

**PROSPECCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS USANDO MÉTODOS DE ANÁLISIS  
ESPACIAL EN COMUNIDADES INDÍGENAS DEL MUNICIPIO DE MANAURE,  
DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA, COLOMBIA**

**RICARDO FABIO OÑATE FRAGOZO**



**UNIVERSIDAD DE  
MANIZALES**

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA  
MANIZALES**

**2024**

**PROSPECCIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS USANDO MÉTODOS DE ANÁLISIS  
ESPACIAL EN COMUNIDADES INDÍGENAS DEL MUNICIPIO DE MANAURE,  
DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA, COLOMBIA**

**RICARDO FABIO OÑATE FRAGOZO**

Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar al título de Especialista en  
Sistemas de Información Geográfica

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

**MANIZALES**

**2024**

## TABLA DE CONTENIDO

1.	RESUMEN .....	9
2.	ABSTRACT .....	10
3.	INTRODUCCIÓN .....	11
4.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
5.	OBJETIVOS.....	14
5.1.	OBJETIVO GENERAL .....	14
5.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
6.	JUSTIFICACIÓN .....	15
7.	GENERALIDADES.....	16
7.1.	LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA .....	16
7.2.	EXTENSIÓN TERRITORIAL .....	17
7.3.	LIMITES.....	18
7.4.	HIDROGRAFÍA.....	18
7.5.	CLIMATOLOGÍA .....	18
7.6.	POBLACIÓN .....	19
7.7.	ECONOMÍA .....	19
7.8.	VÍAS DE ACCESO.....	20
8.	ANTECEDENTES .....	21
9.	MARCO TEÓRICO.....	26
9.1.	AGUA SUBTERRÁNEA .....	26
9.2.	RECARGA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS .....	26
9.3.	LA RECARGA: ESTIMACIÓN Y DIFERENCIACIÓN.....	28
9.4.	FACTORES QUE CONTROLAN EL ALMACENAMIENTO DE AGUA SUBTERRÁNEA 29	29
9.5.	MODELACIÓN DE LOS PROCESOS DE RECARGA.....	31
9.6.	BALANCE HÍDRICO .....	31
10.	MARCO GEOLÓGICO REGIONAL .....	35
11.	MARCO GEOLÓGICO LOCAL .....	46
11.1.	GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	54
11.2.	GEOMORFOLOGÍA .....	55
12.	REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL.....	59
13.	METODOLOGÍA.....	67
13.1.	FASE 1: Recopilación de información bibliográfica.....	68

13.2.	FASE 2: Selección de los factores de estudio.....	68
13.3.	FASE 3: Elaboración de la cartografía temática.....	69
13.4.	FASE 4: Análisis espacial e implementación de las herramientas SIG .....	69
13.5.	FASE 5: Determinación de las áreas con mayor potencial hidrogeológico.....	70
14.	ASIGNACIÓN DE VALORES A CADA FACTOR DE ESTUDIO PARA LA RECLASIFICACIÓN.....	71
14.1.	LITOLOGÍA (TIPO DE ROCA).....	72
14.2.	PRECIPITACIÓN.....	73
14.3.	PENDIENTE .....	74
14.4.	COBERTURA Y USO DEL SUELO (VEGETACIÓN).....	75
14.5.	DENSIDAD DE DRENAJE.....	77
15.	RECLASIFICACIÓN Y ASIGNACIÓN DE PESOS A CADA FACTOR DE ESTUDIO.....	78
16.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	81
17.	MAPA DE POTENCIAL UBICACIÓN DE ACUÍFEROS SUBTERRÁNEOS (POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO).....	94
18.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	96
19.	CONCLUSIONES .....	99
20.	RECOMENDACIONES.....	101
21.	BIBLIOGRAFÍA.....	102
22.	SOFTWARE UTILIZADO.....	105

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación del área de estudio..	16
Figura 2. Distribución de rancherías wayuu en el municipio de Manaure.....	17
Figura 3. Sistemas de flujo y zonas de recarga y descarga.....	27
Figura 4. Mecanismos de recarga en un área semiárida. ....	28
Figura 5. Factores que controlan el almacenamiento de agua.....	30
Figura 6. Modelo de recarga de agua subterránea basado en el concepto de balance hídrico..	32
Figura 7. Mapa geológico regional .....	36
Figura 8. Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca Guajira. ....	37
Figura 9. Mapa geológico de la zona de estudio.....	46
Figura 10. Estilo estructural de la cuenca Baja Guajira.....	55
Figura 11. Mapa geomorfológico de la zona de estudio.....	56
Figura 12. Flujo metodológico .....	67
Figura 13. Intercepción de la vegetación en la recarga de acuíferos .....	75
Figura 14. Herramienta de reclasificación de Arcgis.....	78
Figura 15. Herramienta Weighted Overlay de Arcgis.....	80
Figura 16. Mapa temático del factor litología .....	83
Figura 17. Mapa temático del factor precipitación.....	84
Figura 18. Mapa temático del factor pendiente.....	84
Figura 19. Mapa temático del factor cobertura y uso del suelo .....	85
Figura 20. Mapa temático del factor densidad de drenaje .....	85
Figura 21. Potencial hidrogeológico del factor litología .....	86
Figura 22. Potencial hidrogeológico del factor precipitación .....	88
Figura 23. Potencial hidrogeológico del factor pendiente.....	89
Figura 24. Potencial hidrogeológico del factor cobertura y uso del suelo.....	91
Figura 25. Potencial hidrogeológico del factor densidad de drenaje .....	92

Figura 26. Gráfico con porcentajes de cobertura del potencial hidrogeológico ..... 94

Figura 27. Mapa de potencial hidrogeológico ..... 95

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Corregimientos del municipio de Manaure .....	18
Tabla 2. Principales factores que influyen en el almacenamiento de agua subterránea .....	31
Tabla 3. Fuente de los datos espaciales .....	69
Tabla 4. Asignación de valores a los factores que condicionan la recarga y el almacenamiento de agua subterránea .....	71
Tabla 5. Valores de reclasificación para litología .....	73
Tabla 6. Valores de reclasificación para precipitación .....	74
Tabla 7. Valores de reclasificación para pendiente.....	75
Tabla 8. Valores de reclasificación para cobertura y uso del suelo (vegetación) .....	76
Tabla 9. Valores de reclasificación para densidad de drenaje .....	77
Tabla 10. Asignación de pesos a los factores de estudio .....	79
Tabla 11. Resumen de metodologías base sobre estudios hidrogeológicos utilizando análisis espacial a nivel nacional e internacional.....	82
Tabla 12. Porcentaje de área cubierta por cada clase del factor litología .....	86
Tabla 13. Porcentaje de área cubierta por cada clase del factor precipitación.....	87
Tabla 14. Porcentaje de área cubierta por cada clase del factor pendiente .....	89
Tabla 15. Porcentaje de área cubierta por cada clase del factor cobertura y uso del suelo .....	90
Tabla 16. Porcentaje de área cubierta por cada clase del factor densidad de drenaje .....	92
Tabla 17. Porcentaje de cobertura del potencial hidrogeológico.....	94

## LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Conglomerados de guijarros y cantos subredondeados de la Formación Monguí.	47
Fotografía 2. Depósitos de Cauce Aluvial. Río Ranchería .....	48
Fotografía 3. Depósitos Aluviales Recientes con presencia de depósitos eólicos de arena fina cuarzosa (Qale).....	49
Fotografía 4. Depósitos Costeros al NE del Manaure .....	50
Fotografía 5. Depósitos Costeros, arrecifes al NE de Manaure .....	51
Fotografía 6. Depósitos Eólicos (Qe).....	52
Fotografía 7. Depósitos Aluviales Recientes. ....	53
Fotografía 8. Depósitos Evaporíticos y Lagunares recientes (Qes). ....	53

## 1. RESUMEN

El presente trabajo de investigación presenta una metodología que utiliza análisis espacial para identificar y mapear zonas con potencial hidrogeológico en comunidades indígenas del municipio de Manaure, departamento de La Guajira. Mediante análisis espacial se evaluarán y procesarán de forma conjunta variables geográficas y geológicas clave como la litología, cobertura y uso del suelo (vegetación), precipitación, pendiente y densidad de drenaje que influyen en la presencia y calidad del agua subterránea. Se recopilarán datos geoespaciales y se utilizarán técnicas de procesamiento de análisis vectorial y ráster para obtener un mapa de zonas con potencial hidrogeológico de la zona de estudio.

El objetivo principal de esta investigación es proporcionar a las comunidades indígenas de La Guajira información precisa y actualizada sobre la ubicación de zonas con potencial hídrico subterráneo, lo cual permitirá a su vez la toma de decisiones en la gestión eficiente de los recursos hídricos.

Palabras clave: Prospección, agua subterránea, análisis espacial, hidrogeología, sistemas de información geográfica, mapa.

## 2. ABSTRACT

This research paper presents a methodology that uses spatial analysis to identify and map areas with hydrogeological potential in indigenous communities of La Guajira. Through spatial analysis, key geographic and geological variables such as lithology, vegetation, precipitation, slope, and drainage density that influence the presence and quality of groundwater will be jointly evaluated and processed. Geospatial data will be collected and vector and raster analysis processing techniques will be used to obtain a map of zones with hydrogeological potential of the study area.

The main objective of this research is to provide the indigenous communities of La Guajira with accurate and updated information on the location of areas with underground water potential, which will in turn allow decision-making in the efficient management of water resources.

Keywords: Prospecting, groundwater, spatial analysis, hydrogeology, geographic information systems, map.

### 3. INTRODUCCIÓN

La escasez de agua en Colombia es un factor socioeconómico importante para muchas comunidades que no cuentan con el abastecimiento de este preciado líquido. Lo anterior es una de las características comunes que se presentan en el sector norte de la región Caribe, lo que hace que las comunidades se vean obligadas a buscar nuevas maneras de abastecimiento para poder desarrollarse.

Durante varios años se ha buscado estudiar el comportamiento de las aguas subterráneas, para el aprovechamiento y consumo humano; esto como medida urgente ante la escasez que se sufre en diferentes regiones del país.

Es por lo anterior que este trabajo se presenta como un aporte para el conocimiento de las zonas con mayor potencial hidrogeológico basado en el análisis de 5 variables geográficas y geológicas clave que influyen en la recarga y almacenamiento de agua subterránea como lo son como la litología, cobertura y uso del suelo (vegetación), precipitación, pendiente y densidad de drenaje en la zona donde habitan comunidades indígenas del municipio de Manaure en el departamento de La Guajira.

En este contexto, el uso de métodos de análisis espacial para la prospección de aguas subterráneas se convierte en una herramienta importante para la identificación de zonas con potencial para la extracción de agua. Estos métodos se basan en la interpretación de datos geoespaciales, como imágenes satelitales, datos geológicos e hidrológicos, para identificar patrones y tendencias que puedan indicar la presencia de agua subterránea.

#### 4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua es un elemento de la naturaleza, integrante de los ecosistemas naturales, fundamental para el sostenimiento y la reproducción de la vida en el planeta ya que constituye un factor indispensable para el desarrollo de los procesos biológicos que la hacen posible. Sin embargo, en la actualidad, en diversos territorios de Colombia, especialmente en departamentos de la región Caribe como La Guajira, Bolívar, Córdoba, y otros, se presenta un problema de vital importancia, el cual consiste en la escasez del agua (Arévalo, Lozano, & Sabogal, 2010).

El departamento de La Guajira localizado en la zona norte de Colombia se caracteriza por ser una región semiárida, donde las condiciones climáticas son adversas y los recursos hídricos son limitados. Esta situación se agrava en las comunidades indígenas, que históricamente han sido marginadas y enfrentan serias dificultades para acceder al agua potable. Estas comunidades indígenas dependen en gran medida de las fuentes de agua subterránea para satisfacer sus necesidades diarias, como el consumo humano, la agricultura y la cría de animales. Sin embargo, la disponibilidad de agua subterránea es limitada y su acceso se ha vuelto cada vez más difícil debido a la disminución de los niveles de agua y la sobreexplotación de los acuíferos (Daza Daza, Serna Mendoza, & Carabalí Angola, 2018)

El gobierno de Colombia en el 2010 presentó el estudio Nacional del Agua -ENA- en el cual, en el capítulo correspondiente a oferta y uso del agua subterránea en Colombia se presentan las zonas hidrogeológicas homogéneas de Colombia, que son unidades con escalas entre 1:5.000 y 1:10.000.000, que indican la distribución y el estado del recurso hídrico subterráneo regional. El Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales de Colombia -IDEAM- (2014) indica que el área geográfica Caribe, comprendida por los departamentos del César, Bolívar, Sucre, Magdalena y La Guajira, es caracterizada por

índices de aridez entre moderados a altamente deficitarios. Por ende, gran parte de los centros urbanos y rurales utilizan el agua subterránea como fuente alterna de abastecimiento (IDEAM, 2010).

Las perforaciones para hacer pozos de agua subterránea se realizan de forma puntual. Primero se realiza una caracterización hidrogeológica, luego se eligen los sitios para hacer los estudios geoeléctricos y con estos resultados se perfora. Una vez elaborados los pozos, se han presentado casos en donde se encuentra el agua pero el volumen es insuficiente para surtir el acueducto, conllevando al abandono del pozo y la pérdida de la inversión. Para el proceso de identificación de zonas potenciales para el hallazgo de aguas subterráneas confluyen múltiples factores cuantitativos y cualitativos que precisan de un análisis simultáneo. El IDEAM, como entidad encargada de cuantificar los reservorios ha implementado los sistemas de información geográfica (SIG) para gestionar la información y facilitar la toma de decisiones (IDEAM, 2010).

De lo anterior, surge la siguiente pregunta de investigación:

¿Se pueden identificar áreas con potencial hidrogeológico en comunidades indígenas del municipio de Manaure, departamento de La Guajira por medio de análisis espacial?

## 5. OBJETIVOS

### 5.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar la prospección de aguas subterráneas usando métodos de análisis espacial en comunidades indígenas en el municipio de Manaure, departamento de La Guajira, Colombia.

### 5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar e Identificar las metodologías empleadas en la prospección de aguas subterráneas, con el fin de identificar los factores determinantes en la recarga y almacenamiento de las mismas.
  - Realizar la cartografía temática, reclasificación y asignación ponderada de pesos utilizando herramientas SIG para analizar la influencia de los factores en la recarga y almacenamiento de aguas subterráneas.
  - Generar un mapa donde se identifiquen las áreas con mayor potencial hidrogeológico en comunidades indígenas del municipio de Manaure, departamento de La Guajira.

## 6. JUSTIFICACIÓN

La creciente demanda de aguas subterráneas implica el uso de nuevas técnicas para estimar los acuíferos y disminuir el riesgo de la inversión de la extracción. También es necesario que sean ajustables a escenarios locales, para facilitar el seguimiento al uso del recurso y evitar la sobreexplotación (IDEAM, 2014)

La investigación hidrogeológica básica se realiza mediante la aplicación de técnicas convencionales a través de la toma de información directamente en campo por medio de equipos tecnológicos costosos con los cuales se obtienen parámetros que permiten determinar la posible relación con el agua subterránea de una zona. Sin embargo, la implementación de los sistemas de información geográfica (SIG) ofrecen ventajas frente a estos métodos convencionales (Quiroz, Escobar, Martínez, Betancur, & Massone, 2007).

Una de las principales ventajas es la capacidad de integrar diferentes tipos de datos geoespaciales en un mismo entorno de trabajo, lo que permite tener una visión más completa de la posible relación de un área de interés con el agua subterránea. Además, los SIG permiten realizar análisis espaciales avanzados y generar modelos tridimensionales para una mejor comprensión de la estructura geológica de la zona. También son menos costosos y permiten evaluar áreas más grandes (Quiroz, Escobar, Martínez, Betancur, & Massone, 2007).

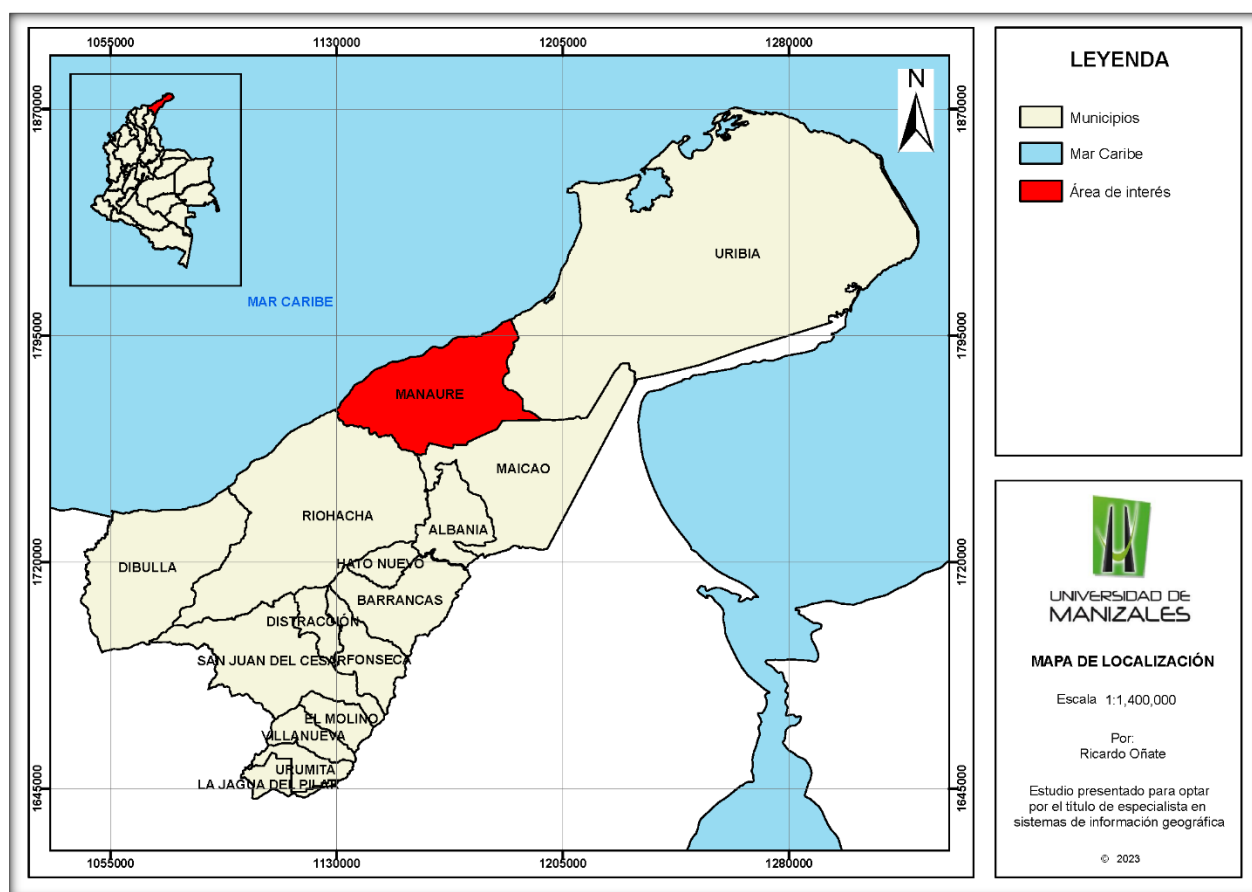
La aplicación de métodos de análisis espacial para la prospección de aguas subterráneas permitirá entonces el desarrollo de las actividades económicas en la región, el mejoramiento de la calidad de vida, la preservación de su cultura y tradiciones convirtiéndose en un insumo de utilidad que facilite la toma de decisiones para una gestión más eficiente y sostenible del recurso hídrico.

## 7. GENERALIDADES

### 7.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La zona de estudio se encuentra ubicada en el departamento de La Guajira, la cual está situada en el extremo norte del país, en un municipio llamado Manaure.

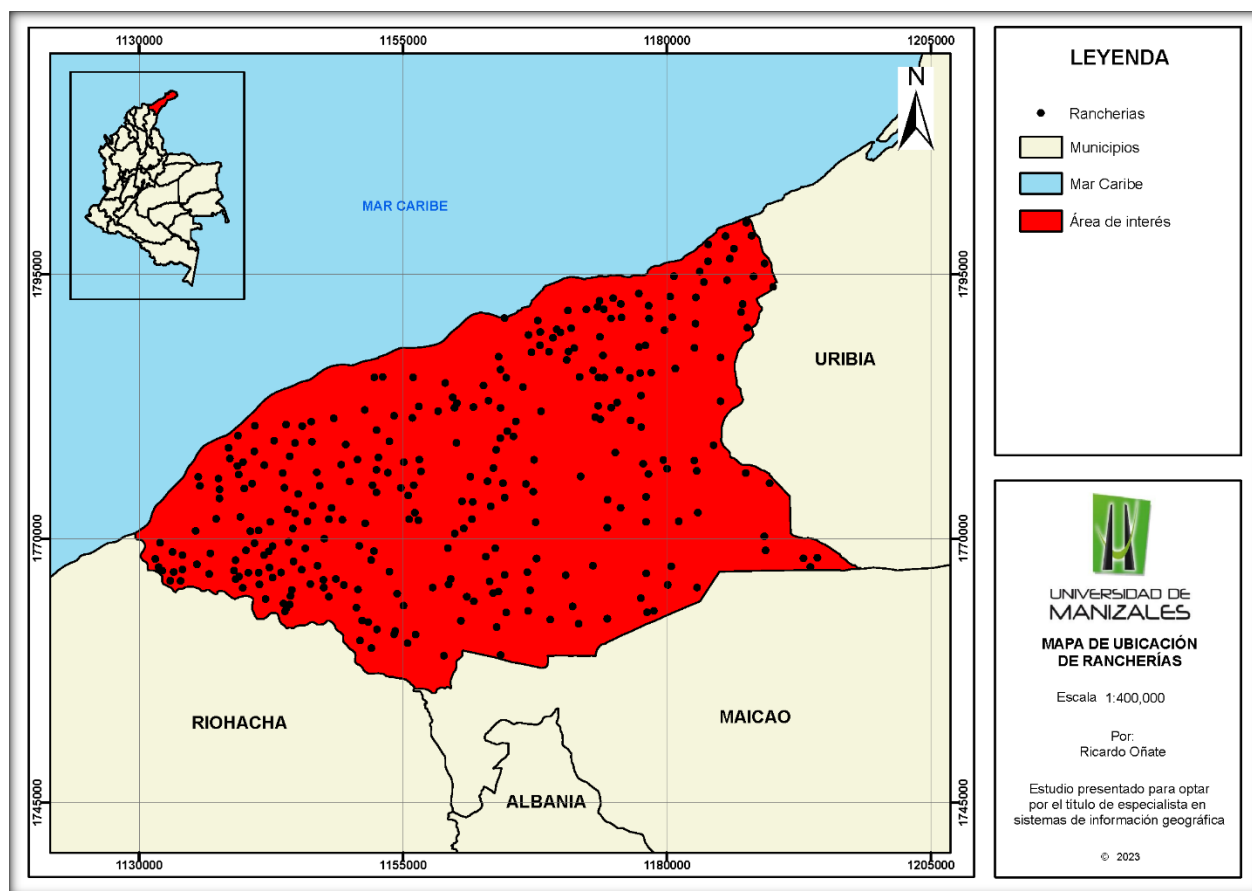
El municipio de Manaure se encuentra en la parte occidental del departamento de La Guajira en una subregión denominada Media Guajira (ver Figura 1).



**Figura 1:** Mapa de ubicación del área de estudio. Fuente: autor.

Este estudio está enfocado en comunidades indígenas del municipio de Manaure, estas comunidades se encuentran dispersas a través de todo el municipio, como se

muestra en la *Figura 2*, por lo tanto se hace extensiva el área de estudio a todo el municipio de Manaure.



**Figura 2:** Distribución de rancherías wayuu en el municipio de Manaure. Fuente: autor.

## 7.2. EXTENSIÓN TERRITORIAL

El municipio de Manaure tiene una extensión aproximada de 1643 kilómetros cuadrados dentro del departamento de la Guajira y es uno de los municipios donde se encuentra el Resguardo Indígena Wayúu de la Alta y Media Guajira, abarca parte de la región de la Media Guajira y lo conforman 9 corregimientos (ver *Tabla 1: Corregimientos del municipio de Manaure*. Fuente: *Plan de territorial de salud, Alcaldía Municipal de Manaure, 2016-2019*.) e innumerables rancherías indígenas (Sarmiento, 2012).

1. <u>Aremasahin</u>	6. <u>Musichi</u>
2. El Pájaro	7. <u>Shiruria</u>
3. Manzana	8. La Gloria
4. <u>Mayapo</u>	9. La Paz
5. San Antonio	

**Tabla 1:** Corregimientos del municipio de Manaure. Fuente: Plan de territorial de salud, Alcaldía Municipal de Manaure, 2016-2019.

### 7.3. LÍMITES

El Municipio de Manaure limita por el norte con el Mar Caribe, por el sur con los municipios de Riohacha y Maicao, por el oeste con el municipio de Riohacha y el Mar Caribe, por el este con los municipios de Uribia y Maicao (Sarmiento, 2012).

### 7.4. HIDROGRAFÍA

En cuanto a las corrientes superficiales, la corriente de agua más importante del departamento es el Río Ranchería, que nace en la Sierra Nevada de Santa Marta y desemboca en el mar Caribe; muchas de las corrientes son insuficientes y de cursos de agua esporádicos, con crecidas violentas y cortas. Las aguas superficiales se aprovechan a menudo por el sistema de jagüey, pero igualmente se ven afectados por las sequías prolongadas. Las reservas subterráneas, de difícil aprovechamiento y recarga, son además frecuentemente salobres (Mejía, 2022).

### 7.5. CLIMATOLOGÍA

El clima según el IDEAM, especialmente en la península, es árido, seco, de alta radiación solar y alto porcentaje de evaporación, altas temperaturas (máximas absolutas oscilando entre 36 y 40° mientras que las mínimas muestran una variación de 17 a 21° C). Así mismo, por encontrarse en la zona tropical dicho clima se somete a las condiciones

generadas por la oscilación de la Zona de Convergencia Tropical (ZCIT). El mapa de la velocidad media del viento en superficie, extraído del Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia, evidencia que la medición promedio de vientos durante todo el año en la península de la Guajira oscila entre 5 y 11 m/s; en el resto del país durante los meses de abril, octubre y diciembre los vientos se debilitan, pero en los demás meses se alcanza intensidades de hasta 4 m/s, en el litoral central de Bolívar y Atlántico, límites entre Boyacá y Cundinamarca, Piedemonte Llanero de Meta y Casanare (Mejía, 2022).

## **7.6. POBLACIÓN**

En el año 2.015 el municipio de Manaure lo conforman un total de 103.961 habitantes, el 49,2% (51.222) de la población son hombres y el 50,8% (52.739) son Mujeres. La relación hombre: mujer se ha mantenido estable entre el año 2005 y 2013, por cada 100 mujeres hay 97 hombres.). El 56,8 % de la población habita en el área rural y en el área urbana el 43,2 %. La Tasa Bruta de Natalidad: Según el DANE para el año 2.013, el municipio de Manaure presento una tasa bruta de natalidad de 6,53. Presentando un comportamiento con una tendencia ligeramente decreciente de este indicador si lo comparamos con el año 2005 donde fue de 7,78. La Tasa Bruta de Mortalidad: La tasa bruta de mortalidad para el año 2.013 fue de 0,70, presentando un comportamiento con una tendencia lineal de este indicador al compararlo con el año 2.005 donde fue de 0,74. Al comparar la tasa de natalidad y mortalidad del municipio de Manaure, Según las estimaciones del DANE se evidencia para la natalidad una tendencia al descenso, la mortalidad del municipio por su parte, muestra un comportamiento sostenido para los años evaluados (Mejía, 2022).

## **7.7. ECONOMÍA**

Las principales actividades económicas del municipio son la explotación mineral artesanal de sal marina y el comercio. Las zonas de explotación de sal marina se

encuentran a muy poca distancia de las zonas residenciales, el barrio principalmente afectado se conoce como Manaure Abajo. La contaminación auditiva que producen los camiones transportadores de sal es notoria, además de los problemas que podrían presentarse por exceso de sodio al asimilar la sal por las vías respiratorias. En el mercado público se comercia con pescado, mariscos y carne de chivo (Mejía, 2022).

## **7.8. VÍAS DE ACCESO**

El acceso principal al área de trabajo se realiza a través de la Troncal del Caribe que une Santa Marta con Riohacha y Maicao. Otra vía de importancia es la carretera privada Albania - Uribia, paralela a vía férrea que conduce el carbón desde la mina de El Cerrejón a Bahía Portete, la cual constituye acceso a las localidades de la Media y Alta Guajira. Otras vías en regular a mal estado son las que comunican a Maicao con la zona de la Serranía del Perijá al sur del área de estudio, especialmente a las localidades de Majayura, Carraipía y Tigre Pozo y las vías Valledupar - La Paz - Manaure; Manaure – Uribia; La Paz - Cuestecitas, y Cuestecitas - Monguí (vía a Riohacha).

En las áreas planas se presenta una red intrincada de carreteables que comunican entre sí y con las vías principales a una innumerable cantidad de rancherías ampliamente distribuidas en esta zona, pertenecientes a la etnia Wayúu (Mejía, 2022).

## 8. ANTECEDENTES

La evaluación, planificación y gestión de los recursos de aguas subterráneas se están volviendo cruciales y extremadamente urgentes en los últimos tiempos. Para hacer una evaluación de la disponibilidad de agua subterránea, se requiere delimitar las zonas con potencial de agua subterránea, es aquí donde los sensores remotos, los Sistemas de Información Geográfica y el Análisis Multi-Criterio juegan un papel fundamental.

Dentro de los trabajos relacionados con prospección de aguas subterráneas donde se han utilizado métodos de análisis espacial se destacan trabajos como:

“Propuesta metodológica para la prospección de acuíferos subterráneos usando métodos de análisis espacial en el departamento del Cesar, Colombia”. Esta es una tesis en donde el autor presenta una metodología que utiliza análisis espacial para la prospección de acuíferos subterráneos.

El autor indica que “En Colombia, la identificación de recursos hidrológicos subterráneos se realiza de forma directa a través de sondeos geoelectrónicos. Estos estudios tienen un alto costo y no siempre garantizan un resultado de caudales suficientes para el abastecimiento de acueductos” (Rincón Rivera, 2018).

El área de estudio es el departamento del Cesar, ubicado en la región más árida de Colombia, en donde tienen una alta demanda de las aguas subterráneas por desabastecimiento de aguas superficiales. La metodología propuesta está basada en análisis y métodos propuestos por autores que estudiaron áreas con condiciones climáticas similares a la región seleccionada. Esta propuesta implementa análisis geoespaciales con factores de la superficie de los terrenos analizados para identificar áreas con potencial hidrogeológico (Rincón Rivera, 2018).

Para el estudio se procesaron de forma conjunta los factores de litología, precipitación, cobertura, pendiente y densidad de drenaje. Se convirtieron características del orden cualitativo en cuantitativo al asignarles valores ponderados para poder distribuirlos en intervalos de clase. Esta distribución se dio en función de la facilidad de infiltración y almacenamiento de agua.

Se determinó un alto potencial de agua subterránea para las zonas donde se presentó un efecto combinado de suelos permeables, presencia de precipitaciones, cobertura pobre y pendientes suaves.

Con todo lo mencionado hasta el momento es preciso resaltar que, los problemas de decisión espacial típicamente involucran un gran conjunto de alternativas viables y múltiples criterios de evaluación.

Además, la validez y veracidad de los datos son un tema de suma importancia para garantizar la funcionalidad de los sistemas de información geográfica, es por esto que la recolección de información debe abarcar la mayor cantidad de datos que permitan obtener un conocimiento general sobre el área en la cual se realiza el estudio.

Los Sistemas de Información Geográfica y las técnicas de análisis espacial en la prospección de aguas subterráneas son ampliamente utilizados a nivel mundial.

Otro estudio fue el realizado en un municipio costero de Ghana llamado Komenda-Edina-Eguafo-Abrem, el cual lleva como título “Geospatial techniques for groundwater potential zones delineation in a coastal municipality, Ghana” en donde, con el fin de brindar una solución práctica a los desafíos relacionados con el agua que enfrenta el área de estudio se realizó un mapeo de las zonas con potencial de aguas subterráneas utilizando técnicas geoespaciales a partir de la implementación de técnicas de teledetección y los sistemas de información geográfica y se demostró que, los resultados obtenidos con la ejecución de estos estudios son

significativos para la formulación de políticas, la planificación sostenible y la gestión de los recursos hídricos.

En este estudio se seleccionaron 8 factores que influyen en la recarga y almacenamiento de aguas subterráneas, los cuales son: Geología, Densidad del lineamiento, Pendiente, Índice topográfico de humedad, Densidad de drenaje, Uso de la tierra/Cobertura terrestre (LULC), Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y Tipo de suelo (Yaw Danso & Ma, 2023).

A estos 8 factores se les asignaron pesos utilizando un proceso de jerarquía analítica y se superpusieron en un entorno de sistemas de información geográfica para generar un mapa donde se delimitan las zonas con mayor potencial de aguas subterráneas. El mapa resultante se clasificó en cinco zonas: Muy mala, Mala, Buena, Muy buena y Excelente.

La distribución espacial de las zonas potenciales de agua subterránea se determinó utilizando un enfoque de superposición ponderada en un entorno GIS. Allí se analizaron 8 factores para logra obtener un mapa con el potencial hidrogeológico del área de estudio.

Las zonas potenciales de agua subterránea encontradas se agruparon en 5 categorías: muy pobre, pobre, buena, muy buena y excelente.

Los resultados demostraron que, en general, una gran proporción (casi el 36%) del área de estudio se encontraba dentro de zonas de aguas subterráneas pobres. Sin embargo, otras áreas (27%) fueron identificadas como muy buenas ubicaciones para la prospección de aguas subterráneas. El uso de perforaciones funcionales como proxy para la validación, confirmó que el 76,5% de las perforaciones se encontraban dentro de sitios adecuados para el descubrimiento de aguas subterráneas. Estos resultados son significativos para la formulación de políticas, la planificación sostenible y la gestión de los recursos hídricos del territorio.

Otro estudio de ámbito internacional fue el realizado en el distrito de Theni, Tamil Nadu en la India, el cual lleva como título “Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques”.

Este estudio se basa en el delineamiento de zonas potenciales de aguas subterráneas utilizando sensores remotos y técnicas SIG, para esto se tomaron cartas topográficas de la zona e imágenes satelitales IRS-1C para generar capas temáticas de: litología, pendiente, uso del suelo, lineamiento, drenaje y precipitaciones. Se transformaron los datos en ráster utilizando una herramienta de conversión de entidades a ráster en Arcgis.

A los mapas ráster de estos factores se les asignó una puntuación fija y un peso, calculados a partir de la técnica de factores de influencia múltiple (MIF). Cada capa temática ponderada se calcula estadísticamente para obtener las zonas potenciales de aguas subterráneas (Soundranayagam, Chandrasekar, & Magesh, 2012).

Otro estudio de gran importancia fue el realizado en Turquía, más específicamente en el delta del río Kızılırmak, considerado el río más largo del país y una reserva natural permanente, el cual tiene como título “Delineation of a Groundwater Potential Zone Map for the Kızılırmak Delta by Using Remote-Sensing-Based Geospatial and Analytical Hierarchy Processes”

Este estudio se enfoca en la localización de zonas de recarga de aguas subterráneas mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG) y el método de jerarquía analítica (AHP). Se analizaron diversos factores geoambientales, como densidad de drenaje, lineamientos, precipitación, pendiente, textura del suelo, uso/cobertura del suelo, nivel de agua subterránea y geología, mediante la técnica AHP. Cada factor fue ponderado según su influencia en el potencial hídrico. La superposición ponderada en un entorno SIG permitió la creación de un mapa de zonas potenciales de aguas subterráneas (GPZ), dividiendo el área en cuatro categorías de potencial: pobre, moderado, alto y muy alto. Según los resultados, el 38%

de la cuenca muestra un potencial muy alto, el 19% alto, el 39% moderado y el 4% pobre (Beden, Soydan-Oksal, Arıman, & Ahmadzai, 2023). Estas conclusiones ofrecen información valiosa para la conservación y gestión de los recursos de agua subterránea, identificando áreas con alto potencial hídrico.

Po último, cabe mencionar el estudio que se realizó en el distrito de Malakand, provincia de Khyber Pakhtunkhwa en Pakistán para determinar la calidad del agua subterránea, evaluación de riesgos para la salud y distribución de fuentes de contaminación por metales pesados alrededor de las minas de cromita aplicando métodos SIG, el cual lleva por título “Groundwater Quality, Health Risk Assessment, and Source Distribution of Heavy Metals Contamination around Chromite Mines: Application of GIS, Sustainable Groundwater Management, Geostatistics, PCAMLR, and PMF Receptor Model”.

Para este trabajo se recolectaron muestras de agua de distintas áreas, incluyendo la región minera, no minera y de las minas de cromita, y se analizaron para evaluar las concentraciones de metales pesados (HM) y variables fisicoquímicas. Para interpolar la variabilidad geográfica, los SIG suelen utilizar cuatro técnicas: ponderación de distancia inversa (IDW), kriging, spline y vecindad más cercana. La técnica de kriging es la más importante. Los mapas de calidad del agua subterránea se identifican mediante kriging para categorizar las áreas vulnerables y determinar la información faltante que representa las zonas vulnerables en el acuífero de agua subterránea. Para fortalecer el alcance de esta investigación se utilizan técnicas de interpolación espacial y estadística multivariada (Rashid, y otros, 2023).

El análisis de riesgo demostró que los niños son más vulnerables a la toxicidad de los HM que los adultos. Se identificaron fuentes de contaminación geogénicas y antropogénicas, sugiriendo la necesidad de medidas correctivas y planes de gestión sostenible para mitigar los riesgos para la salud y garantizar la seguridad del suministro de agua subterránea.

## 9. MARCO TEÓRICO

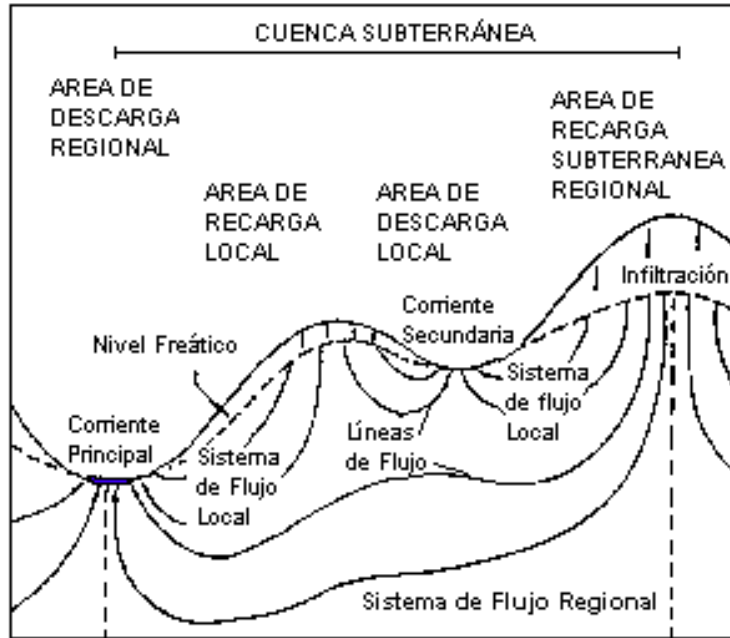
### 9.1. AGUA SUBTERRÁNEA

El agua subterránea es agua sub-superficial que ocupa vacíos presentes en formaciones geológicas. La cantidad de agua subterránea almacenada en las formaciones geológicas y la facilidad con la cual puede extraerse depende de 2 factores físicos: la porosidad y la permeabilidad. El agua subterránea es ampliamente utilizada en regiones áridas y en islas, debido a la escasez de fuentes superficiales, pero debido al alto costo de los sistemas de abastecimiento de agua superficial, en los países de clima húmedo se ha comenzado a implementar también este recurso (Velez Otálvaro & Vásquez Ariza, 2007). El potencial de aguas subterráneas en una cuenca se puede establecer a través de la investigación de la lluvia y la escorrentía, y de los factores hidrológicos que controlan su ocurrencia (Elewa & Qaddah, 2011).

### 9.2. RECARGA DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

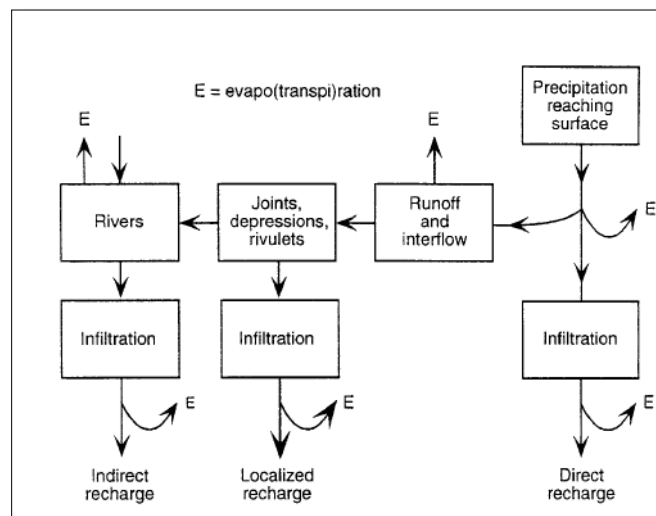
La recarga se puede definir como la entrada de agua dentro de la zona saturada donde comienza a hacer parte de las reservas subterráneas, esta entrada puede darse de dos maneras, por un movimiento descendente del agua debido a las fuerzas de gravedad y luego de presentarse un movimiento horizontal del flujo debido a las diferentes condiciones hidráulicas de las capas que constituyen el perfil del suelo (Elewa & Qaddah, 2011).

En la *Figura 3* se muestra el sistema de recarga de un acuífero. Se discriminan los flujos subterráneos y las áreas de recarga y descarga de agua.



**Figura 3:** Sistemas de flujo y zonas de recarga y descarga. Fuente: Tomado de Knutsson (1988) y propuesta inicialmente por Tóth (1962) y Gustafsson (1968).

En la *Figura 4* se muestra un diagrama de flujo elaborado por (De Vries & Simmers, 2002) que resaltan los mecanismos de recarga de los acuíferos subterráneos en las zonas semiáridas. Hoy esta condición climática predomina en la zona de estudio del presente trabajo.



**Figura 4:** *Mecanismos de recarga en un área semiárida. Fuente: Lerner (1997) citado en De Vries y Simmers (2002).*

Este diagrama destaca a la precipitación como el principal ingreso de agua al acuífero y muestra que en todas las etapas se tienen pérdidas por evapotranspiración. El agua puede infiltrarse directamente o convertirse en escorrentía que ingresa al acuífero al percolarse por las juntas, depresiones o canales (drenajes secundarios) o los ríos (drenajes primarios).

### **9.3. LA RECARGA: ESTIMACIÓN Y DIFERENCIACIÓN**

En la mayor parte de las investigaciones hidrogeológicas suele ser necesario estimar la recarga, es decir la cantidad de agua (generalmente de lluvia) que entra un acuífero. Este es un paso previo al establecimiento del balance hidrológico (entradas y salidas) del mismo (He & Wang, 2008). La recarga de un acuífero se suele expresar como el volumen medio anual de agua que entra en el acuífero o bien en forma de porcentaje respecto a la precipitación, también llamada tasa de recarga o infiltración eficaz (Andreo, y otros, 2004)

Según (De Vries & Simmers, 2002) la interacción del clima, la geomorfología, el suelo y la vegetación condicionan la recarga. En las zonas semiáridas o secas la recarga depende más de las condiciones cercanas a la superficie que en las regiones más húmedas. La percolación en áreas húmedas es controlada principalmente por el exceso de precipitación (precipitaciones menos la evapotranspiración potencial), la capacidad de infiltración del suelo, el almacenamiento y la capacidad de transporte en el nivel freático (De Vries & Simmers, 2002).

En las zonas semiáridas, sin embargo, la evapotranspiración potencial en promedio supera las precipitaciones. La recarga de acuíferos depende de eventos de lluvia de alta

concentración, acumulación del agua en los drenajes superficiales y la capacidad de percolarse rápido para escapar de la evapotranspiración (De Vries & Simmers, 2002).

La recarga normalmente se ve obstaculizada por suelos aluviales gruesos, que realizan un almacenamiento de alta retención durante la temporada de lluvias. La vegetación también afecta la recarga, porque extrae del suelo el agua en la próxima estación seca (De Vries & Simmers, 2002).

#### **9.4. FACTORES QUE CONTROLAN EL ALMACENAMIENTO DE AGUA SUBTERRÁNEA**

(Al Saud, 2010) y (Elewa & Qaddah, 2011) resaltan los factores que controlan el almacenamiento de agua subterránea (*ver Figura 5*), y resaltan que varían según el espacio y el tiempo. Esta variación se describe a continuación:

- a) La disponibilidad de precipitaciones como fuente de agua
- b) El tipo de roca porque la litología determina la capacidad de infiltración y el régimen de almacenamiento.
- c) El sistema de fallas estructurales porque mejoran la permeabilidad
- d) La pendiente que controla la energía del flujo de agua
- e) Las características del drenaje porque indica el esquema de infiltración
- f) La cobertura y uso del suelo que determinan el comportamiento del flujo vertical y horizontal de agua en la superficie del terreno.



**Figura 5:** Factores que controlan el almacenamiento de agua. Fuente: Al Saud (2010); Elewa y Qaddah (2011).

(Al Saud, 2010) asigna la importancia a cada uno de los factores en función de la influencia en el almacenamiento de agua subterránea. Para determinar esta influencia Al Saud realizó una revisión cronológica de diferentes estudios cuyo objetivo era la determinación de sitios potenciales para hallar aguas subterráneas. En base a la efectividad de los resultados la *Tabla 2* resume los factores que controlan el almacenamiento de aguas subterráneas y su función.

FACTOR DE INFLUENCIA	ELEMENTO DE INFLUENCIA	IMPORTANCIA
Precipitación	Tasa de precipitación	Agua como fuente, recarga directa
Litología	Tipo de roca	Permeabilidad, almacenamiento
Fractura de las rocas	Sistema de fallamiento	Aumento de permeabilidad
Pendiente	Energía del flujo de agua	Afectación flujo de acumulación

Drenaje	Densidad	Permeabilidad y flujo de acumulación
Cobertura y uso del suelo	Impermeabilidad	Interferencia en la recarga

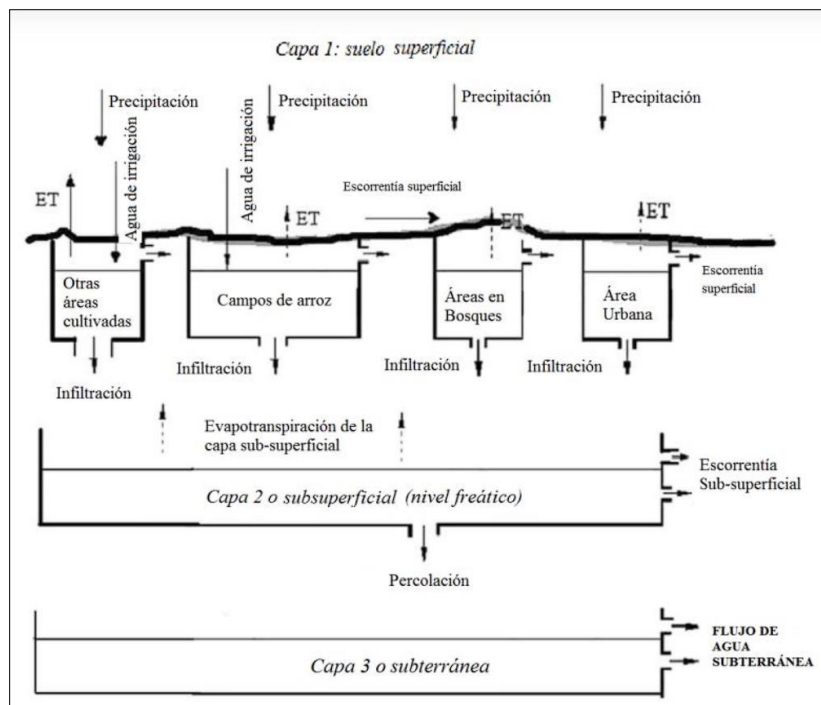
**Tabla 2:** Principales factores que influyen en el almacenamiento de agua subterránea. Fuente: Al Saud, 2010.

## 9.5. MODELACIÓN DE LOS PROCESOS DE RECARGA

Según (Avinash, Deepika, & Jayappa, 2013) en primera instancia se identifican los sectores con potencial para almacenar agua subterránea a partir de la identificación, hoy análisis y asignación de pesos de los factores que favorecen la percolación del agua. Posteriormente se determina la recarga que entra en el acuífero, por último se realiza la determinación cuantitativa de las entradas y salidas del sistema acuífero (Avinash, Deepika, & Jayappa, 2013). Para contabilizar estas entradas y salidas es preciso el modelamiento de los mecanismos y procesos de ingreso y pérdida del agua desde la superficie hasta el subsuelo o recarga. Destacan los métodos del Balance Hídrico, el DRASTIC y el APLIS, los cuales se describen a continuación.

## 9.6. BALANCE HÍDRICO

El balance hídrico calcula el equilibrio de los recursos hídricos a partir de la estimación de las cantidades que ingresan y salen del sistema por lo que puede ser positivo o negativo (IDEAM, 2014). (He & Wang, 2008) definen a partir del concepto de balance hídrico un modelo de recarga que se puede ver en la *Figura 6*.



**Figura 6:** Modelo de recarga de agua subterránea basado en el concepto de balance hídrico. Fuente: Raneesh y Thampi, 2013.

En este modelo se realiza el acople de los parámetros atmosféricos e hidrogeológicos a los diferentes usos del agua (uso agropecuario, forestal y urbano) y consiste en 3 capas: una superficial (uso del suelo), otra sub-superficial (nivel freático) y la última es la capa en donde circula el agua subterránea.

## DRASTIC

El DRASTIC es un modelo empírico para determinar la vulnerabilidad de acuíferos, desarrollado por Aller, Bennett, Lehr & Petty en 1987, para la Environmental Protection Agency, EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos). Es un método que se basa en la asignación de índices que van de 1 (mínima vulnerabilidad) a 10 (máxima vulnerabilidad), de acuerdo con las características y el comportamiento de las variables consideradas en el acrónimo DRASTIC: D: Depth. Profundidad del agua subterránea; R:

Recharge. Recarga neta; A: Acuífero. Litología del acuífero; S: Soil. Tipo del suelo; T: Topography. Topografía; I: Impact. Naturaleza de la zona no saturada; C: Hydraulic conductivity. Conductividad hidráulica del acuífero (Raneesh & Thampi, 2013).

En este método se obtienen solo valores puntuales; por ende, es necesario el uso de métodos de interpolación, por lo que usan SIG (Sanz, 2014).

## **APLIS**

(Choudhury, K, & Chowdary, 2010) proponen una metodología para delinear zonas de recarga, utilizando teledetección, un sistema de información geográfica (SIG) y la toma de decisiones multicriterio (MCDM). Las capas temáticas usadas por estos autores fueron: geomorfología, geología, densidad de drenaje, la pendiente y la transmisividad del acuífero. A cada capa les asignaron los pesos adecuados en función de su contribución relativa en la zona a la recarga a las aguas subterráneas. La normalización de los pesos se calculó usando el Proceso Analítico Jerárquico de Thomas L. Saaty (Saaty's analytic hierarchy process -AHP).

Este mismo método fue usado por (Ribeiro, Rocha, & Garcia, 2011) quienes plantearon que el AHP, corresponde un método flexible y eficiente de toma de decisiones. El AHP ayuda al establecimiento de las preferencias y a su elección cuando los aspectos cuantitativos y cualitativos deben pesarse. (Andreo, y otros, 2004) usaron el método APLIS mediante la expresión:

$$R = (A + P + 3.L 2.I + S)/0.9 \quad (1)$$

Esta ecuación la implementan para determinar la tasa media de recarga anual en acuíferos (R) esta se expresa como porcentaje de la precipitación, a partir de la altitud (A), pendiente (P), litología (L), áreas de absorción-infiltración preferencial (I) y tipo de suelo (S).

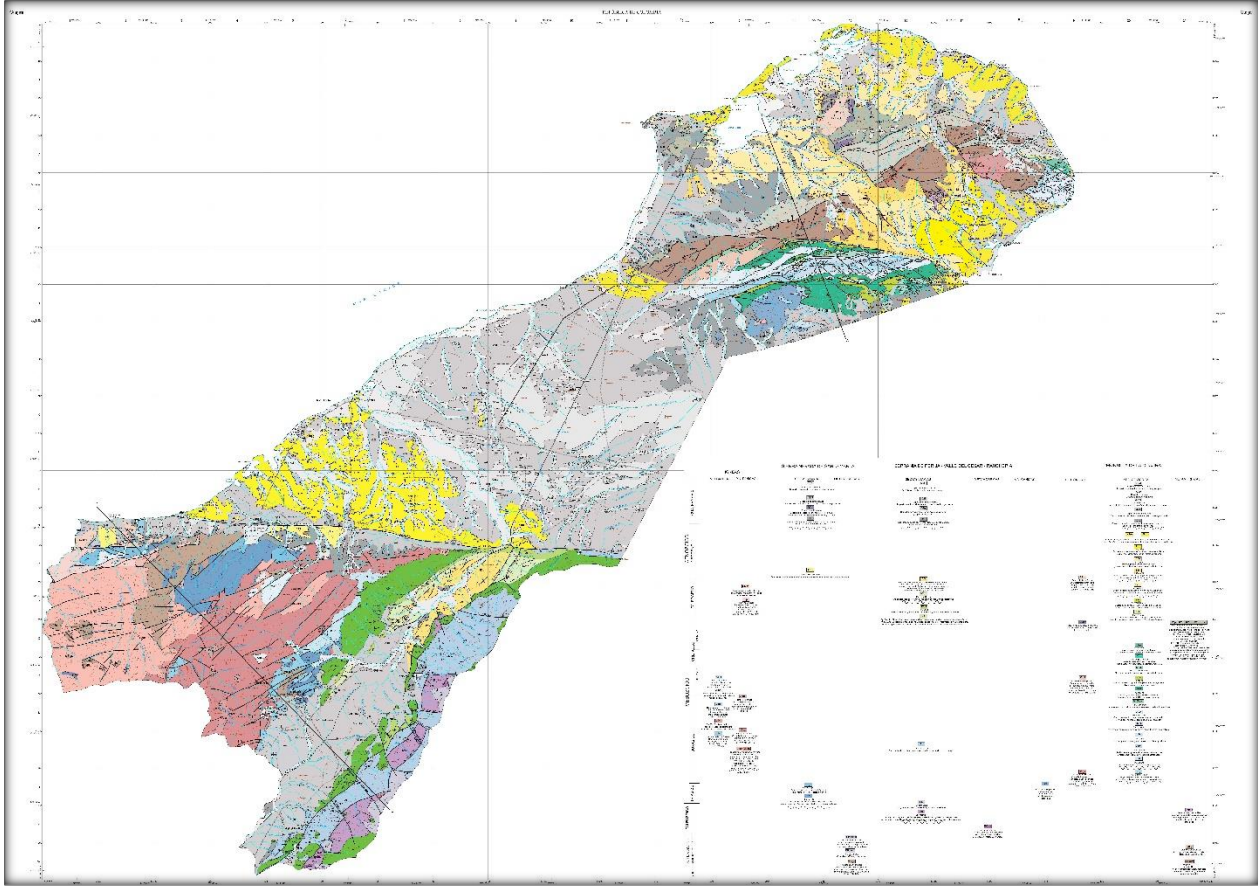
De cada variable, (Andreo, y otros, 2004) establecieron categorías o intervalos, a cada uno de los cuales se les asignó un valor entre 1 (mínima influencia en la recarga) y 10 (máxima influencia) y se almacenaron en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Los métodos de Balance Hídrico, DRASTIC y APLIS refinan la obtención del resultado llegando a calcular un valor para la recarga, es decir, buscan predecir la cantidad de agua que entra al complejo subterráneo. La aplicación de uno de estos modelos se considera un paso subsecuente a los objetivos de este trabajo de investigación que es la determinación de áreas a partir de factores idóneos que favorezcan la recarga y el almacenamiento de aguas subterráneas.

## 10. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL

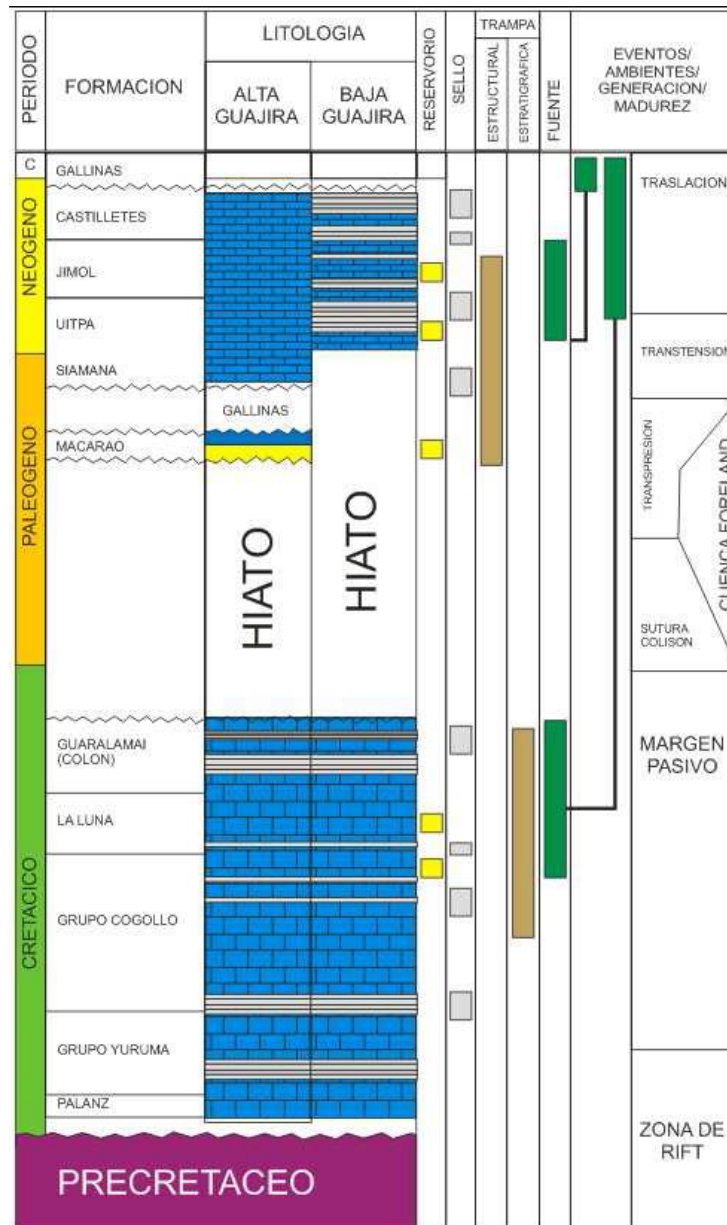
En la Cuenca de la Guajira se reportan rocas sedimentarias e ígneo-metamórficas del basamento las cuales se consideran de edad Precámbrica – Paleozoica (*ver Figura 7*), sin existir evidencia fósil ni datación que soporte esta idea. En superficie han sido reportadas y estudiadas en las serranías de Jarara, Macuira y Cocinas, variando en composición en cada localidad. La sucesión estratigráfica reconocida es incompleta y su registro va desde el Triásico al Cuaternario (*ver Figura 8*).

En general las condiciones y ambientes de depositación de las unidades geológicas Mesozoicas y Cenozoicos son muy similares, en su mayoría marinas someras a continentales en facies proximales. La geometría de la cuenca se ve afectada principalmente en el Cenozoico debido a fenómenos orogénicos que permitieron el levantamiento de las serranías de Cocinas, Jarara y Macuira. La Orogenia Andina y el desplazamiento dextral y vertical de las fallas de Oca y Cuiza hacia el Mioceno, explican que unidades Cretácicas y del basamento se pongan en contacto con rocas del Mioceno Superior (Servicio Geológico Colombiano, 2016).



**Figura 7:** Mapa geológico regional. Tomado de: *Modelo Hidrogeológico del departamento de La Guajira*, Servicio Geológico Colombiano, 2016.

Se describe a continuación la estratigrafía regional de la cuenca de la Guajira:



**Figura 8:** Columna estratigráfica generalizada de la Cuenca Guajira (Rubio y Ramírez, 2000).

### Basamento indiferenciado

Al noroeste de la Serranía de Jarara se presenta intercalaciones de pizarras, filitas, lutitas silíceas y micáceas de colores gris oscuro a negro, también se presentan algunas calizas cristalinas sin contenido fosilífero que se disponen discordantemente sobre rocas metamórficas.

Intrusivos graníticos han sido reportados en la Serranía de Macuira, compuestos por ortoclasas ligeramente coloreados y en contacto con el complejo metamórfico; en la Serranía de Jarara el cuerpo ígneo observado corresponde a una diorita hornbléndica cristalina que intruye esquistos micáceos y pizarras de color gris; y en la Serranía de Cocinas y el Cerro Julanal, se observa un granito de ortoclasa de color rosado, que también se presenta intruyendo el complejo metamórfico (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

### **Formación La Quinta**

Definida originalmente Kündig (1938) en Rollins (1960) como una Formación de edad Triásica Superior (Carniano- Raethiano), la cual está constituida por capas rojas de conglomerados arcósicos masivos, oscuros, areniscas rojizas e intercalaciones de arcillolitas, lutitas y areniscas delgadas. En menor proporción se observan intercalaciones de calizas grises con areniscas y lutitas. Las calizas contienen restos de bivalvos. Las areniscas están compuestas por granos de cuarzo grueso a fino y feldespato principalmente al tope de la sucesión, presenta estratificación cruzada y están intercaladas con limolitas. Por otra parte, se presentan intercalaciones de lutitas y arcillolitas en casi toda la unidad a excepción de la parte inferior (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

### **Formación Cojoro (Fm. Uitpana)**

De acuerdo a Rollins (1960) se trata de una Formación de edad Triásica Superior a Jurásica Inferior que consiste de areniscas cuarzosas de grano muy grueso a fino, limpias, de color gris a blanco, con estratificación masiva a cruzada, bien cementada, e intercalaciones con niveles de areniscas conglomeráticas cuarzosas de cantos subangulares a subredondeados. A la base de la unidad se observan niveles calcáreos, algunos conglomeráticos de cantos subangulares de color gris oscuro y algunas calizas cristalinas (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

### **Formación Cheterlo**

Rollins (1960) la define como una Formación de edad Jurásica Inferior (Hettangiano-Toarciario), la cual consiste de cuarzoarenitas de color gris a gris verdoso, grano muy fino a fino, con capas cuyos espesores varían entre 10 cm y 30 cm hacia la parte superior (30%-40 areniscas), e intercalaciones con lutitas limosas y limolitas arcillosas micáceas y ligeramente carbonáceas; hacia la parte inferior arcillolitas verdes a rojas oscuras, intercaladas con areniscas en menor proporción (20%) (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

### **Formación Caju**

Rollins (1960) señala que la Formación Caju tiene una edad que oscila entre Jurásico Medio a Jurásico Superior. Se trata de una Formación constituida por lutitas grises que alteran a un color oliva opaco, micáceas y limosas que presentan concreciones hacia la parte inferior de la sucesión con amonitas pobremente preservadas, intercalaciones con limolitas y delgadas capas de areniscas y calizas. Las areniscas son de composición cuarcítica de grano fino y capas muy delgadas que se presentan principalmente en la parte superior de la unidad. Hacia la parte inferior de la Formación se observan delgadas capas de calcarenitas y algunas calizas dolomíticas altamente fracturadas y hacia la parte superior se presenta contenido de fósiles ostreoides (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

### **Formación Pachepa (Fm. Chinapa)**

Descrita por Rollins (1960) como una Formación de Jurásico Medio (pre-Kimmeridgiano), la cual está compuesta por areniscas arcólicas de grano grueso a medio, localmente grano fino en la parte inferior de la sección, con presencia de micas y matriz arcillosa. Las capas son de espesores superiores a 10 cm. Presenta intercalaciones de capas de conglomerados con cantos de granito subangulares a subredondeados, así como rocas metamórficas y bloques retrabajados. Hacia la parte inferior de la sucesión las areniscas se

presentan intercaladas con delgadas capas de lutitas limosas y calizas dolomíticas de colores café amarillento (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

### **Formación Jipi (Incluye El Shale de Cuiza)**

En su descripción Rollins (1960) hace referencia a esta Formación como de edad Jurásico Superior (Kimmeridgiano a Portlandiano), la cual consiste de delgadas capas de lutita micáceas, limosas, de colores gris oscuro a negro, localmente carbonosas, intercaladas con areniscas calcáreas de capas delgadas hacia la parte inferior y media y limolitas hacia la parte superior. También se presentan capas de dolomitas, calizas arenosas y biohermos bien desarrollados en la parte superior de la unidad. Las dolomitas por lo general están presentes en los niveles de lutita y se observan fracturadas y recementadas. La riqueza bioestratigráfica de micro y macro fauna asociada a esta Formación, y colectada por autores como Bürgl, Renz y Rollins y estudiada por G.H. Fraunfelter y J.A. Frangerstrom (Rollins, 1960) permite el reconocimiento de un ambiente depositacional marino somero (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

### **Formación Río Negro (Fm. Palanz – Fm. Ipapure)**

Se trata de una Formación de edad Berriasiano a Valanginiano (Rollins, 1960), la cual presenta hacia la base niveles de cuarzoarenitas de grano grueso y hacia la parte superior areniscas cuarzosas localmente arcósicas, areniscas conglomeráticas y conglomerados arcósicos de color café rojizo. Igualmente, presenta Intercaladas algunas capas delgadas de pinchan contra el basamento y cambia lateralmente a calizas arrecifales que corresponden al Miembro Cuiza y las areniscas y conglomerados superiores parecen cambiar lateralmente a calizas no cristalinas. Los depósitos arrecifales parecen interdigitarse con calcarenitas, arcillolitas calcáreas y lutitas calcáreas. Ambientalmente es variable según los depósitos estudiados en varias localidades, pero se asume como una unidad depositada en ambientes

continentales a marinos someros, con cambios de facies que muestran el desarrollo de varios sub-ambientes (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

### **Formación Yuruma (Grupo Yuruma)**

Se trata de una unidad de edad Valanginiano-Barremiano (Renz, 1956), compuesta por calizas masivas en gran proporción y lutitas calcáreas, margas y areniscas calcáreas. A la base de la unidad se presentan calizas intercaladas con lutita calcárea tipo marga, calizas margosas y calizas masivas en la parte media de la sucesión, constituyendo lo que se ha denominado Yuruma Inferior o Formación Moina. Estas calizas son densas, masivas y resistentes de color gris y negro, con niveles fosilíferos. El nivel superior o Formación Yuruma superior está caracterizado a la base por una sucesión de lutitas grises a negras en capas delgadas intercaladas con margas y hacia el tope calizas masivas de color gris oscuro, textura fina, muy resistentes, y fosilíferas con abundantes restos de conchas finas. Localmente presenta niveles de cuarzoarenitas de granos gruesos. Hacia la parte más superior en el contacto con la unidad suprayacente se encuentra abundante fauna exogyras y ostreoideos. El ambiente de depósito para esta unidad es considerado como marino somero con variaciones laterales y verticales que permiten el reconocimiento de varios sub-ambientes (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

### **Grupo Cogollo**

El Grupo Cogollo fue definido originalmente como Aptiano – Cenomaniano por Garner (1926) en Rollins (1960). Presenta una unidad informal Cogollo Inferior que consiste de lutitas limosas en capas muy delgadas, calcáreas y fosilíferas que expelen un ligero olor a petróleo, intercaladas con calizas limosas de color negro a café oscuro, con estratificación plana, en capas que varían de 12 cm a 30 cm de espesor presentando laminaciones hacia la parte superior de la sucesión. Estas presentan finas laminaciones de limolitas y son altamente fosilíferas. La Unidad informal Cogollo Superior (Formación Maraca) está compuesto por calizas

masivas de color gris a gris azulado, textura microcristalina a cristalina muy gruesa, fosilíferas, intercaladas con lutita calcárea. Abundante fauna colectada e identificada por varios autores (Sutton, 1948; Renz, 1956; Rollins 1960) permiten determinar con buena precisión la edad para esta unidad (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

### **Formación La Luna**

De acuerdo a Garner (1926) en Rollins (1960) se trata de una Formación de edad Cenomaniano-Turoniano que contiene en la base cherts negros finamente estratificados e intercalados con delgadas capas de calizas de color negro, con abundante contenido de foraminíferos, presencia de nódulos intraestratificados, alto a moderado contenido de pirita y aceite. El ambiente de depositación sugerido por Rollins es probablemente en una cuenca restringida, con poca circulación de fluidos y condiciones reductoras (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

### **Formación Colón (Fm. Guaralamai)**

Liddle (1928) en Rollins (1960) la define como un conjunto de calizas cristalinas de edad Campaniano, las cuales presentan color negro, y en ocasiones se presentan arcillosas, limosas y arenosas, dispuestas en capas delgadas y con fuerte olor a aceite, intercaladas con lutitas calcáreas negras de láminas delgadas que conforman el 40% de la unidad. La Formación Colón está constituida en otras cuencas en su mayor parte por lutitas, y es correlacionada con las facies Santa Rosa (Cuenca de Maracaibo) en su mayor parte calcárea. El ambiente de depósito sugerido corresponde a condiciones clásticas marinas superficiales (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

### **Formación Macarao**

De acuerdo a Rollins (1960), se trata de una Formación de edad Eoceno Superior que consiste de areniscas glauconíticas de color verde-café, de grano fino, en capas delgadas, estratificación en artesa, intercaladas con arcillolitas de color gris claro, con contenido de selenio, ligeramente carbonáceas y calizas masivas fosilíferas hacia la parte superior de la sucesión. El ambiente de depositación para esta unidad es marino somero en condiciones de bahía abierta, en el cual las calizas se depositan en sub-ambientes arrecifales de bancos de conchas, y las areniscas y arcillolitas en sub-ambientes tipo “lagoon” conformados por barreras arrecifales detrás de la línea de costa (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

### **Formación Siamana (Fm. Sillamana)**

Según Rollins (1960) se trata de una unidad Oligoceno Superior a Mioceno Inferior, la cual se encuentra compuesta por lutitas y arcillas limosas de color gris a café oscuro, presentan contenidos de selenio y dentro de sus laminas se observan algunos lentes de areniscas de grano fino, intercalados con areniscas calcáreas de color canela a café, grano fino, fosilíferas y localmente arcillosas; se presentan dispuestas en capas delgadas. En menor proporción se encuentran capas de calizas arenosas o arcillosas fosilíferas. Esta unidad se depositó en un ambiente marino profundo en condiciones neríticas (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

### **Formación Uitpa**

Se trata de un conjunto de calizas margosas, calizas arrecifales y calizas arenosas de colores grises de abundante contenido fosilífero, intercaladas en menor proporción con arcillolitas ligeramente grises. En esta unidad litológica prevalece el contenido de calizas. Fue depositada en un ambiente marino somero dentro de una cuenca estrecha, con aguas cálidas persistentes que permitieron el crecimiento de los corales y el hábitat de moluscos en el fondo. Para Rollins (1960) esta unidad es de edad Oligoceno, en tanto Renz (1960) de acuerdo a

observaciones e interpretación de fauna colectada en el área la ubica en el Mioceno Inferior. Rubio y Ramírez (2000) con interpretación bioestratigráfica de pozos de la Alta Guajira la consideran de edad Mioceno Inferior. Corresponde a la zona cronoestratigráfica I M en el sentido de estos últimos autores (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

### **Formación Jimol (Fm. Guararies)**

Rollins (1960) describe esta unidad como de edad Miocena, la cual consiste principalmente de calizas arenosas masivas, resistentes y muy fosilíferas con abundantes escombros de conchas y algas, intercaladas con areniscas calcáreas de color blanco a gris, grano medio a grueso, cuarzosas, de buena selección; éstas se encuentran principalmente a la base de la unidad. En menor proporción se presentan arcillolitas limosas de color gris claro intercaladas con calizas que se encuentran a la base de la unidad. El intervalo superior es más calcáreo. Dentro de las capas se observan cantos de cuarzo finos atrapados entre las capas y concentrados hacia la base, que dan idea de un incremento en el régimen de flujo. Corresponde a la zona cronoestratigráfica II M (Mioceno Inferior-Medio) de Rubio y Ramírez (2000) (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

### **Formación Castilletes**

De acuerdo con Rollins (1960) se trata de un conjunto de rocas de edad Mioceno Medio a Plioceno Inferior, constituidas por calizas margosas de color gris, textura gruesa y fosilíferas, predominantes hacia la base de la sucesión y arcillolitas limosas de color gris a gris verdoso, algunas rojizas moteadas, intercaladas con delgadas capas de areniscas y que predominan en la parte superior de la sucesión estratigráfica. La Formación Castilletes corresponde a las zonas cronoestratigráficas III M y IV M de Rubio y Ramírez (2000) (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

### **Formación Monguí**

Mosquera et al., (1976) definen la Formación Monguí para agrupar los sedimentos Paleógenos y Neógenos que afloran hacia el sur de la troncal del Caribe, al sur del departamento de La Guajira, tomando su nombre del corregimiento de Monguí en el municipio de Riohacha donde se presentan buenos afloramientos. La Formación está constituida por arcillolitas arenosas de color pardo a amarillo verdoso de grano medio a grueso y por conglomerados semiconsolidados de color amarillo con cantos subredondeados irregulares de 0.5 a 5 cm de diámetro de rocas ígneas en una matriz areno arcillosa (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

### **Formación Gallinas**

Rollins (1960) se refiere a esta Formación como un conjunto de rocas de edad Plioceno superior a Pleistoceno, constituidas por arcillolitas intercaladas con areniscas hacia la base de la sucesión y arcillolitas rojas, grises y ocre, suaves y plásticas, intercaladas con areniscas de mala selección y conglomerados arenosos hacia el tope de la sucesión. El espesor de los finos es mucho mayor. Esta unidad corresponde a la zona cronoestratigráfica V M de Rubio y Ramírez (2000) (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

### **Depósitos Cuaternarios**

Para el intervalo Pleistoceno – Holoceno se han asociado depósitos de arcillolitas arenosas intercaladas con bancos de areniscas de grano medio a grueso y conglomerados con cantos de origen ígneo, encerrados en una matriz areno-arcillosa. Sobre estas secuencias se encuentran de manera intermitente ocurrencias de depósitos de cauce aluvial, llanura aluvial y dunas que se extienden sobre toda la zona de estudio (Servicio Geológico Colombiano, 2016).

### 11. MARCO GEOLÓGICO LOCAL

Las rocas que afloran en el área de estudio corresponden a unidades compuestas por rocas sedimentarias, estas se encuentran dentro de una gran llanura aluvial en la subregión denominada Media Guajira. Allí se encuentran unidades con edades del periodo terciario como la Formación Monguí (N1m) y cuaternario como los depósitos de cauce aluvial (Qca), Depósitos Aluviales Recientes con presencia de depósitos eólicos de arena fina cuarzosa (Qale), depósitos costeros (Qc), depósitos de dunas de arena (Qe), depósitos aluviales recientes (Qal) y depósitos evaporíticos y lagunares recientes (Qes) ver *Figura 9*, las cuales se van a definir a continuación de la más antigua a la más reciente (INGEOMINAS, 2009).

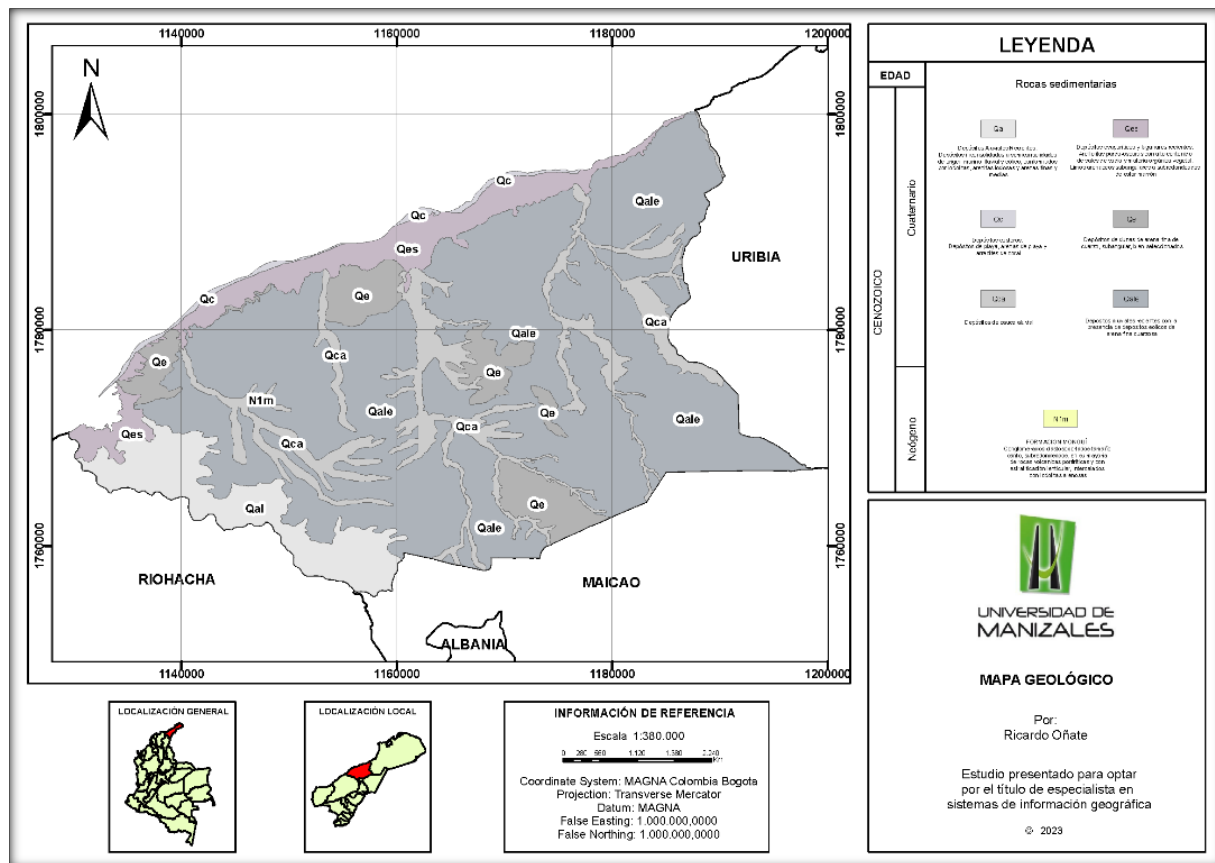


Figura 9: Mapa geológico de la zona de estudio. Fuente: autor.

## ▪ Terciario

### Formación Monguí (N1m)

Litológicamente, la unidad es bastante heterogénea en los afloramientos observados, sus capas presentan una disposición horizontal a subhorizontal y no superan los 25 metros de altura. El ambiente de formación de esta unidad es de una secuencia estratigráfica regresiva, dominada por depósitos terrígenos de ríos trenzados y, hacia la base, depósitos marinos someros de plataforma (Mosquera, Arango, Carreño, & Aguilera, 1976)



**Fotografía 1:** Conglomerados de guijarros y cantos subredondeados de la Formación Monguí. Imagen tomada de: Memoria explicativa de la cartografía geológica de las planchas 7 - Ranchería, 8 – Riohacha, 9 – Uribia, 13 – Dibulla, 14 – Albania y 15 – 15 bis Maicao, 2009.

## CUATERNARIO

### Depósitos de cauce aluvial (Qca)

Según Rodríguez & Londoño (2002 en ALMA MATER – INGEOMINAS, 2009), los depósitos encontrados están formados por sedimentos de zonas de inundación de corrientes

aluviales y se asocian a los cauces del Río Ranchería fundamentalmente y algunas quebradas que diseñan cuencas de importancia local.

En otras localidades dentro de la zona de estudio, se observa que estos depósitos se encuentran conformados principalmente por arcillas y arenas poco consolidadas, de color pardo amarillento con tamaño de grano arena fina cuyos granos son subredondeados de composición predominantemente silícea y presencia de fragmentos líticos de color negro sin diferenciar como se aprecian en la *Fotografía 2*.



**Fotografía 2:** *Depósitos de Cauce Aluvial. Río Ranchería. Se observa la morfología plana, compuesta por arenas y arcillas inconsolidadas de color pardo amarillento. Imagen tomada de: Memoria explicativa de la cartografía geológica de las planchas 7 - Ranchería, 8 - Riohacha, 9 - Uribia, 13 - Dibulla, 14 - Albania y 15 - 15 bis Maicao, 2009.*

### **Depósitos Aluviales Recientes con presencia de depósitos eólicos de arena fina cuarzosa (Qale)**

Los Depósitos Aluviales Recientes con presencia de depósitos eólicos, inconsolidados, se encuentran compuestos de manera general por arenas de grano fino y arcillas inconsolidadas de color pardo amarillento, compuestas predominantemente por cristales de

cuarzo, plagioclasa y minerales máficos sin diferenciar, cubierto por una serie de clastos sueltos de composición silíceo como cuarzo lechoso y chert de colores pardo, pardo rojizo y negro con formas subredondeadas, tamaño de grano máximo  $\geq 4\text{cm}$ , promedio de  $2\text{cm}$  y mínimo de  $3\text{mm}$ , acompañada por la formación incipiente de montículos de baja altura, compuestos por arenas cuarzosas, inconsolidadas con tamaño de grano arena fina de color amarillo claro relacionada con depósitos eólicos (dunas) (INGEOMINAS-UNAL, 2009).



**Fotografía 3:** Depósitos Aluviales Recientes con presencia de depósitos eólicos de arena fina cuarzosa (Qale). Detalle de la morfología plana a levemente colinada que describe esta unidad, la cual se caracteriza por exhibir un color amarillo claro a amarillo. Imagen tomada de: Memoria explicativa de la cartografía geológica de las planchas 7 - Ranchería, 8 – Riohacha, 9 – Uribia, 13 – Dibulla, 14 – Albania y 15 – 15 bis Maicao, 2009.

### **Depósitos costeros (Qc)**

Corresponde con grandes extensiones de arenas inconsolidadas de grano fino a grueso, blancas a amarillo claro. Es muy frecuente encontrar también fragmentos bioclásticos retrabajados de conchas, corales, algas, esponjas, peces, equinodermos, etc. Composicionalmente son sublíticas y muy frecuentemente tienen también porcentajes importantes de material calcáreo. Se encuentran muy bien seleccionadas y sus granos son

redondeados. Esta unidad se extiende generalmente en las bahías y son franjas angostas y alargadas restringidas a la zona entre el mar y el continente (*Fotografía 4*) (INGEOMINAS, 2009).



**Fotografía 4:** Depósitos Costeros al NE del Manaure. Playas de arena sobre la línea de costa. Imagen tomada de: Memoria explicativa de la cartografía geológica de las planchas 7 - Ranchería, 8 – Riohacha, 9 – Uribia, 13 – Dibulla, 14 – Albania y 15 – 15 bis Maicao, 2009.

Otra de las litologías que hace parte de los Depósitos Costeros, es aquella descrita por ALMA MATER – INGEOMINAS (2009) como Arrecifes, los cuales se encuentran comúnmente remplazando las playas de arena. Son cuerpos de gran extensión de arrecifes de coral (*Fotografía 5*), que comúnmente ocurren en los cabos separando grandes extensiones de playas de arena. Son cuerpos calcáreos amarillos macizos boundstone, que son arrecifes coralinos ahora expuestos y que están siendo erosionados fuertemente en la línea de costa (INGEOMINAS, 2009).



**Fotografía 5:** Depósitos Costeros, arrecifes al NE de Manaure. Arrecifes de coral en la línea de costa. Imagen tomada de: Memoria explicativa de la cartografía geológica de las planchas 7 - Ranchería, 8 – Riohacha, 9 – Uribia, 13 – Dibulla, 14 – Albania y 15 – 15 bis Maicao, 2009.

### **Depósitos de dunas (Qe)**

Corresponde a depósitos de dunas de arena fina de cuarzo, subangular, bien seleccionados. Según el trabajo realizado por ALMA MATER – INGEOMINAS (2009), gran parte de la superficie continental de la llamada Baja Guajira está formada por depósitos de esta naturaleza. Se distinguen dos tipos de sedimentos eólicos. Sedimentos de dunas activas y Sedimentos de dunas estabilizadas. Ambos tipos de sedimentos tienen la dirección de su faceta más alargada en la Este Oeste lo que implica igual dirección para el agente formador de estos depósitos, es decir el viento (ver *Fotografía 6*) (INGEOMINAS, 2009).



**Fotografía 6:** Depósitos Eólicos (Qe). Se observa el relieve levemente colinado relacionado con las Dunas compuestas de arenas silíceas de granos sueltos muy redondeados color crema. Imagen tomada de: Memoria explicativa de la cartografía geológica de las planchas 7 - Ranchería, 8 – Riohacha, 9 – Uribia, 13 – Dibulla, 14 – Albania y 15 – 15 bis Maicao, 2009.

### **Depósitos aluviales recientes (Qal)**

Esta unidad corresponde a depósitos semiconsolidados a no consolidados de origen marino, aluvial y localmente con aporte eólico, constituido por gravas, arenas y arcillas en proporciones variables de acuerdo con la distancia a la fuente de transporte (*Fotografía 7*); cubren áreas extensas en las zonas planas y deprimidas (INGEOMINAS, 2009).



**Fotografía 7:** *Depósitos Aluviales Recientes. Se observa la morfología plana propia de esta unidad, formada por arenas con tamaño de grano arena fina y arcillas de color pardo amarillento, suprayacidas por clastos de composición silícea, sueltos y dispuestos aleatoriamente sobre el terreno. Imagen tomada de: Memoria explicativa de la cartografía geológica de las planchas 7 - Ranchería, 8 – Riohacha, 9 – Uribia, 13 – Dibulla, 14 – Albania y 15 – 15 bis Maicao, 2009.*

### **Depósitos evaporíticos y lagunares recientes (Qes)**

Según ALMA MATER – (INGEOMINAS-UNAL, 2009), esta unidad agrupa tanto las salinas y los ambientes evaporíticos como los pantanos y marismas, cuya característica principal es ser afectado por inundaciones o permanecer inundadas. Estas zonas, luego de ser inundadas por mareas o tormentas, conforman masas de agua salada que son expuestas al sol y al viento, factores muy intensos en esta zona del país, así pues, se va evaporando el agua y quedan costras de sal sobre la superficie de estas zonas bajas (ver *Fotografía 8*).



**Fotografía 8:** *Depósitos Evaporíticos y Lagunares recientes (Qes). Entrada natural de agua del mar que genera por la alta evaporación, ambientes hipersalinos y consecuentemente costras de sal sobre la superficie del desierto. Imagen tomada de: Memoria explicativa de la cartografía geológica de las planchas 7 - Ranchería, 8 – Riohacha, 9 – Uribia, 13 – Dibulla, 14 – Albania y 15 – 15 bis Maicao, 2009.*

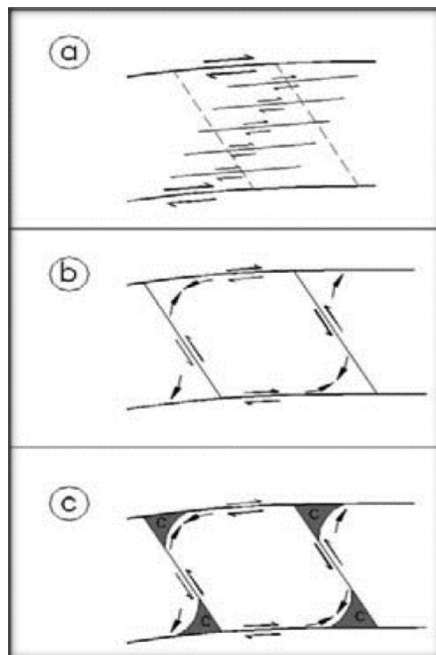
## 11.1. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La zona de estudio a nivel local no presenta un régimen estructural marcado debido a que se encuentra cubierta en su gran mayoría por depósitos sedimentarios no consolidados del cuaternario.

Se reconoce la existencia a nivel regional de dos bloques geológicos estructurales que se encuentran al norte por la falla de Cuisa en el municipio de Uribia y al sur por la falla de Oca que divide las subregiones denominadas media y baja Guajira.

El emplazamiento de estas estructuras y la posterior reactivación de la Falla Bucaramanga Santa Marta (con terminación abrupta en la Falla de Oca), no solamente explican el origen posible de la Sierra Nevada de Santa Marta, la depresión del Tayrona, el Alto de Carraipía, entre otras, sino la generación de una tectónica muy compleja para la Baja Guajira, que durante mucho tiempo se comportó como una plataforma relativamente estable afectada solamente por cambios eustáticos y fenómenos de subsidencia (INGEOMINAS, 2009).

Dentro de la Cuenca de la Baja Guajira es posible determinar varios tipos de sub cuencas clasificadas como strike slip basin, sin embargo se observan características que hacen pensar en una cuenca transrotacional (transrotational basin) que se caracteriza por desarrollarse entre fallas rumbo deslizantes y como el resultado de la rotación de bloques en la misma dirección del esfuerzo de cizalla principal (*Figura 10*). Estas generan geometrías triangulares a lo largo de los márgenes de los bloques rotados. Por efecto de cizalla entre las fallas de Oca y Cuiza, se generan una serie de fallas de rumbo, de componente sinextral y dirección preferencial NW –SE, con un importante componente de desplazamiento vertical. Adicionalmente, se presentan fallas de rumbo dextrales, subparalelas, de dirección preferencial este-oeste (INGEOMINAS, 2009).



**Figura 10:** Estilo estructural de la cuenca Baja Guajira. Representación esquemática de una cuenca transrotacional. A) Sistema de fallas de rumbo de componente dextral, que generan fallas paralelas y de cizalla oblicuas, b) detalle de posibles esfuerzos al interior del esquema donde se indica el movimiento, c) zonas de interés donde se concentran esfuerzos compresivos. Las fallas en sentido E-W podrían corresponder a las fallas de Cuiza y Oca. Fuente: Geología estructural y estratigrafía del área Majayura (Guajira), 2012.

## 11.2. GEOMORFOLOGÍA

De acuerdo con la jerarquización geomorfológica del SGC (2009), el área enmarcada dentro de la zona de estudio se localiza dentro de la parte suroccidental de la Provincia Geomorfológica de la Alta Guajira. Se interpretaron unidades geomorfológicas correspondientes a los ambientes costeros, planicies eólicas y llanuras aluviales (ver Figura 11).



**Edin (Dunas costeras sin diferenciar)**

Campos de arena cuya forma en superficie y origen es difícil de definir o no de ha determinado (INGEOMINAS, 2009).

**Edl (Dunas longitudinal)**

Lomas de arena, más o menos simétricas, alargadas a estrechas que se extienden paralelas a la dirección del viento. Sus crestas pueden ser redondeadas o agudas, con generación de picos y depresiones (INGEOMINAS, 2009).

**Ema (Mantos de arena eólica)**

Acumulación de arena transportada por el viento, de 20 – 30 cm de espesor que cubre grandes extensiones de terreno. En algunos sectores colmata lagunas costeras, estableciendo una morfología plana a suavemente ondulada (INGEOMINAS, 2009).

**Fca (Cauce aluvial)**

Canal de forma irregular excavado por erosión de las corrientes perennes o estacionales, dentro de macizos rocosos y/o sedimentos aluviales. Dependiendo de factores como pendiente, resistencia del lecho, carga de sedimentos y caudal, pueden persistir por grandes distancias (INGEOMINAS, 2009).

**Fpi (Plano o llanura de inundación)**

Superficie de morfología plana, baja a ondulada, eventualmente inundable. Se localiza bordeando los cauces fluviales, donde es limitado localmente por escarpes de terraza. Incluye los cauces fluviales menores en formas de “U” y “V”, al igual que a los conos coluviales menores de los flancos de los valles intramontanos (INGEOMINAS, 2009).

**Fta (Terraza de acumulación)**

Superficie elongada, plana a suavemente ondulada, modelada sobre sedimentos aluviales, que se presenta en forma pareada, limitada por escarpes de diferente altura a lo largo del cauce de un río (INGEOMINAS, 2009).

**Mlc (Laguna costera)**

Son cuerpos de aguas saladas permanentes acumuladas en zonas de depresión, que se caracterizan por tener comunicación de manera periódica o permanente con el océano y por estar separadas del mismo por una playa o cordón litoral (INGEOMINAS, 2009).

**Mlli (Llanura intermareal)**

Zonas de morfología plana o levemente inclinada. Su origen obedece al efecto combinado del ascenso de la marea y altos niveles freáticos, siendo característica su composición de arena fina a lodosa desprovista de vegetación o con vegetación herbácea escasa y esporádica. Se ubican en zonas desprotegidas del oleaje marino, bordeando lagunas costeras o en la parte interna de las espigas (INGEOMINAS, 2009).

**Mpl (Playas)**

Se identifica por consistir de sedimentos depositados por el oleaje; o como una acumulación de arena marina que es transportada a la costa por el oleaje y las corrientes (INGEOMINAS, 2009).

## 12. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL

En Colombia, las aguas subterráneas están reguladas por diversos marcos normativos y legales. A continuación, se mencionan las leyes y regulaciones principales relacionadas con este tema.

- Decreto 2811 de 1974 por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

En los artículos 83 al 85 de este decreto se establece que, salvo derechos adquiridos por particulares, son bienes inalienables e imprescriptibles del Estado:

- a.- El álveo o cauce natural de las corrientes;
- b.- El lecho de los depósitos naturales de agua;
- c.- Las playas marítimas, fluviales y lacustres;
- d.- Una faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho;
- e.- Las áreas ocupadas por los nevados y por los cauces de los glaciares;
- f.- Los estratos o depósitos de las aguas subterráneas.

La adjudicación de un baldío no comprende la propiedad de aguas, cauces ni, en general, la de bienes a que se refiere el artículo anterior, que pertenecen al dominio público.

Salvo los derechos adquiridos, la Nación se reserva la propiedad de aguas, minerales y termales y su aprovechamiento se hará según lo establezca el reglamento.

En los artículos 151 al 154 se dicta que:

El dueño, poseedor o tenedor tendrá derecho preferente en el aprovechamiento de las aguas subterráneas existentes en su predio, de acuerdo con sus necesidades. Se podrá otorgar concesión de aprovechamiento de aguas subterráneas en terreno distinto al del peticionario, para los usos domésticos y de abrevadero, previa la constitución de servidumbres, cuando se demuestre que no existen en el suyo en profundidad razonable y cuando su alumbramiento no contraviene alguna de las condiciones establecidas con este título.

La concesión se otorgará sin perjuicio del derecho preferente del dueño, tenedor o poseedor del terreno en donde se encuentran las aguas, que podrá oponerse a la solicitud en cuanto lesione ese derecho, siempre que esté haciendo uso actual de las aguas o se obligue a hacerlo en un término que se le fijará según el tipo y la naturaleza de las obras necesarias y en cuanto el caudal subterráneo no exceda las necesidades de agua del predio. (EXEQUIBLE).

Cuando se compruebe que las aguas del subsuelo de una cuenca o de una zona se encuentran en peligro de agotamiento o de contaminación, o en merma progresiva y sustancial en cantidad o calidad, se suspenderá definitiva o temporalmente el otorgamiento de nueva concesiones en la cuenca o zona; se podrá decretar la caducidad de las ya otorgadas o limitarse el uso, o ejecutarse, por cuenta de los usuarios, obras y trabajos necesarios siempre que medie el consentimiento de dichos usuarios, y si esto no fuere posible, mediante la ejecución de la obra por el sistema de valorización. Ver Decreto Nacional 2857 de 1981

Las concesiones de aprovechamiento de aguas subterráneas podrán ser revisados o modificadas o declararse su caducidad, cuando haya agotamiento de tales aguas o las circunstancias hidrogeológicas que se tuvieron en cuenta para otorgarlas hayan cambiado sustancialmente.

El titular de concesión de aguas subterráneas está obligado a extraerlas de modo que no se produzcan sobrantes.

- Decreto 1541 de 1978 por el cual se reglamenta la Parte III del Libro II del Decreto-Ley 2811 de 1974: "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973.

En los artículos 146 al 154 se establece que, la prospección y exploración que incluye perforaciones de prueba en busca de aguas subterráneas con miras a su posterior aprovechamiento, tanto en terrenos de propiedad privada como en baldíos, requiere permiso del Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente, Inderena, con los requisitos exigidos para obtener concesión de aguas y suministrar además la siguiente información:

- a. Ubicación y extensión del predio o predios a explorar indicando si son propios, ajenos o baldíos;
- b. Nombre y número de inscripción de la empresa perforadora, y relación y especificaciones del equipo que va a usar en las perforaciones;
- c. Sistema de perforación a emplear y plan de trabajo;
- d. Características hidrogeológicas de la zona, si fueren conocidas;
- e. Relación de los otros aprovechamientos de aguas subterráneas existente dentro del área que determine el Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente, Inderena;
- f. Declaración de efecto ambiental;
- g. Superficie para la cual se solicita el permiso y término del mismo;
- h. Los demás datos que el peticionario o el Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente, Inderena, consideren convenientes.

Las personas naturales o jurídicas, públicas o privadas deberán acompañar a la solicitud:

- a. Certificado del Registrador de Instrumentos Públicos y Privados sobre el registro del inmueble o la prueba adecuada de la posesión o tenencia;
- b. Los documentos que acrediten la personería o identificación del solicitante, y
- c. Autorización escrita con la firma autenticada del propietario o propietarios de los fundos donde se van a realizar las exploraciones, si se tratare de predios ajenos.

Recibida la solicitud de exploración debidamente formulada, el Inderena procederá a estudiar cada uno de los puntos relacionados en el artículo 147 de este Decreto, por intermedio de profesionales o técnicos en la materia.

Con base en los estudios a que se refiere el artículo anterior, el Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente, Inderena, podrá otorgar el permiso. Si el beneficiario fuere una persona natural, o jurídica privada se deberán incluir las siguientes condiciones:

- a. Que el área de exploración no exceda de 1.000 hectáreas, siempre y cuando sobre la misma zona no existan otras solicitudes que impliquen reducir esta extensión;
- b. Que el período no sea mayor de un (1) año, y
- c. Que el interesado preste caución de cumplimiento a satisfacción del Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente, Inderena.

En el proceso de exploración se contemplarán los siguientes aspectos para efectos del informe a que se refiere el artículo 152 de este Decreto:

- a. Cartografía geológica superficial;

- b. Hidrología superficial;
- c. Prospección geofísica;
- d. Perforación de pozos exploratorios;
- e. Ensayo de bombeo;
- f. Análisis físico-químico de las aguas, y
- g. Compilación de datos sobre necesidad de agua existente y requerida.

Al término de todo permiso de exploración de aguas subterráneas, el permisionario tiene un plazo de sesenta (60) días hábiles para entregar al Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente, Inderena, por cada perforado un informe que debe contener, cuando menos, los siguientes puntos:

- a. Ubicación del pozo perforado y de otros que existan dentro del área de exploración o próximos a ésta. La ubicación se hará por coordenadas geográficas y siempre que sea posible con base en cartas del Instituto Geográfico "Agustín Codazzi";
- b. Descripción de la perforación y copias de los estudios geofísicos, si se hubieren hecho;
- c. Profundidad y método de perforación;
- d. Perfil estratigráfico de todos los pozos perforados, tengan o no agua; descripción y análisis de las formaciones geológicas, espesor, composición, permeabilidad, almacenaje y rendimiento real del pozo si fuere productivo, y técnicas empleadas en las distintas fases. El titular del permiso deberá entregar, cuando la entidad lo exija, muestras de cada formación geológica atravesada, indicando la cota del nivel superior e inferior a que corresponde;

e. Nivelación de cota del pozo con relación a las bases altimétricas establecidas por el Instituto Geográfico "Agustín Codazzi", niveles estáticos de agua contemporáneos a la prueba en la red de pozos de observación, y sobre los demás parámetros hidráulicos debidamente calculados;

f. Calidad de las aguas; análisis físico-químico y bacteriológico, y

g. Otros datos que el Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente, Inderena, considere convenientes.

La prueba de bombeo a que se refiere el punto e) del artículo anterior deberá ser supervisada por un funcionario designado por el Inderena,

Los permisos de exploración de aguas subterráneas no confieren concesión para el aprovechamiento de las aguas, pero darán prioridad al titular del permiso de exploración para el otorgamiento de la concesión en la forma prevista en el Título III, Capítulo III, de este Decreto.

- Decreto 1594 de 1984 por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 09 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI - Parte III - Libro II y el Título III de la Parte III Libro I del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.

En los artículos 28 al 36 se establece que, para la administración y manejo del recurso agua, la EMAR deberá tener en cuenta, además de las disposiciones del presente Decreto, las contenidas en los Decretos 1541 de 1978, 2857 de 1981 y demás normas que rigen la materia.

Para los efectos del presente Decreto se tendrán en cuenta los siguientes usos del agua, sin que su enunciado indique orden de prioridad:

a) Consumo humano y doméstico

b) Preservación de flora y fauna

- c) Agrícola
- d) Pecuario
- e) Recreativo
- f) Industrial
- g) Transporte

Cuando quiera que el agua se utilice para fines distintos de las opciones previstas en el presente Decreto, el Ministerio de Salud, para efectos del control sanitario y la EMAR por razones de administración del recurso, establecerán la denominación para su uso y definirán el contenido o alcance del mismo. Así por ejemplo, el empleo del agua para la recepción de vertimientos, siempre y cuando ello no impida la utilización posterior del recurso de acuerdo con el ordenamiento previo del mismo, se denominará dilución y asimilación, su uso para contribuir a la armonización y embellecimiento del paisaje, se denominará estético.

Se entiende por uso del agua para consumo humano y doméstico su empleo en actividades tales como:

- a) Fabricación o procesamiento de alimentos en general y en especial los destinados a su comercialización o distribución.
- b) Bebida directa y preparación de alimentos para consumo inmediato.
- c) Satisfacción de necesidades domésticas, individuales o colectivas, tales como higiene personal y limpieza de elementos, materiales o utensilios.
- d) Fabricación o procesamiento de drogas, medicamentos, cosméticos, aditivos y productos similares.

Se entiende por uso del agua para preservación de flora y fauna, su empleo en actividades destinadas a mantener la vida natural de los ecosistemas acuáticos y terrestres y de sus ecosistemas asociados, sin causar alteraciones sensibles en ellos, o para actividades que permitan la reproducción, supervivencia, crecimiento, extracción y aprovechamiento de especies hidrobiológicas en cualquiera de sus formas, tal como en los casos de pesca y acuicultura.

Se entiende por uso agrícola del agua, su empleo para irrigación de cultivos y otras actividades conexas o complementarias, que el Ministerio de Salud o la EMAR establezcan.

Se entiende por uso pecuario del agua, su empleo para el consumo del ganado en sus diferentes especies y demás animales, así como para otras actividades conexas y complementarias que el Ministerio de Salud o la EMAR establezcan.

Se entiende por uso del agua para fines recreativos, su utilización, cuando se produce:

- a) Contacto primario, como en la natación y el buceo.
- b) Contacto secundario, como en los deportes náuticos y la pesca.

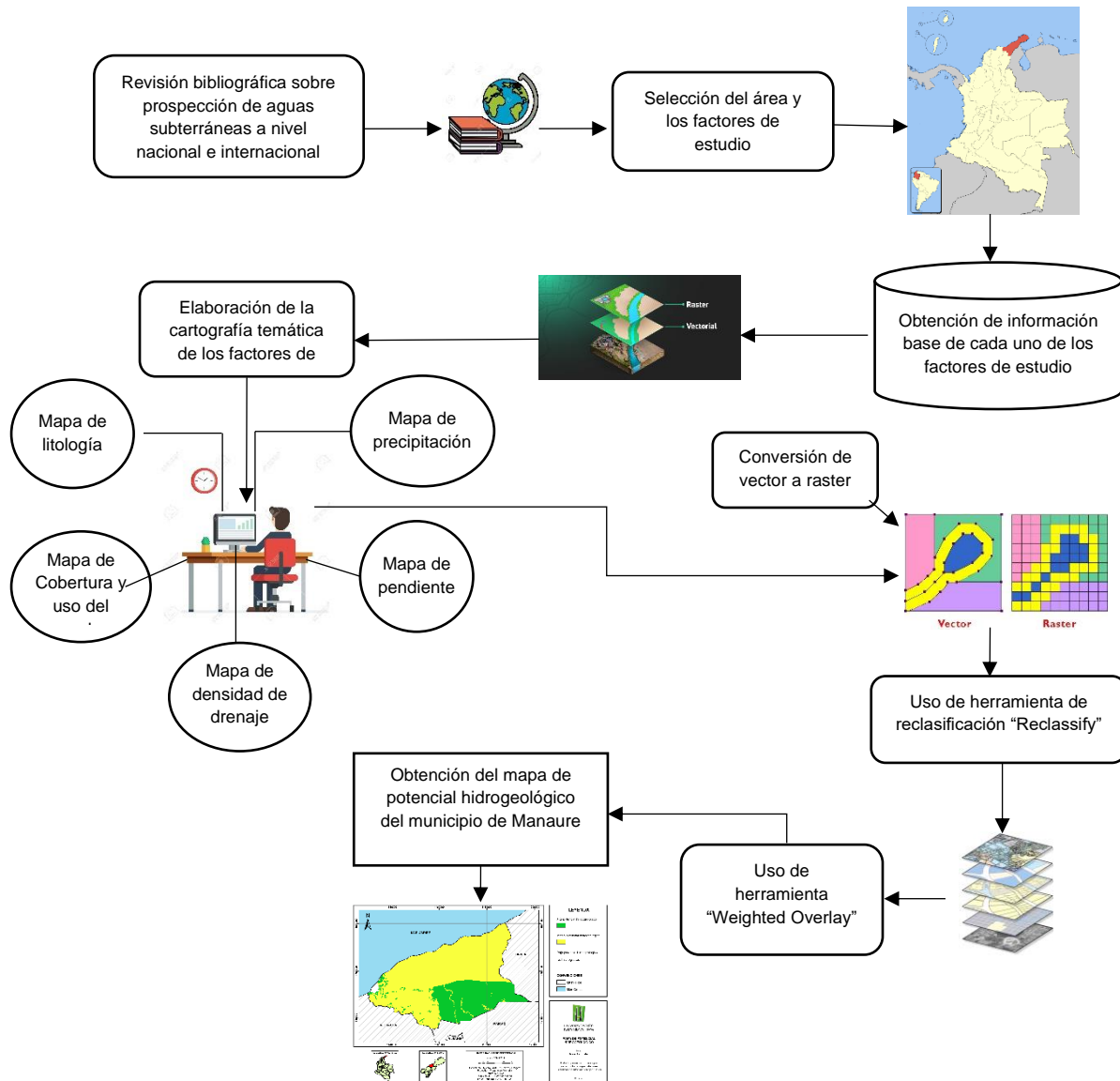
Por extensión, dentro de los usos del agua a que se refiere el presente artículo, se incluyen los baños medicinales.

Se entiende por uso industrial del agua, su empleo en actividades tales como:

- a) Procesos manufactureros de transformación o explotación, así como aquellos conexas y complementarios, que el Ministerio de Salud o la EMAR establezcan.
- b) Generación de energía.
- c) Minería.

### 13. METODOLOGÍA

A continuación, se presenta un diagrama de flujo (ver **Figura 12**) y se describen las 5 fases de la metodología y procedimientos que se llevaron a cabo para la realización del presente estudio.



**Figura 12:** Flujo metodológico. Fuente: autor.

### **13.1. FASE 1: Recopilación de información bibliográfica**

Esta fase consistió en la revisión y recopilación de información bibliográfica de estudios hidrogeológicos utilizando análisis espacial a nivel nacional e internacional, que permitieron conocer metodologías y factores determinantes asociados a la zona de estudio, además de información relacionada con:

- Cartografía geológica, geomorfológica y estructural de la zona de estudio.
- Propuestas metodológicas para la prospección de aguas subterráneas

empleando análisis espacial multicriterio.

- Datos de precipitación, cobertura y uso del suelo (vegetación), drenajes y pendiente.

### **13.2. FASE 2: Selección de los factores de estudio**

Esta fase consiste en la selección de los factores que tienen mayor importancia en la recarga y almacenamiento de aguas subterráneas, para lo cual se tuvieron en cuenta los más usados en las diferentes metodologías de la bibliografía revisada y que tuvieron resultados favorables.

Los factores seleccionados para determinar sitios las zonas de aguas subterráneas fueron: litología (tipo de roca), precipitación, cobertura y uso del suelo (vegetación), pendiente y densidad de drenaje.

(De Vries & Simmers, 2002) y (Hernández, 2010) documentan que los procesos de recarga de acuíferos son diferentes entre zonas húmedas y semi-áridas, por ello se omitió el fallamiento o lineamientos, por ser más determinantes en los estudios de zonas húmedas.

### 13.3. FASE 3: Elaboración de la cartografía temática

Esta fase consiste en la elaboración de la cartografía temática de cada uno de los factores elegidos teniendo en cuenta los datos obtenidos en los diferentes portales de carácter institucional que brindaban la información para el área de estudio, en total se realizaron 5 mapas. En la *Tabla 3* se relacionan los insumos y las fuentes usadas.

FACTOR DE ESTUDIO	TIPO DE ARCHIVO	INSUMO	FUENTE
<b>Litología</b>	Vector	Cartografía Geológica de las planchas 7-Rancheria, 8-Riohacha, 9-Uribia, 13-Dibulla, 14-Albania y 15-15 Bis Maicao. Escala 1:25.000	Geoportal del Servicio Geológico Colombiano, 2009.
<b>Cobertura y uso del suelo</b>	Vector	Mapa de coberturas de la tierra por metodología Corine Land Cover escala 1:100.000	IDEAM, 2018, en catálogo de mapas del SIAC.
<b>Precipitación</b>	Vector	Mapa de precipitación anual promedio para Colombia (mm)	IDEAM, 2012, en catálogo de mapas del SIAC.
<b>Pendiente</b>	Raster	Modelo de elevación digital, resolución 30m	NASA 2011.
<b>Drenaje</b>	Vector	Cartografía Geológica de las planchas 7-Rancheria, 8-Riohacha, 9-Uribia, 13-Dibulla, 14-Albania y 15-15 Bis Maicao. Escala 1:25.000	Geoportal del Servicio Geológico Colombiano, 2009.

**Tabla 3:** Fuente de los datos espaciales. Fuente: autor.

### 13.4. FASE 4: Análisis espacial e implementación de las herramientas SIG

Esta fase consistió en la implementación de las herramientas SIG en los procesos de reclasificación y asignación de pesos a los factores de estudio, para lo cual se tuvo en cuenta la clasificación de intervalos de clase definidos (3-alto, 2-medio, 1-bajo), en donde se establecieron valores en función a que tanto facilitan o inhiben la recarga y almacenamiento de aguas subterráneas los factores de estudio. Para la reclasificación se utilizó la herramienta "Reclassify" y para la asignación de pesos se utilizó "Weighted Overlay" ambas herramientas del software Arcgis.

### **13.5. FASE 5: Determinación de las áreas con mayor potencial hidrogeológico**

En esta fase, con base en la información obtenida a partir del análisis e implementación de las herramientas SIG se hizo la caracterización de las zonas con mayor potencial de aguas subterráneas y finalmente se generó el mapa de potencial hidrogeológico para la zona de estudio.

A continuación, se explicará cada una de estas fases con mayor profundidad.

## 14. ASIGNACIÓN DE VALORES A CADA FACTOR DE ESTUDIO PARA LA RECLASIFICACIÓN

Para valorar los factores se tuvo en cuenta que, una vegetación pobre, un suelo permeable, precipitación de alta intensidad y una pendiente baja crean condiciones favorables para la recarga de aguas subterráneas (De Vries & Simmers, 2002).

Para facilitar el análisis de los factores, cada uno se distribuyó en tres intervalos de clases: alto, medio y bajo; entiéndase por intervalo de clase como la agrupación de datos que comparten características comunes.

Esta clasificación se da en función de que tanto facilitan o inhiben la recarga y almacenamiento de aguas subterráneas los factores de estudio seleccionados. En la *Tabla 4* se relacionan los intervalos de clase, los valores asignados y la justificación a la valoración.

INTERVALO DE CLASE	VALOR ASIGNADO	JUSTIFICACIÓN
Alto	3	Condición del factor que favorece totalmente la recarga y el almacenamiento
Medio	2	Condición del factor que favorece parcialmente la recarga y el almacenamiento
Bajo	1	Condición del factor que inhibe la recarga y el almacenamiento

**Tabla 4:** Asignación de valores a los factores que condicionan la recarga y el almacenamiento de agua subterránea. Fuente: autor.

Una vez establecidos los intervalos de clase se les asignó un valor para posteriormente usar la herramienta de reclasificación de Arcgis llamada "reclassify", de esta forma generar la reclasificación de los factores de estudio. El valor más alto (3) se asignó para aquellos rangos que más favorecen la recarga de los acuíferos subterráneos, el valor medio (2) a aquellos rangos que favorecen parcial o medianamente y el valor más bajo (1) a aquellos que inhiben la recarga y almacenamiento.

#### 14.1. LITOLOGÍA (TIPO DE ROCA)

La evaluación litológica es la base para los estudios hidrogeológicos ya que permite identificar las rocas y sedimentos que favorecen la circulación y almacenamiento de las aguas subterráneas, así como la determinación de su continuidad areal y espesor (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2014).

Para hacer la reclasificación de litología se tomó como referencia lo estipulado en la guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014 donde se establece que:

- Los depósitos no consolidados de gravas y arenas intercalados frecuentemente con niveles o paquetes de limos y arcillas, que son comúnmente el resultado de procesos aluviales o de depósito en las vertientes tienen el mayor potencial de infiltración. Se les asignó el valor 3 (**Alto**).
- Las rocas sedimentarias normalmente consolidadas y semiconsolidadas de conglomerados y areniscas, que tienen permeabilidad y porosidades primarias (intergranulares) y secundarias como consecuencia del fracturamiento (fallas, y diaclasas principalmente) tienen potencial medio alto de infiltración. Se les asignó el valor 2 (**medio**).
- Las rocas de origen ígneo y metamórfico al ser impermeables por su naturaleza poseen el menor potencial de infiltración. Se les asignó el valor 1 (**bajo**).

A continuación, se muestra la tabla con los valores de reclasificación asignados al factor de litología.

LITOLOGÍA	PROBABILIDAD DE ENCONTRAR AGUA SUBTERRÁNEA	VALOR DE RECLASIFICACIÓN	CARACTERIZACIÓN
Los depósitos no consolidados de gravas y arenas intercalados frecuentemente con niveles o paquetes de limos y arcillas, que son comúnmente el resultado de procesos aluviales o de depósito en las vertientes	Alto	3	Zonas con alta infiltración
Las rocas sedimentarias normalmente consolidadas y semiconsolidadas de conglomerados y areniscas, que tienen permeabilidad y porosidades primarias (intergranulares) y secundarias como consecuencia del fracturamiento (fallas, y diaclasas principalmente)	Medio	2	Zonas con media infiltración
Las rocas de origen ígneo y metamórfico	Bajo	1	Zonas con baja infiltración

**Tabla 5:** Valores de reclasificación para litología. Fuente: (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2014)

## 14.2. PRECIPITACIÓN

La importancia de la precipitación como factor de estudio radica en que, a mayor cantidad de precipitación, mayor es la posibilidad de recarga de aguas subterráneas debido a la cantidad de agua superficial disponible en el proceso de infiltración. Una reducción de la recarga por precipitación por lo general provoca una directa e inmediata disminución de los niveles de agua subterránea (Elewa y Qaddah, 2011).

Para Colombia los promedios de precipitación están entre los 500 mm anuales en La Guajira a los 6000 mm en el Chocó. Para la zona de estudio la cual pertenece a la región Caribe, las precipitaciones se encuentran en su mayoría entre los 500 mm y los 2500 mm.

Para el presente estudio, se usaron los valores de precipitación tomando como referencia los datos de precipitación anual del año 2012, del IDEAM. En la *Tabla 6* se muestra la asignación de valores de reclasificación para la precipitación.

PRECIPITACIÓN (ANUAL)	PROBABILIDAD DE ENCONTRAR AGUA SUBTERRÁNEA	VALOR DE RECLASIFICACIÓN	CARACTERIZACIÓN
1001 - 1500 mm	Alto	3	Alta tasa de ingreso de agua al acuífero
501 - 1000 mm	Medio	2	Tasa media de ingreso de agua al acuífero
0 - 500 mm	Bajo	1	Baja tasa de ingreso de agua al acuífero

**Tabla 6:** Valores de reclasificación para precipitación. Fuente: (IDEAM, 2014)

### 14.3. PENDIENTE

La pendiente es una función inversa de la permeabilidad. Según (Yeh, Lee, Hsu, & Chang, 2009) la inclinación de la pendiente influye directamente en la infiltración de la lluvia. Las pendientes pronunciadas producen una menor recarga, porque el agua fluye velozmente por la superficie durante los eventos de lluvia y no tiene tiempo de infiltrarse y recargar el acuífero, caso contrario sucede cuando las pendientes son suaves.

(Elewa & Qaddah, 2011) señalan que entre mayor sea la precipitación de un área, mayor es la posibilidad de recarga de las aguas subterráneas. Sin embargo, a pesar de que el área de estudio reciba mucha agua producto de las precipitaciones, se debe evaluar la pendiente. Esta puede conllevar a la escasez de agua al facilitar el escurrimiento de gran parte de las precipitaciones hacia los drenajes superficiales.

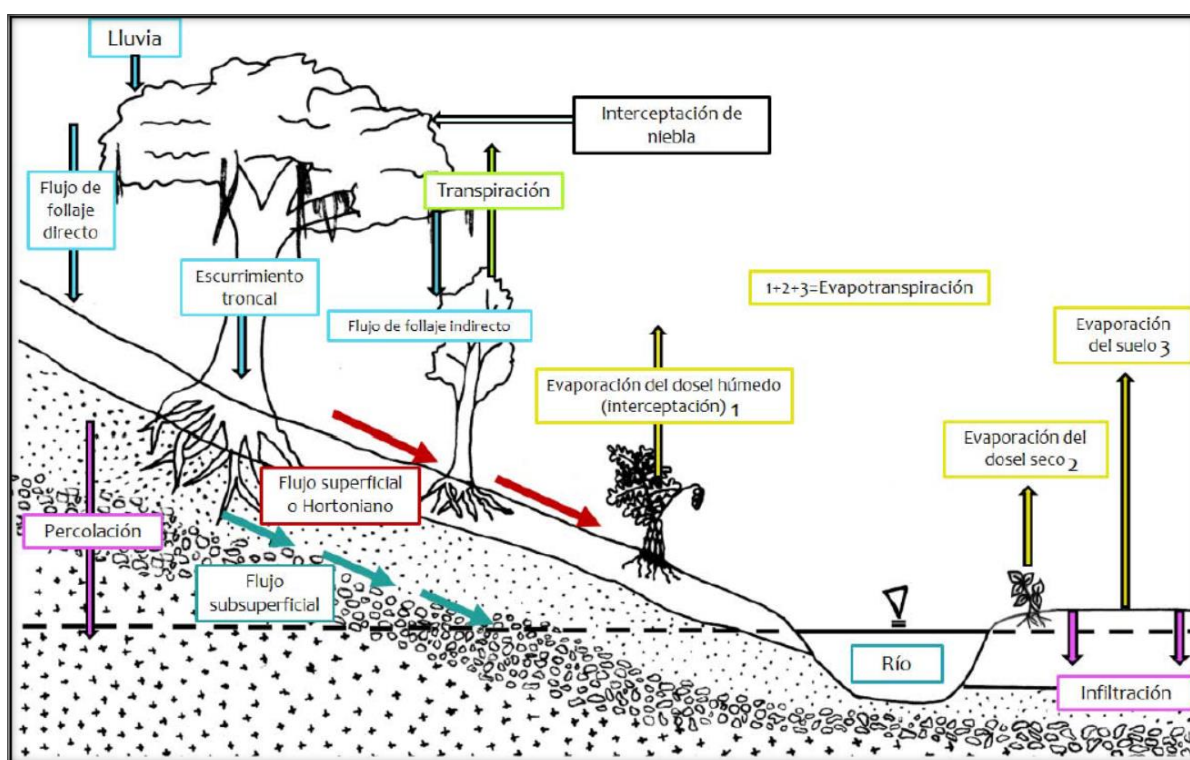
En la *Tabla 7* se muestran los valores de reclasificación asignados a los rangos de pendiente.

PENDIENTE	PROBABILIDAD DE ENCONTRAR AGUA SUBTERRÁNEA	VALOR DE RECLASIFICACIÓN	CARACTERIZACIÓN
Paisaje plano (pendiente entre 0° y 10°)	Alto	3	Alta tasa de ingreso de agua al sistema
Paisaje ondulado (pendiente entre 11° y 20°)	Medio	2	Tasa media de ingreso de agua al sistema
Paisaje montañoso (pendiente mayor a 21°)	Bajo	1	Baja tasa de ingreso de agua al sistema

**Tabla 7:** Valores de reclasificación para pendiente. Fuente: IDEAM, 2014.

#### 14.4. COBERTURA Y USO DEL SUELO (VEGETACIÓN)

La cobertura del suelo fue elegida como factor de estudio debido a que el follaje disminuye la entrada de agua al sistema al interceptar la precipitación y favorecer la evaporación al retener agua en las hojas (Rutter et al. 1971; Rutter et al. 1975; Xiao et al. 2000 citados en Méndez Monroy, 2013). En la *Figura 13* se muestra el proceso.



**Figura 13:** Interceptación de la vegetación en la recarga de acuíferos. Fuente: (Guzmán, 2019)

La cantidad de agua interceptada varía según las características dasométricas de la vegetación. Las hojas pueden retener del 100 al 50% de la precipitación total (Gerrits, 2010) citado por (Mendez Monroy, 2013). En la *Tabla 8* se muestran los valores de reclasificación para el factor de cobertura del suelo (vegetación). Este valor fue asignado

según la estructura tanto dasométrica (hierba, arbusto, árbol) como de distribución en el espacio (disperso, gregario), que condiciona la capacidad de interceptación de la precipitación.

COBERTURA DEL SUELO (VEGETACIÓN)	PROBABILIDAD DE ENCONTRAR AGUA SUBTERRÁNEA	VALOR DE RECLASIFICACIÓN	CARACTERIZACIÓN
Los cultivos agrícolas de bajo porte (cereales), pastos y herbazales naturales, suelos desnudos	Alto	3	<b>Interceptación baja.</b> Ocupan un solo estrato en el componente vertical, no se sobreponen y presentan espaciamiento entre individuos, hojas pequeñas o angostas por lo que no impiden la infiltración, ni facilitan la evaporación al retenerlas en los limbos foliares.
Los cultivos perennes (arbustos como café, cacao, oliva, uva, etc.), los arbustales, los pastos arbolados y los bosques muy intervenidos y fragmentados	Medio	2	<b>Interceptación media.</b> Tienen mayor cantidad de estratos que las coberturas de bajo porte, por lo que el agua que gotea tiene alta probabilidad de ser retenida por la capa inferior, pero hay espaciamiento entre los individuos ya sea pensando en las actividades de cosecha o porque son procesos de regeneración de zonas naturales como pastizales en donde los árboles o arbustos crecen de forma dispersa
Bosques densos, bosques de galería y plantaciones forestales	Bajo	1	<b>Interceptación alta.</b> Los individuos tienen la mayor cantidad de capas en la copa, además por debajo de los árboles encuentran arbustos y plantas herbáceas ocupando un mismo espacio porque aprovechan la vertical al competir por la luz. En estos ecosistemas la copa de los árboles se tocan reforzando la interceptación

**Tabla 8:** Valores de reclasificación para cobertura y uso del suelo (vegetación). Tomado de: (Rincón Rivera, 2018)

#### 14.5. DENSIDAD DE DRENAJE

De acuerdo con el concepto geomorfológico común, entre más denso es el sistema de drenaje más baja la tasa de recarga. Para conocer la densidad de drenaje implica identificar la longitud de todos los cauces y dividirlo por la unidad de área de interés, el resultado es la densidad de drenaje (Edet, Okereke, Teme, & Esu, 1998)

La densidad de drenaje es la longitud total de los cauces de agua por área y se expresa en Km/km<sup>2</sup>. Los valores pueden ir desde 0,5 Km/Km<sup>2</sup> (cuencas con drenaje pobre) hasta 3,5 Km/Km<sup>2</sup> (cuencas excepcionalmente bien drenadas) (Monsalve, 1999).

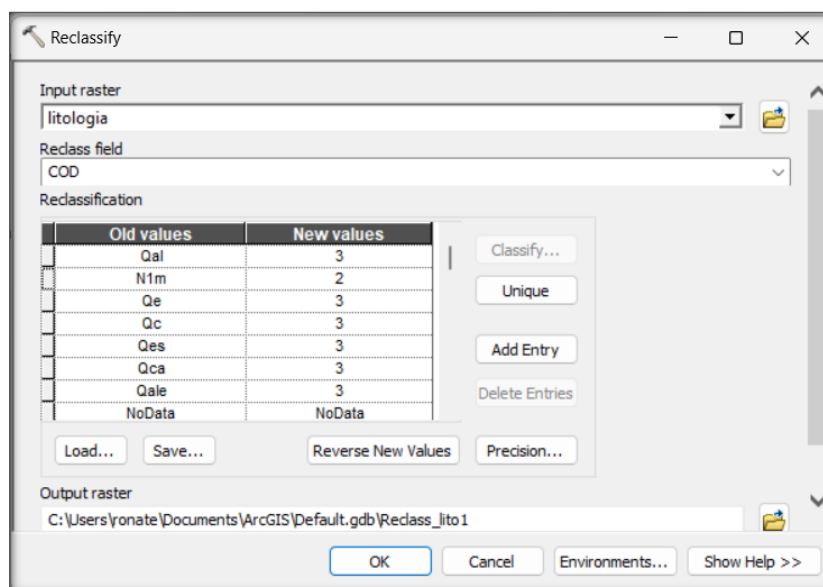
La densidad de drenaje facilita la identificación de las propiedades litológicas. Una mayor densidad de drenaje indica que la roca presente es de baja infiltración por lo que el agua corre superficialmente (Mahmoud, Alazba, & Amin, 2014). En la *Tabla 9* se encuentran los valores de reclasificación asignados a los rangos de densidad de drenaje.

DENSIDAD DE DRENAJE	PROBABILIDAD DE ENCONTRAR AGUA SUBTERRÁNEA	VALOR DE RECLASIFICACIÓN	CARACTERIZACIÓN
0,5 a 1,5 Km/Km <sup>2</sup> (cuencas con drenaje pobre)	Alto	3	Zonas con alta infiltración
1,51 a 2,5 Km/Km <sup>2</sup> (cuencas con drenaje normal)	Medio	2	Zonas de infiltración intermedia
2,51 a 3,5 Km/Km <sup>2</sup> (cuencas excepcionalmente bien drenadas)	Bajo	1	Zonas con baja infiltración

**Tabla 9:** Valores de reclasificación para densidad de drenaje. Fuente: Modificado de Mahmoud et al. 2014; Monsalve, 1999.

## 15. RECLASIFICACIÓN Y ASIGNACIÓN DE PESOS A CADA FACTOR DE ESTUDIO

Para realizar la reclasificación y asignación de pesos fue preciso convertir los mapas que se encontraban en formato vector a formato ráster, para esto se utilizó la herramienta “polygon to raster” de Arcgis, teniendo en cuenta que, las capas a convertir eran todas de tipo polígono. Una vez obtenidos los raster de cada uno de los factores de estudio se utilizó la herramienta “Reclassify” de Arcgis (*Figura 14*).



**Figura 14:** Herramienta de reclasificación de Arcgis, en este caso se muestra la reclasificación del factor litología. Fuente: autor.

Con esta herramienta se asignaron valores de 1 a 3 para cada unidad de clasificación o factor de estudio, teniendo en cuenta lo mencionado en la *Tabla 4*, en donde 1 se asignó a los valores que inhibían la recarga, 2 a valores medios y 3 a los que favorecían la recarga. El producto de la reclasificación son mapas de cada factor de interés (litología, cobertura del suelo, precipitación, pendiente y densidad de drenaje) con igual escala de clasificación.

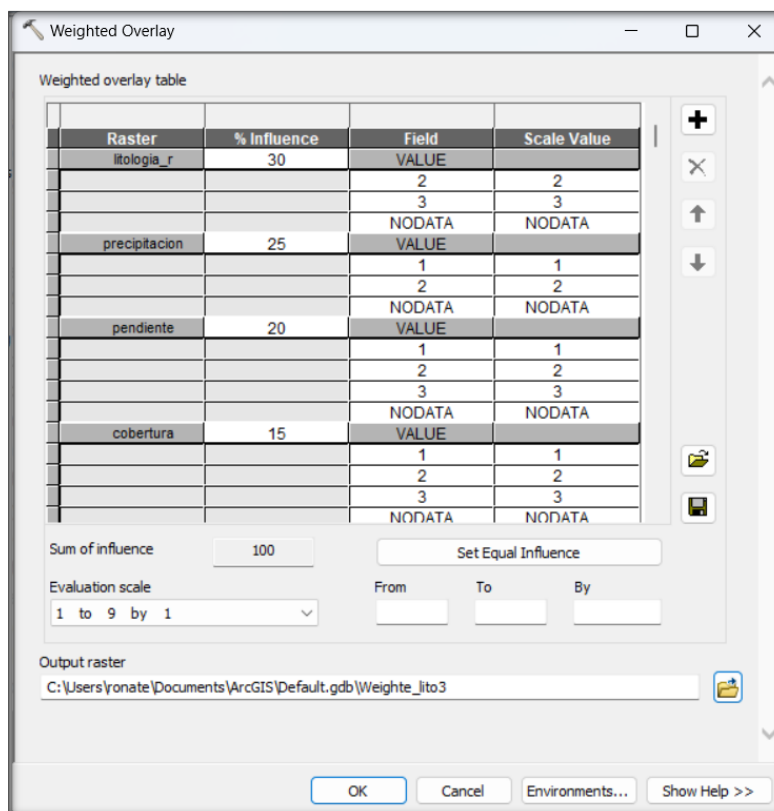
Para la asignación de los pesos se revisó la incidencia de cada uno de los factores en relación con la medida en que favorecen o permiten el ingreso de agua al sistema de acuerdo a

sus características propias. De esta manera se estableció que, la litología es el factor de mayor relevancia debido a que, el tipo de roca determina su porosidad y esta es fundamental para que las lluvias percolen rápidamente hacia el sistema, se le asignó un peso del 30%, el segundo factor de mayor importancia es la precipitación debido a que, a mayor cantidad de lluvia mayor disponibilidad de agua para ser captada por el sistema, se le asignó un peso del 25%, el siguiente factor es la pendiente, esto se debe a que, el nivel de inclinación del suelo va a condicionar la capacidad o velocidad en la que el agua va a fluir a través de la superficie para ser captada por el sistema, se le asignó un peso del 20%, el siguiente factor es la cobertura y uso del suelo al cual se le asignó un peso del 15%, porque a pesar de que la cobertura del suelo puede ayudar a reducir la escorrentía superficial y aumentar la infiltración está condicionado a los factores anteriores, y por último se consideró la densidad de drenaje como el factor de menor relevancia para la zona de estudio debido a que, a pesar de que puede utilizarse para evaluar la capacidad de una cuenca para transportar agua está condicionado por todos los demás factores, se le asignó un peso del 10%. En la *Tabla 10* se resume la asignación de pesos para cada factor.

FACTOR	PESO	JUSTIFICACIÓN
Litología	30%	El tipo de roca determina su porosidad y esta es fundamental para que las lluvias percolen rápidamente hacia el sistema.
Precipitación	25%	A mayor cantidad de lluvias mayor disponibilidad de agua para ser captada por el sistema.
Pendiente	20%	El nivel de inclinación del suelo va a condicionar la capacidad o velocidad en la que el agua va a fluir a través de la superficie para ser captada por el sistema.
Cobertura y uso del suelo (vegetación)	15%	Puede ayudar a reducir la escorrentía superficial y aumentar la infiltración, sin embargo, está condicionado por los demás factores.
Densidad de drenaje	10%	Puede utilizarse para evaluar la capacidad de una cuenca para transportar agua está condicionado por todos los demás factores.

**Tabla 10:** Asignación de pesos a los factores de estudio. Fuente: autor.

Una vez establecida la asignación de pesos a los factores de estudio, se procedió a hacer una superposición ponderada utilizando la herramienta “Weighted Overlay” de Arcgis, la cual consiste en superponer varios rásteres con una escala de medición común y pondera cada uno según su importancia o peso.



**Figura 15:** Herramienta Weighted Overlay de Arcgis, utilizada para realizar la superposición ponderada de los factores de estudio. Fuente: autor.

En la *Figura 15* se puede observar la parametrización de la herramienta Weighted Overlay, en donde en la columna raster se asignaron los mapas producto de la reclasificación, el porcentaje de influencia asignado y su escala de valores de clasificación.

## 16. ANALISIS DE RESULTADOS

De la revisión y recopilación de la información bibliográfica de estudios hidrogeológicos utilizando análisis espacial a nivel nacional e internacional que permitieron conocer las metodologías y factores determinantes asociados a la zona de estudio se destacan los siguientes 5, los cuales fueron tomados como base para la realización del presente estudio.

TITULO DEL DOCUMENTO	AUTOR(ES)	METODOLOGÍA UTILIZADA
Propuesta metodológica para la prospección de acuíferos subterráneos usando métodos de análisis espacial en el departamento del Cesar, Colombia.	Suann Semiramis Rincón Rivera	Esta tesis presenta una metodología que utiliza análisis espacial para la prospección de acuíferos subterráneos en el departamento del Cesar, Colombia. Para este estudio se procesaron de forma conjunta diferentes factores (litología, precipitación, cobertura, pendiente y densidad de drenaje). Se asignaron valores ponderados a cada uno de los factores y se determinaron las zonas con potencial hidrogeológico del departamento.
Metodología para la prospección de agua subterránea utilizando información satelital y datos obtenidos en forma tradicional	Myriam Hernández	Este trabajo presenta una metodología que utiliza distintas capas vectoriales, sensoramiento remoto, criterios hidrogeológicos e información obtenida de información capturada con técnicas tradicionales para revelar sitios con mayor probabilidad de presencia de aguas subterráneas en Ecuador. Para esto se generaron mapas temáticos a través de datos obtenidos con sensores remotos, se hizo una categorización de las características temáticas basándose en cuanto se relacionan con la presencia de acuíferos y se diseñó un modelo SIG basado en la integración de datos con las condiciones lógicas.

<p>Caracterización Hidrogeoquímica De Los Municipios de Manaure y Uribia en La Guajira, Colombia</p>	<p>Matheus Mejía Gómez</p>	<p>Este trabajo presenta una metodología que busca realizar una caracterización hidrogeológica de los municipios de Manaure y Uribia y evaluar la calidad del recurso. Inicialmente se hace una obtención y recopilación de datos, depuración y procesamiento de datos, análisis estadístico de las propiedades hidrogeoquímicas de los pozos estudiados en los municipios de Manaure y Uribia, análisis espacial y fisicoquímico de las propiedades hidrogeoquímicas de los pozos estudiados en los municipios de Manaure y Uribia y análisis de sondeos eléctricos verticales para identificar y caracterizar la litología presente en la zona de estudio.</p>
<p>Técnicas geoespaciales para la delimitación de zonas potenciales de aguas subterráneas en un municipio costero, Ghana</p>	<p>Samuel Yaw Danso, Yi Ma</p>	<p>Este trabajo presenta una metodología que utiliza técnicas geoespaciales para mapear las zonas potenciales de aguas subterráneas en un municipio costero de Ghana llamado Komenda-Edina-Eguafo-Abrem. Para evaluar con precisión la condición de las aguas subterráneas se seleccionaron 8 factores que influyen en la recarga de aguas subterráneas, se asignaron pesos a los factores utilizando el proceso de jerarquía analítica y se superpusieron en un entorno de sistemas de información geográfica.</p>
<p>Identificación de sitios potenciales para la recarga aguas subterráneas utilizando un sistema de soporte de decisiones basado en SIG en la región de Jazan-Arabia Saudita</p>	<p>Shereif H. Mahmoud y AA Alazba y Amin M.T</p>	<p>En este estudio se presenta una metodología para identificar áreas adecuadas para la recarga de agua subterránea en la región de Jazan-Arabia Saudita mediante el uso de un sistema de soporte de decisiones basado en SIG. Los análisis basados en dicho sistema comprendieron mapas de excedencia de lluvias, pendiente, coeficiente de escorrentía superficial, cobertura/uso del suelo y textura del suelo. Las extensiones espaciales de las áreas de idoneidad se identificaron mediante un proceso de análisis jerárquico que consideró las 5 capas mencionadas anteriormente. El modelo generó un mapa de recarga de aguas subterráneas con 4 categorías de idoneidad: excelente, buena, moderada y mala.</p>

**Tabla 11:** Resumen de metodologías base sobre estudios hidrogeológicos utilizando análisis espacial a nivel nacional e internacional. Fuente: autor.

## CARTOGRAFÍA TEMÁTICA

A continuación, se presenta la cartografía temática resultante de cada uno de los factores de estudio, elaborada a partir de los insumos obtenidos como se detalla en la *Tabla 3*, que se encuentra en el ítem 13.3.

## LITOLOGÍA

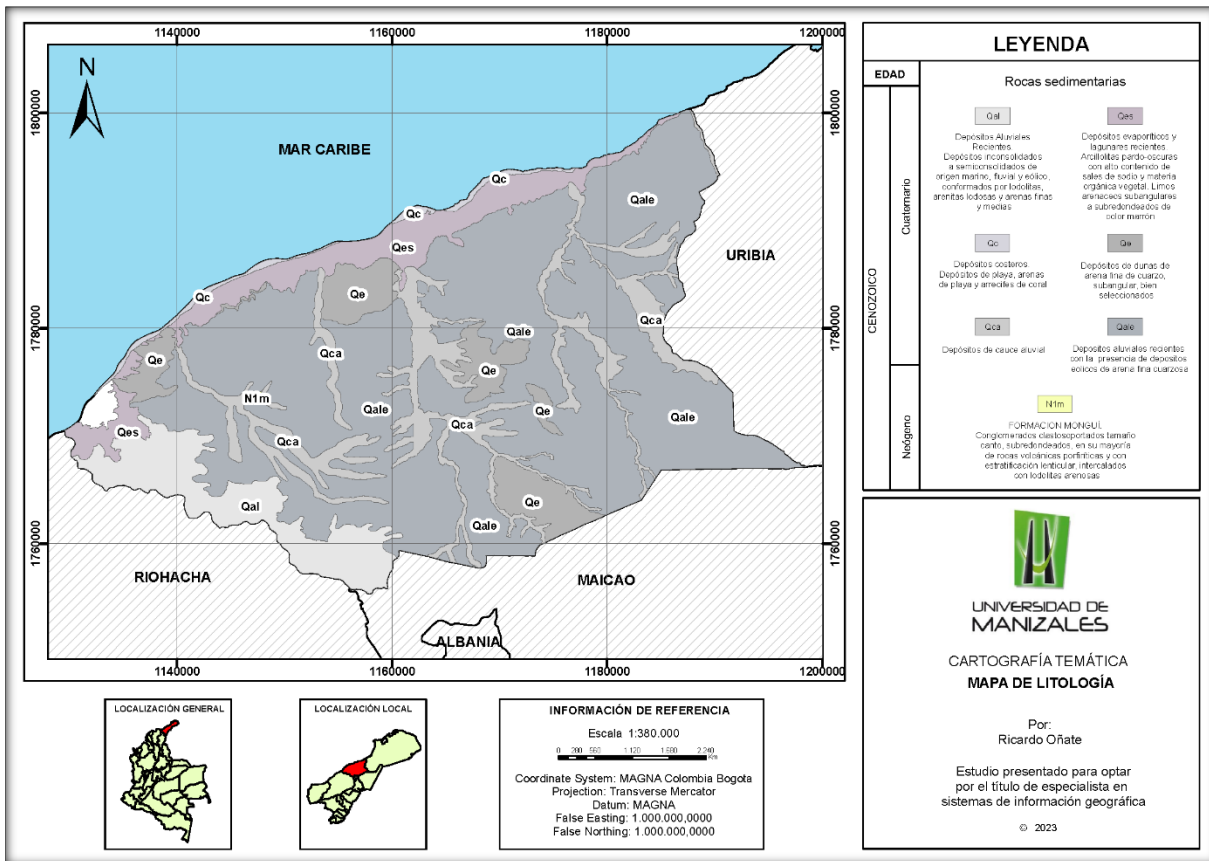


Figura 16: Mapa temático del factor litología. Fuente: autor.

# PRECIPITACIÓN

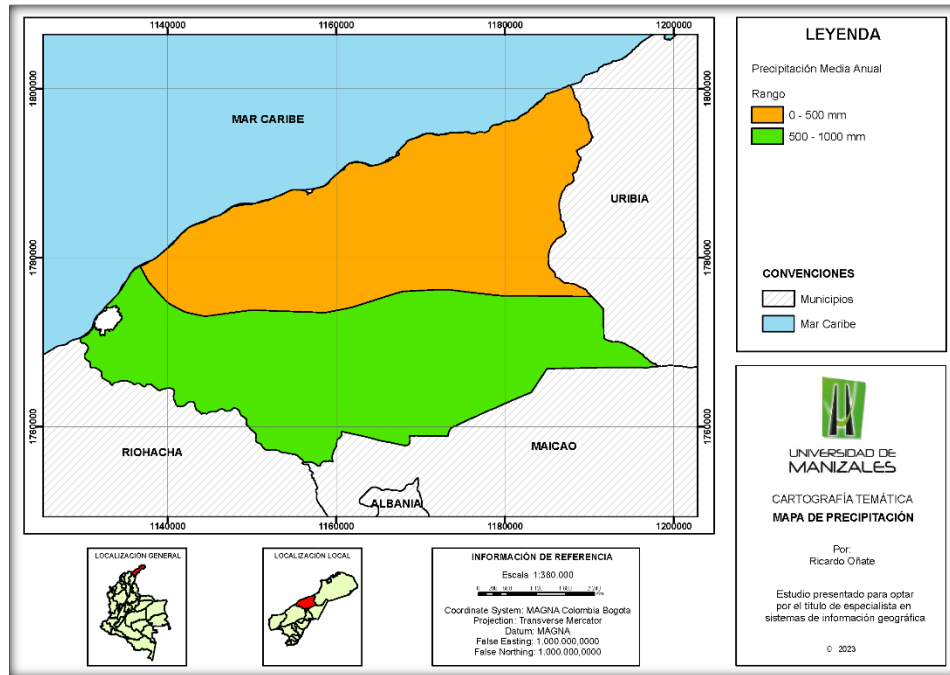


Figura 17: Mapa temático del factor precipitación. Fuente: autor.

# PENDIENTE

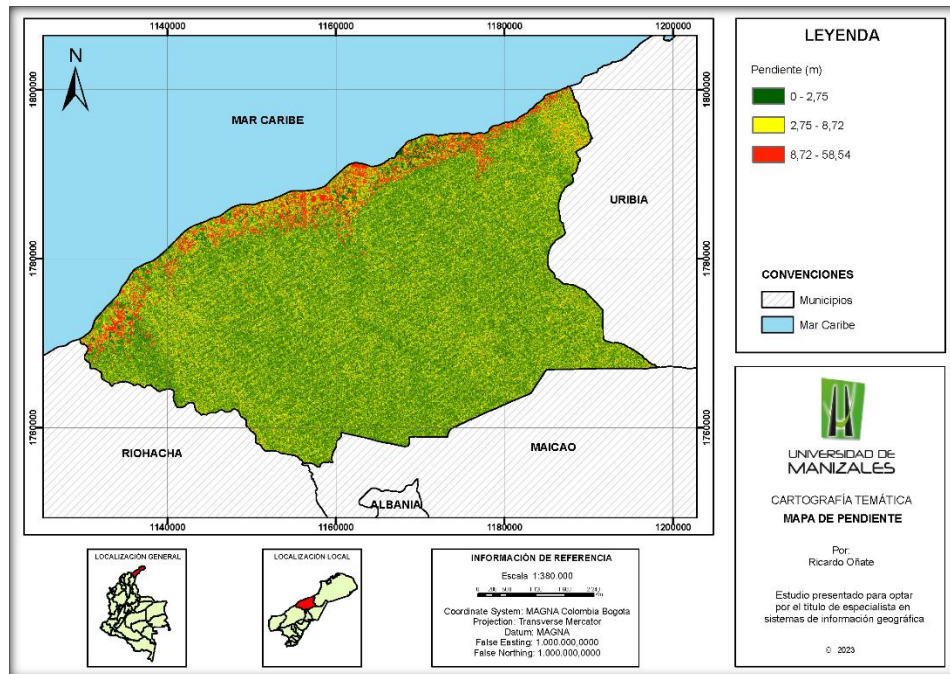


Figura 18: Mapa temático del factor pendiente. Fuente: autor.

### COBERTURA Y USO DEL SUELO

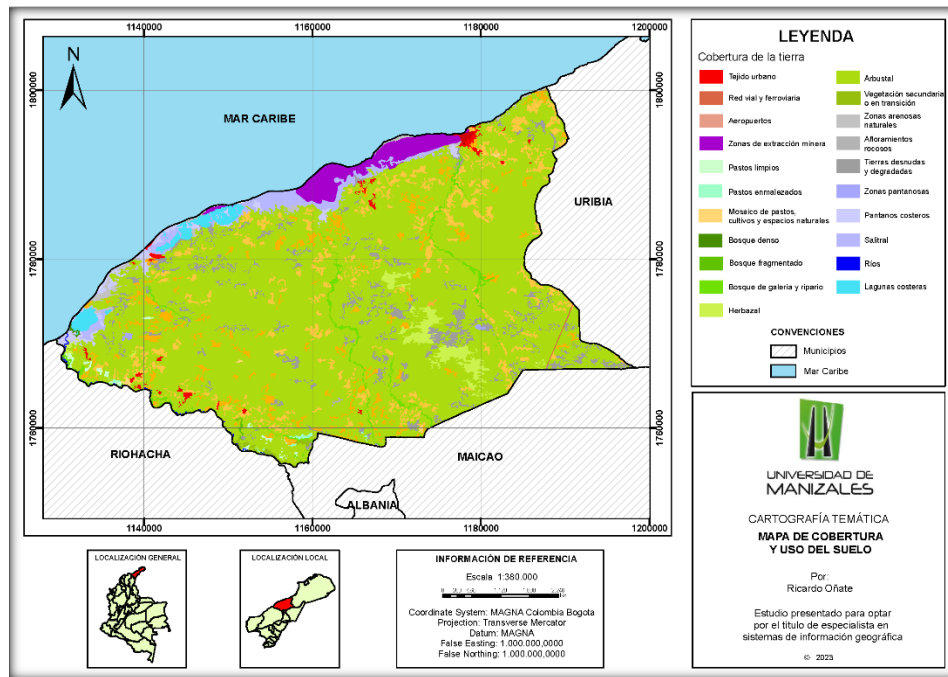


Figura 19: Mapa temático del factor cobertura y uso del suelo. Fuente: autor.

### DENSIDAD DE DRENAJE

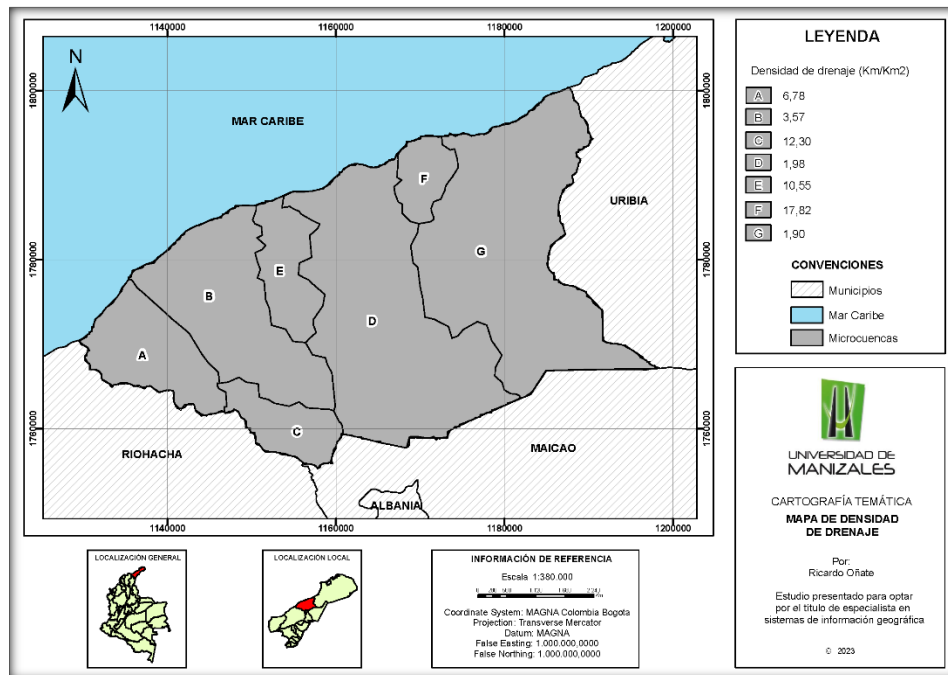


Figura 20: Mapa temático del factor densidad de drenaje. Fuente: autor.

MAPAS DE LA RECLASIFICACIÓN DE LOS FACTORES DE ESTUDIO

LITOLOGÍA

VALOR DE RECLASIFICACIÓN	LITOLOGÍA	COBERTURA DEL ÁREA DE ESTUDIO
3 - (Alto)	Los depósitos no consolidados de gravas y arenas intercalados frecuentemente con niveles o paquetes de limos y arcillas, que son comúnmente el resultado de procesos aluviales o de depósito en las vertientes	99,98%
2 - (Medio)	Las rocas sedimentarias normalmente consolidadas y semiconsolidadas de conglomerados y areniscas, que tienen permeabilidad y porosidades primarias (intergranulares) y secundarias como consecuencia del fracturamiento (fallas, y diaclasas principalmente)	0,02%
1 - (Bajo)	Las rocas de origen ígneo y metamórfico	0%

Tabla 12: Porcentaje de área cubierta por cada clase del factor litología. Fuente: autor.

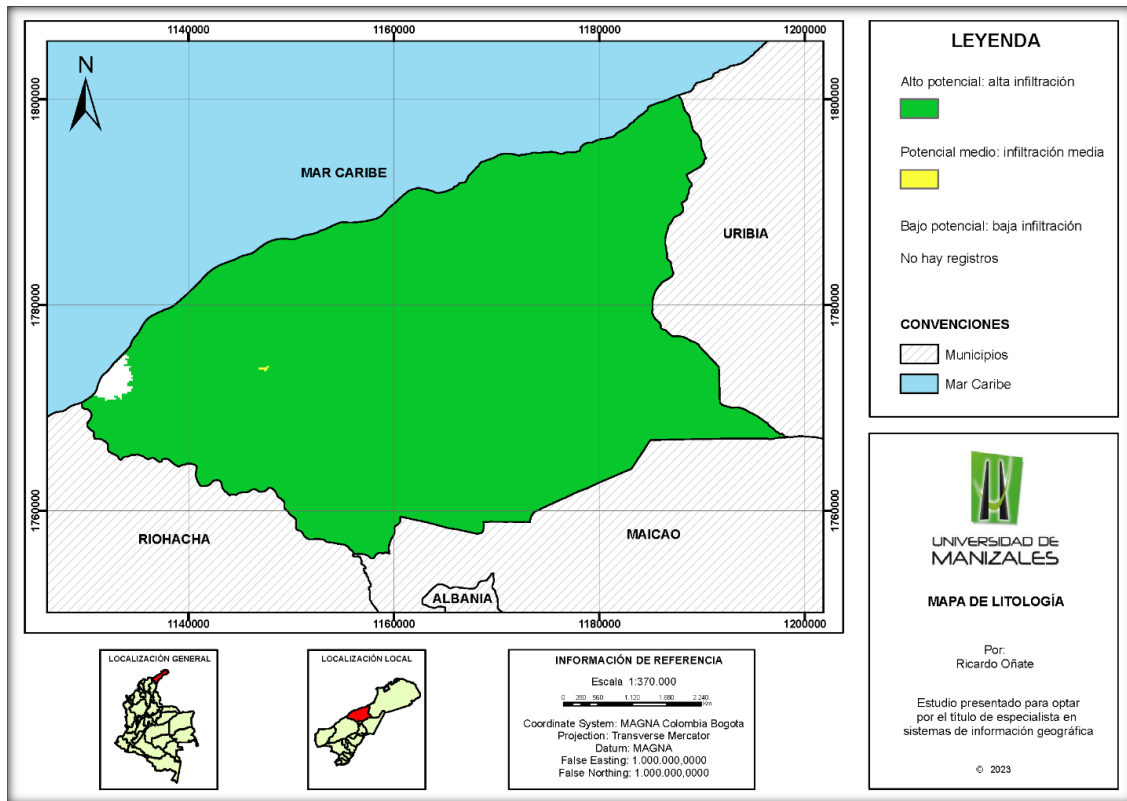


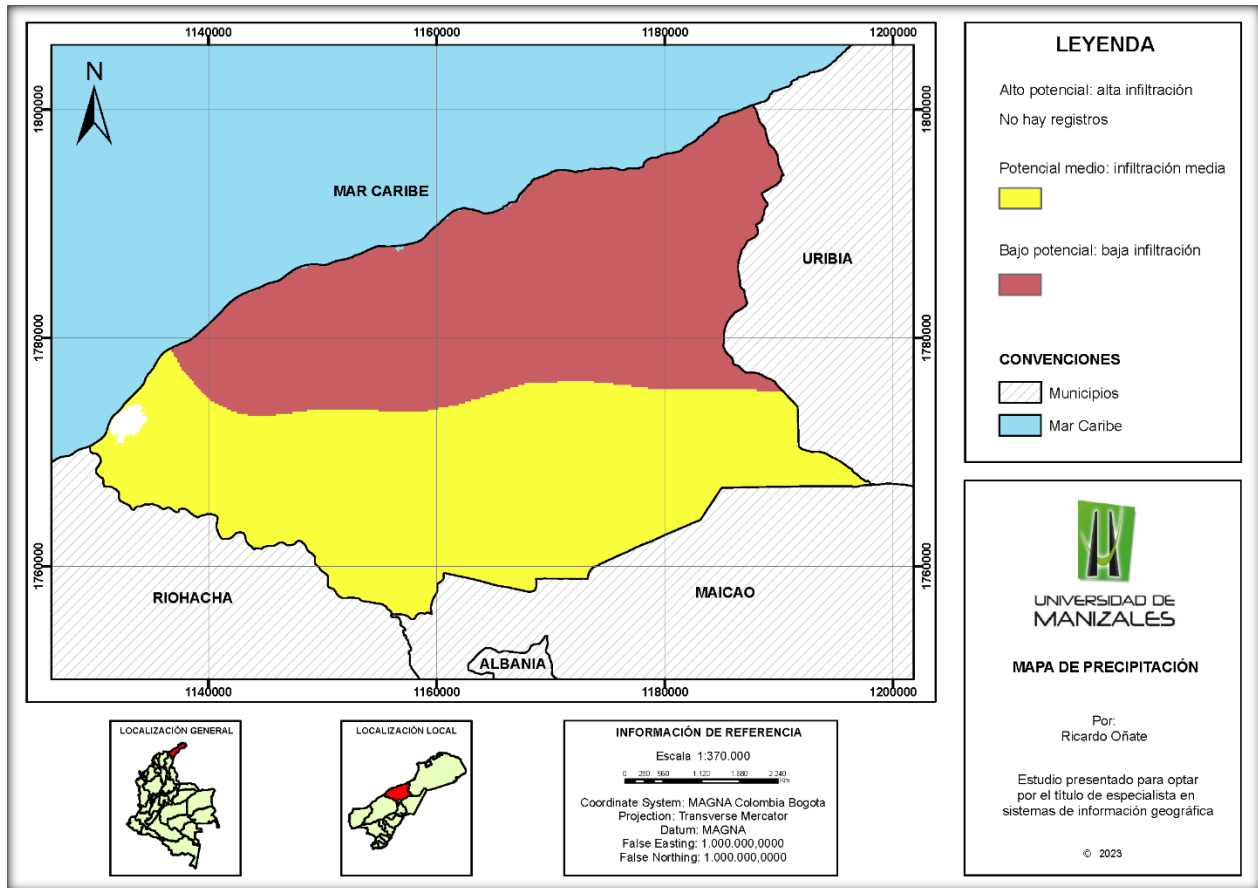
Figura 21: Potencial hidrogeológico del factor litología. Fuente: autor.

Como se puede observar en la *Figura 21*, en la zona de estudio predomina con un 99,98% la litología que favorece la infiltración de agua subterránea, se trata de depósitos sedimentarios no consolidados resultado de procesos aluviales y eólicos, los cuales tienen una alta porosidad y por tanto un alto potencial hidrogeológico. La zona con potencial medio representa tan solo el 0,02% y está localizada al occidente del área de estudio; se trata de rocas sedimentarias de la formación Monguí, la cual está compuesta por conglomerados clastosoportados, lodolitas y depósitos sedimentarios los cuales también favorecen la infiltración de agua subterránea, pero en menor medida. Para la zona de estudio no hay presentes litologías con potencial bajo.

## PRECIPITACIÓN

VALOR DE RECLASIFICACIÓN	PRECIPITACIÓN	COBERTURA DEL ÁREA DE ESTUDIO
3 - (Alto)	1001 - 1500 mm	0%
2 - (Medio)	501 - 1000 mm	51%
1 - (Bajo)	0 - 500 mm	49%

**Tabla 13:** Porcentaje de área cubierta por cada clase del factor precipitación. Fuente: autor.



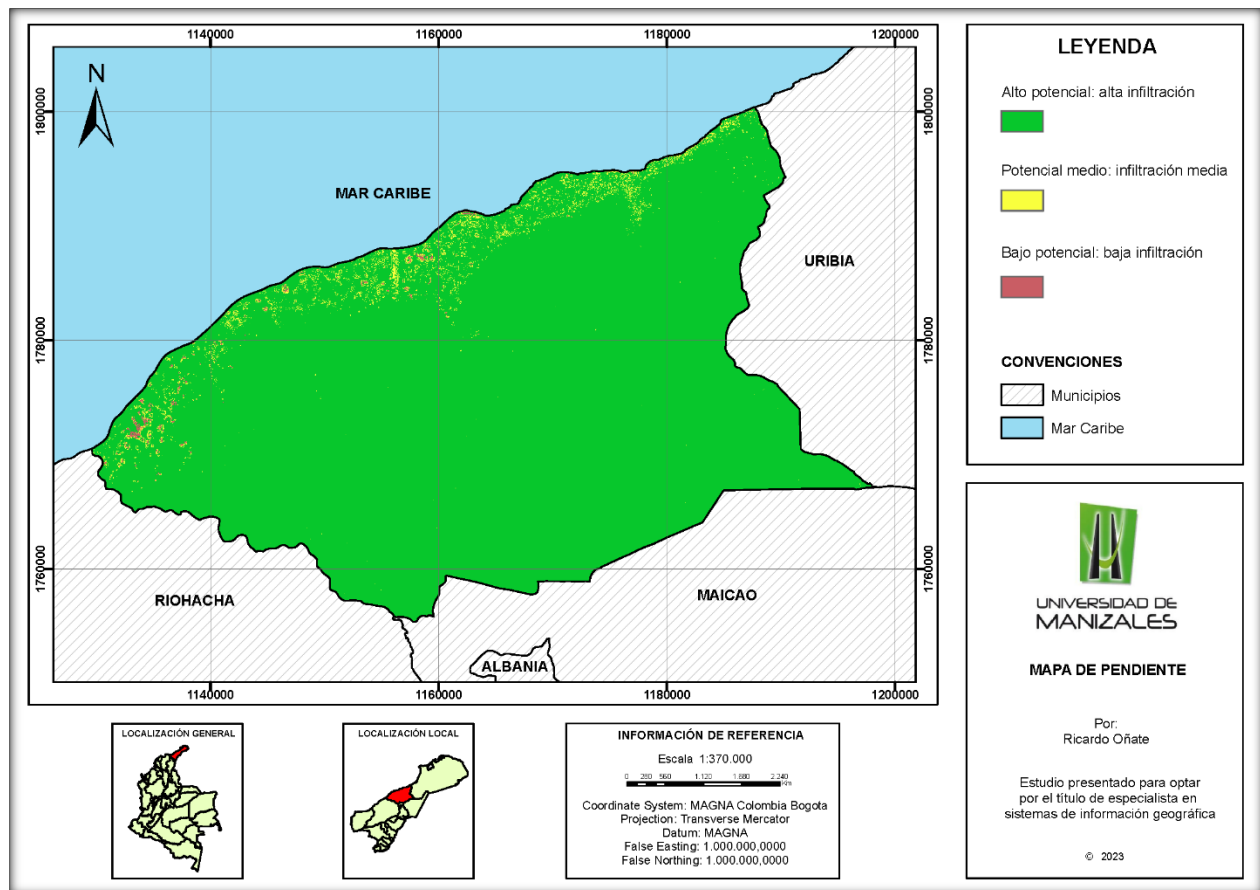
**Figura 22:** Potencial hidrogeológico del factor precipitación. Fuente: autor.

Como se puede observar en la *Figura 22*, hacia la zona sur del área de estudio hasta más o menos el centro, cubriendo el 51% de toda el área, se tienen los rangos de precipitación con valores entre 501 a 1000mm anuales, esta área representa la zona con potencial hidrogeológico medio, mientras que en la parte norte con un 49% se encuentran los rangos con valores de precipitación entre 0 a 500mm al año, estos representan el área con potencial hidrogeológico bajo. Para la zona de estudio no se registran valores de precipitación con alto potencial hidrogeológico.

**PENDIENTE**

VALOR DE RECLASIFICACIÓN	PENDIENTE	COBERTURA DEL ÁREA DE ESTUDIO
3 - (Alto)	Paisaje plano (pendiente entre 0° y 10°)	98,15%
2 - (Medio)	Paisaje ondulado (pendiente entre 11° y 20°)	1,63%
1 - (Bajo)	Paisaje montañoso (pendiente mayor a 21°)	0,22%

**Tabla 14:** Porcentaje de área cubierta por cada clase del factor pendiente. Fuente: autor.



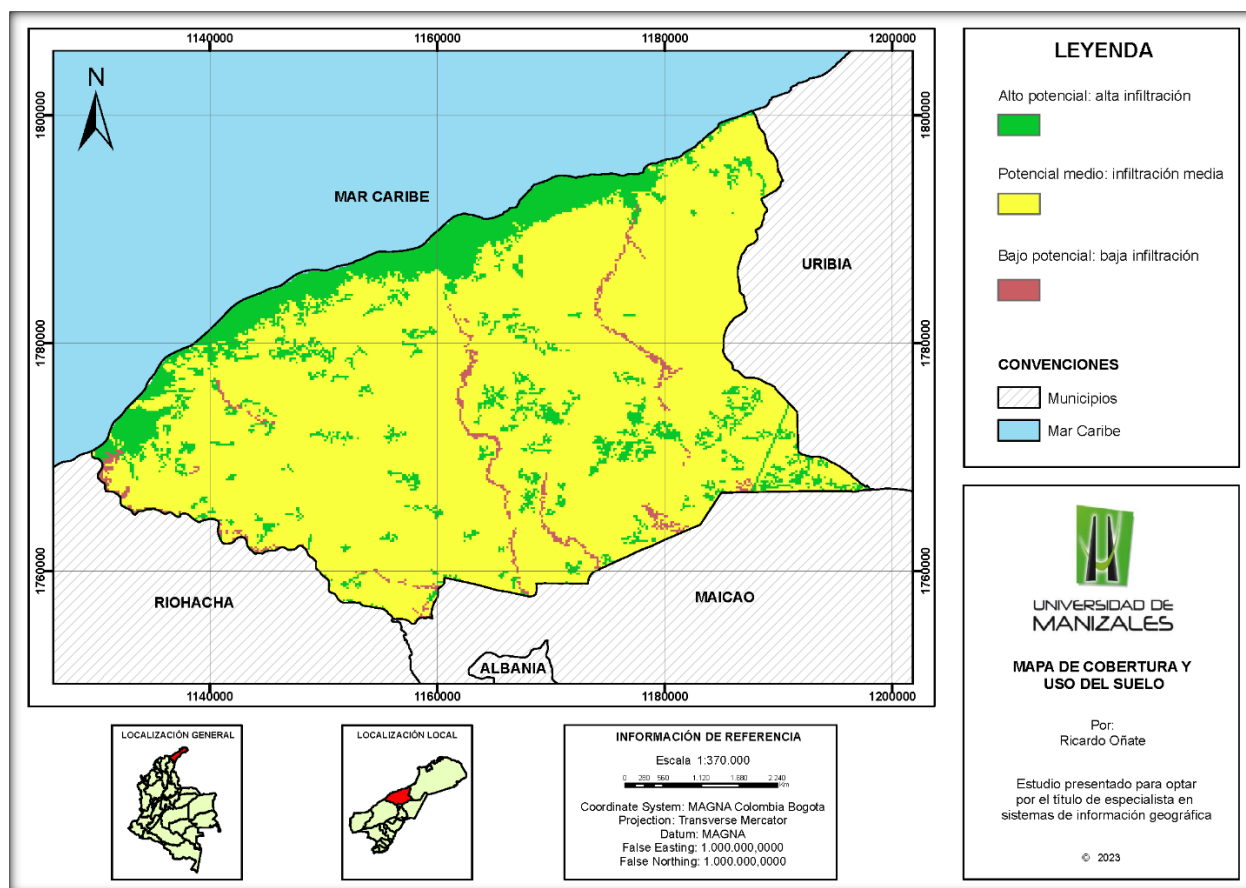
**Figura 23:** Potencial hidrogeológico del factor pendiente. Fuente: autor.

Como se puede observar en la *Figura 23*, en la zona de estudio predomina con un 98,15% los rangos de pendiente que mayormente favorecen la infiltración de aguas subterráneas, se tratan de pendientes entre los 0 y 10 grados, las cuales denotan un paisaje plano donde el agua puede depositarse fácilmente y recargar el sistema, esta área representa la zona con potencial hidrogeológico alto. Con un 1,63% los rangos de pendiente entre 11 y 20 grados que favorecen medianamente la infiltración de agua y denotan paisajes ondulados, estas se encuentran hacia la parte norte y noroccidental de la zona de estudio junto con los rangos de pendiente mayores a 21 grados de inclinación correspondientes a paisajes montañosos que favorecen en menor medida la infiltración, a estos les corresponde un 0,22%, estas áreas corresponden a las zonas con potencial hidrogeológico medio y bajo, correspondientemente.

## COBERTURA Y USO DEL SUELO

VALOR DE RECLASIFICACIÓN	COBERTURA Y USO DEL SUELO	COBERTURA DEL ÁREA DE ESTUDIO
3 - (Alto)	Los cultivos agrícolas de bajo porte (cereales), pastos y herbazales naturales, suelos desnudos	14,73%
2 - (Medio)	Los cultivos perennes (arbustos como café, cacao, oliva, uva, etc.), los arbustales, los pastos arbolados y los bosques muy intervenidos y fragmentados	83,36%
1 - (Bajo)	Bosques densos, bosques de galería y plantaciones forestales	1,91%

**Tabla 15:** Porcentaje de área cubierta por cada clase del factor cobertura y uso del suelo. Fuente: autor.



**Figura 24:** Potencial hidrogeológico del factor cobertura y uso del suelo. Fuente: autor.

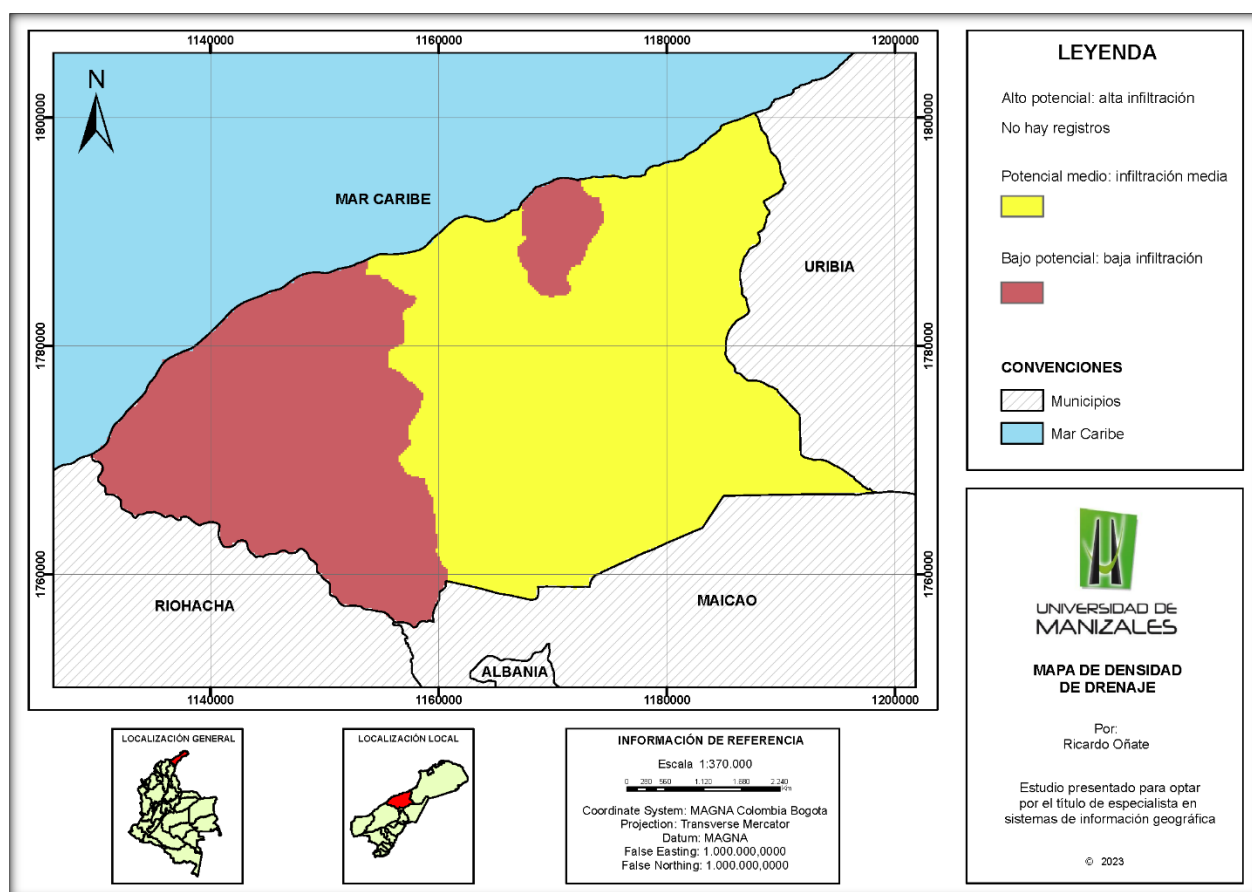
Como se puede observar en la *Figura 24*, en la zona de estudio predomina con un 83,36% las coberturas correspondientes a cultivos perennes, los arbustales, los pastos arbolados y bosques muy fragmentados estos se encuentran localizados hacia la parte central de la zona y representa el área con potencial hidrogeológico medio. Con un 14,73% las coberturas correspondientes a cultivos agrícolas de bajo porte, pastos, herbazales naturales y suelos desnudos, estos tienen el más alto favorecimiento a la infiltración y están localizados en mayor medida hacia las zonas de playa en la parte de norte y de forma dispersa en toda el área, esta parte representa la zona con alto potencial hidrogeológico. Con un 1,91% en las coberturas que menos favorecen la recarga de agua se encuentran los bosques densos,

bosques de galería y plantaciones forestales, esta área representa la zona con bajo potencial hidrogeológico.

## DENSIDAD DE DRENAJE

VALOR DE RECLASIFICACIÓN	DENSIDAD DE DRENAJE	COBERTURA DEL ÁREA DE ESTUDIO
3 - (Alto)	0,5 a 1,5 Km/Km <sup>2</sup> (cuencas con drenaje pobre)	0%
2 - (Medio)	1,51 a 2,5 Km/Km <sup>2</sup> (cuencas con drenaje normal)	61%
1 - (Bajo)	2,51 a 3,5 Km/Km <sup>2</sup> (cuencas excepcionalmente bien drenadas)	39%

**Tabla 16:** Porcentaje de área cubierta por cada clase del factor densidad de drenaje. Fuente: autor.



**Figura 25:** Potencial hidrogeológico del factor densidad de drenaje. Fuente: autor.

Como se puede observar en la *Figura 25*, en la zona de estudio predomina con un 61% las microcuencas con densidad de drenaje entre 1,51 a 2,5Km/Km<sup>2</sup> consideradas como cuencas con drenaje normal, están localizadas hacia el centro y este de la zona de estudio, esta área representa la zona con potencial hidrogeológico medio. Con un 39% las microcuencas con densidad de drenaje entre 2,51 a 3,5Km/Km<sup>2</sup> consideradas como cuencas excepcionalmente bien drenadas las cuales favorecen en menor medida la filtración de agua subterránea, están localizadas hacia la parte occidental y norte de la zona de estudio, estas representan el área con potencial hidrogeológico bajo. En la zona de estudio no se registran microcuencas con valores de densidad de drenaje 0,5 a 1,5 Km/Km<sup>2</sup>, catalogadas dentro de este estudio como zonas con mayor potencial de agua subterránea en cuanto a densidad de drenaje.

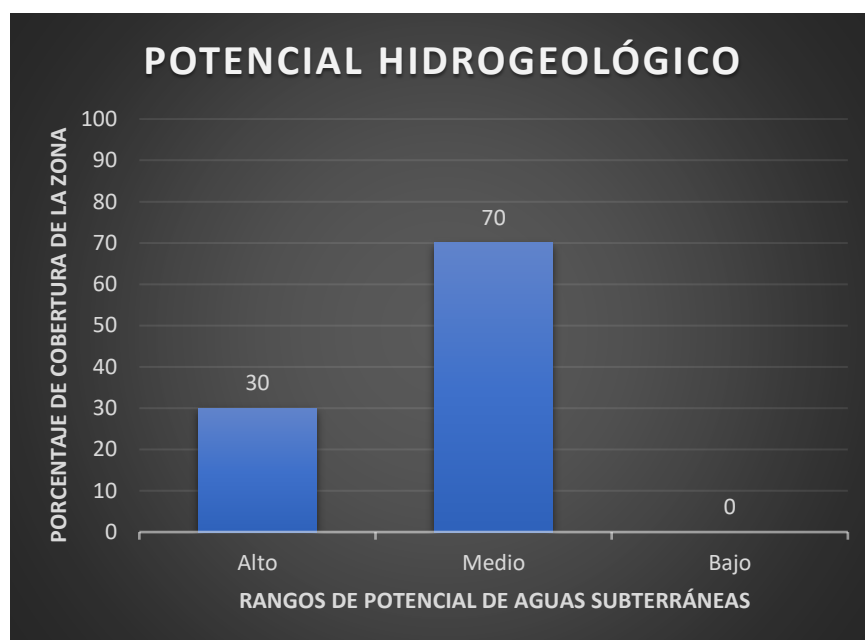
## 17. MAPA DE POTENCIAL UBICACIÓN DE ACUÍFEROS SUBTERRÁNEOS (POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO)

En la *Tabla 17* se relacionan los resultados de porcentaje de cobertura para cada rango de potencial hidrogeológico para la zona de estudio.

POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO	COBERTURA DEL ÁREA DE ESTUDIO
Alto	30%
Medio	70%
Bajo	0%

**Tabla 17:** Porcentaje de cobertura del potencial hidrogeológico. Fuente: autor.

En la *Figura 26* se muestra un gráfico que representa los porcentajes de cobertura de los diferentes rangos de potencial para la zona de estudio.



**Figura 26:** Gráfico con porcentajes de cobertura del potencial hidrogeológico. Fuente: autor.

En la *Figura 27* se muestra el mapa de potencial hidrogeológico de la zona de estudio.

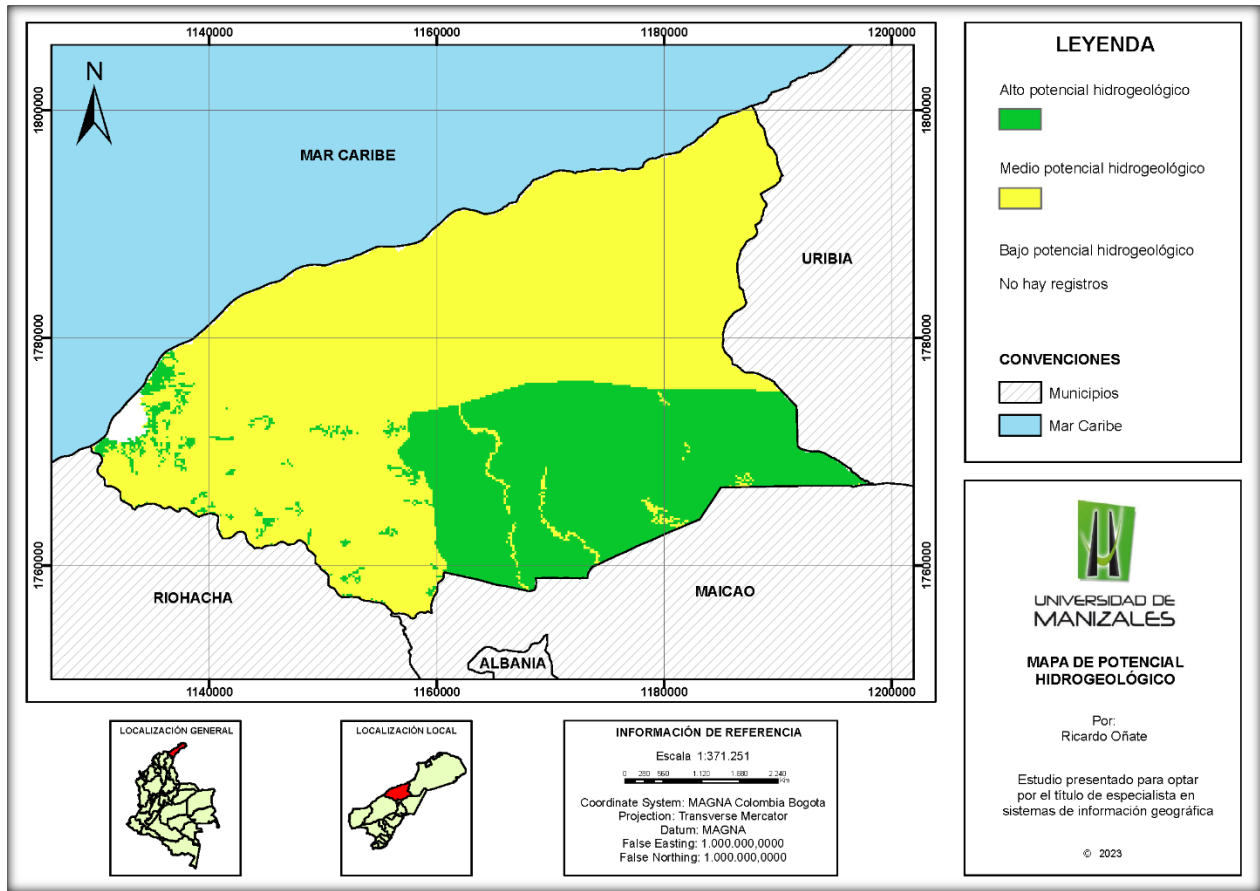


Figura 27: Mapa de potencial hidrogeológico. Fuente: autor.

## 18. DISCUSION DE RESULTADOS

Derivado de la revisión de las metodologías de (Yeh, Lee, Hsu, & Chang, 2009); (Soares, y otros, 2012) y (Mahmoud, Alazba, & Amin, 2014), se definieron los factores o criterios de interés para el presente trabajo. Estas metodologías contienen la mayor cantidad de factores que pueden ser identificados sin medidas directas y muestran una secuencia lógica y ordenada de pasos para su análisis.

La información espacial de los factores de litología, precipitación, pendiente, cobertura y uso del suelo y densidad de drenaje pudo ser procesada de una forma conjunta usando el análisis espacial. El análisis espacial permitió realizar una selección ponderada del sitio. Las diferentes herramientas utilizadas permitieron clasificar los píxeles de las imágenes y asignar una importancia relativa a cada factor de análisis. El resultado de la selección ponderada del sitio fue una superficie de idoneidad con valores clasificados del 1 al 3, donde 1 era el menos adecuado y 3 el más adecuado. Esto permitió obtener las mejores opciones de sitio para el almacenamiento y la recarga de aguas subterráneas.

Por ser el departamento de La Guajira una zona seca, la recarga es controlada por una vegetación pobre, un suelo permeable, precipitación de alta intensidad y una pendiente baja (De Vries y Simmers, 2002). Con esta premisa se categorizó con valores altos de probabilidad de encontrar aguas subterráneas las áreas con las siguientes características:

- Litología de alta porosidad como los depósitos no consolidados de gravas y arenas, los depósitos de vertiente, eólicos y aluviales.
- Cobertura del suelo con cultivos de bajo porte y suelos desnudos.
- Mayores registros de precipitación.
- Pendientes de baja inclinación que denotan paisajes planos.
- Densidad de drenaje que contengan microcuencas con drenaje pobre.

Para el área de estudio la mayor limitante para la recarga es lo referente al ingreso de agua al sistema en forma de precipitación. El mayor rango (1001 - 1500 mm por año) no ocurre en el territorio, mientras que los valores medios (501 - 1000 mm por año) ocurren en un 51% y los valores bajos (0 - 500 mm por año) en un 49%.

En Colombia, las zonas más áridas tienen promedios de precipitación anuales de 500 mm y las más húmedas de 6000mm. En la zona de estudio, los rangos que predominan (0 - 1000 mm por año) indica que las precipitaciones son escasas. Por ello la importancia de que no sea interceptada y se percole favorablemente.

En el área de estudio la litología con el mayor valor de probabilidad de contener aguas subterráneas ocupa un 99,98% de la zona. Es el factor más importante porque mientras que en las zonas húmedas la precipitación supera la evapotranspiración, en las zonas secas ocurre lo contrario, por lo que la porosidad juega un papel fundamental para que las lluvias se profundicen antes que se evaporen. La importancia del tipo de roca radica en que este controla la circulación y el almacenamiento de las aguas subterráneas a partir de la porosidad y permeabilidad. Por esta razón, este factor es la base de los estudios hidrogeológicos tradicionales (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2014); (Al Saud, 2010).

Otro factor de la zona de estudio que favorece la probabilidad de encontrar aguas subterráneas es la cobertura y uso del suelo. Predominan los cultivos perennes, los arbustales, los pastos arbolados y los bosques muy intervenidos y fragmentados con un 83,36% de área. Como esta vegetación ocupa un solo estrato vertical, no se sobreponen los individuos y al predominar las hojas lineares no se retiene la lluvia, lo que permite que pueda fluir hacia el suelo.

Respecto a la pendiente, también favorece el potencial hidrogeológico porque predomina el paisaje plano en un 98,15% del territorio. Las bajas pendientes favorecen la percolación ya que no se presenta escorrentía superficial hacia los drenajes.

La densidad de drenaje refuerza la identificación de las áreas de almacenamiento porque funciona como un indicador del potencial de infiltración. En el municipio de Manaure el 61% del terreno tiene una densidad de 1,51 a 2,5 Km de drenajes por Km<sup>2</sup>, catalogada como una zona de potencial media que favorece la infiltración del agua.

A diferencia de las técnicas tradicionales a partir de métodos directos de prospección de aguas subterráneas en donde la litología tiene una importancia absoluta, esta propuesta tiene en cuenta y muestra la importancia de otros factores en la recarga y almacenamiento de aguas subterráneas.

## 19. CONCLUSIONES

Se realizó un estudio de prospección de aguas subterráneas usando métodos de análisis espacial en comunidades indígenas del municipio de Manaure en el departamento de La Guajira.

La definición de los intervalos de clase (alto, medio y bajo) permitió la agrupación de datos que comparten características comunes para cada uno de los factores de estudio en función de que tanto inhiben o facilitan la recarga y almacenamiento de aguas subterráneas, esto facilitó su análisis a través de la implementación de las herramientas SIG.

Para el municipio de Manaure se determinó un alto potencial hidrogeológico para las zonas donde se evidenció un efecto combinado de suelos permeables, presencia de precipitaciones, cobertura pobre y pendientes suaves.

Para la zona de estudio se obtuvieron resultados que indican que el 30% del área total tiene un alto potencial hidrogeológico, el 70% tiene un potencial medio y no se encontraron valores con zonas de potencial bajo. Estos resultados evidencian que para la zona de estudio en general hay altas probabilidades de encontrar agua subterránea, en específico, para las zonas que se definieron con potencial alto.

La integración de diversos factores o variables en estudios de prospección de aguas subterráneas permiten tener un concepto más amplio de la zona que se desea analizar y esto a

su vez facilita la toma de decisiones a la hora de elegir sitios con mayores probabilidades de encontrar el recurso.

Los estudios de prospección de aguas subterráneas resaltan la necesidad de enfoques multidisciplinarios que permitan la colaboración entre profesionales de diferentes ámbitos y las comunidades que lo requieran para la evaluación de iniciativas de gestión del recurso hídrico que aseguren soluciones a las necesidades de las comunidades.

## 20. RECOMENDACIONES

Realizar estudios adicionales concernientes a exploración de aguas subterráneas in situ, como la implementación de métodos geofísicos convencionales (SEV, geoelectrica, entre otros) en las áreas cuyo resultado arrojó probabilidades altas y medias de encontrar aguas subterráneas, esto con el fin de dar mayor robustez al estudio realizado y que además va a permitir corroborar los resultados obtenidos en la prospección.

Actualización de los datos obtenidos para los factores de estudio, esto debido a que en los portales oficiales de las entidades gubernamentales de donde se extrajo la información base se encontraron datos de años no recientes, se necesita una serie de datos más amplio que sirva para la obtención de resultados actuales. De igual manera, el estudio es aplicable en cualquier rango de fechas.

## 21. BIBLIOGRAFÍA

- 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.
- Andreo, B., Vías, J., López-Geta, J., Carrasco, F., Duran, J., & Jimenez, P. (2004). *Propuesta metodológica para la estimación de la recarga en acuíferos carbonáticos*. Boletín Geológico y Minero.
- Arévalo, D., Lozano, J., & Sabogal, J. (2010). *Estudio nacional de huella hídrica Colombia sector agrícola*. CORE.
- Avinash, K., Deepika, B., & Jayappa, K. (2013). *Integration of hydrological factors and demarcation of groundwater prospect zones: insights from remote sensing and GIS techniques*. Environmental Earth Sciences.
- Beden, N., Soydan-Oksal, N., Arıman, S., & Ahmadzai, H. (2023). *Delineation of a Groundwater Potential Zone Map for the Kızılırmak Delta by Using Remote-Sensing-Based Geospatial and Analytical Hierarchy Processes*. Sustainability.
- Choudhury, A., K, J., & Chowdary, V. (2010). *Delineation of groundwater recharge zones and identification of artificial recharge sites in West Medinipur district, West Bengal, using RS, GIS and MCDM techniques*. Environmental Earth Sciences.
- Daza Daza, A. R., Serna Mendoza, C. A., & Carabalí Angola, A. (2018). *El Recurso Agua en las Comunidades Indígenas Wayuu de La Guajira Colombiana. Parte 2: Estudio Cualitativo de las Condiciones de Higiene, Aseo y Disponibilidad de Agua*. Scielo.
- De Vries, J. J., & Simmers, I. (2002). *Groundwater recharge: an overview of processes and challenges*. Hydrogeology Journal.
- Edet, A., Okereke, C., Teme, S., & Esu, E. (1998). *Application of remote-sensing data of groundwater exploration: A case study of the Cross River State southeastern Nigeria*. Hydrogeology Journal.
- Elewa, H., & Qaddah, A. (2011). *Groundwater potentiality mapping in the Sinai Peninsula, Egypt, using remote sensing and GIS-watershed-based modeling*. Hydrogeology Journal.
- Guzmán, A. (2019). *Respuesta hidrológica de una cuenca de bosque tropical húmedo de montaña y su asociación con eventos meteorológicos, México*. ResearchGate.
- He, T., & Wang, Y. (2008). *A semi-distributed groundwater recharge model for estimating water-table and water-balance variables*. Hydrogeology Journal.
- Hernández, M. (2010). *Metodología para la prospección de agua subterránea utilizando información satelital y datos obtenidos de forma tradicional*. Revista politécnica.

- IDEAM. (2010). *Capítulo 4: Oferta y uso de agua subterránea en Colombia. Estudio nacional de agua.*
- IDEAM. (2014). *Capítulo 3: Agua subterránea. Estudio Nacional del agua.*
- INGEOMINAS. (2009). *Cartografía geológica de las planchas 7 - Ranchería, 8 – Riohacha, 9 – Uribia, 13 – Dibulla, 14 – Albania y 15 – 15 bis Maicao.*
- INGEOMINAS-UNAL. (2009). *Proyecto cartografía e historia de la alta guajira, implicaciones en la búsqueda de recursos minerales.*
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. (2006). *Los Sistemas de Información Geográfica.* Redalyc.
- Mahmoud, S., Alazba, A., & Amin, M. (2014). *Identification of potential sites for groundwater recharge using a GIS-Based decision support system in Jazan region Sausi Arabia.* Water Resources Management.
- Mejía, M. (2022). *Caracterización Hidrogeoquímica De Los Municipios de Manaure y Uribia en La Guajira, Colombia.* Universidad del Norte.
- Mendez Monroy, J. (2013). *Metodología para la medición de variables hidrometeorológicas que facilitan la implementación de modelos dinámicos de interceptación de lluvia en el contexto Colombiano.* Universidad Nacional de Colombia.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2014). *Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos.*
- Monsalve, G. (1999). *Hidrología en la ingeniería.* Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Mosquera, F., Arango, J., Carreño, J., & Aguilera, H. (1976). *Exploración de acuíferos de la Alta y Media Guajira. Capítulo I, Geología.*
- Quiroz, M., Escobar, J., Martínez, D., Betancur, T., & Massone, H. (2007). *Los sistemas de información geográfica como herramienta de apoyo en los estudios hidrogeológicos dos casos de estudio en América Latina.* Revista ingenierías Universidad de Medellín.
- Raneesh, K., & Thampi, S. (2013). *A Simple Semi-distributed Hydrologic Model to Estimate Groundwater Recharge in a Humid Tropical Basin.* Water Resour Manage.
- Rashid, A., Ayub, M., Ullah, Z., Ali, A., Sardar, T., Iqbal, J., . . . al., e. (2023). *Groundwater Quality, Health Risk Assessment, and Source Distribution of Heavy Metals Contamination around Chromite Mines: Application of GIS, Sustainable Groundwater Management, Geostatistics, PCAMLR, and PMF Receptor Model.* International Journal of environmental research and public health.
- Ribeiro, D., Rocha, W., & Garcia, A. (2011). *Modelagem da potencialidade hidrica das aguas subterraneas da subbacia do rio Siriri, Brasi, com base em Sistema de Informação Geográficas e técnicas de Sensoriamento Remoto.* Revista Ambiente & Água.

- Rincón Rivera, S. (2018). *Propuesta metodológica para la prospección de acuíferos subterráneos usando métodos de análisis espacial en el departamento del Cesar, Colombia*. UNIGIS.
- Sanz, G. (2014). *Modelo y simulación hidrogeológica para la sostenibilidad del acuífero libre de los Montes Torozos*. Universidad de La Rioja.
- Sarmiento, D. (2012). *Informe técnico de evaluación de las condiciones de agua, saneamiento e higiene de 11 comunidades wayúu en el municipio de Manaure, departamento de La Guajira*. UNICEF.
- Servicio Geológico Colombiano. (2016). *Modelo Hidrogeológico del departamento de La Guajira*.
- Soares, P., Pereira, S., Simoes, S., Bernardes, G., Barbosa, S., & Trannin, I. (2012). *The definition of potential infiltration areas in Guaratinguetá watershed, Paraíba so Sul Basin, southeastern Brazil: an integrated approach using physical and land-use elements*. Environmental Earth Sciences.
- Soundranayagam, J. P., Chandrasekar, N., & Magesh, N. (2012). *Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques*. Geoscience frontiers.
- Velez Otálvaro, M., & Vásquez Ariza, L. (2007). *Métodos para determinar la recarga en acuíferos*. Universidad Nacional de Medellín.
- Yaw Danso, S., & Ma, Y. (2023). *Geospatial techniques for groundwater potential zones delineation in a coastal municipality, Ghana*. ELSEVIER.
- Yeh, H., Lee, C., Hsu, K., & Chang, P. (2009). *GIS for the assessment of the groundwater recharge potential zone*. Environmental Geology.

## 22. SOFTWARE UTILIZADO

- ArcGis v10.8



- Microsoft Office 2019



- Google Earth Pro



- Corel Draw x7

