



**COMPARACIÓN DE MAPAS DE ZONAS DE RECARGA EN EL ACUÍFERO DE RÍO
GRANDE DE LA MAGDALENA**

María Camila Vásquez Lamadrid

Trabajo de investigación presentado para optar al título de Ingeniera Ambiental

Asesora

Ph.D Teresita Betancur Vargas

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Ambiental
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita	(Vásquez, 2024)
Referencia	(Vásquez, 2024). <i>Comparación de mapas de zonas de recarga en el Acuífero de Río Grande de la Magdalena</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi madre, que siempre ha sido mi pilar más fuerte.

Agradecimientos

Primero agradezco a mi familia, por siempre brindarme apoyo en todo.

A la Universidad de Antioquia, por abrirme sus puertas para aprender todo lo que sé.

A todos los profesores que formaron parte de mi camino, por convertirme en la profesional que soy.

A la profesora Teresita Betancur por haberme acompañado durante todo el proceso de este trabajo.

Y a los profesionales del grupo de investigación GIGA de la línea de aguas subterráneas, por haberme apoyado en todo lo que necesité durante este proyecto.

Tabla de contenido

Resumen	11
Abstract	12
Introducción	13
1 Generalidades	14
1.1 Justificación.....	15
1.2 Antecedentes	16
1.3 Objetivos	17
1.3.1 Objetivo general.....	17
1.3.2 Objetivos específicos	17
2 Marco teórico	18
2.1 Delimitación de zonas de recarga.....	18
2.1.1 Topografía Adecuada.....	20
2.1.2 Condiciones de infiltración	20
2.1.3 Patrones texturales	21
2.1.4 Cobertura terrestre	21
2.1.5 Patrones estructurales.....	23
2.2 Magnitud de la Recarga.....	24
3 Metodología	25
3.1 Revisión bibliográfica	26
3.2 Recopilación de información.....	26
3.3 Determinar rangos de la magnitud de la recarga.....	37
3.4 Definición de la función de recarga	39
4 Resultados	40

4.1 Zonas de Recarga Metodología UdeA	40
4.2 Zonas de Recarga Metodología CORPOCALDAS.....	45
4.3 Propuesta metodológica para evaluar la magnitud de la recarga	46
4.3 Magnitud de la recarga	50
4.4 Función de recarga	58
5 Discusión	61
6 Conclusiones	64
Referencias	65

Lista de tablas

Tabla 1. Peso obtenido por factor para la metodología UdeA.	19
Tabla 2. Categorización por rango metodología UdeA.	20
Tabla 3. Categorización según velocidad de infiltración según metodología de la UdeA.	21
Tabla 4. Categorización según patrón textural según metodología de la UdeA.	21
Tabla 5. Categorización para cobertura de la tierra según Corine Land Cover según la metodología de la UdeA	22
Tabla 6. Calificación de patrones estructurales según la metodología UdeA.	24
Tabla 7. Información recopilada.	27
Tabla 8. Clasificación según la metodología USDA y su calificación para la zona de interés.	30
Tabla 9. Cobertura terrestre según la clasificación Corine Land Cover para la zona de estudio y su porcentaje de ocupación.	31
Tabla 10. Calificación de patrones estructurales para las áreas por fuera del acuífero Rio Grande de la Magdalena	33
Tabla 11. Revisión bibliográfica para determinar uso de variables hidrológicas	38
Tabla 12. Matriz de clasificación de la función de recarga con base en reglas de decisión cualitativa aplicada sobre los factores Magnitud de la Recarga y Zonas de Recarga	39
Tabla 13. Zonificación de Lang en función de la relación entre precipitación y temperatura.	50
Tabla 14. Clasificación de rangos de recarga por zona climática	54

Lista de figuras

Figura 1. Ubicación del acuífero Río Grande de la Magdalena.....	15
Figura 2. Metodología del proyecto de investigación.....	25
Figura 3. Modelo Digital de Elevaciones – DEM de la zona de interés.....	28
Figura 4. Velocidad de infiltración en la zona de interés.....	29
Figura 5. Patrones texturales según la metodología USDA para la zona de interés.	30
Figura 6. Cobertura terrestre según Corine Land Cover para zona de interés.....	33
Figura 7. Plancha geológica 188.....	34
Figura 8. Plancha geológica 168.....	35
Figura 9. Plancha geológica 207.....	36
Figura 10. Porcentaje de precipitación que se convierte en recarga para la zona de interés	37
Figura 11. Calificación de la Topografía Adecuada según la metodología de la UdeA	41
Figura 12. Calificación de los Patrones Texturales según la metodología de la UdeA.	41
Figura 13. Calificación de las Condiciones de Infiltración según la metodología de la UdeA	42
Figura 14. Calificación de la Cobertura Terrestre según la metodología de la UdeA	42
Figura 15. Calificación de los Patrones Estructurales según la metodología de la UdeA	43
Figura 16. Delimitación de zonas de recarga según la metodología de la UdeA	44
Figura 17. Delimitación de zonas de recarga metodología CORPOCALDAS utilizando variables intrínsecas del medio	45
Figura 18. Delimitación de zonas de recarga metodología CORPOCALDAS utilizando en nivel freático.....	46
Figura 19. Propuesta metodológica para evaluar rangos de la magnitud de recarga.	47
Figura 20. Precipitación media multianual para Colombia según la base de datos CHIRPS.	48

Figura 21. Temperatura media multianual para Colombia según la base de datos CHELSA.	49
Figura 22. Zonas de recarga Colombia según índice de Lang	51
Figura 23. Recarga potencial anual por el método de Turc	52
Figura 24. Porcentaje de precipitación que se convierte en recarga método de Turc	53
Figura 25. Porcentaje de precipitación que se convierte en recarga zona climática semihúmeda	55
Figura 26. Porcentaje de precipitación que se convierte en recarga zona climática húmeda	56
Figura 27. Porcentaje de precipitación que se convierte en recarga zona climática súper húmeda	56
Figura 28. Clasificación de porcentaje de precipitación que se convierte en recarga en la zona de interés	57
Figura 29. Función de recarga para la metodología de la Universidad de Antioquia	58
Figura 30. Función de recarga para la metodología de variables intrínsecas del medio aplicada por CORPOCALDAS	59
Figura 31. Función de recarga para la metodología del nivel freático aplicada por CORPOCALDAS	60

Siglas, acrónimos y abreviaturas

CORPOCALDAS	Corporación Autónoma Regional de Caldas
UTP	Universidad Tecnológica de Pereira
SWB	Soil Water Balance
AHP	Analytical Hierarchy Process
SGC	Servicio Geológico Colombiano
POMCA	Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas
USDA	United States Department of Agriculture
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
CHIRPS	Climate Hazards Groups InfraRed Precipitation with Station data
CHELSA	Climatologies at High Resolution for the Earth's Land Surface Areas
UdeA	Universidad de Antioquia

Resumen

Este trabajo de grado investiga la delimitación de zonas de recarga para el Acuífero Río Grande de la Magdalena, aplicando la metodología desarrollada por la Universidad de Antioquia y comparándola con dos metodologías anteriormente aplicadas por la Corporación Autónoma Regional de Caldas, y a su vez enfrentando los resultados a un rigor hidrometeorológico, proponiendo por medio del método de Turc calificaciones a distintos rangos de porcentaje de precipitación que se convierte en recarga, con el fin de realizar una función de recarga, la cual cruza las zonas de recarga con la magnitud de recarga, así analizando su variación.

Los resultados revelan que, según la comparación de las tres metodologías, en la mayor parte de la zona delimitada para el acuífero y a su vez las zonas cercanas a él, por donde se dan flujos regionales, se presentan calificaciones altas de importancia de zona de recarga, lo cual debe ser tenido en cuenta en la gestión y planeación del recurso hídrico; sin embargo, al momento de desarrollar el método de clasificación de la recarga, se concluye que el método de Turc no es el apropiado para dicha evaluación, por lo cual se recomienda seguir con los esfuerzos para la estandarización de una metodología utilizando procedimientos de estimación de recarga más precisos que puedan representar mejor la dinámica hidrológica del país.

Palabras clave: Recarga, protección de zonas de recarga, gestión hidrogeológica

Abstract

This thesis investigates the delineation of recharge zones for the Río Grande de la Magdalena Aquifer by applying the methodology developed by the University of Antioquia and comparing it with two methodologies previously applied by the Autonomous Corporation of Caldas. The study also subjects the results to rigorous hydrometeorological analysis, proposing recharge ratings for different ranges of precipitation percentage using the Turc method. The goal is to create a recharge function that intersects recharge zones with recharge magnitude, thereby analyzing their variation. The results reveal that, according to the comparison of the three methodologies, most of the delineated area by the aquifer and the surrounding zones with regional flows present high ratings of recharge zone importance. This finding should be considered in water resource management and planning. However, when developing the recharge classification method, it was concluded that the Turc method is not appropriate for this evaluation. Therefore, it is recommended to continue efforts to standardize a methodology using more precise recharge estimation procedures that better represent the country's hydrological dynamics.

Keywords: Recharge, recharge zones protection, hydrogeological management

Introducción

La creciente demanda de recursos hídricos, impulsada por factores como crecimiento poblacional, la industrialización y el cambio climático, ha aumentado la dependencia que tiene la población del agua subterránea (Senanayake et al., 2016; Sadeghi & Hosseini, 2023; Noori & Singh, 2024), lo cual es crucial no solo para el ciclo hidrológico, sino también para el desarrollo sostenible y la protección de ecosistemas; además, las zonas de recarga de aguas subterráneas son de especial interés ecosistémico, reconocidas como suelo de protección en Colombia, por lo cual se hace necesario aumentar el conocimiento de la ubicación de estas zonas y la clasificación y jerarquización de su importancia.

A pesar de la reconocida importancia de las aguas subterráneas tanto para las actividades humanas como para el mantenimiento de los ecosistemas, su estudio a menudo se ve relegado a un segundo plano debido a su naturaleza oculta. Esta falta de visibilidad resulta en un interés insuficiente en la investigación de sus dinámicas y su adecuado aprovechamiento (Arévalo & Rivera, 2013). Sin embargo, esta actitud es incongruente con las demandas actuales de investigación, especialmente en el contexto del cambio climático (Peñuela-Arévalo & Carrillo-Rivera, 2013), que exige un conocimiento profundo y actualizado de los recursos naturales para una gestión eficiente y sostenible.

Teniendo esto en cuenta, y considerando que el agua subterránea es aproximadamente el 30% de agua dulce disponible en la Tierra (Senanayake et al., 2016) y que se ha convertido en la principal fuente para satisfacer la demanda hídrica en muchos países (Noori & Singh, 2024), es fundamental no solo identificar vacíos de conocimiento existentes, sino también fortalecer la producción científica. Este enfoque permitirá ampliar el conocimiento necesario para apoyar estrategias de mantenimiento y gestión de los recursos hídricos, así como monitorear los posibles impactos ocasionados por diferentes condiciones climáticas.

1 Generalidades

En Colombia, las zonas de recarga de aguas subterráneas son de interés hidrológico y de especial interés ecosistémico según lo establecido en la ley 99 de 1993, y son incluidas como suelo de protección; sin embargo, puede existir un deterioro en dichas áreas debido a la falta de conocimiento de donde se ubican o también puede no contarse con las metodologías necesarias para su delimitación (Matus et al., 2009).

Particularmente, en el Acuífero de Rio Grande de la Magdalena, del departamento de Caldas, ubicado en los municipios La Dorada, Victoria y un pequeño porcentaje de Norcasia **Figura 1**, de aproximadamente 1.001 km², es importante no solo por ser suministro de agua para los municipios mencionados, sino que constituye áreas de especial importancia ecosistémica debido a su influencia para el mantenimiento de servicios ambientales (CORPOCALDAS & UTP, 2018). Sin embargo, la recarga, que es el resultado de la percolación en varias capas de suelo y roca (Samson & Elangovan, 2015), puede verse alterada debido a factores tanto humanos como naturales (Diriba et al., 2024), por lo cual, se convierte en un asunto de prioritaria importancia realizar un análisis sistémico de los elementos que conforman las zonas de recarga y su relación con los componentes ambientales para desarrollar herramientas de manejo confiables y eficientes.

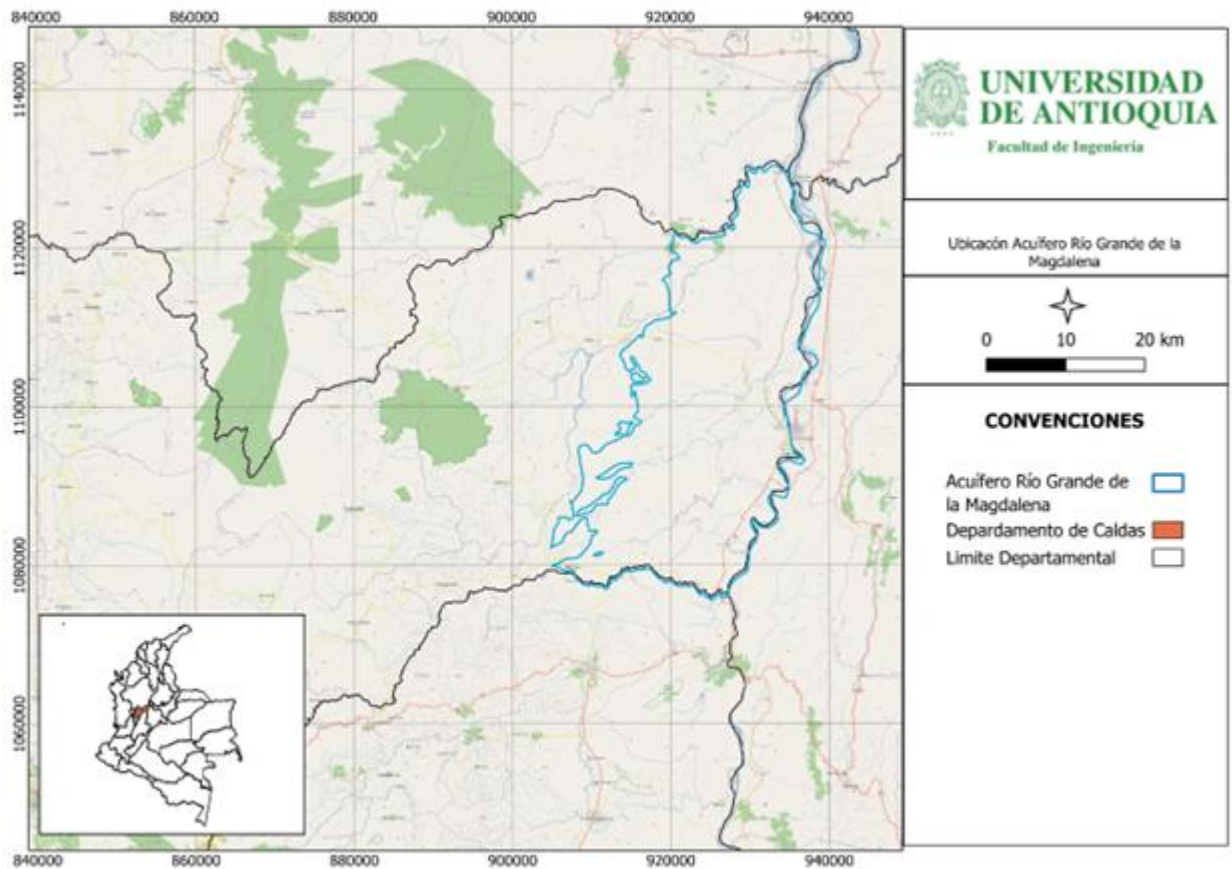


Figura 1. Ubicación del acuífero Río Grande de la Magdalena.

Fuente: Elaboración propia.

1.1 Justificación

Las zonas de recarga son, según la ley 99 de 1993, zonas de especial interés ecosistémico, por lo cual es necesario implementar herramientas que nos permitan su delimitación y jerarquización, para así poder preservar estos recursos naturales por medio de planteamientos y estrategias adecuadas para cada una de las zonas planteadas.

Para el caso del Acuífero de Río Grande de la Magdalena, se han desarrollado dos modelos que trabajan la delimitación de zonas de recarga (CORPOCALDAS & UTP, 2018), sin embargo, en la presente investigación se utiliza la metodología de la Universidad de Antioquia, la cual no solo permite llevar a consideración variables físicas del medio que en el área no se habían evaluado anteriormente, como patrones estructurales y velocidad de infiltración, sino que a su vez expande la zona de interés para estudiar la recarga proveniente de flujos regionales, los cuales también son importantes debido a que alimentan constantemente a los acuíferos por medio de flujos laterales.

Adicionalmente, se tuvo en cuenta que para el acuífero y su delimitación de zonas de recarga anteriormente no se había considerado el uso de variables hidrometeorológicas, desconociendo que estas son la principal fuente de abastecimiento en las zonas de recarga (Matus et al., 2009), por lo cual, se consideró importante someter las tres metodologías, dos de CORPOCALDAS y una de la Universidad de Antioquia, a un rigor hidrometeorológico, y analizar como este puede alterar la jerarquización de las zonas de recarga, entendiendo cuales pueden disminuir o aumentar su potencial de recarga al ser sometidas a una nueva variable.

La investigación es viable ya que se basa en la utilización de información retoma y Sistemas de Información Geográfica – SIG, que permiten una cobertura de área extensa y un costo menor, siendo medidas eficientes en comparación a otros métodos tradicionales (Diriba et al., 2024; Dar et al., 2020), permitiendo llegar al objetivo de la investigación, el cual es comparar las dos metodologías ya anteriormente desarrolladas en el área de interés con la metodología planteada por la Universidad de Antioquia, añadiendo a su vez variables hidrometeorológicas, con la meta específica de beneficiar a la conservación de los recursos naturales y defendiendo el derecho a un medio ambiente sano.

1.2 Antecedentes

La Corporación Autónoma Regional de Caldas – CORPOCALDAS en convenio con la Universidad Tecnológica de Pereira – UTP (2018) delimitó zonas de recarga para el acuífero Río Grande de la Magdalena, en el marco de la Actualización del Plan de Manejo Ambiental del Acuífero, tomando en cuenta dos metodologías distintas.

La primer metodología se basó en propiedades físicas del medio, tales como la pendiente, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal permanente y uso del suelo, uniendo cada una de ellas según su nivel de importancia en el proceso de percolación del acuífero, obteniendo como resultado un mapa de zonas de recarga con calificaciones de Muy Alta, Alta, Moderada y Baja, en los cuales se destacan las calificaciones entre Muy Alta y Alta, siendo los mayores porcentajes de área dentro del acuífero.

Dentro del documento también se retoma una segunda metodología, planteada en el año 2016, en la cual se delimitaron las zonas de recarga utilizando las mediciones del nivel del agua de pozos y aljibes para obtener la tabla de agua en el acuífero, y, por medio de herramientas de geoestadística, delimitar las zonas de recarga con clasificaciones de Muy Baja, Baja, Modelada,

Alta y Muy Alta. Cabe resaltar que, si bien con esta metodología se volvió a observar una predominancia en las zonas de importancia Alta, hubo un aumento significativo en las zonas delimitadas como Moderadas y Bajas, específicamente en la zona noreste del acuífero, y no se registra una calificación de Muy Alta para el acuífero en general, como sí se evidenció en gran medida para los resultados obtenidos con la primera metodología, la cual fue planteada posteriormente en el 2018.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Comparar distintos mapas de delimitación de áreas de especial importancia ecosistémica en relación con la recarga, para el Sistema Acuífero Río Grande de la Magdalena.

1.3.2 Objetivos específicos

- Obtener mapas de delimitación de zonas de recarga según propiedades intrínsecas de la zona de estudio, a partir de diferentes fuentes y/o metodologías.
- Clasificar rangos de recarga para el acuífero según condiciones hidrológicas.
- Evaluar las relaciones que se generan entre zonas de recarga intrínsecas y zonas hidrológicas.

2 Marco teórico

2.1 Delimitación de zonas de recarga

Un modelo hidrogeológico conceptual es una representación simplificada de los componentes hidrogeológicos de un medio (Escobar et al., 2017), permitiendo conocer la profundidad de las unidades hidrogeológicas, fuentes de agua en ellas, entre otros, por medio de labores de exploración (Betancur, 2023), entre los cuales se encuentra aquellas que permiten la identificación de áreas, fuentes y magnitud de la recarga.

La recarga es uno de los principales componentes y conductores del ciclo hidrológico, entendiéndose como aproximadamente un porcentaje del agua que se precipita e infiltra (Bakker et al., 2013) por medio de un proceso en el cual el agua infiltrada atraviesa el nivel freático y alcanza en la zona saturada (Betancur, 2023), almacenándose en un sistema que contiene y transporta agua, conocido como acuífero.

Existen diferentes fuentes de recarga, como lo son la precipitación, interacción con cuerpos superficiales, fronteras con otras unidades hidrogeológicas, recarga inducida, retorno de riego o recargas accidentales por fugas (Betancur, 2023; Betancur & Palacio, 2007), todas estas actuando a través de áreas conocidas como zonas de recarga.

Las zonas de recarga son las áreas donde ocurre el proceso de infiltración hacia los acuíferos (Figueredo, 2019; Matus et al., 2009), dividiéndose en zonas de recarga directa, principalmente condicionadas por eventos de precipitación y caracterizadas por un flujo vertical hacia el acuífero, y zonas de recarga asociadas a sistemas de flujo, dadas por flujos regionales laterales (Betancur, 2023).

Para determinar las zonas de recarga existen diferentes métodos reportados en la literatura, como en (Boufekane et al., 2020; Nayak et al., 2023; Mansour et al., 2018; Khan et al., 2022), sin embargo, en la presente investigación se partió de la metodología desarrollada por la Universidad de Antioquia (Escobar et al., 2017), la cual utilizaba un proceso Analítico Jerárquico Ponderado teniendo en cuenta las propiedades intrínsecas del medio, tales como: manantiales, patrones texturales, topografía adecuada, patrones estructurales y condiciones de infiltración; sin embargo, se tuvo en cuenta la actualización de la metodología planteada posteriormente, donde se eliminó la variable de manantiales debido a que son puntos de agua que no representan zonas de recarga, y fue reemplazado por coberturas terrestres (CORANTIOQUIA & UdeA, 2021).

El proceso Analítico Jerárquico Ponderado en la metodología se basó en una consulta a expertos, en la cual a cada una de las variables físicas se le asignó un peso ponderante relacionado con su nivel de importancia en el proceso de recarga hacia los acuíferos, los cuales se encuentran descrito en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Peso obtenido por factor para la metodología UdeA.

Factor	Peso obtenido
Áreas con Topografía Adecuadas (T)	0.34
Condiciones de Infiltración (I)	0.27
Patrones Texturales (PT)	0.17
Coberturas Terrestres (CT)	0.12
Condiciones Estructurales (E)	0.1

Fuente: (Betancur, 2023)

Para la evaluación de cada uno de los factores determinantes se estableció una calificación en la escala de 1 a 5, teniendo en cuenta las condiciones que favorezcan en mayor o menor medida la recarga, como se explicará a mayor detalle en cada una de las componentes.

Posteriormente, se aplica una función, la cual consiste en multiplicar cada uno de los factores con su respectivo peso ponderante determinado en la metodológica (**Ecuación 1**), obteniendo como resultado unos rangos entre 1 y 5 con su respectiva categorización, los cuales pueden ubicarse desde una importancia muy baja hasta importancia alta respectivamente (**Tabla 2**).

$$IFR = 0,34(T) + 0,27(I) + 0,17(PT) + 0,12(CT) + 0,10(E)$$

Ecuación 1. Función de clasificación metodología UdeA.

Fuente: (Betancur, 2023)

Donde

IFR: Índice de flujos regionales.

T: Topografía Adecuada.

I: Condiciones de Infiltración.

PT. Patrones Texturales.

CT: Cobertura Terrestre.

CE: Condiciones Estructurales.

Tabla 2. Categorización por rango metodología UdeA.

Rango	Clasificación	Categorización
1-2	1	Importancia muy baja
2-3	2	Importancia baja
3-4	3	Importancia media
4-5	4	Importancia alta

Fuente: (Betancur, 2023)

2.1.1 Topografía Adecuada

Una topografía adecuada es de los aspectos más importantes a tener en cuenta al momento de evaluar las zonas de recarga para una ubicación específica, esto debido a que la pendiente controla la energía de flujo de agua (Al Saud, 2010; Arévalo & Rivera, 2013) regulando la escorrentía superficial, su dirección y tiempo de retención, lo cual es crucial para la recarga, siendo la precipitación una de las fuentes principales de recarga de reservorios subterráneos (Tiwari et al., 2024; Boufekane et al., 2020; Nayak et al., 2023). Menores niveles de recarga se observan en zonas de mayor pendiente, ya que el flujo rápido no permite tener tiempo suficiente para la infiltración, y, por el contrario, en zonas de menor pendiente se facilita la recarga (Senanayake et al., 2016; Nayak et al., 2023).

Teniendo esto en cuenta, se utiliza la **Ecuación 2**, que permite tomar la pendiente en grados y obtener como resultado entre el 1 y el 5, donde 5 corresponde a la pendiente de 0°, la cual favorece en mayor medida la recarga en el acuífero, y 1 la pendiente de 90°, la cual no favorece la recarga.

$$TA = 1 + \frac{4 * (90 - Y)}{90}$$

Ecuación 2. Clasificación de la topografía según metodología de la UdeA.

Fuente: (Betancur, 2023)

Donde

TA: Topografía Adecuada

Y: Pendiente en grados

2.1.2 Condiciones de infiltración

Por sus propias características, las zonas de recarga son áreas donde se facilita la infiltración ofreciendo mayores aportes de recarga (Matus et al., 2009), por ello, en zonas de topografía

adecuada con perfiles de meteorización y patrones estructurales adecuados se realizan pruebas de infiltración, cuyos resultados se califican según la escala de valoración establecida en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Categorización según velocidad de infiltración según metodología de la UdeA.

Velocidad (cm/h)	Calificación
0 - 0.004	1
0.004 - 1.52	3
1.52 - 5.08	5
5.08 - 50.08	5
> 50.08	5

Fuente: (Escobar et al., 2017)

2.1.3 Patrones texturales

El tipo de suelo juega un papel fundamental al momento de determinar zonas de recarga debido a que permite la percolación de agua y que esta llegue a los reservorios (Nayak et al., 2023; Ahmad et al., 2020). La textura del suelo, en función del tamaño del grano y define el potencial de infiltración y la recarga (Kumar et al., 2024; Aykut, 2021; Boufekane et al., 2020); a su vez, el tipo de suelo afecta la recarga y el almacenamiento por su capacidad de absorción (Noori & Singh, 2024).

Según la metodología, la clasificación de patrones texturales se realiza teniendo en cuenta los diferentes tamaños de grano de las muestras de suelo (**Tabla 4**).

Tabla 4. Categorización según patrón textural según metodología de la UdeA.

Patrón textural	Calificación
Grava	5
Arena, Grava-arenosa	5
Arena fina, Arena-limosa	5
Limo, limo-arenoso, arcillo-arenoso	3
Arcillo	1

Fuente: (Betancur, 2023)

2.1.4 Cobertura terrestre

La cobertura terrestre representa tanto actividades relacionadas al uso de la tierra por parte del hombre -agricultura o industria- como vegetación existente, entre otros (Dar et al., 2020). Estas coberturas son esenciales ya que indican información sobre humedad del suelo, infiltración, y su modificación altera de manera crítica el proceso de recarga de agua subterránea (Diriba et al., 2024; Tiwari et al., 2024; Boufekane et al., 2020). La vegetación puede incrementar la infiltración y reducir la escorrentía, es decir, hay una relación directamente proporcional entre el tipo y la

densidad de la vegetación y la infiltración, gobernando flujos tanto horizontales como verticales; y, en contra parte, en zonas urbanas se reduce drásticamente la capacidad de recarga, aumentando la escorrentía (Al Saud, 2010).

La categorización de la cobertura terrestre en este estudio se llevó a cabo gracias a la calificación elaboradas por (CORANTIOQUIA & UdeA, 2021), en el cual se le proporciona una categorización entre el 1 y 5 para las coberturas de tierra según Corine Land Cover (**Tabla 5**).

Tabla 5. Categorización para cobertura de la tierra según Corine Land Cover según la metodología de la UdeA

Cobertura de la tierra según Corine Land Cover	Calificación
1. Territorios Artificializados	
1.1.1. Tejido urbano continuo	1
1.1.2. Tejido urbano discontinuo	2
1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	
1.2.1. Zonas industriales o comerciales	1
1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	1
1.2.3. Zonas portuarias	1
1.2.4. Aeropuertos	1
1.2.5. Obras hidráulicas	1
1.3. Zonas de extracción mineras y escombreras	
1.3.1. Zonas de extracción minera	1
1.3.2. Zonas de disposición de residuos	1
1.4.1. Zonas verdes urbanas	2
1.4.2. Instalaciones recreativas	1
2. Territorios Agrícolas	
2.1. Cultivos transitorios	
2.1.1. Otros cultivos transitorios	3
2.1.2. Cereales	3
2.1.3. Oleaginosas y leguminosas	3
2.1.4. Hortalizas	4
2.1.5. Tubérculos	4
2.2. Cultivos permanentes	
2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	3
2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	4
2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	4
2.2.4. Cultivos agroforestales	3
2.2.5. Cultivos confinados	
2.3. Pastos	
2.3.1. Pastos limpios	2

Cobertura de la tierra según Corine Land Cover	Calificación
2.3.2. Pastos arbolados	2
2.3.3. Pastos enmalezados	2
2.4. Áreas agrícolas heterogéneas	
2.4.1. Mosaico de cultivos	3
2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	3
2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	3
2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	2
2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	3
3. Bosques y Áreas Seminaturales	
3.1. Bosques	
3.1.1. Bosque denso	3
3.1.2. Bosque abierto	3
3.1.3. Bosque fragmentado	5
3.1.4. Bosque de galería y ripario	5
3.1.5. Plantación forestal	4
3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	
3.2.1. Herbazal	5
3.2.2. Arbustal	5
3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	3
3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	
3.3.1. Zonas arenosas naturales	4
3.3.2. Afloramientos rocosos	1
3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	1
3.3.4. Zonas quemadas	1
4. Áreas húmedas	
4.1. Áreas húmedas continentales	
4.1.1. Zonas pantanosas	1
5. Superficies de agua	
5.1. Aguas continentales	
5.1.1. Ríos (50m)	1
5.1.2. Lagunas, lagos, ciénagas naturales	1

Fuente: (CORANTIOQUIA & UdeA, 2021)

2.1.5 Patrones estructurales

El rol que tienen las fracturas en las unidades litológicas es de suma importancia para la recarga (Mansour et al., 2018). Por lo general, es de esperarse que entre mayor sea la densidad de las fracturas mayor sea la posibilidad de recarga (Aykut, 2021), por lo cual, en esta metodología, se analizan las familias y patrones de diaclasamiento que sean propicios para el flujo regional hacia el acuífero (**Tabla 6**).

Tabla 6. Calificación de patrones estructurales según la metodología UdeA.

Condición	Calificación
Depósitos o formaciones blandas afectadas estructuralmente	5.0
Dirección de buzamiento favorable (por lo menos una familia) en dirección del flujo subterráneo marcado por la superficie piezométrica	3.5 - 5.0
Dirección buzamiento favorable a una unidad geológica con potencial acuífero medio	1.5 - 3.0
Familias de diaclasas sin actitud favorable	1.0

Fuente: (Betancur, 2023)

2.2 Magnitud de la Recarga

Adicionalmente a las zonas de recarga, también debe ponerse a consideración la magnitud de la recarga, la cual considera cierta variedad de factores, convirtiéndola en una de las más complejas variables hidrológicas para calcular (Dripps & Bradbury, 2007), sin embargo, es necesaria para definir límites de extracción, el grado de recuperación y oferta y demanda (Betancur, 2023).

En la literatura se presentan varios métodos para estimar la recarga, entre ellos se encuentra el modelo de balance por humedad de suelo Soil Water Balance – SWB (Xie et al., 2018), basado en el principio de la conservación de la masa (Dripps & Bradbury, 2007) el cual utiliza como valores de entrada valores de carácter climatológico, características del suelo, cobertura del suelo y topografía (Deeb & Almasri, 2021; (Stanton et al., 2013) y resuelve la recarga potencial de agua subterránea celda por celda para todo el dominio del modelo, según la siguiente ecuación.

$$Recharge = (Precipitación + deshielo + entradas) - (intercepción + salidas + ET) - \Delta humedad del suelo$$

Ecuación 3. Estimación de la recarga potencial según el modelo SWB.

Fuente: (Deeb & Almasri, 2021)

3 Metodología

El presente proyecto, en el cual se establecieron las zonas de recarga para el acuífero Río Grande de la Magdalena por medio de la metodología de la Universidad de Antioquia, y se comparó con los resultados obtenidos anteriormente por CORPOCALDAS, tuvo un enfoque metodológico mixto, ya que se consideraron aspectos cuantitativos, como lo son, por ejemplo, las variables hidrometeorológicas y demás que permiten calcular la recarga, el porcentaje de precipitación que se convierte en recarga; y aspectos cualitativos para evaluar una función de recarga, que proceden de una matriz en la cual se efectúa un cruce entre la magnitud de la recarga y las zonas de recarga, dando como resultados valores en la escala entre Muy Baja y Muy Alta.

Para el cumplimiento del objetivo general, se planteó la siguiente estrategia: primeramente, se tuvo en cuenta las metodologías a considerar para la delimitación de zonas de recarga, teniendo en cuenta dos aplicadas por CORPOCALDAS y una por la Universidad de Antioquia, esto con el fin de comparar sus resultados. Posteriormente, a cada uno de los tres diferentes resultados obtenidos se le aplicó una función de recarga, la cual cruza las zonas de recarga con la magnitud de la recarga, para realizar una última comparación de resultados, en el cual se esperó que se evidenciaran cambios en las zonas de recarga para cada una de las metodologías (**Figura 2**).

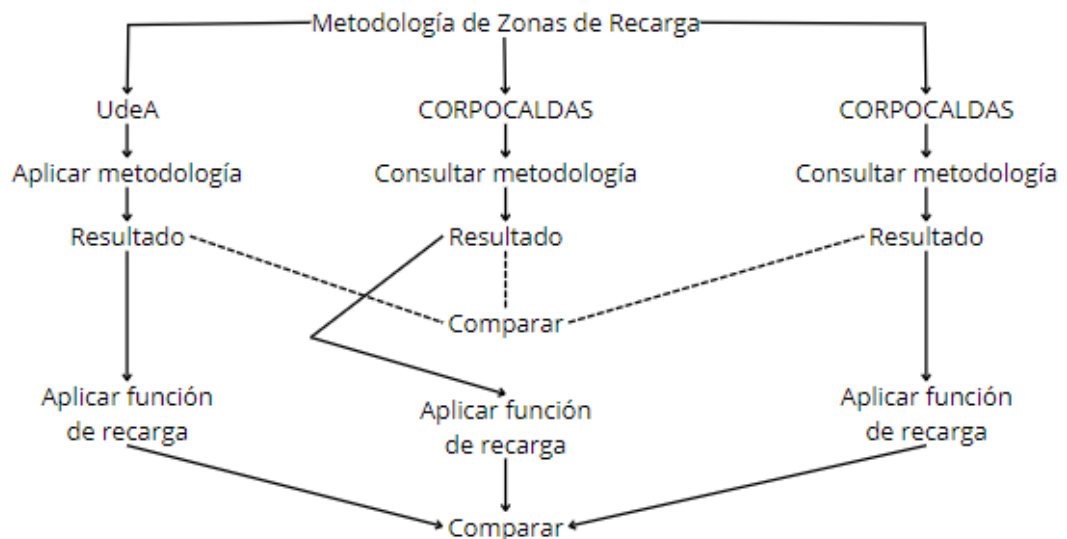


Figura 2. Metodología del proyecto de investigación.

Fuente: Elaboración propia.

Para ejecutar la metodología planteada se dividió el proceso en cuatro fases: revisión bibliográfica, recopilación de información, determinar rangos de la magnitud de recarga y definición de función de recarga.

3.1 Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica se centró principalmente en el entendimiento de la definición de recarga y metodologías utilizadas para la delimitación de zonas de recarga, haciendo un especial énfasis en aquellos que consideran variables hidrológicas. Cabe resaltar que se le dio prioridad a los artículos e investigaciones que no superaran los cinco años de publicación, esto con el fin de verificar las metodologías y variables más utilizadas actualmente.

El objetivo general fue entender la importancia de la delimitación de zonas de recarga, analizando como se componen, la utilidad de su conocimiento y delimitación, poniendo todo en un contexto internacional, donde se tuviera en cuenta las problemáticas ambientales emergentes y a su vez planteamientos y soluciones a dichas problemáticas.

Las metodologías revisadas ponen sobre la mesa distintos factores a considerar para la delimitación de zonas de recarga, destacándose la geomorfología, geología, el uso del suelo y la precipitación, entre otros, para los cuales, según la opinión de expertos o relaciones entre los mismos factores, se definía un peso ponderado para cada uno, y así, por medio de una función o varias funciones matemáticas, llegar a un resultado que permitiera categorizar las zonas de recarga, jerarquizando su importancia.

Además, se pudo determinar que predomina en las metodologías recientes la utilización del Analytical Hierachy Process – AHP, es español Proceso de Jerarquía Analítica, el cual permite que, al momento de cruzarse factores, determinar un nivel de prioridad (peso ponderado) para así poder llegar a una solución. Dicha metodología, combinada con el aumento de la demanda del recurso hídrico, ha sido una solución viable para diferentes países al momento de necesitar delimitar las zonas de recarga en diferentes acuíferos.

3.2 Recopilación de información

La recopilación de información se categorizó en tres grandes grupos: datos de las componentes intrínsecas del medio, necesario para aplicar la metodología de la Universidad de

Antioquia, resultados de la delimitación de zonas de recarga para las metodologías utilizadas por CORPOCALDAS, y variables hidrológicas. La información recolectada se sintetiza en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Información recopilada.

Información	Descripción
Modelo Digital de Elevaciones (MDE)	Modelo Digital de Elevaciones para la zona de estudio tomados de la misión satelital Shuttle Radas Ropography Mission (SRTM) de la NASA
Plancha geológica 188 - Escala 1:100.000	Descripción de las unidades geológicas y diaclasa - escala 1:100.000. Formato shape. Tomado del Servicio Geológico Colombiano - SGC
Plancha geológica 207 - Escala 1:100.000	Descripción de las unidades geológicas y diaclasa - escala 1:100.000. Formato shape. Tomado del Servicio Geológico Colombiano - SGC
Plancha geológica 168 - Escala 1:100.000	Descripción de las unidades geológicas y diaclasa - escala 1:100.000. Formato shape. Tomado del Servicio Geológico Colombiano - SGC
Mapa de velocidad de infiltración - escala 1:100.000	Discretización de velocidad de infiltración en unidades geológicas en (cm/h). Formato shape. Convenio 090-V1. (UdeA & CORPOCALDAS, 2024)
Mapa de patrones texturales - escala 1:100.000	Discretización textural según la metodología USDA por unidad geológica. Formato shape. Convenio 090-V1. (UdeA & CORPOCALDAS, 2024)
Mapa de porcentaje de recarga - escala 1:100.000	Porcentaje de precipitación que se convierte en recarga. Formato raster. Convenio 090-V1. (UdeA & CORPOCALDAS, 2024)
Mapa de coberturas de la tierra escala 1:100.000	Mapa de coberturas de tierra para la zona de estudio - escala 1:100.000. Formato shape, IDEAM
Mapas de zonas de recarga CORPOCALDAS	Delimitación de zonas de recarga utilizando variables intrínsecas del medio. Formato PDF. (CORPOCALDAS & UTP, 2018). Delimitación de zonas de recarga utilizando la superficie piezométrica. Formato PDF. (CORPOCALDAS & UTP, 2018).

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los datos de las componentes intrínsecas del medio, son un insumo fundamental para poder aplicar la función para delimitar las zonas de recarga, por lo cual se obtuvieron cuatro capas shape de patrones texturales, velocidad de infiltración, patrones estructurales y cobertura terrestre, y una capa raster correspondiente a la topografía de la zona de estudio.

Para el caso de la topografía, evaluada a partir del Modelo Digital de Elevaciones – DEM, se aprecia una variación de altura considerable, siendo la menor de 138 metros sobre el nivel del mar, ubicando en la zona este de la zona de estudio, por el Río Magdalena, hasta los máximos de 2.957 metros sobre el nivel del mar, entrando en la parte oeste de la zona de estudio. Se observa que dentro del acuífero, zona de especial interés en el presente proyecto, no se presentan cambios de elevación abruptos, por lo cual se caracteriza como una zona de pendiente baja y topografía llana (**Figura 3**).

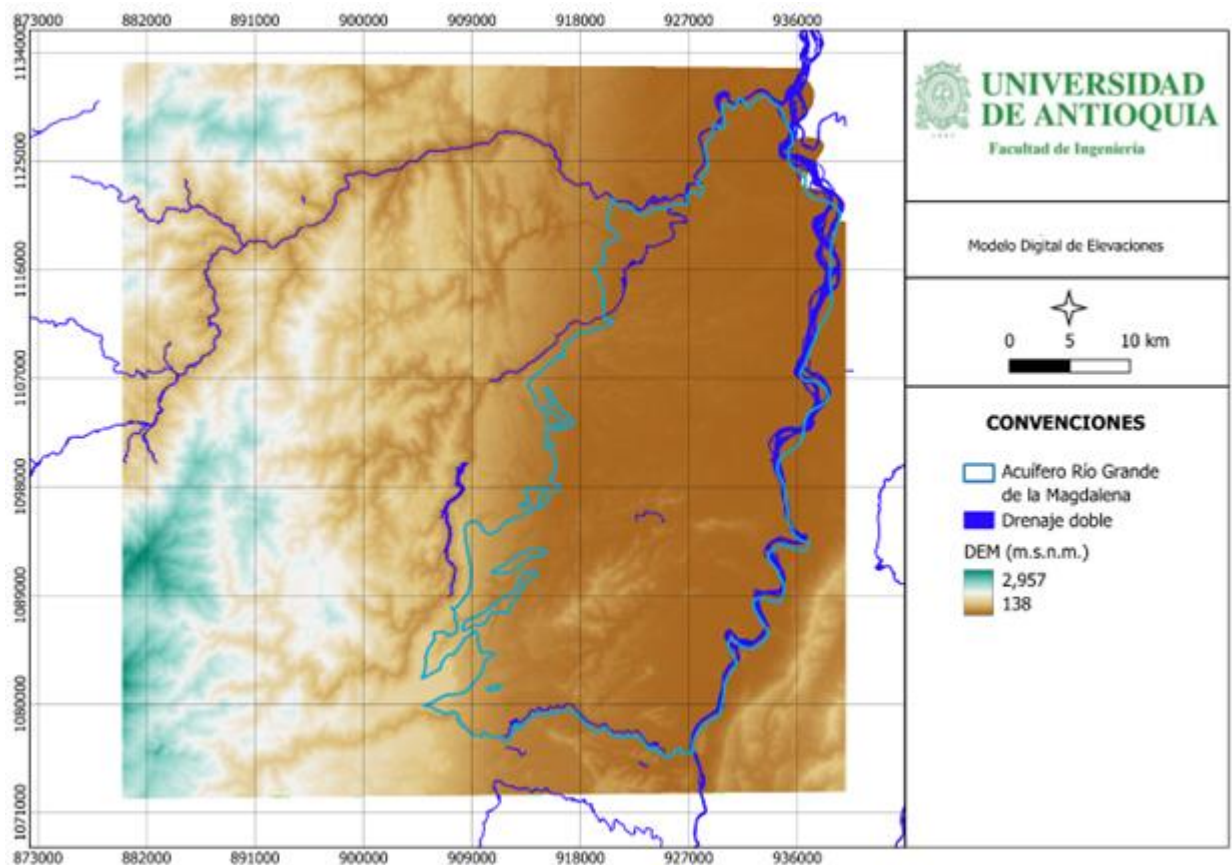


Figura 3. Modelo Digital de Elevaciones – DEM de la zona de interés.

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la información de los suelos, se tuvo en cuenta los datos recopilados en el marco del convenio 090-V1 entre la Universidad de Antioquia y CORPOCALDAS, en los cuales se estuvo analizando los estudios generales de suelos y zonificación de tierras de los departamentos de Caldas, Antioquia, Cundinamarca, Boyacá y Tolima, a su vez que en la información de perfiles de suelos y pruebas de infiltración identificados en los Planes de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas – POMCA de los ríos Guarinó, Samaná Sur y La Miel.

Se evidencia, gracias a la sinterización de dicha información, para el caso de las condiciones de infiltración en el área de interés, que una mayor parte del territorio posee buenas condiciones de infiltración, entre 1.52 a 5.08 cm/h, lo cual se considera favorable para los flujos regionales, seguido de pocas zonas que estén tanto por encima como por debajo de este rango (**Figura 4**).

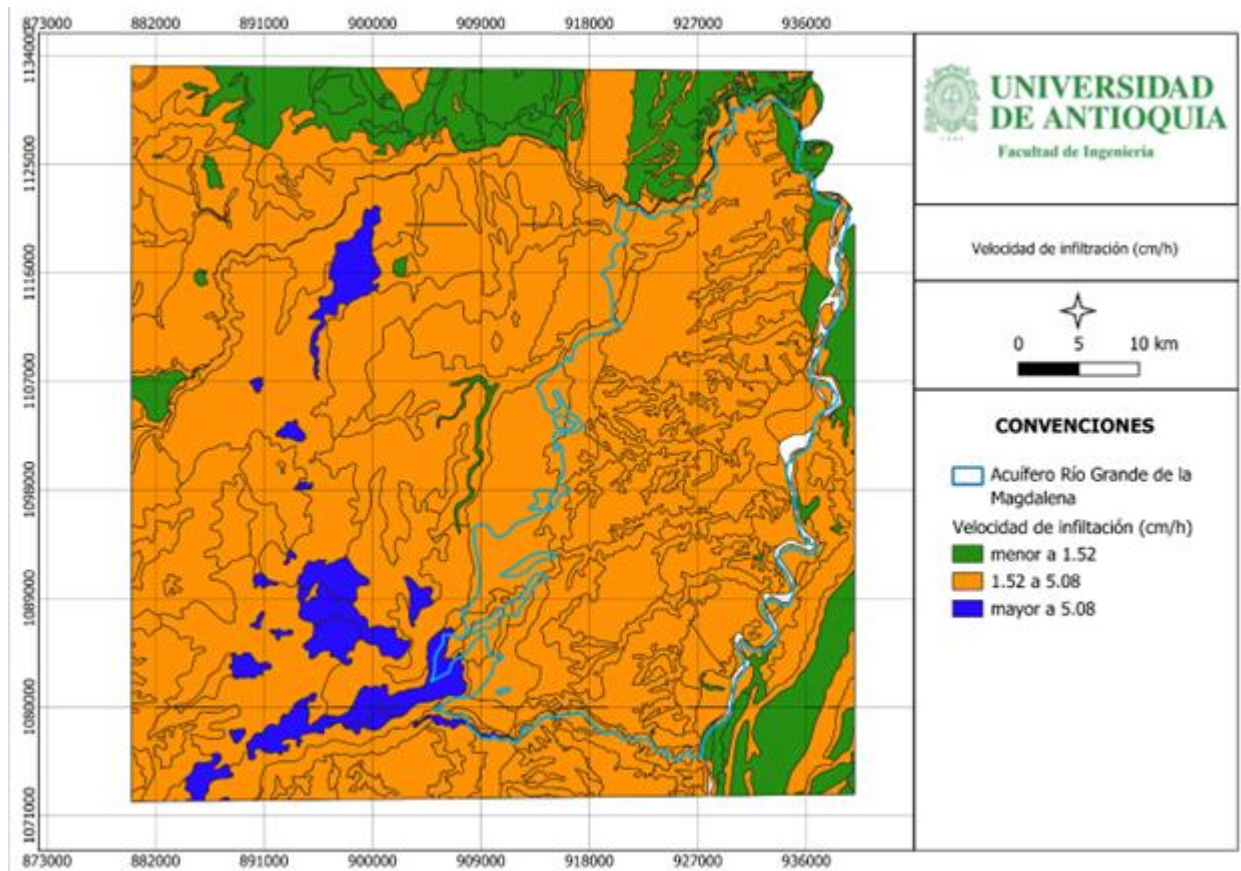


Figura 4. Velocidad de infiltración en la zona de interés.

Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de los patrones texturales de la zona de estudio se realizó, gracias a la información revisada durante el convenio, una clasificación por medio de la metodología USDA – United States Department of Agriculture, Departamento de Agricultura de Estados Unidos en español (**Figura 5**).

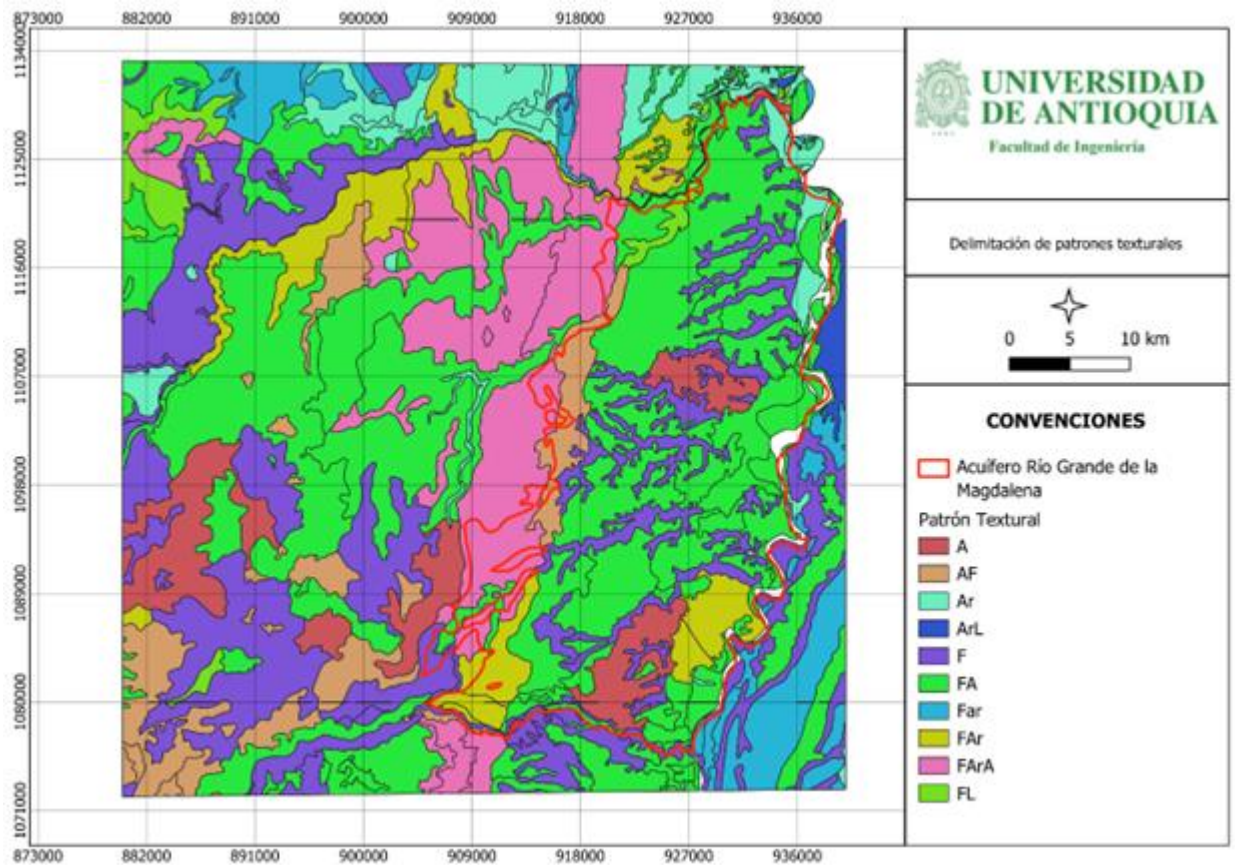


Figura 5. Patrones texturales según la metodología USDA para la zona de interés.

Fuente: Elaboración propia.

Tomando de base la categorización basada en la metodología USDA, se planteo un nuevo sistema de calificación, en el cual se le otorgó un valor del 1 a 5 a cada una de las clasificaciones dependiendo de que tan favorables fuesen para la recarga. En la tabla se observa dicha calificación, y a su vez se observa la predominancia de textura franco arenosa, seguida de una textura franca y franco arcillo arenoso, y en menor medida texturas arcillo limosa y franco. Particularmente, hablando de la zona exclusiva donde se encuentra el Acuífero Río Grande de la Magdalena, se encuentra una predominancia considerable de la textura FA, correspondiente a la clasificación franco arenoso (**Figura 5**).

Cabe resaltar que se encuentran secciones sin información, correspondientes al cuerpo de agua Río Magdalena.

Tabla 8. Clasificación según la metodología USDA y su calificación para la zona de interés.

TEXTURAF	Clasificación	Calificación	Area km2	Porcentaje
A	Arena	5	203.346	5.64%

TEXTURAF	Clasificación	Calificación	Area km2	Porcentaje
AF	Arena franca	5	208.489	5.78%
Ar	Arcillas	1	188.232	5.22%
ArL	Arcillo limoso	2	22.376	0.62%
F	Franco	5	752.429	20.86%
FA	Franco arenoso	5	1309.304	36.29%
Far	Franco arcilloso	1	385.677	10.69%
FArA	Franco arcillo arenoso	3	449.91	12.47%
FL	Franco limoso	3	57.932	1.61%
Sin información	-	-	29.897	0.83%
Total			3607.592	100.00%

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la cobertura terrestre, se tomó en consideración la categorización de Corine Land Cover obtenido del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM, donde se aprecia que el área de estudio cuenta con coberturas diversas, divididas en 39 categorías diferentes (**Figura 6**). En la **Tabla 9** se presenta cada una de las coberturas con su respectivo porcentaje de ocupación, donde se destaca en mayor medida los pastos limpios, sobre todo en la zona que comprende el área del acuífero, seguido de vegetación secundaria y de transición. Se obtuvo en menor medida tierras desnudas o degradadas, zonas industriales o comerciales y obras hidráulicas.

Tabla 9. Cobertura terrestre según la clasificación Corine Land Cover para la zona de estudio y su porcentaje de ocupación.

Código	Cobertura de la tierra según Corine Land Cover	Área Km ²	Porcentaje
111	1.1.1. Tejido urbano continuo	10.7	0.298%
112	1.1.2. Tejido urbano discontinuo	2.702	0.075%
121	1.2.1. Zonas industriales o comerciales	0.536	0.015%
122	1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados	1.247	0.035%
124	1.2.4. Aeropuertos	2.762	0.077%
125	1.2.5. Obras hidráulicas	0.147	0.004%
131	1.3.1. Zonas de extracción minera	4.65	0.129%
2232	2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos	5.613	0.156%
223			
224	2.2.4. Cultivos agroforestales	0.615	0.017%
231	2.3.1. Pastos limpios	942.503	26.232%
232	2.3.2. Pastos arbolados	42.894	1.194%
233	2.3.3. Pastos enmalezados	116.998	3.256%

Código	Cobertura de la tierra según Corine Land Cover	Área Km²	Porcentaje
242	2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos	259.172	7.213%
243	2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	334.531	9.311%
244	2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	301.361	8.388%
245	2.4.5. Mosaico de cultivos con espacios naturales	68.229	1.899%
314	3.1.4. Bosque de galería y ripario	248.552	6.918%
315	3.1.5. Plantación forestal	26.005	0.724%
323	3.2.3. Vegetación secundaria o en transición	721.31	20.076%
3231			
3232			
331	3.3.1. Zonas arenosas naturales	4.849	0.135%
3312			
333	3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	0.953	0.027%
411	4.1.1. Zonas pantanosas	5.029	0.140%
511	5.1.1. Ríos	58.102	1.617%
512	5.1.2. Lagunas, lagos y ciénagas naturales	1.879	0.052%
2222	2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos	56.842	1.582%
3131	3.1.3. Bosque fragmentado	89.432	2.489%
3132			
3222	3.2.2. Arbustal	5.14	0.143%
5141	5.1.4. Cuerpos de agua artificiales	11.139	0.310%
22122	2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	13.412	0.373%
31111	3.1.1. Bosque denso	240.552	6.695%
31121			
31211	3.1.2. Bosque abierto	10.936	0.304%
321113	3.2.1. Herbazal	4.106	0.114%
Total		3592.898	100.000%

Fuente: Elaboración propia.

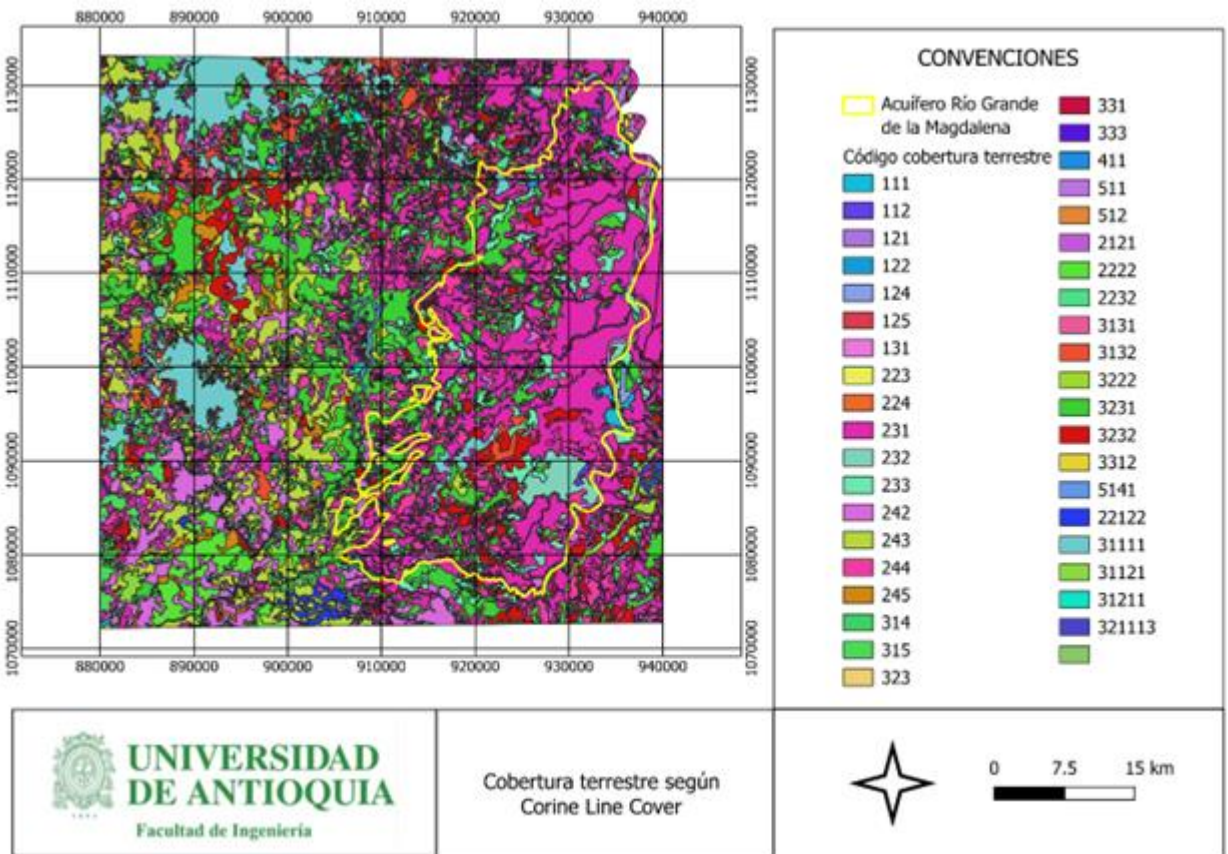


Figura 6. Cobertura terrestre según Corine Land Cover para zona de interés.

Fuente: Elaboración propia

Para los patrones texturales, se obtuvo del Servicio Geológico Colombiano – SGC las planchas correspondientes a la zona de estudio, plancha 188 (**Figura 7**), plancha 168 (**Figura 8**) y plancha 207 (**Figura 9**), y teniendo en cuenta la información obtenida, para el caso en concreto de las zonas por fuera del área del acuífero, donde se dan los flujos laterales, se planteó categorizar primeramente las unidades geológicas en formaciones blancas (depósitos y rocas sedimentarias detríticas) y formaciones duras (rocas ígneas y metamórficas); luego de esta categorización, se analizó si en ellas existían estructuras, específicamente diaclasas, que según su orientación y buzamiento fueran positivas al flujo hacia el acuífero, y con estas dos condiciones se procedió a realizar una calificación (**Tabla 10**).

Tabla 10. Calificación de patrones estructurales para las áreas por fuera del acuífero Río Grande de la Magdalena

Tipo de formación	Presencia de diaclasas	Buzamiento	Calificación
Dura		Favorable al flujo	4.5
		No favorable al flujo	3.5
	Sí	Vertical	1
Blanda	Sí	-	1
	No	-	5
Blanda	Sí	-	1
	No	-	4

Fuente: Elaboración propia

Se destaca que para el caso particular del área del acuífero se tuvo en cuenta una clasificación diferente, donde tanto los sedimentos y depósitos, obtuvieron una calificación de 5, al ser una zona de recarga directa.

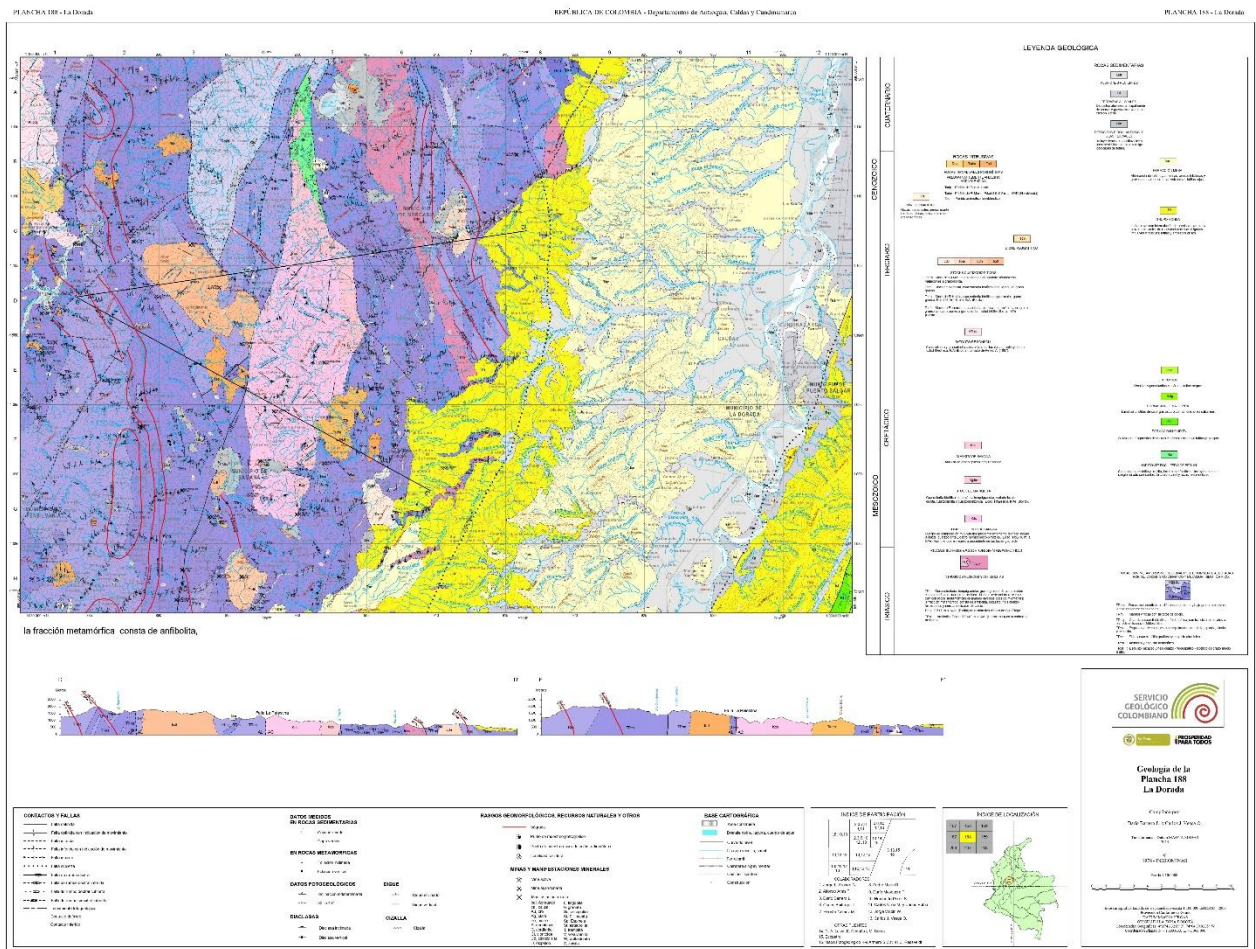


Figura 7. Plancha geológica 188.
Fuente: Servicio Geológico Colombiano

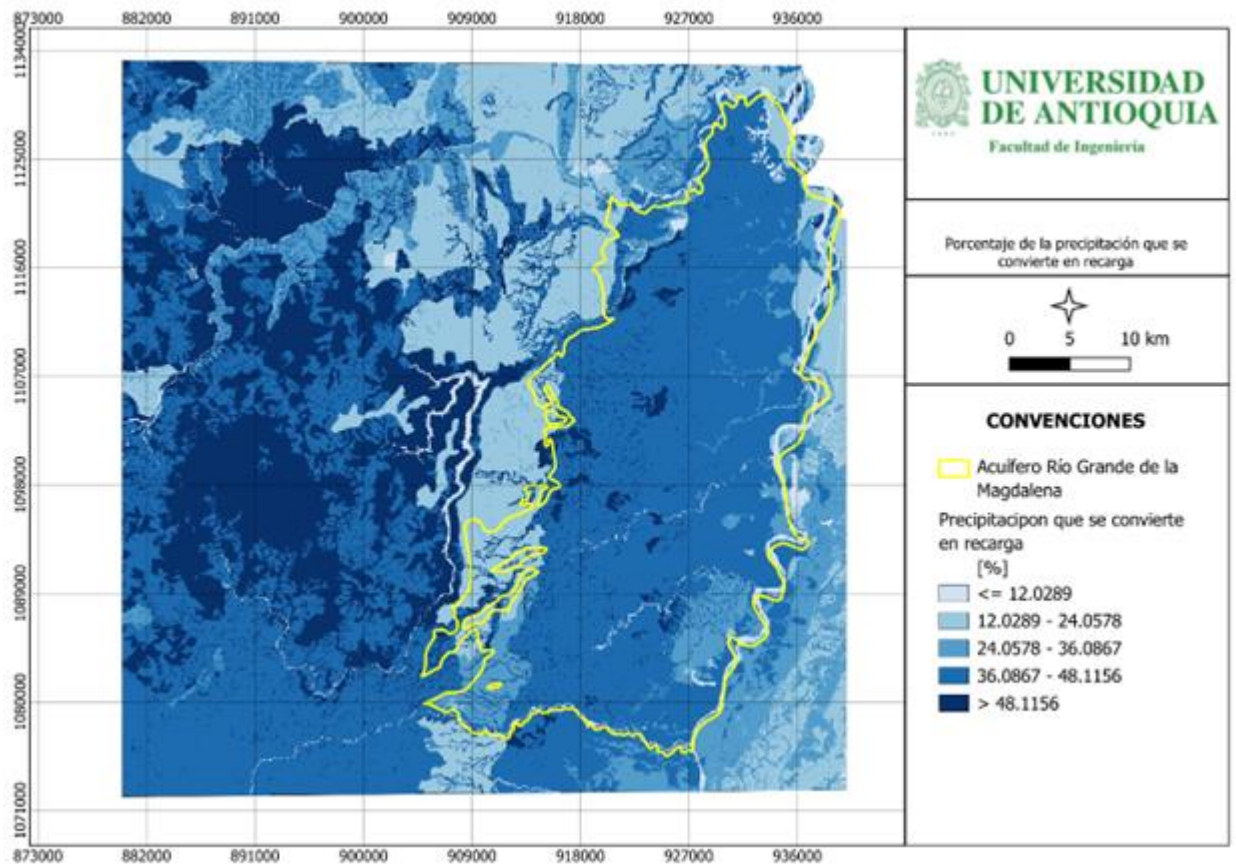


Figura 10. Porcentaje de precipitación que se convierte en recarga para la zona de interés

Fuente: Elaboración propia

3.3 Determinar rangos de la magnitud de la recarga

Uno de los objetivos fundamentales de la presente investigación es un planteamiento de cómo evaluar las condiciones hidrológicas. Para ello, se llevó a cabo una revisión bibliográfica (**Tabla II**), la cual tuvo como objetivo identificar como en otros estudios recientes, no mayores a cinco años de publicación, se evaluaban las variables hidrológicas y así intentar hallar una similitud entre ellas para ser aplicado en el caso de Colombia. Debido a que no fue posible encontrar estudios que utilizaran manera particular la variable de la recarga, se tomo como base estudios en los que se tuvo en cuenta la precipitación.

(Autores, Año)	Título
(Noori & Singh, 2024)	Delineation of optimal locations for artificial groundwater recharge utilizing MIF and GIS in a semi-arid area

(Autores, Año)	Título
(Samson & Elangovan, 2015)	Delineation of Groundwater Recharge Potential Zones in Namakkal District, Tamilnadu, India Using Remote Sensing and GIS
(Diriba et al., 2024)	Delineation of groundwater potential zonation using geoinformatics and AHP techniques with remote sensing data
(Kumar et al., 2024)	Delineation of groundwater potential zones and its extent of contamination from the hard rock aquifers in west-Bengal, India
(Dar et al., 2020)	Delineation of potential groundwater recharge zones using analytical hierarchy process (AHP)
(Tiwari et al., 2024)	GIS and AHP-based groundwater recharge potential zones in urban region: A study of Ajmer City, Rajasthan, India
(Slimani et al., 2024)	Identification of groundwater potential recharge zones in a Tunisian anthropogenic coastal region: Insights from multicriteria decision-making techniques
(Ahmad et al., 2020)	GIS-based multi-criteria evaluation of groundwater potential of the Beshilo River basin, Ethiopia
(Aykut, 2021)	Determination of groundwater potential zones using Geographical Information Systems (GIS) and Analytic Hierarchy Process (AHP) between Edirne-Kalkansogut (northwestern Turkey)
(Khan et al., 2022)	GIS and RS intelligence in delineating the groundwater potential zones in Arid Regions: a case study of southern Aseer, southwestern Saudi Arabia
(Boufekane et al., 2020)	Delineation of groundwater recharge zones in the Mitidjaplain, north Algeria, using multi-criteria analysis
(Nayak et al., 2023)	Delineation of Potential Groundwater Recharge Zones in the Middle Reach of Mahanadi River Basin using GIS-Based MCDM Technique

Tabla 11. Revisión bibliográfica para determinar uso de variables hidrológicas

Fuente: Elaboración propia.

En la revisión se encontró un factor en común, y es que en la categorización de la variable hidrológica, se tomaba como valor de inicio para la clasificación el valor medio, dándole un peso “Moderado”, y a partir de él se realizaron categorizaciones de peso “Bajo” y “Muy bajo” para

valores por debajo de la media, y valores de “Alto” y “Muy alto” para valores por encima de la media, sin embargo no se encontró una metodología en común para la división de dichos valores por fuera de rango de la media, frente a esta circunstancia se vio la necesidad de dar pie a la estructuración de una propuesta metodológica que permitiera dar una salida más lógica y que aplicara criterios estadísticos.

3.4 Definición de la función de recarga

Para la función de recarga, necesaria para determinar cómo las variables hidrológicas influyen en la delimitación de las zonas de recarga, se retomó la metodología planteada por la Universidad de Antioquia, en la cual, gracias a la decisión tomada por un taller de expertos, en el marco del convenio 040-COV2211-104, “ANUAR ESFUERZOS PARA LA ACTUALIZACIÓN DE LOS PLANES DE MANEJO AMBIENTAL DE ACUÍFEROS DE OCCIDENTE Y MAGDALENA MEDIO Y LA FORMULACIÓN DEL PLAN DE MANEJO AMBIENTAL DE ACUÍFEROS DEL SISTEMA ACUÍFERO DE CARTAMA” se diseñó una matriz, la cual cruza la Importancia de zonas recarga con la Magnitud de la recarga, para así, según el juicio de los expertos, determinar una nueva clasificación entre los valores Muy alto y Muy bajo dependiendo del cruce (*Tabla 12*).

Función de recarga		Magnitud de la recarga				
		Muy Alta	Alta	Media	Baja	Muy baja
Importancia zonas de recarga	Muy Alta	Muy alto	Muy alto	Alto	Alto	Alto
	Alta	Muy alto	Alto	Alto	Alto	Medio
	Moderada	Alto	Alto	Medio	Medio	Bajo
	Baja	Medio	Medio	Bajo	Bajo	Muy bajo
	Muy baja	Medio	Bajo	Bajo	Muy bajo	Muy bajo

Tabla 12. Matriz de clasificación de la función de recarga con base en reglas de decisión cualitativa aplicada sobre los factores Magnitud de la Recarga y Zonas de Recarga

Fuente:(CORANTIOQUIA & UdeA, 2021)

4 Resultados

4.1 Zonas de Recarga Metodología UdeA

Para la topografía se obtuvo resultados en su gran mayoría entre una calificación entre 4 y 5, sobre todo en las zonas cercanas al acuífero donde se había evidenciado topografía plana, y cuya calificación disminuye a medida que se avanza hacia el oeste de la zona de estudio, acercándose a la zona montañosa donde la calificación cambia a estar en entre 3 y 4. Con respecto a las menores calificaciones, correspondientes a el rango de 1 a 2 y el rango 2 a 3, se observa en la **Figura 11** se encuentran en una pequeña proporción, en las zonas donde de evidenciaba las mayores altitudes, esto debido a que aunque en la zona de interés en general hubiera grandes diferencia de altura, no había cambios en la pendiente abruptos, sino que en las zonas donde aumentaba la elevación se realizaba con pendientes mas sutiles, no afectando como tal de manera significativa el proceso de infiltración, por los cual en casi toda la zona de interés predomina una calificación entre 3 y 5.

Para el caso de los patrones texturales, gracias a que se identificó en las pruebas texturales un gran número de zonas las cuales contaban con una textura franco arenosa o franca se obtuvieron altos valores de calificación para el área de interés, sin embargo, también se cuentan con bajos resultados debido a la presencia de textura arcillosa, a veces combinada con limos, los cual tiene como resultados zonas donde se baje la calificación entre 1 a 3, ya que dichas texturas no favorecen al proceso de infiltración (**Figura 12**).

En contra parte, gracias a las pruebas de infiltración realizadas en el área de interés se obtuvo una excelente calificación para la variable de condiciones de infiltración, donde se observa casi en su totalidad una calificación entre 4 y 5, gracias a las pruebas de infiltración con un resultado mayor o igual a 1.52 cm/h, las cuales fueron una mayoría. También se obtuvieron valores entre 2 y 3 en la zona norte y oeste del área de estudio, sin embargo, no representan una mayoría y puede concluirse en general unos resultados excelentes para esta propiedad (**Figura 13**).

No se obtuvo resultados favorables al momento de evaluar la cobertura vegetal, esto debido a que en la zona primaron, según la clasificación Corine Land Cover, zonas de pastos limpios y vegetación de transición, los cuales no suelen tener valores alto al momento de aplicar la metodología. A su vez, se contó con muy pocas áreas con una buena calificación, correspondiente a la clasificación entre 4 y 5, ya que las zonas de arbustal, herbazal y bosque fragmentado, correspondientes a las calificaciones más altas, eran escasos (**Figura 14**).

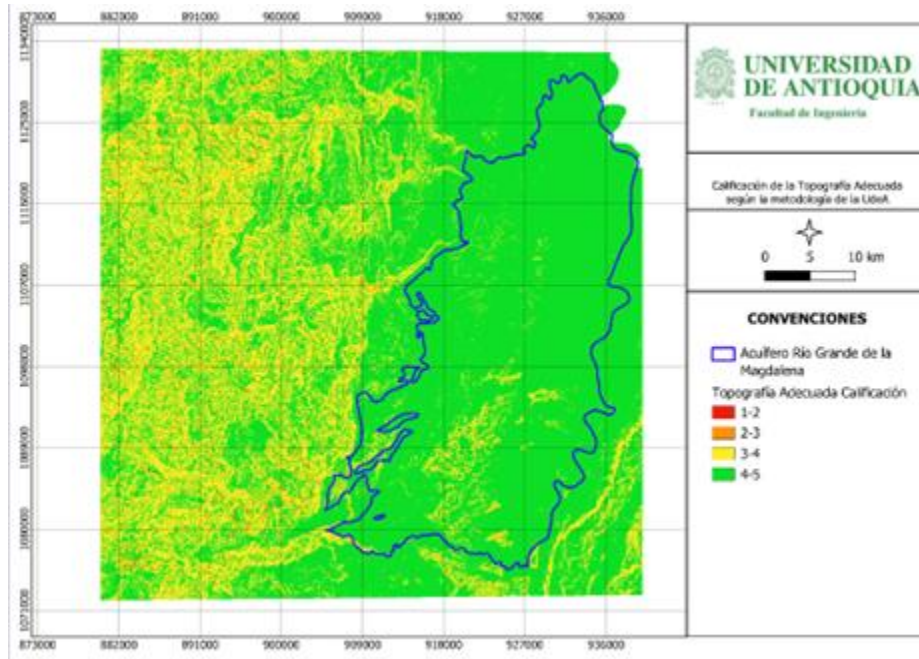


Figura 11. Calificación de la Topografía Adecuada según la metodología de la UdeA

Fuente: Elaboración propia

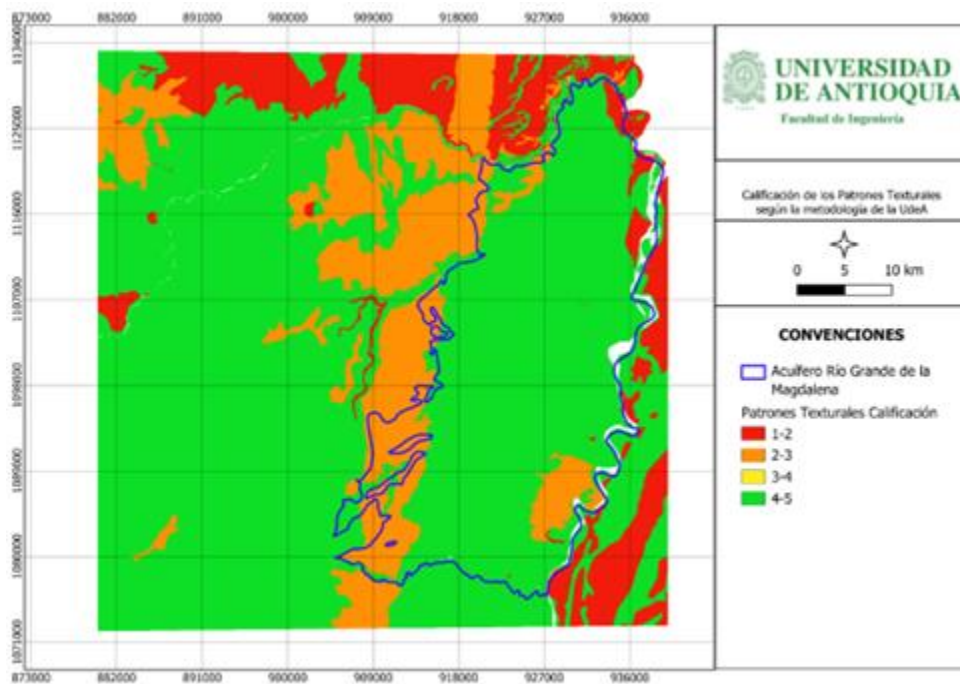


Figura 12. Calificación de los Patrones Texturales según la metodología de la UdeA.

Fuente: Elaboración propia

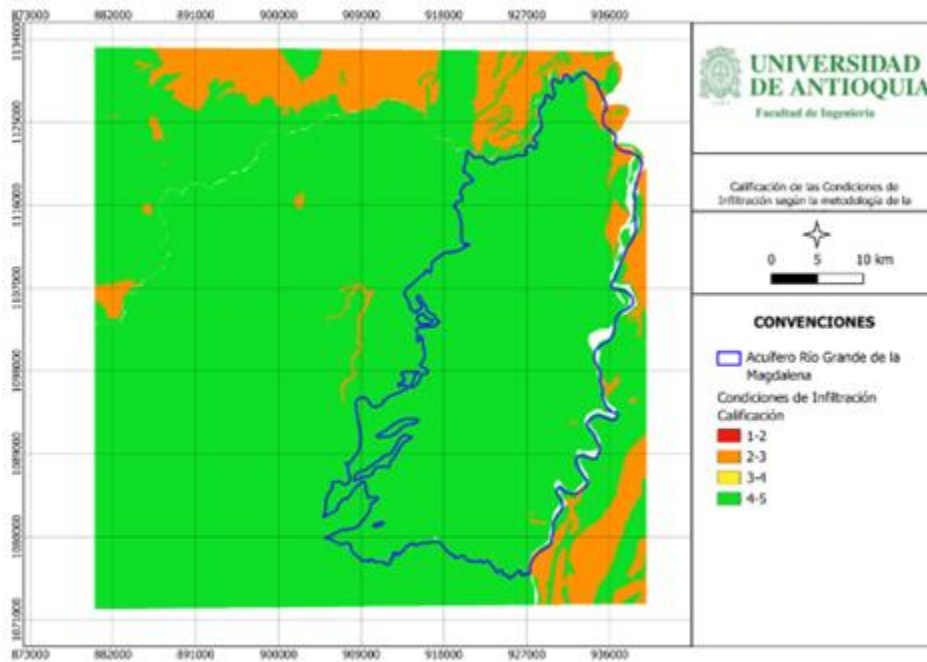


Figura 13. Calificación de las Condiciones de Infiltración según la metodología de la UdeA
Fuente: Elaboración propia

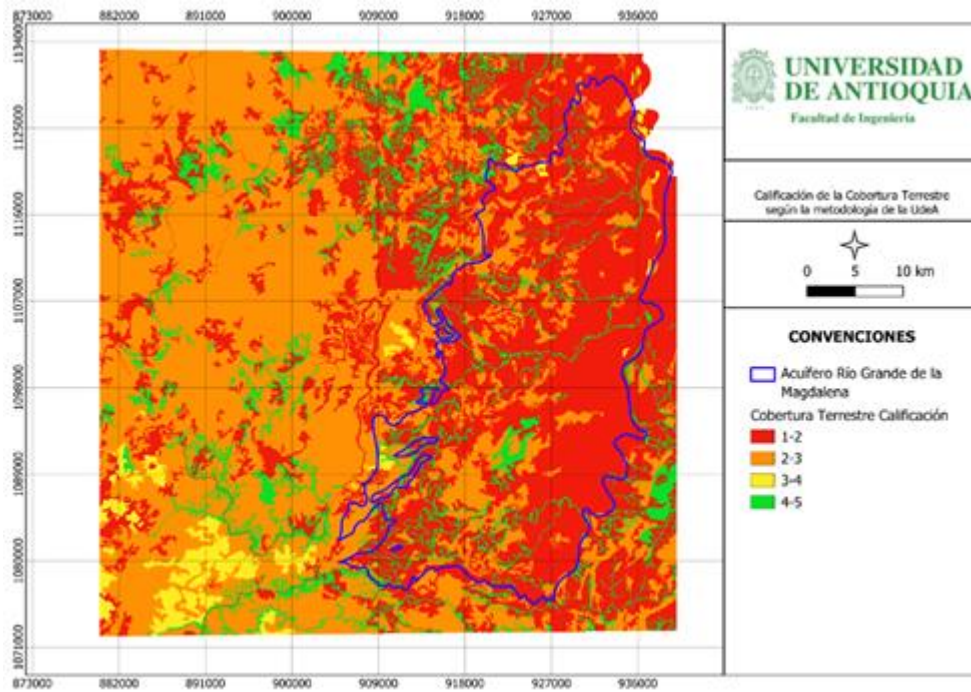


Figura 14. Calificación de la Cobertura Terrestre según la metodología de la UdeA
Fuente: Elaboración propia

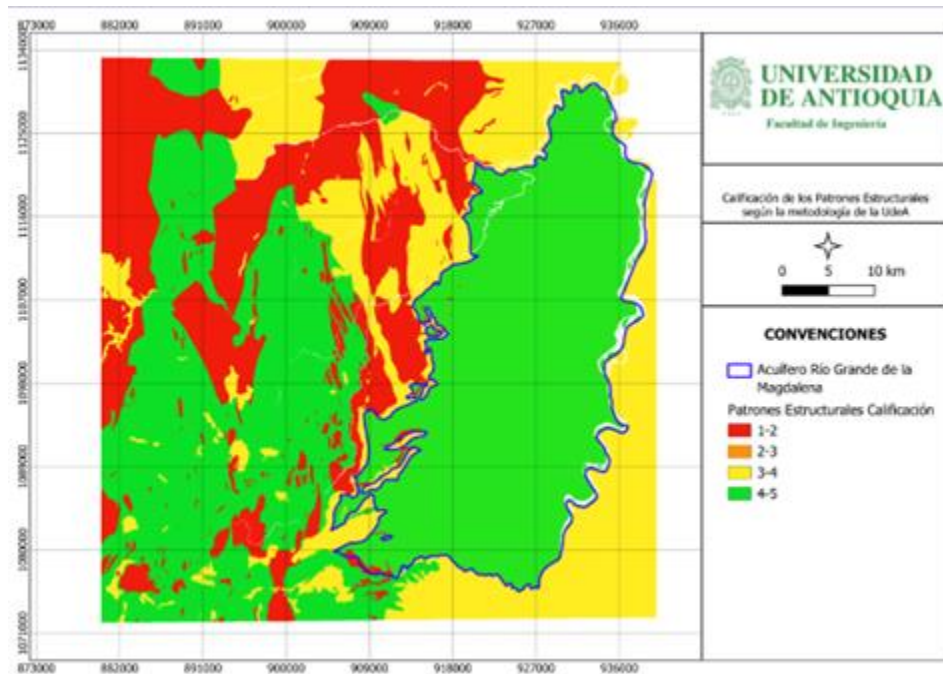


Figura 15. Calificación de los Patrones Estructurales según la metodología de la UdeA

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, como resultado final de la aplicación de la metodología UdeA, se obtuvo un mapa de delimitación de zonas de recarga (**Figura 16**), en el cual primeramente se evaluó la zona por fuera del acuífero Río Grande de la Magdalena, ya que estas son las áreas donde se da el flujo regional hacia el acuífero. En aspectos generales, se obtuvo un buen resultado, siendo en la mayoría de áreas una categorización de zona de recarga Alta, esto debido sobre todo a los resultados obtenidos del mapa de topografía adecuada (**Figura 11**) y el mapa de condiciones de infiltración (**Figura 13**), ya que son las variables con un mayor peso ponderante en la **Ecuación 1**.

En orden de importancia le sigue las zonas de importancia Media, las cuales fueron las segundas mayor representadas en el área de estudio, explicadas gracias a los resultados obtenidos por los patrones texturales (**Figura 12**), ya que se puede notar una clara influencia, debido a que este no sólo es la tercer variable más importante según su peso ponderado en la ecuación, sino que a su vez es claro como en las zonas donde esté presentó menores calificaciones texturales baja la importancia de la zona de recarga, pasando de importancia Alta a importancia Media.

Por último, hablando de las zonas de recarga por flujos regionales, tenemos una clasificación baja, fuertemente influenciada por las bajas calificaciones de las coberturas terrestres

(Figura 14) en combinación de las zonas donde no se obtuvo buenas pruebas de infiltración (Figura 13), dos variables importantes que pudieron bajar la calificación de la zona de recarga a Baja.

También se evaluó la zona de recarga directa, la cual está ubicada en el área del acuífero, donde se obtuvieron buenos resultados debido a que en ella priman no solo los flujos verticales, sino que a su vez calificaciones altas en todas las variables físicas, a excepción de las coberturas terrestres, por lo cual se decidió clasificar la zona en zonas de recarga de mayor importancia, las cuales obtuvieron valores entre 4 y 5, y zona de menor importancia, las cuales obtuvieron valores entre 3 y 4, todo lo anterior en un marco en el cual se defiende que al ser una zona de recarga directa, y en consecuencia se dan flujos verticales provenientes de la precipitación, es una zona de especial interés e importancia.

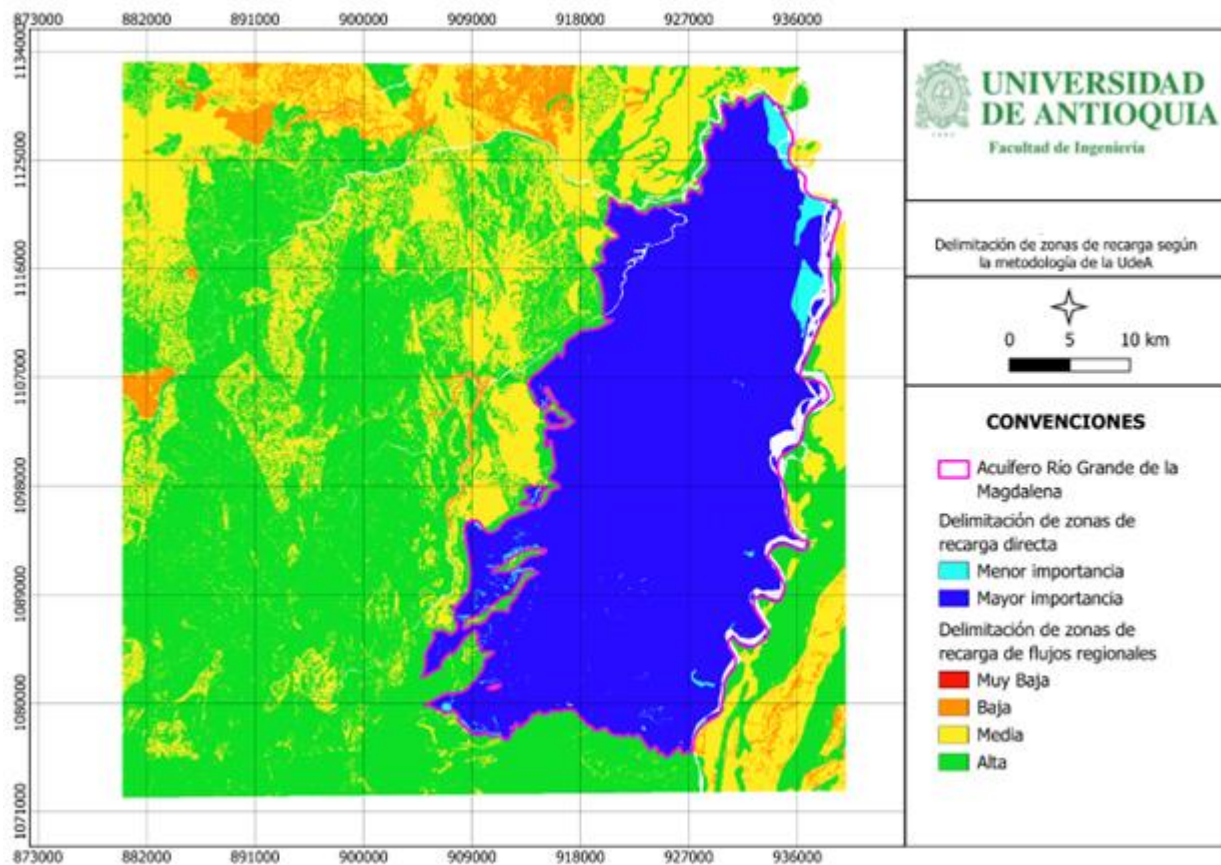


Figura 16. Delimitación de zonas de recarga según la metodología de la UdeA

Fuente: Elaboración propia

4.2 Zonas de Recarga Metodología CORPOCALDAS

Como resultado de la búsqueda en la revisión bibliográfica se encontraron dos mapas de delimitación de zonas de recarga generados por CORPOCALDAS con dos metodologías diferentes:

La primera, la cual utilizó las características intrínsecas del medio, tales como la pendiente, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso del suelo, otorgándole a cada una un peso ponderado específico y aplicando una función con dichos pesos ponderados, dando como resultado en el acuífero una predominancia entre las zonas Muy Alta y Alta, siendo la mayor visualmente la categoría Alta y muy pocas zonas donde se considere las categorías Moderada y Baja (**Figura 17**).

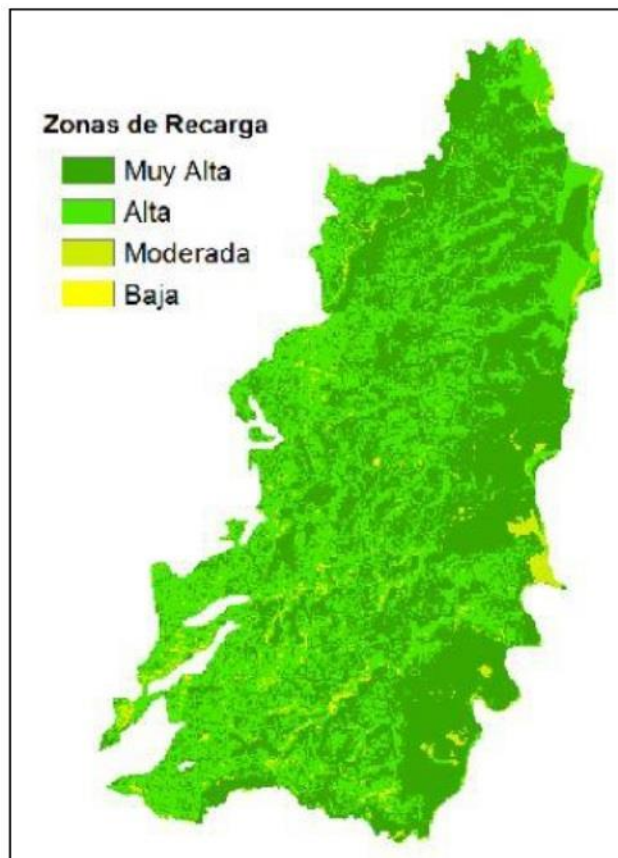


Figura 17. Delimitación de zonas de recarga metodología CORPOCALDAS utilizando variables intrínsecas del medio

Fuente: (CORPOCALDAS & UTP, 2018)

La segunda, que tuvo en cuenta las mediciones de pozos y aljibes para formar el nivel freático y con el cual, por medio de herramientas geoestadísticas, determinó la delimitación de las zonas de recarga. En este método, tal como en el anterior, predomina la clasificación de Alta, sin

embargo, disminuye significativamente la categoriza de Muy Alta, y, por consiguiente, aumentan las categorías de Muy baja y Baja hacia la zona este del acuífero, siendo clara la diferencia de resultados para ambas metodologías (**Figura 18**).

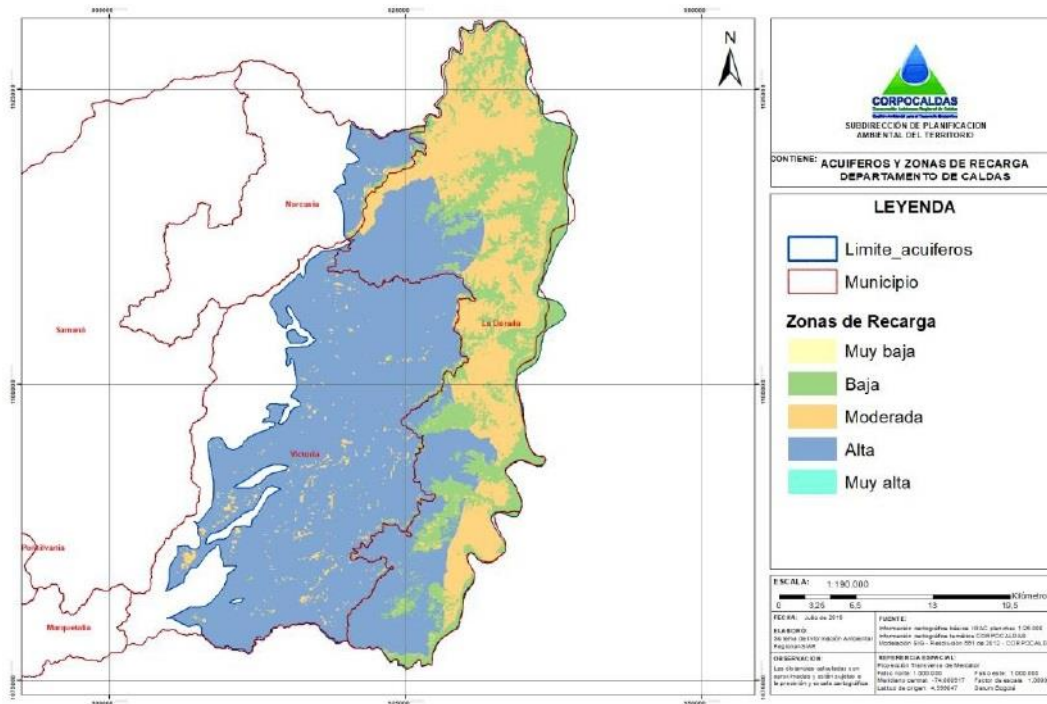


Figura 18. Delimitación de zonas de recarga metodología CORPOCALDAS utilizando en nivel freático.

Fuente: (CORPOCALDAS & UTP, 2018)

4.3 Propuesta metodológica para evaluar la magnitud de la recarga

Con el fin de proponer una metodología para evaluar la magnitud de la recarga se propuso lo siguiente: partir de la media, como se identificó en la revisión bibliográfica, y tomar como valor determinante y divisorio la desviación estándar, al ser la medida que muestra como los diferentes datos varían de la media.

Se creó entonces cinco divisiones de calificación para la recarga, partiendo de la “Recarga Moderada”, la cual corresponde a los valores que están a una desviación estándar alrededor de la media, tanto por encima como por debajo, teniendo un rango total de dos desviaciones estándar, siguientemente se definió el valor de “Recarga Alta”, el cual corresponde también a un rango de una desviación estándar por encima del valor moderado, y por consiguiente todos los valores por

encima de la calificación alta fueron categorizados como “Recarga Muy Alta”, como se observa en la **Figura 19**. Del mismo modo se procedió con los valores que se encuentran por debajo de la calificación de recarga media.

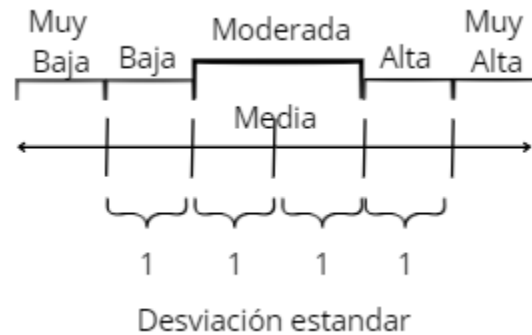


Figura 19. Propuesta metodológica para evaluar rangos de la magnitud de recarga.

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, esta metodología planteada se enfrentó a un reto, el cual se presenta al tener en cuenta que la variedad climatológica de Colombia conlleva a diferente disponibilidad hídrica en diferentes zonas del país, y si la metodología se aplicaba a nivel general nacional se podía eclipsar el potencial de recarga para las zonas más secas, por lo cual se decidió hacer una zonificación climática para crear un rango de zona de recarga por zona climática.

Para ello, primeramente, se utilizó la información de precipitación, esta fue obtenida a partir del sensor CHIRPS, el cual permite obtener la precipitación media anual para una extensa área del globo terráqueo, incluido Colombia. Se obtuvo los datos de entre los años 1981 a 2014, debido a que ese es el rango para el cual se encuentra validada la base de datos en el país (Urrea et al., 2016). Según los datos se presenta un mínimo de precipitación media anual de 18 mm/año y un máximo de 8650 mm/año, mostrando la amplia variabilidad de precipitación que se presenta en el país, y se observa en la **Figura 20** una distribución coherente, en la cual las mayores precipitaciones se encuentran en la región pacífica y las menores en las zonas desérticas, como lo es La Guajira.

También se utilizó información de temperatura media anual proveniente de la base de datos CHELSA para un periodo de registro entre 1981 y 2010, en el cual se obtuvieron valores mínimos alrededor de los 0°C y máximos de 29°C, y como se observa en **Figura 21** esta sigue una distribución espacial coherente, en la que las mayores temperaturas se encuentran en las zonas desérticas y secas, y las menores temperaturas corresponden a zonas de mayor elevación,

correspondientes a las zonas de las tres cordilleras que atraviesan Colombia, y a la zona específica donde se encuentra la Sierra Nevada de Santa Marta.

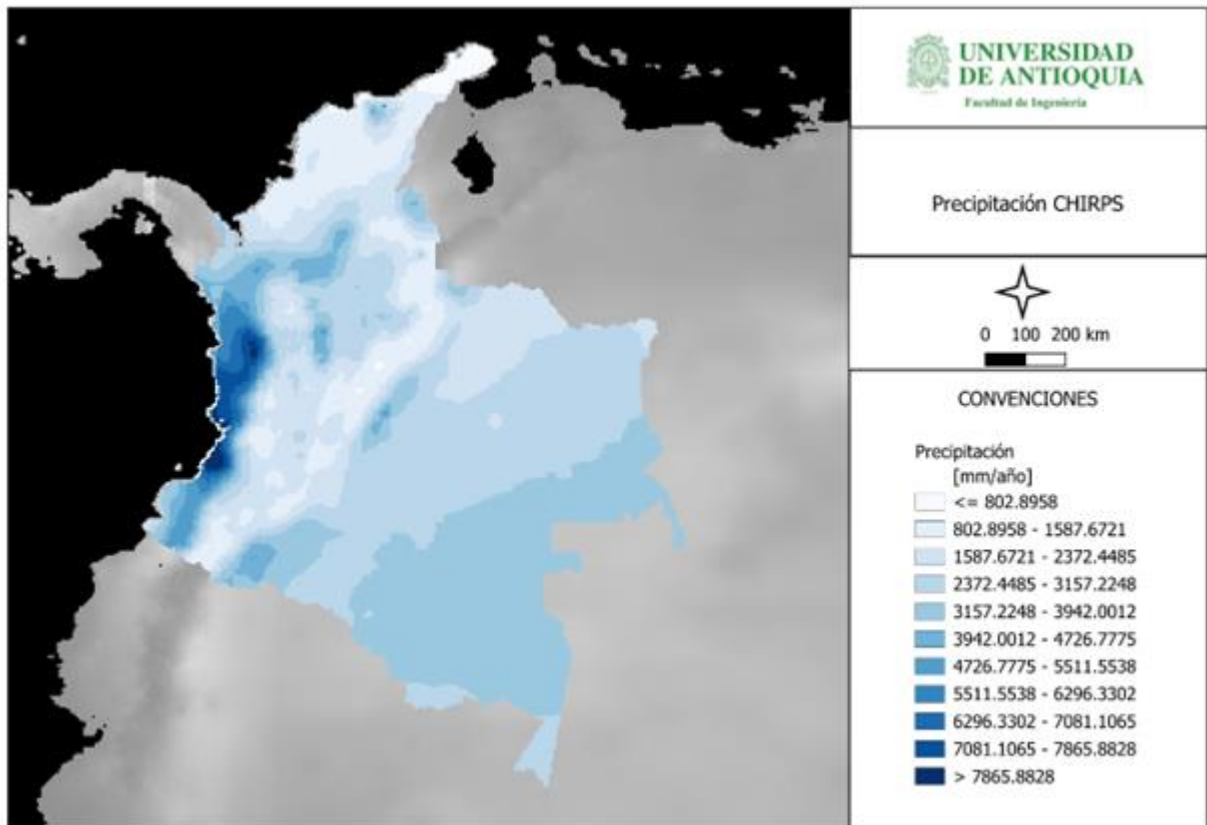


Figura 20. Precipitación media multianual para Colombia según la base de datos CHIRPS.

Fuente: Elaboración propia

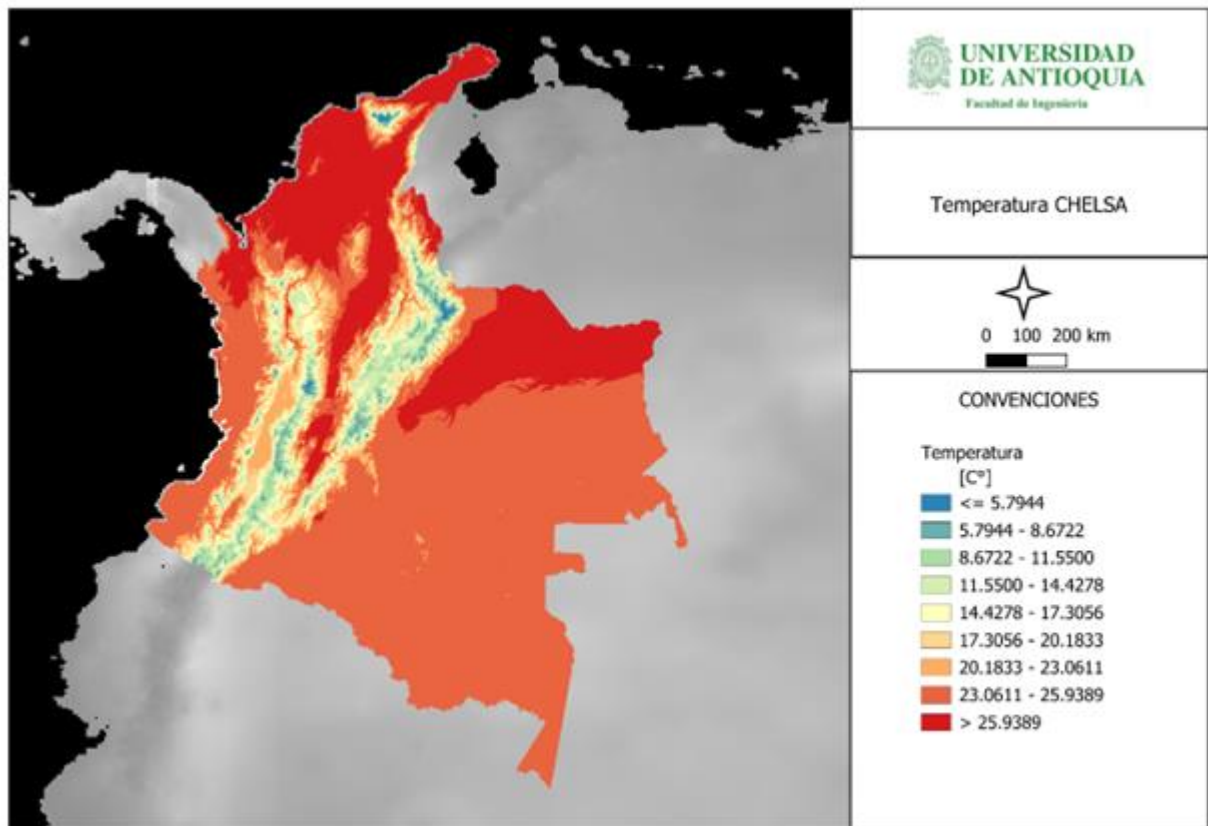


Figura 21. Temperatura media multianual para Colombia según la base de datos CHELSA.

Fuente: Elaboración propia

Con la información tanto de precipitación y temperatura media anual se procede a hacer una zonificación climática, para ello se aplicó el factor de Lang, el cual permite por medio de una relación entre precipitación y temperatura categorizar las diferentes zonas del país por medio de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y su zonificación como se muestra en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

$$\text{Índice de Lang} = \frac{\text{Precipitación}}{\text{Temperatura}}$$

Ecuación 4. Índice de Lang

Fuente: (IGAC, 2021)

Relación Precipitación / Temp. Media anual	Zonas
0 - 20	Desiertos
20 - 40	Árida
40 - 60	Semiárida
60 - 100	Semihúmeda

Relación Precipitación / Temp. Media anual	Zonas
100 - 160	Húmeda
> 160	Super húmeda

Tabla 13. Zonificación de Lang en función de la relación entre precipitación y temperatura.

Fuente: (IGAC, 2021)

Con la zonificación climática planteada, se procedió a definir los rangos de recarga para cada una de ella, recordando lo establecido en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Para ello, se debió establecer primero una recarga nacional que utilizar de base, para la cual se utilizó la ecuación de Turc (**Ecuación 1**), el cual es un proceso empírico que permite calcular la recarga potencial relacionando las variables de precipitación y temperatura.

$$Recarga = P \left[1 - \left(0.9 + \frac{P^2}{L^2} \right)^{-0.5} \right]$$

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

Ecuación 5. Turc para estimar la recarga potencial

Siendo

P: Precipitación (mm/año)

T: Temperatura media anual (C°)

Con el cálculo de la recarga potencial en mm/año para todo Colombia, se procedió encontrar los rangos de recarga potencial por zonificación climática, para posteriormente poder aplicar la función de recarga.

4.3 Magnitud de la recarga

Para obtener la magnitud de la recarga para zona de interés, primero se debió evaluar la magnitud de la recarga a nivel nacional, esto primeramente obteniendo resultados de zonificación climática dados por el índice de Lang, el cual combina características de temperatura y precipitación, dando como resultado una clasificación entre Desierto, Árido, Semiárido, Semihúmedo, Húmedo y Super Húmedo (**Figura 22**).

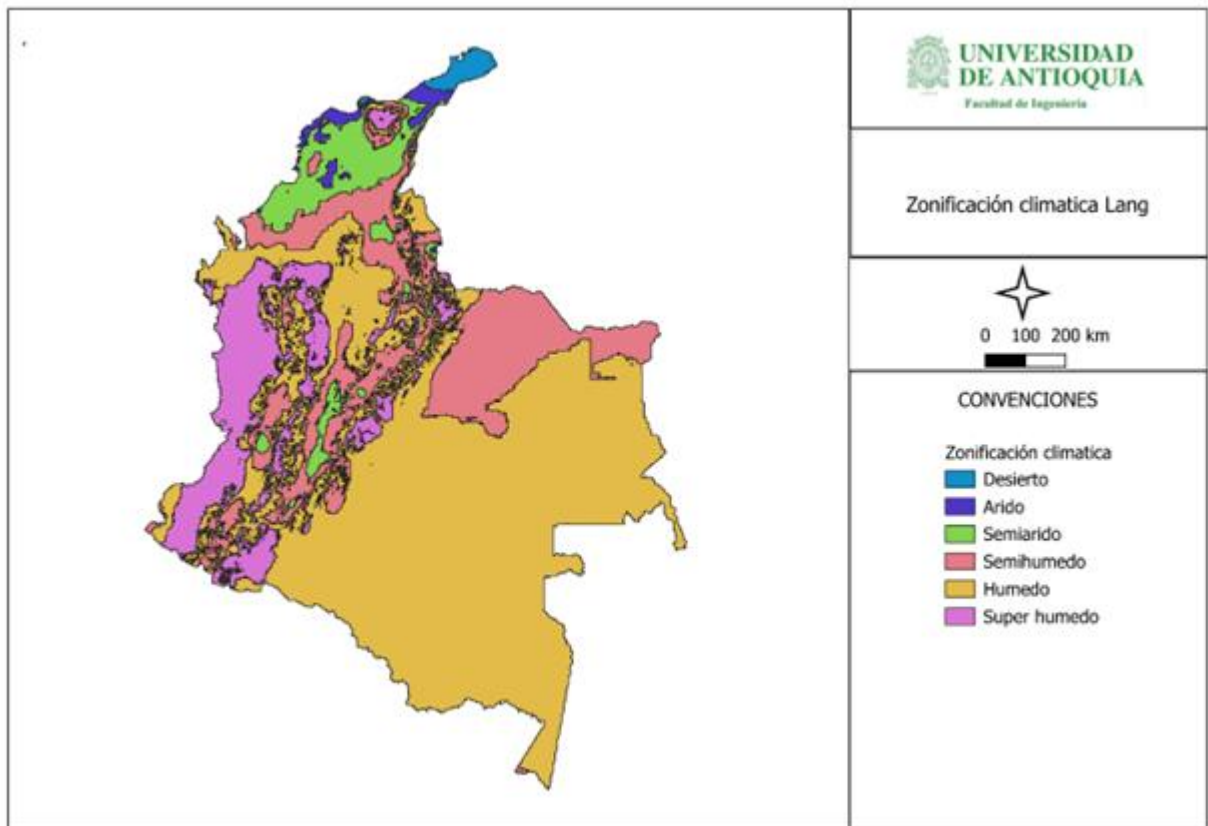


Figura 22. Zonas de recarga Colombia según índice de Lang

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se obtuvo el resultado de la recarga potencial anual para todo Colombia por medio del método de Turc (**Figura 23**), el cual demuestra una recarga mínima potencial de 0 mm/año para las zonas correspondientes a la zona climática desértica, esto debido a una condicional en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, la cual indica que si en la relación entre la precipitación y el factor L , $(\frac{P}{L})$, se cumple que sea menor a 0.316, la recarga es 0, esto debido a que el rango de la ecuación esta limitada por la raíz aplicada, por lo cual no se obtuvo un resultado para dicha zona climática.

Para el resto de zonas climáticas, se observan unos rangos coherentes de recarga potencial. Teniendo en cuenta que los máximos se encuentran en la zona pacífica y la zona correspondiente a la Sierra Nevada de Santa Marta, lo segundo siendo acorde al hecho de que en esa zona climática se esperan menores evapotranspiraciones potenciales debido a el aumento en la elevación y la disminución de la temperatura, aumentando la recarga potencial, y así, encontrando unos máximos a nivel nacional de 6930 mm/año.

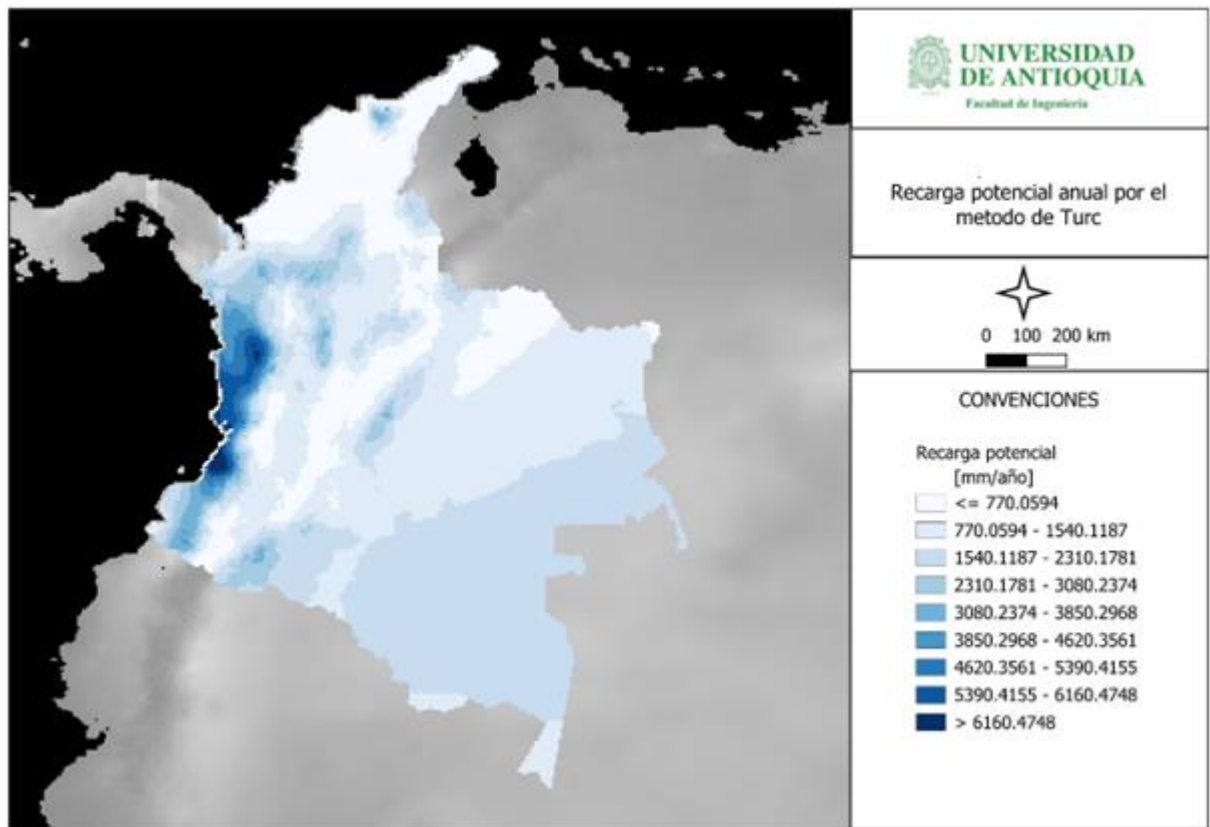


Figura 23. Recarga potencial anual por el método de Turc

Fuente: Elaboración propia

Se produjo a su vez el respectivo porcentaje de precipitación que se convierte en recarga, aplicando una relación entre la recarga potencial anual y la precipitación promedio anual. En aspectos generales para el caso de estudio nacional, se observa una relación directamente proporcional entre las zonas con mayor precipitación media anual y las zonas con mayor recarga, correspondientes a la región pacífica, cordilleras y la Sierra Nevada de Santa Marta, y las zonas donde menores precipitaciones anuales ocurrieron en donde se suele hallar una menor recarga.

Cabe resaltar que en las zonas climáticas delimitadas como desierto se obtuvo un resultado de cero en la relación porcentual entre la recarga y la precipitación, esto debido a lo esclarecido anteriormente, donde no se da un resultado para dichas zonas debido a las limitaciones de la metodología.

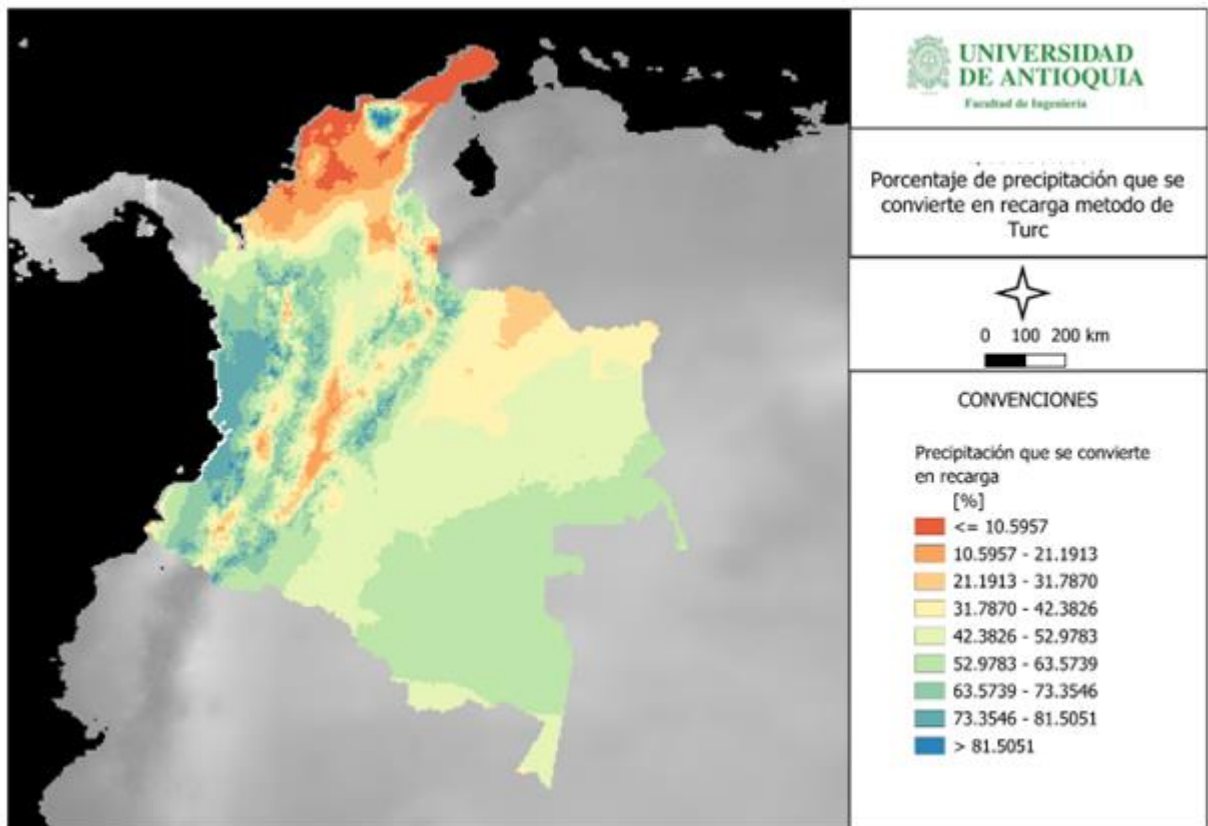


Figura 24. Porcentaje de precipitación que se convierte en recarga método de Turc

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, gracias a la información obtenida de porcentaje de precipitación que se convierte en recarga y las zonas climáticas, se pudo llevar a cabo la metodología planteada, la cual permitió calificar la precipitación que se convierte en recarga en las categorías de “Muy baja”, “Baja”, “Moderada”, “Alta” y “Muy Alta”, y, a su vez, a cada una de dichas calificaciones otorgarle un rango correspondiente a una evaluación que permitió juntar todas las áreas del país que cumplieran con las condiciones climáticas para ser clasificadas, de manera común, permitiendo encontrar de manera general para cada una de ellas (**Tabla 14**).

Clasificación	Zona climática									
	Árida		Semiárida		Semihúmeda		Húmeda		Super húmeda	
	Media	Des. Estándar	Media	Des. Estándar	Media	Des. Estándar	Media	Des. Estándar	Media	Des. Estándar
	12.2	2.43	15.36	4.53	35.53	6.76	52.86	5.45	70.21	5.77
	Rango recarga		Rango recarga		Rango recarga		Rango recarga		Rango recarga	
Muy baja	< 3.94		< 11.96		< 30.46		< 48.77		< 65.88	
Baja	3.94 - 5.15		11.96 - 14.23		30.46 - 33.84		48.77 - 51.50		65.88 - 68.77	
Moderada	5.15 - 6.37		14.23 - 16.49		33.84 - 37.22		51.50 - 54.22		68.77 - 71.65	
Alta	6.37 - 7.58		16.49 - 18.76		37.22 - 40.60		54.22 - 56.95		71.65 - 74-53	
Muy alta	> 7.58		> 18.76		> 40.60		> 56.95		> 74.53	

Tabla 14. Clasificación de rangos de recarga por zona climática

Fuente: Elaboración propia

Al momento de evaluar la relación presentada entre la magnitud de la recarga, expresada en porcentaje de precipitación que se convierte en recarga, en el área de interés de la presente investigación, se identificó que en ella se encontraban en ella tres zonas climáticas: Semihúmeda, ubicada en la zona este del área de interés (**Figura 25**), Húmeda, ubicada en la parte central (**Figura 26**) y Super Húmeda, ubicada en la zona oeste (**Figura 27**), por lo cual, para poder aplicar la función de recarga como paso siguiente, tuvo que ser dividida la zona de estudio según su zona climática y así identificar los rangos de recarga correspondientes.

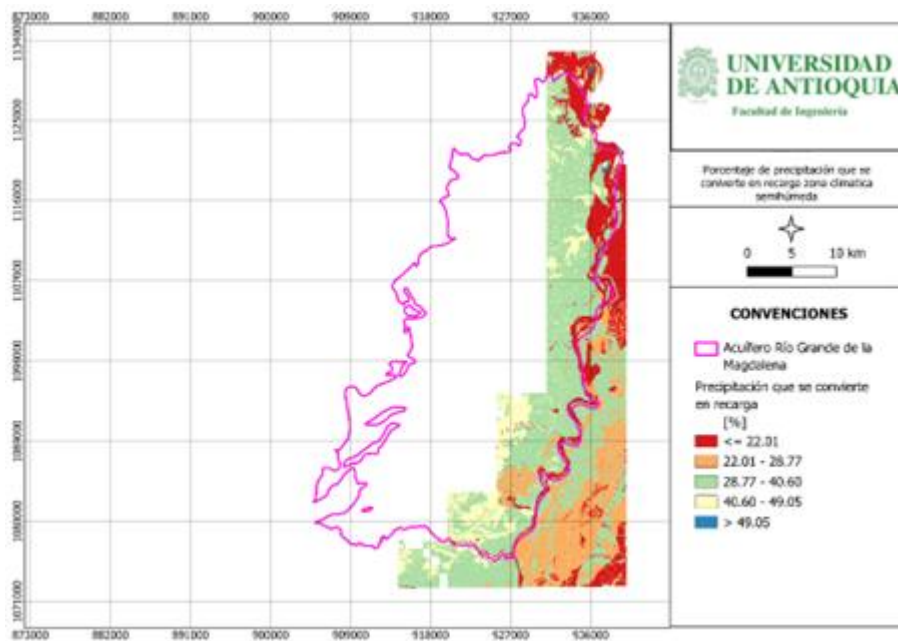


Figura 25. Porcentaje de precipitación que se convierte en recarga zona climática semihúmeda

Fuente: Elaboración propia

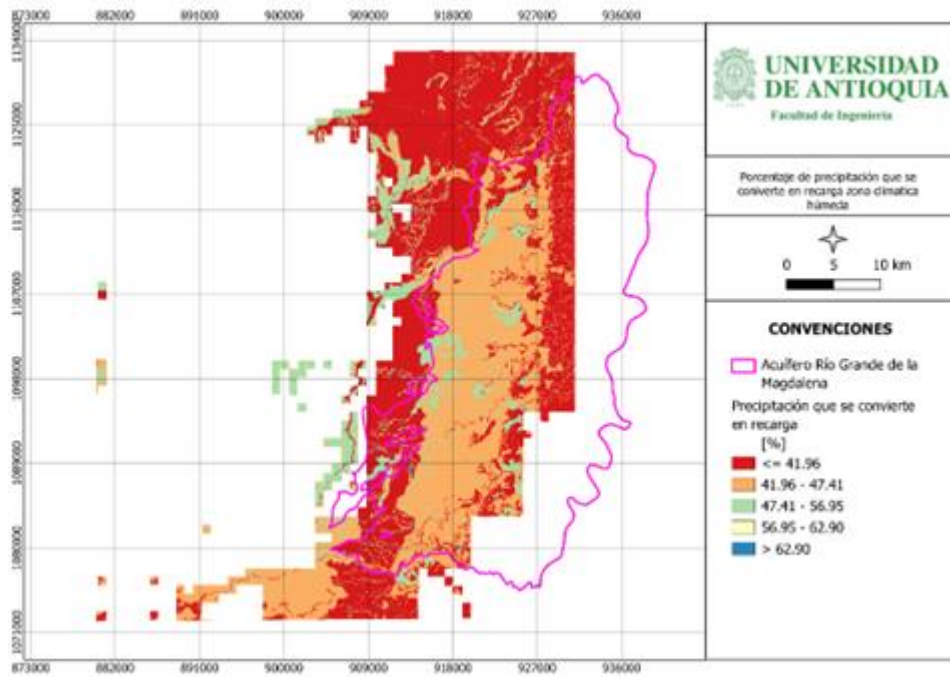


Figura 26. Porcentaje de precipitación que se convierte en recarga zona climática húmeda

Fuente: Elaboración Propia

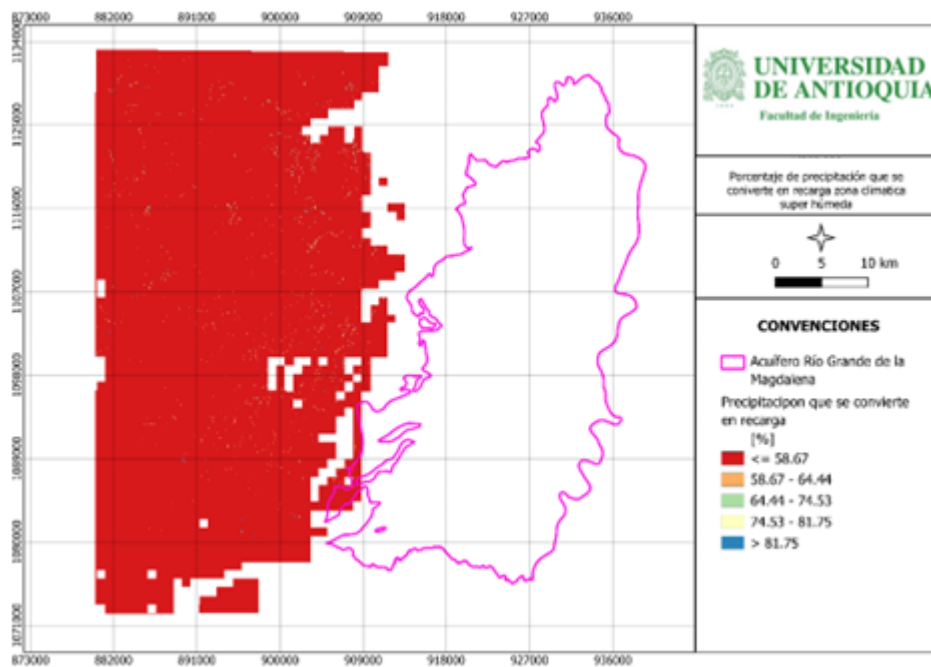


Figura 27. Porcentaje de precipitación que se convierte en recarga zona climática súper húmeda

Fuente: Elaboración propia

Al haber identificado cada una de las zonas climáticas fue posible clasificarlas a cada una de ellas en las diferentes categorías entre Muy Bajo y Muy Alto, pudiendo finalmente obtener un solo mapa de clasificación de magnitud de la recarga para la zona de estudio (**Figura 28**).

Es observable que, a pesar de las alto porcentaje de precipitación que se convierte en recarga en la zona occidental del área de interés, donde nos encontramos con una zona climática húmeda, al momento de aplicar la clasificación por medio de la **Tabla 14** esta tiene en casi toda su extensión una calificación Muy baja, esto debido a que se obtuvo a nivel nacional resultados de porcentajes muy altos para dicha zona climática, por lo cual al momento de evaluarlo a una menor escala conllevó a que la recarga local fuese de un rango menor, ocasionando una calificación pobre.

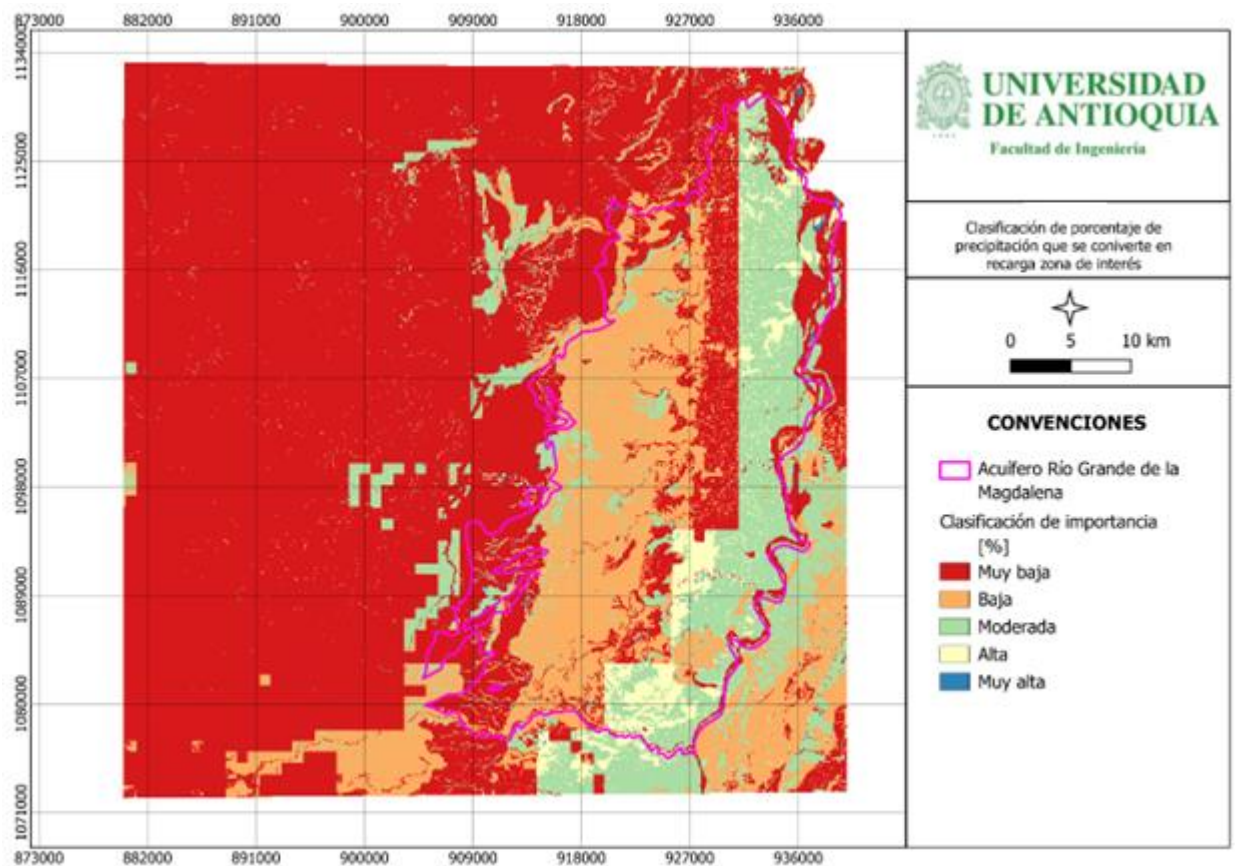


Figura 28. Clasificación de porcentaje de precipitación que se convierte en recarga en la zona de interés

Fuente: Elaboración propia

4.4 Función de recarga

En primer lugar, se realizó el cruce entre las variables hidrológicas y las zonas de recargas obtenidas aplicando la metodología de la Universidad de Antioquia, donde se obtuvo que en la zona conformada por el acuífero predomina la calificación de zona de importancia alta, sin embargo, bajó considerablemente la calificación muy alta.

Donde más se observan cambios en el las áreas por fuera de los límites del acuífero, esto debido principalmente a que al ser zonas catalogadas como super húmedas y húmedas, la recarga potencial a media a nivel nacional se obtuvo muy alta, dando como resultado una calificación baja para la recarga y así bajando de categoría la calificación en general al momento de aplicar la función de recarga, por lo cual se observa una predominancia de zonas de calificación moderada, donde anteriormente se consideraba calificación alta. Cabe resaltar a su vez, y como consecuencia de la misma situación, que las zonas calificadas con un nivel de importancia muy baja aumentaron considerablemente (**Figura 29**).

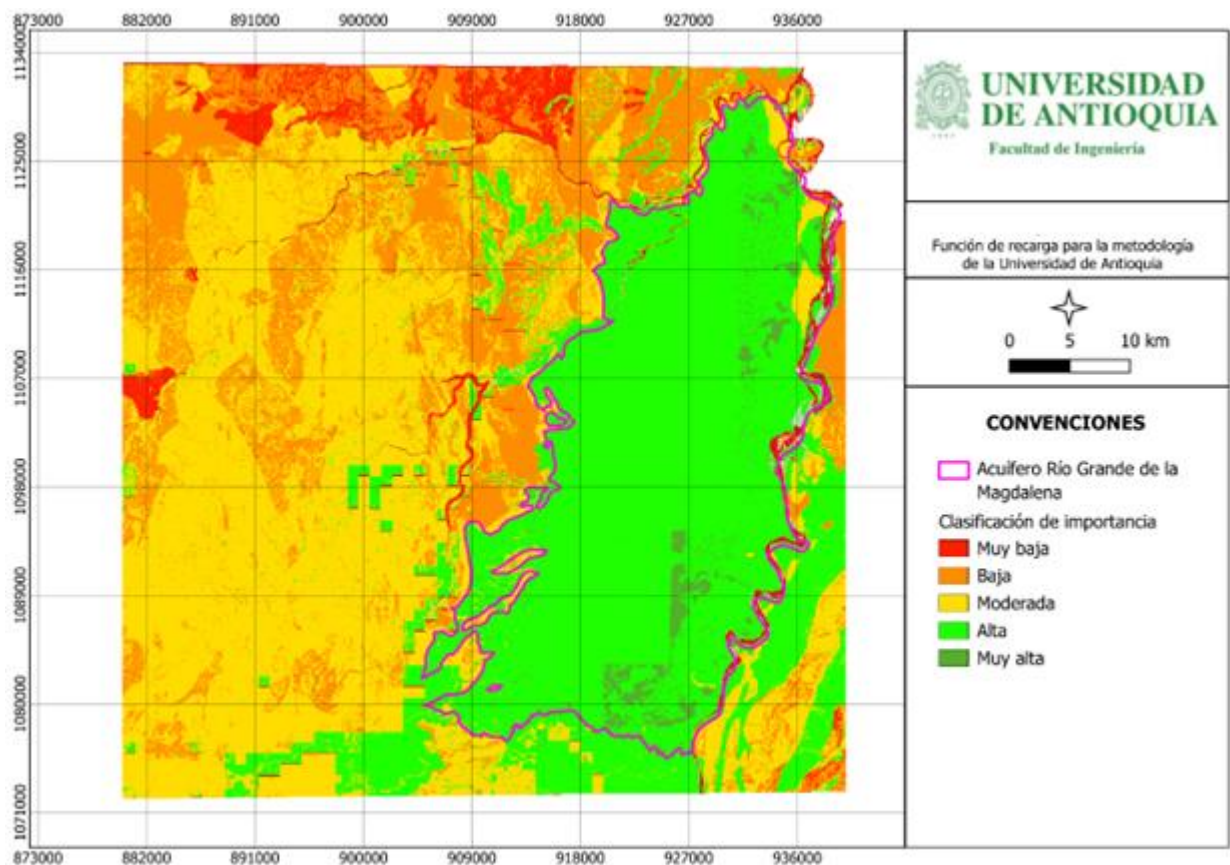


Figura 29. Función de recarga para la metodología de la Universidad de Antioquia

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de las metodologías aplicadas por CORPOCALDAS, primero se le aplicó la función de recarga a la metodología que tenía en cuenta las variables intrínsecas del medio para hallar las zonas de recarga, en la cual se obtuvo resultados solo para el área correspondiente a los límites del acuífero, donde en aspectos generales se sigue observando que destaca la calificación alta, incluso más que antes de ser aplicada la función de recarga, y una disminución de la calificación alta.

A su vez, luego de aplicada la función es más apreciable la calificación moderada a lo largo del acuífero, aumentando en porcentaje. Un cambio notorio es la aparición de la calificación muy baja en la zona suroccidental del acuífero, debido a la baja calificación de la recarga al ser una zona climática húmeda (**Figura 30**).

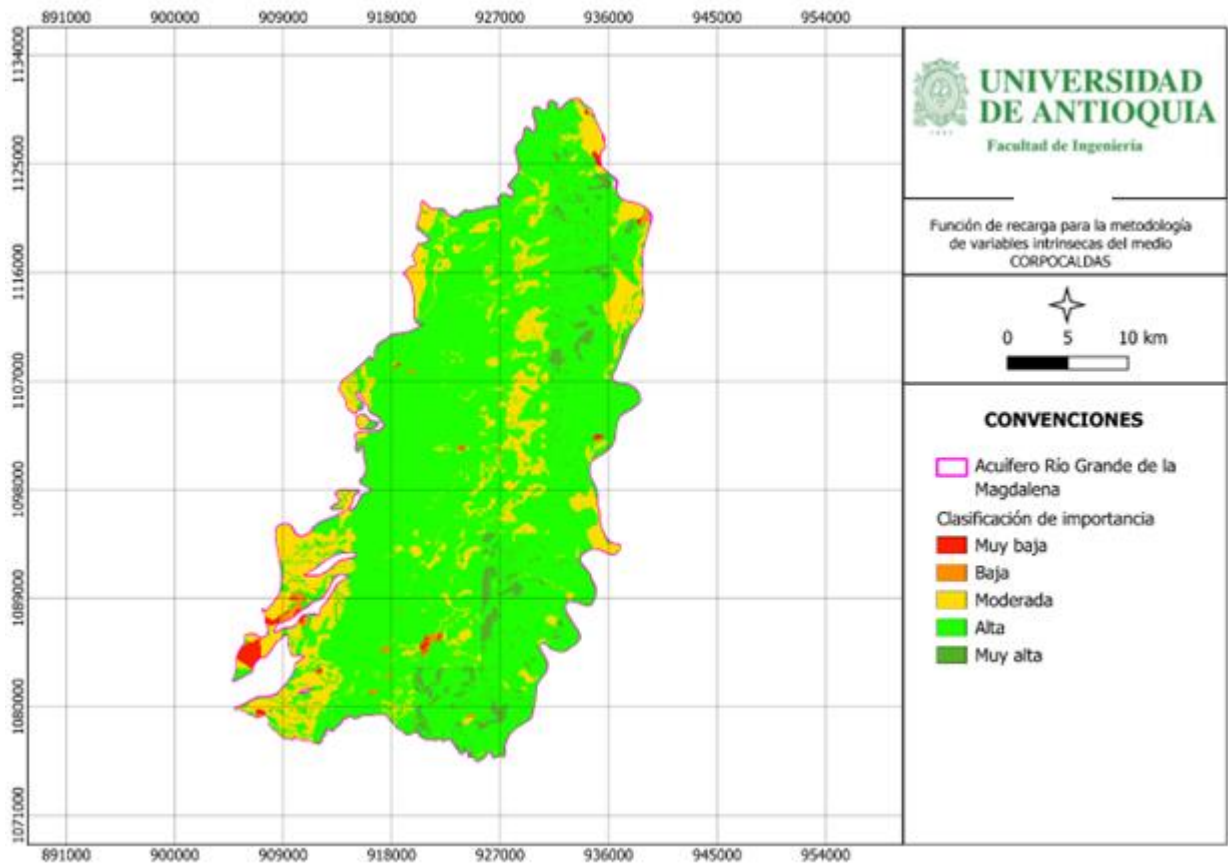


Figura 30. Función de recarga para la metodología de variables intrínsecas del medio aplicada por CORPOCALDAS

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se obtuvo la función para la metodología para delimitación de zonas de recarga de CORPOCALDAS que utilizó el nivel freático, difiriendo los resultados de manera significativa en comparación con las anteriores dos metodologías. En este caso, para el área que delimita el acuífero al momento de cruzar la variable hidrológica destaca la calificación baja, sobre todo en la zona media y oeste del acuífero, y se tiene un cambio drástico en el cual anteriormente se encontrada más de la mitad de la zona con calificación alta a tener pequeñas zonas repartidas sin embargo en su totalidad no son tan significativas como en la anterioridad. Adicionalmente, aumentó tanto las zonas de calificación muy baja como moderada (**Figura 31**).

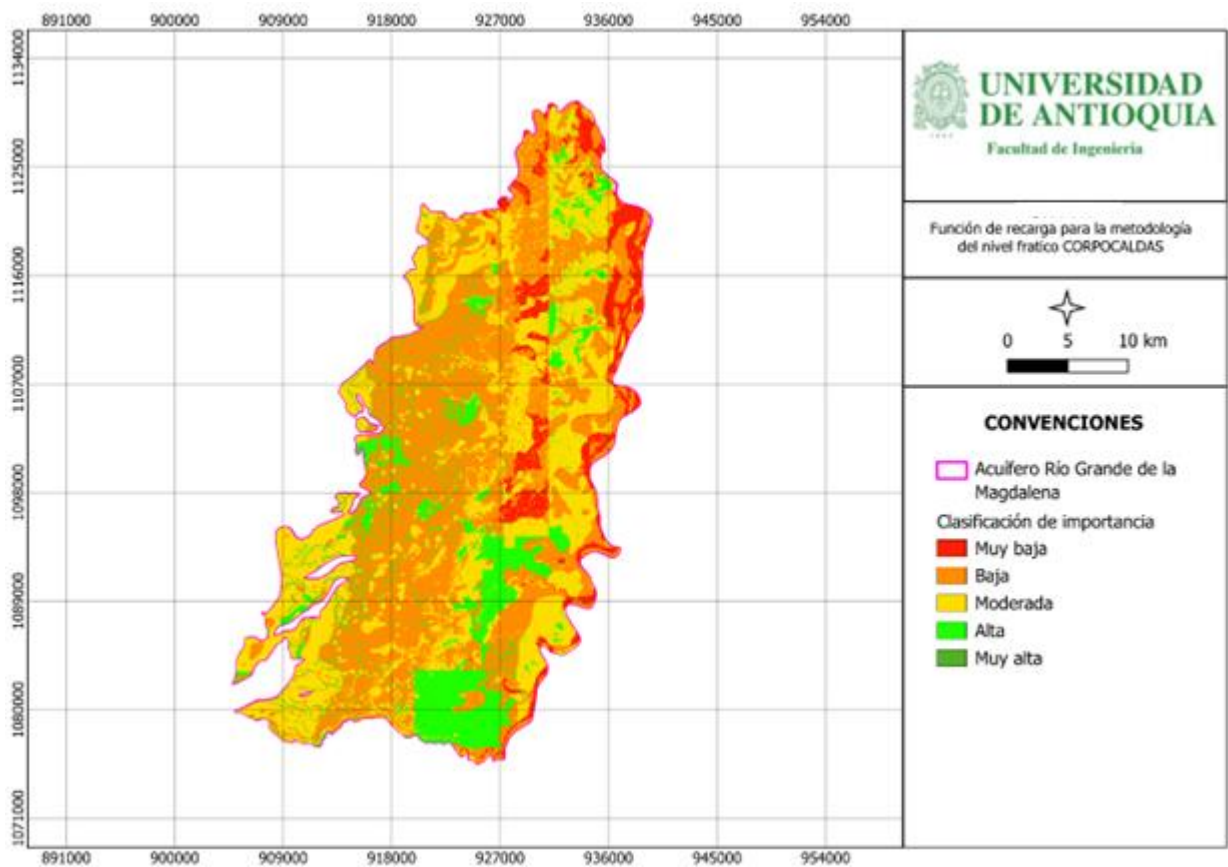


Figura 31. Función de recarga para la metodología del nivel freático aplicada por CORPOCALDAS

Fuente: Elaboración propia

5 Discusión

Al analizar la delimitación de zonas de recarga, primeramente, obtuvo el resultado con la metodología de la Universidad de Antioquia, la cual permite evaluar tanto los flujos regionales como la zona de recarga directa. Se observó calificaciones predominantemente altas, esto debido a las variables de mayor peso, como la topografía, donde se visualizó pendientes suaves, especialmente en la zona del acuífero, condiciones de infiltración, las cuales presentaban velocidades de infiltración altas en un gran porcentaje de la zona de estudio, y patrones texturales, en los cuales primaban las texturas franco arenosa, franca y franco arcillo arenosa, las cuales facilitan las condiciones de recarga. Se destaca, además, que la metodología fue la única que permitió visualizar la importancia de los flujos en el área externa del acuífero y esclarecer como estas zonas tienen potencial para alimentarlo. Adicionalmente, al examinar la zona exclusiva donde se encuentra el acuífero, resulta en una clasificación de porcentaje de recarga directa de mayor importancia, la cual es clasificada como una zona de importancia “Muy Alta”, debido a que representa la zona donde mayormente se alimenta el acuífero por medio de flujos verticales.

Posteriormente se consideró las dos metodologías aplicadas por CORPOCALDAS donde se observa que, independientemente de las diferencias en su ejecución, se representa en el área delimitada por el acuífero alta importancia de recarga, exceptuando las diferencias observadas en la zona norte y este del acuífero, donde se observa que la metodología que utilizó el nivel piezométrico muestra calificaciones de importancia de zonas de recarga más pobres, entre “Moderada” y “Baja”, sin embargo, una mayor parte se clasifica como zona de importancia “Alta”.

Retomando las tres metodologías evaluadas, y teniendo en cuenta que existen diferencias en las bases metodológicas de cada una de ellas, al momento de ser comparadas en una zona común, la cual es el área que corresponde al acuífero, coinciden mayoritariamente en la zona central, oeste y sur, resultando en una calificación común de importancia entre “Alta” y “Muy Alta” y, en contra parte, en la zona norte y este se encuentran discordancias ya que en las metodologías en las que se utilizó variables intrínsecas del medio se clasificó con importancia “Alta” y “Muy Alta” y la metodología que utilizó la tabla de agua se clasificó con importancia “Moderada” y “Baja”.

Continuando con la metodología planteada en el presente trabajo, al momento de llevar a cabo el intento de generar un procedimiento que represente una clasificación de la recarga a nivel nacional por medio del método de Turc se observaron distintas limitantes:

- La imposibilidad de generar una evaluación en las zonas desérticas del país, esto debido a una limitación al momento de aplicar la ecuación, la cual conlleva a que la recarga potencial se convierta en cero para toda la zona climática, lo cual no es coherente con resultados reales.
- La sobreestimación de la recarga potencial, sobre todo en las zonas caracterizadas por tener precipitaciones muy elevadas, esto debido a que es un método empírico que solo lleva a consideración variables como precipitación y temperatura, lo cual puede incurrir por falta de información a cálculos que se alejen de los valores reales en zonas climáticas extremas.

Las limitantes mencionadas pueden ser visualizadas al momento de aplicar la metodología de clasificación de magnitud de la recarga en la **Tabla 14**, donde se observa que en las zonas semihúmeda, húmeda y súper húmeda se parte de valores muy altos de recarga para la clasificación “Muy Baja” y que la media para las tres zonas climáticas es excesivamente alta.

Si se examina la metodología de forma local en el área de estudio, se observa que, a pesar de los altos resultados de porcentaje de precipitación que se convierte en recarga logrado a partir del modelo SWB, al momento de categorizar la importancia de la recarga según el procedimiento planteado se obtienen clasificaciones bajas, predominantemente en la zona oeste del área de interés, donde se encuentra la zona climática súper húmeda, en la cual se aprecia que se castigan valores de recarga altos con calificaciones bajas. Esto ocurre en menor medida al momento de evaluar la zona central del área de estudio, donde se encuentra la zona climática húmeda, hasta llegar a la zona semihúmeda ubicada en la parte este, donde se obtuvieron resultados más coherentes, sin embargo, se siguen presentando circunstancias difíciles de explicar.

A pesar de las limitaciones de la metodología se realizó la función de recarga con el fin de evaluar cómo alteraba la calificación de las zonas de recarga. Para el caso de la metodología de la Universidad de Antioquia, se observa una notable diferencia en las zonas por fuera del acuífero, en las cuales se cambió de clasificación “Alta” en su mayoría a una predominancia de la clasificación “Moderada”, además de un aumento considerable de la clasificación “Baja” y “Muy Baja”.

Sin embargo, al momento de evaluar la variable hidrológica por medio de la función de recarga en la zona del acuífero, en el caso de las metodologías que utilizaron variables intrínsecas del medio, como lo son la metodología de la Universidad de Antioquia y al desarrollada por CORPOCALDAS en el 2018, se sigue observando una predominancia en la clasificación “Alta”,

aunque si se obtuvo un leve aumento de la clasificación “Moderada”. A pesar de ellos, evaluando la metodología que utiliza el nivel piezométrico para delimitar zonas de recarga, si se obtuvieron cambios notorios, en el cual la mayoría del acuífero se clasifica con importancia “Baja” y “Moderada” y algunas zonas con clasificación “Alta”, esto debido principalmente a que esta metodología tuvo resultados menos favorables que las otras dos metodologías evaluadas, con mayores áreas con clasificación “Moderada” y “Baja” en comparativa con las demás.

Aun cuando o se llega a resultados definitivos, la exploración de opciones aquí propuesta representa un paso adelante en la definición de aportes a la discusión y construcción de una propuesta metodológica sólida y general que pueda llegar a aplicarse -con información adecuada- a diferentes escalas de análisis.

6 Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos de la delimitación de zonas de recarga utilizando diversas metodologías, se ha observado que en el área del Acuífero Río Grande de la Magdalena predominan zonas de recarga clasificadas como “Alta” y “Muy Alta”. De acuerdo con la normativa colombiana, estas áreas son consideradas claves para la sostenibilidad de los recursos hídricos subterráneos. Por lo tanto, es imperativo implementar acciones de protección ambiental y estrategias dentro de los planes de ordenamiento territorial, siendo crucial que los esfuerzos sean continuos y coordinados, con el fin de preservar este recurso y garantizar la disponibilidad de agua a largo plazo con una adecuada gestión de los recursos, también beneficiando el bienestar de las comunidades que dependen de él.

En relación con la metodología para clasificar el porcentaje de precipitación que se convierte en recarga, se sugiere continuar con los esfuerzos para establecer una metodología robusta y precisa para su evaluación. Es fundamental utilizar métodos de estimación de recarga que sean más exactos y representativos de la dinámica hidrológica específica de Colombia.

La metodología empleada en la presente investigación no produjo los resultados esperados, lo cual destaca la necesidad de desarrollar y perfeccionar técnicas de evaluación, lo cual es esencial para una gestión sostenible de los recursos hídricos en Colombia, procurando una mejor planificación y conservación de los recursos, asegurando su disponibilidad futura.

Referencias

- Ahmad, I., Dar, M. A., Andualem, T. G., & Teka, A. H. (2020). GIS-based multi-criteria evaluation of groundwater potential of the Beshilo River basin, Ethiopia. *Journal of African Earth Sciences, 164*. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103747>
- Al Saud, M. (2010). Mapping potential areas for groundwater storage in Wadi Aurnah Basin, western Arabian Peninsula, using remote sensing and geographic information system techniques. *Hydrogeology Journal, 18*(6), 1481–1495. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0598-9>
- Arévalo, L., & Rivera, C. (2013). Definición de zonas de recarga y descarga de agua subterránea a partir de indicadores superficiales: centro-sur de la Mesa Central, México. *Investigaciones Geográficas, 81*, 18–32. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46112013000200003&lng=es&tlng=es
- Aykut, T. (2021). Determination of groundwater potential zones using Geographical Information Systems (GIS) and Analytic Hierarchy Process (AHP) between Edirne-Kalkansogut (northwestern Turkey). *Groundwater for Sustainable Development, 12*. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100545>
- Bakker, M., Bartholomeus, R. P., & Ferré, T. P. A. (2013). Preface Groundwater recharge: Processes and quantification. *Hydrology and Earth System Sciences, 17*(7), 2653–2655. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2653-2013>
- Betancur, T. (2023). El potencial de las aguas subterráneas en Antioquia. *Universidad de Antioquia, 312 pp*. <https://hdl.handle.net/10495/37051>
- Betancur, T., & Palacio, P. (2007). Identificación de fuente y zonas de recarga a un sistema acuífero a partir de isótopos estables del agua : Caso de estudio Bajo Cauca Antioqueño. *Gestión y Ambiente, 10*(1), 167–182.
- Boufekane, A., Meddi, H., & Meddi, M. (2020). Delineation of groundwater recharge zones in the Mitidja plain, north Algeria, using multi-criteria analysis. *Journal of Hydroinformatics, 22*(6), 1468–1484. <https://doi.org/10.2166/HYDRO.2020.082>

- CORANTIOQUIA, & Universidad de Antioquia. (2021). *AUNAR ESFUERZOS PARA LA EXPLORACIÓN DEL POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO EN ZONAS DE BOSQUE SECO EN EL CAÑON DEL RÍO CAUCA EN LA JURISDICCIÓN DE CORANTIOQUIA. TOMO II.*
- CORPOCALDAS, & Universidad Tecnológica de Pereira. (2018). *Actualización del Plan de Manejo Ambiental del Acuífero del Río Grande de la Magdalena.*
- Dar, T., Rai, N., & Bhat, A. (2020). Delineation of potential groundwater recharge zones using analytical hierarchy process (AHP). *Geology, Ecology, and Landscapes*, 5(4), 292–307. <https://doi.org/10.1080/24749508.2020.1726562>
- Deeb, A. A., & Almasri, M. N. (2021). *Modeling of groundwater recharge in the eocene aquifer (Palestine) using the USGS Soil Water Balance (SWB) Software.* <https://hdl.handle.net/20.500.11888/16776>
- Diriba, D., Karuppannan, S., Takele, T., & Husein, M. (2024). Delineation of groundwater potential zonation using geoinformatics and AHP techniques with remote sensing data. *Heliyon*, 10(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25532>
- Dripps, W. R., & Bradbury, K. R. (2007). A simple daily soil-water balance model for estimating the spatial and temporal distribution of groundwater recharge in temperate humid areas. *Hydrogeology Journal*, 15(3), 433–444. <https://doi.org/10.1007/s10040-007-0160-6>
- Escobar, J., Betancur, T., García, E., Martínez, C., & Palacio, P. (2017). Análisis jerárquico ponderado aplicado a la identificación de recarga y flujos regionales en acuíferos. *Revista Politécnica*, 13(24), 37–48. <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1089>
- Figueredo, J. L. (2019). *Metodología para determinar zonas de recarga hídrica en municipios o comunidades con recursos financieros limitados.* <http://hdl.handle.net/10654/34946>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2021). *ZONIFICACIÓN CLIMÁTICA PARA LEVANTAMIENTO DE SUELOS.*
- Khan, M. Y. A., ElKashouty, M., Subyani, A. M., Tian, F., & Gusti, W. (2022). GIS and RS intelligence in delineating the groundwater potential zones in Arid Regions: a case study of southern Aseer, southwestern Saudi Arabia. *Applied Water Science*, 12(1). <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01535-w>
- Kumar, P., Sen Gupta, D., Rao, K., Biswas, A., & Ghosh, P. (2024). Delineation of groundwater potential zones and its extent of contamination from the hard rock aquifers in west-Bengal, India. *Environmental Research*, 249. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118332>

- Mansour, K., Omar, K., Ali, K., & Abdel Zaher, M. (2018). Geophysical characterization of the role of fault and fracture systems for recharging groundwater aquifers from surface water of Lake Nasser. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 7(1), 99–106. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2018.02.001>
- Matus, O., Faustino, J., & Jiménez, F. (2009). *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica Aplicación práctica en la subcuenca del río Jucuapa, Nicaragua*. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/8339>
- Nayak, D., Das, D. M., Raul, S. K., Sahoo, B. C., & Das, I. C. (2023). Delineation of Potential Groundwater Recharge Zones in the Middle Reach of Mahanadi River Basin using GIS-Based MCDM Technique. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 51(7), 1465–1478. <https://doi.org/10.1007/s12524-023-01708-x>
- Noori, A. R., & Singh, S. K. (2024). Delineation of optimal locations for artificial groundwater recharge utilizing MIF and GIS in a semi-arid area. *Environmental Earth Sciences*, 83(1). <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11338-8>
- Peñuela-Arévalo, L. A., & Carrillo-Rivera, J. J. (2013). Discharge areas as a useful tool for understanding recharge areas, study case: Mexico Catchment. *Environmental Earth Sciences*, 68(4), 999–1013. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1803-z>
- Sadeghi, A. R., & Hosseini, S. M. (2023). Assessment and delineation of potential groundwater recharge zones in areas prone to saltwater intrusion hazard: a case from Central Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10778-2>
- Samson, S., & Elangovan, K. (2015). Delineation of Groundwater Recharge Potential Zones in Namakkal District, Tamilnadu, India Using Remote Sensing and GIS. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 43(4), 769–778. <https://doi.org/10.1007/s12524-014-0442-0>
- Senanayake, I. P., Dissanayake, D. M. D. O. K., Mayadunna, B. B., & Weerasekera, W. L. (2016). An approach to delineate groundwater recharge potential sites in Ambalantota, Sri Lanka using GIS techniques. *Geoscience Frontiers*, 7(1), 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.03.002>
- Slimani, F. E., Zghibi, A., Elomri, A., Aloui, S., Naeem, K., Merzougui, A., Msaddek, M. H., & Chekirbene, A. (2024). Identification of groundwater potential recharge zones in a Tunisian

- anthropogenic coastal region: Insights from multi-criteria decision-making techniques. *Journal of African Earth Sciences*, 209. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.105108>
- Stanton, J. S., Rytter, D. W., & Peterson, S. M. (2013). Effects of linking a soil-water-balance model with a groundwater-flow model. *Groundwater*, 51(4), 613–622. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.01000.x>
- Tiwari, V., Kumar, A., & Mukherjee, M. (2024). GIS and AHP-based groundwater recharge potential zones in urban region: A study of Ajmer City, Rajasthan, India. *Urban Climate*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101840>
- Urrea, V., Ochoa, A., & Mesa, O. (2016). Validación de la base de datos de precipitación CHIRPS para Colombia a escala diaria, mensual y anual en el período 1981-2014. *Congreso Latinoamericano De Hidráulica Lima, Perú, 28 al 30 de Septiembre de 2016* . <http://www.ipcc.ch/>
- Xie, Y., Cook, P. G., Simmons, C. T., Partington, D., Crosbie, R., & Batelaan, O. (2018). Uncertainty of groundwater recharge estimated from a water and energy balance model. *Journal of Hydrology*, 561, 1081–1093. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.08.010>