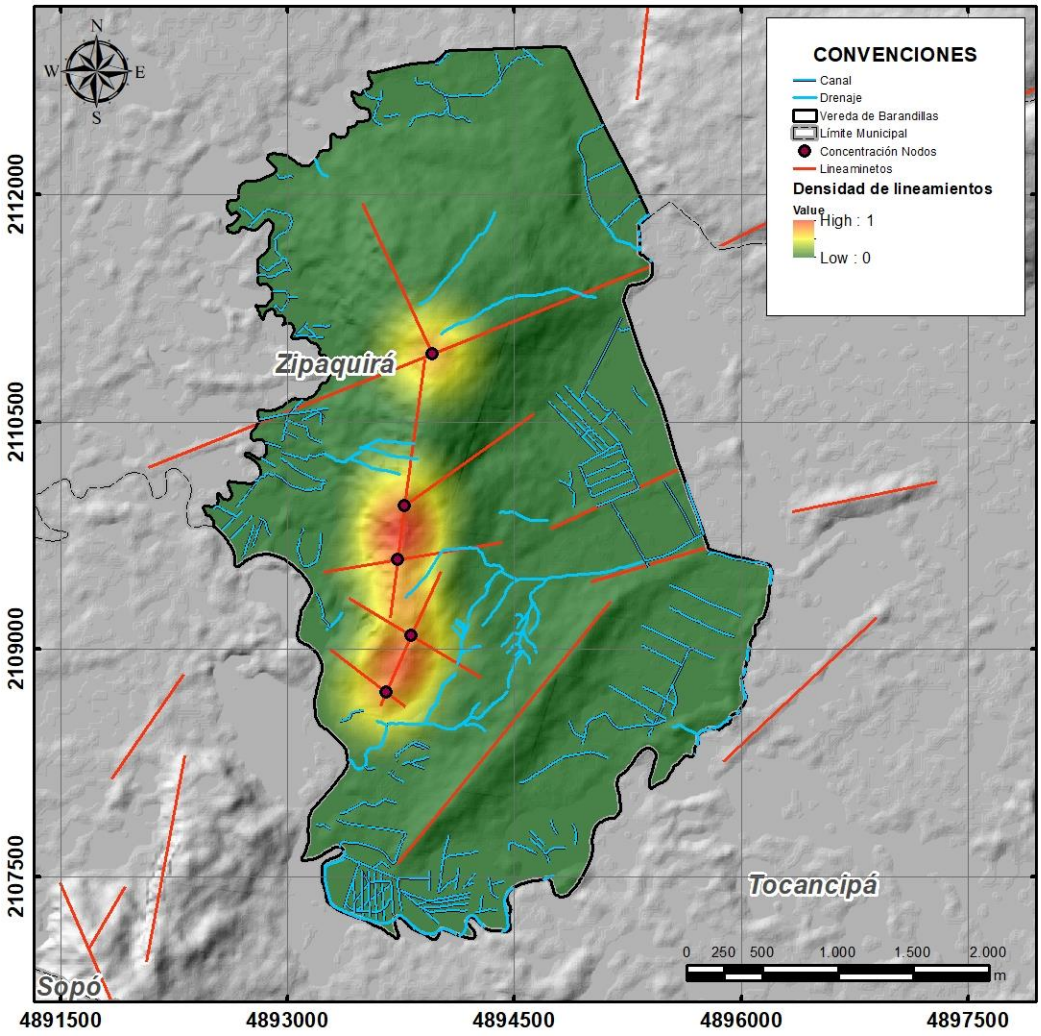
Ráster litológico normalizado



Nota. Elaboración propia (2026).

Figura 13

Rásteres estructurales normalizados



Nota. Elaboración propia (2026).