



**Caracterización de la recarga y análisis del balance hídrico, enfocado en la
evaluación del Recurso Hídrico Subterráneo como soporte de oferta en la ciudad de
Santa Marta (Colombia).**

Víctor Manuel Perdomo Melo

Código: 11962021658

Universidad Antonio Nariño

Programa de Maestría en Hidrogeología Ambiental

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2023

**Caracterización de la recarga y análisis del balance hídrico, enfocado en la
evaluación del Recurso Hídrico Subterráneo como soporte de oferta en la ciudad de
Santa Marta (Colombia).**

Víctor Manuel Perdomo Melo

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Indicar el título que se obtendrá. Por ejemplo, Ingeniero Mecánico

Director: Doctor Diego Felipe Gómez Gutiérrez

Universidad Antonio Nariño
Programa de Maestría en Hidrogeología Ambiental
Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil
Ciudad, Colombia
Año

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

_____, Cumple con

los requisitos para optar

Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Ciudad, Día Mes Año.

Contenido

1	Introducción.....	13
2	Objetivos.....	16
2.1	Objetivo principal.....	16
2.2	Objetivos Específicos	16
3	Marco Teórico.	18
4	Área de estudio	21
5	Metodología.....	25
6	Resultados.....	27
6.1	Modelo Geológico.....	27
6.1.1	Geología Regional.....	27
6.1.2	Geología Local	27
6.2	Modelo Geofísico.....	33
6.2.1	Registros Eléctricos.....	33
6.2.2	Tomografías.....	37
6.3	Hidrogeología.....	45
6.4	Hidrología.....	48
6.4.1	Climatología	48
6.4.2	Precipitación.....	49
6.5	Modelo Hidrogeoquímico	56

6.5.1	Toma de Muestras	57
6.5.2	Diagramas de Piper	59
6.5.3	Diagramas de Stiff.....	60
6.5.4	Evolución Hidroquímica	61
6.5.5	Isotopía	62
6.6	Modelo Hidráulico y Piezometría Pozo Tayrona_1	67
7	Análisis y Discusión de Resultados.....	¡Error! Marcador no definido.
8	Conclusiones.....	72
9	Bibliografía.....	75

Lista de Figuras

Figura 1 Ubicación del área de estudio.....	22
Figura 2 Área Rio Manzanares y área de los acuíferos.	23
Figura 3 Geología del área de estudio.....	28
Figura 4 Registro de Pozo Tayrona_1.	36
Figura 5 Registro de Pozo Tayrona_2.	37
Figura 6 Tomografías que caracterizan el área de estudio.....	38
Figura 7 Tomografía de Resistidad Eléctrica Polideportivo.....	39
Figura 8 Tomografía de Resistidad Eléctrica barrio Santa Ana.	41
Figura 9 Mapa hidrogeológico área de estudio.....	45
Figura 10 Cuenca Hidrográfica del rio manzanares.	48
Figura 11 Análisis temporal multianual mensual de la precipitación.....	50
Figura 12 Isoyetas desde enero a junio.....	51
Figura 13 Isoyetas desde julio a diciembre.....	52
Figura 14 Precipitación para el área de estudio.	54
Figura 15 Análisis temporal multianual mensual de la temperatura.....	55
Figura 16 Temperatura media para el área de estudio.	55
Figura 17 Análisis temporal mensual de la ETP.....	56
Figura 18 Ubicación de los puntos de muestras para caracterización hidrogeoquímica.	56
Figura 19 Diagrama de Pippet.	60
Figura 20 Diagrama de stiff.....	61
Figura 21 PH del acuífero de Santa Marta.....	65

Figura 22 Salinidad del acuífero de Santa Marta.....	66
Figura 23 ubicación de pozos con pruebas de Bombeo.....	67
Figura 24 Prueba de Bombeo Piezómetro Tayrona_1	68
Figura 25 Prueba de Bombeo Piezómetro Tayrona_1	68
Figura 26 Prueba de Bombeo Pozo universidad Cooperativa de Colombia.....	69
Figura 27 Datos de piezometría Pozo Tayrona_1.....	70
Figura 28 Datos de Conductividad Pozo Tayrona_1.....	71

Lista de tablas

Tabla 1 Datos ubicación Pozo Tayrona 1.	23
Tabla 2 Datos ubicación muestra Rio Manzanares Bonda.	24
Tabla 3 Descripción de muestra de esquisto de Gaira	29
Tabla 4 Descripción de muestra Batolito de Santa Marta.....	30
Tabla 5 Descripción de muestra Depósitos aluviales Recientes, (Qal).	32
Tabla 6 Estratigrafía del Piezómetro Tayrona 1	33
Tabla 7 Clasificación Hidrogeológicas del área de estudio.	46
Tabla 8 Estaciones de precipitación analizadas	49
Tabla 9 Registro fotográfico Toma de muestras.....	58
Tabla 10 Datos de Calidad de agua tomados del pozo Tayrona 1.	58
Tabla 11 Resultados del análisis de isotopos estables para el acuífero de Santa Marta- Rio Manzanares.	63
Tabla 12 Datos de Isotopía Obtenidos para el área de estudio.	63
Tabla 13 propiedades Hidráulicas del pozo Tayrona_1	69

(Dedicatoria)

*Dedicado a Alejandro y a mi familia, gracias por todo
el apoyo.*

Agradecimientos

En la realización de este trabajo hubo personas e instituciones que contribuyeron para lograr su conclusión por lo tanto agradezco a:

La Universidad Antonio Nariño, por ser el espacio donde se desarrolló esta Maestría, a la Universidad del Magdalena, por el suministro de los datos y el apoyo otorgado por el personal para la toma de muestras, a Diego Gómez mi orientador, por todo el apoyo recibido de su parte, a Jorge Corrales quien tiene un amplio, si no el mayor conocimiento del acuífero de Santa Marta, gracias por las charlas y los datos, a Hugo y Andrés, quienes sirvieron de compañía en las jornadas de campo y escritura con el mayor entusiasmo.

Resumen

La caracterización de la recarga hacia el acuífero de Santa Marta, fue realizada mediante la implementación y descripción de diferentes modelos como el modelo geológico, el modelo hidrológico, el modelo hidráulico y la validación y confirmación con el modelo hidrogeoquímico.

Las técnicas de isotopía cobran relevancia a la hora de confirmar la proveniencia de las aguas de recarga, como se observa en esta caracterización, convirtiéndose en un validador de las formas de recarga, para el caso del acuífero de Santa Marta se confirma de manera concreta que los depósitos aluviales recientes (Qal) se recargan por parte de río Manzanares principalmente, siendo aguas jóvenes confirmadas por los análisis de tritio mostrando una huella isotópica similar de oxígeno y deuterio el acuífero y el río. Además se presenta la importancia de la instrumentación de los acuíferos para el monitoreo de la recarga y posibles contextos de sobre explotación como se evidencia en el acuífero de Santa Marta.

Palabras clave: Hidrogeología, recarga potencia, recarga, hidrogeoquímica, isotopía, acuífero de Santa Marta.

Abstract

The recharge process of the Santa Marta aquifer has been studied by using various models such as the geological, hydrological, hydraulic, and hydrogeochemical models. Isotopic techniques have been used to confirm the origin of the recharge waters, which helped validate the recharge forms. For Santa Marta aquifer, it has been confirmed that the Manzanares River is the primary source of recharge for the recent alluvial deposits (Qal). Young waters have been confirmed by tritium analyzes, showing a similar isotopic fingerprint of oxygen and deuterium in both the aquifer and the river. The importance of aquifer instrumentation has also been presented in monitoring recharge and possible contexts of overexploitation, as evidenced in the Santa Marta aquifer.

Keywords: Hydrogeology, power recharge, recharge, hydrogeochemistry, isotopia, Santa Marta aquifer.

1 Introducción

Santa Marta es una ciudad turística frente al caribe colombiano, la cual ha tenido un incremento en su población de manera sostenida, llegando a nuestros días a una población aproximada a los 500.000 habitantes, esta posee un sistema de acueducto con capacidades menores para atender los requerimientos en materia de la población actual, además esta ciudad ha incrementado su demanda turística, debido a las mejoras en conectividad tanto aérea como terrestre, con un pico en la cantidad de turistas que llegan a la ciudad en los meses de Diciembre y Enero, siendo la principal actividad comercial, a pesar de la cercanía con el sistema montañoso de la Sierra Nevada de Santa Marta, donde se presentan generosas precipitaciones sumado a una gestión deficiente en el recurso hídrico, a una gran cantidad de captaciones no contabilizadas, y al mismo tiempo un régimen de bajas precipitaciones anuales y a que los picos de turismo se alcanzan en épocas de estiaje generando problemas y dificultades para satisfacer plenamente las necesidades hídricas de toda la población.

La ciudad de Santa Marta se abaste principalmente del recurso hídrico superficial, principalmente de 5 afluentes; Toribio, Córdoba, Gaira, Manzanares y Piedras, que no suplen las necesidades hídricas del todo, para toda la población.

A la fecha no hay un estudio que diga con algún margen de precisión confiable el estado de explotación de las aguas subterráneas del municipio; sin embargo, se observa, por los censos del DANE, que la población proyectada al 2019 puede ser casi en el doble en comparación con 2004; por lo que, la explotación sobre la concesión de aguas subterráneas debe ser mayor y alarmante en comparación. Por tanto, se hace imperativo la realización de un estudio que determine las condiciones de recarga potencial y el estado de explotación del acuífero, para optimizar los

planes de manejo ambiental del recurso hídrico que lleve a cabo la administración distrital y evitar un desabastecimiento repentino. (CORRALES, 2008).

Por lo anteriormente dicho el acuífero de Santa Marta se convierte en una de las soluciones a la alta demanda de recurso hídrico, se hace necesario estudiar la forma de cómo funciona este, según (Iguaran 2022)¹, luego de realizar balance hídrico se obtiene una recarga potencial aproximada por precipitación directa menor a 10 mm/año, el calculado por (Escobar 2022)², muestra que gran parte de la ciudad ha sido impermeabilizada en el proceso de asentamiento de la ciudad y sus alrededores, estos dos autores muestran que el acuífero ha ido perdiendo casi por completo la posibilidad de recarga directa, esto de por si se convierte en un problema que toca enfrentar de manera casi inmediata, así las cosas la única forma de recarga para este acuífero se convierte en la capacidad de recarga que pueda ofrecer la única fuente hídrica que disecta los depósitos cuaternarios del acuífero de Santa Marta. Este acuífero genera recarga de la forma relación (*rio-acuífero*), convirtiéndose en un río perdedor muy probablemente debido a la falta de recarga potencial directa por precipitación.

En este caso particular se realizó la caracterización de la recarga basados en el entendimiento de la geología local, la identificación de la climatología con los regímenes de precipitación con los niveles, la determinación de la evolución geoquímica que permite inferir la proveniencia de las aguas y sus propiedades fisicoquímicas, también se evaluaron los datos piezométricos existentes en el pozo Tayrona_1, el cual es de propiedad de la Universidad del

¹ Iguarán Hernández, H. (2022). Modelo de recarga potencial del sistema acuífero de santa marta y sus alrededores.

² Escobar Villar, A. (2022). Hidrometeorología y Cálculo de Variables Preliminares de un Balance Hídrico para el Sistema Acuífero de Santa Marta y sus Alrededores [Trabajo de grado, Universidad del Magdalena].

Magdalena, donde se observan los cambios en la recarga existente ya que este dispositivo se encuentra a escasos 50 metros lineales del río.

Las rocas cristalinas principalmente los esquistos poseen una baja permeabilidad, se puede hablar que la falta de estudio del batolito hace que se asuma una baja permeabilidad, la relación río-acuífero es clara, las aguas provienen de la precipitación que se convierte en escorrentía, que al pasar frente a los depósitos aluviales cuaternarios recargan el río, el régimen de precipitaciones controla las épocas de mayor recarga, siendo los meses de octubre y noviembre los que aportan mayores caudales.

La recarga debe ser cuantificada mediante una instrumentación más amplia del acuífero, lo cual proporcionaría un conocimiento más preciso, este conocimiento debe ir encaminado a generar medidas de manejo para hacer una correcta y adecuada explotación del acuífero, al tener una amplia caracterización del mismo, esto debería emularse en todas las zonas del país donde exista una extracción exhaustiva del recurso hídrico.

2 Objetivos

2.1 Objetivo principal

El objetivo principal de este proyecto fue caracterizar el modelo de recarga y el sitio de proveniencia de la misma de acuerdo a las condiciones hidrogeológicas en el sistema acuífero de Santa Marta, combinando y validando el modelo con la metodología de análisis de Isotopos Estables (H2; O18).

2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Caracterizar litológicamente los materiales geológicos (rocas y depósitos) objeto de estudio de acuerdo a sus características como potenciales acuíferos, a partir de actualización y validación en campo de la cartografía geológica oficial e interpretación de secciones delgadas pulidas.
- ✓ Delimitar la cuenca aportante y presentar las principales características de esta además de determinar la climatología que afecta directamente el área de estudio mediante el análisis de información hidrometeorológica tomada del IDEAM.
- ✓ Definir los parámetros hidráulicos que definen el comportamiento del flujo subterráneo en los materiales geológicos presentes en el área de evaluación hidrogeológica a partir de análisis de información secundaria disponible.
- ✓ Determinar el tipo de agua subterránea a partir de análisis fisicoquímico mediante diagramas de Piper y Stiff.
- ✓ Validar alturas de recarga para los sistemas de agua subterránea (acuíferos) y posibles conexiones con el río Manzanares a partir del análisis de isotopos estables (H2 – O18).

- ✓ Delimitar las fronteras hidrogeológicas asociadas al área de evaluación del acuífero de Santa Marta mediante interpretación de sistemas de información geográfico, (SIG), y su correlación con información cartográfica ajustada en trabajo de campo.

3 Marco Teórico.

En la actualidad cuando se caracteriza un acuífero, se propone detallar sus principales cualidades y/o propiedades tales como: *litología, conductividad hidráulica, porosidad, espesor, extensión*, y otros que nos permiten conocer como es el tránsito del agua en dicha roca, dependiendo del tipo de roca esta puede permitir con mucha facilidad el paso del agua en su estructura y denominarse acuífero de alta permeabilidad e incluso llegar a conducir el agua con poca facilidad y algunas restricciones denominándose acuitardo, en algunas ocasiones el paso del agua en su estructura es tan mínimo y con pocas posibilidades de extracción, por lo tanto se denomina acuífugo.

Para que el agua fluya dentro de los acuíferos debe provenir de algún sitio que permita que ingrese al sistema y pueda trasegar, estas zonas se denominan zonas de recarga, además existen zonas donde el recurso hídrico sale naturalmente que se denominan zonas de descarga, los nacederos cobran una alta relevancia debido a que nutren sistemas hídricos superficiales y la posibilidad de una fácil captación de estos sitios.

A hoy se usan diferentes metodologías para evaluar la recarga todas basadas en un balance hídrico aplicando los principios de conservación de la masa, entre ellas Thornthwaite (1957)³, Schosinsky, G. (2006)⁴, SWB (2010)⁵ estas metodologías son estimativas por lo tanto a los factores que intervienen en el balance se le atribuyen valores según ciertas características de cada uno,

³ Thornthwaite, C.W., Mather, J.R. (1957). Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and Water Balance. *Climatology*. 10: 185-311.

⁴ Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*. 34-35: 13-30.

⁵ Westenbroek, S.M., Kelson, V.A., Dripps, W.R., Hunt, R.J., and Bradbury, K.R., 2010, SWB-A modified Thornthwaite-Mather Soil-Water-Balance code for estimating groundwater recharge: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A31, 60 p.

siendo suelos, cobertura vegetal, y pendientes los más relevantes a la hora de hacer la estimación por lo tanto cuando se obtiene un resultado se le atribuye el valor de “*potencial*”. Cuando se le atribuye el valor de “*potencial*” a la recarga es debido a que hay una incertidumbre entre el valor estimado y el valor real de la misma.

De igual manera estas metodologías cobran relevancia ya que se hace necesario entender el sistema hidrológico cuando pensamos en los procesos que conllevan a que la precipitación se convierta en recarga del acuífero y al menos obtener un valor estimado para comprender lo que sucede en términos de balance en un área dada.

Al parecer la sobreestimación del balance se da debido a que las metodologías estudian o la relación (precipitación-balance de suelo-recarga potencial) o (precipitación-caudal-recarga), tomando en cuenta los análisis realizados se puede demostrar que la recarga no está dada únicamente en forma de precipitación directa, si no que tiene un componente dual, la cual está dada por precipitación que genera recarga directa y a su vez la precipitación que genera un caudal en los cuerpos hídricos que cruzan las rocas que pueden denominarse por sus características, como acuífero.

Por lo tanto, luego de los análisis en algunos estudios, se puede evidenciar que los valores de recarga pueden estar siendo sobre estimados en la medida que estos procesos no son fáciles de emular en cálculos.

Tomando en cuenta lo que sucede hoy día en Colombia y lo que está enmarcado en la política Nacional del Recurso Hídrico⁶ se puede hablar de varios fenómenos, por una parte, una mala gestión del recurso hídrico, en segundo una oferta hídrica que ha sido superada por la

⁶ Colombia. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá, D.C.: Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010. 124 p.

demanda, en tercer lugar, un alto grado de desconocimiento del recurso hídrico subterráneo a nivel general, además una pésima instrumentación desde el punto de vista hidrometeorológico como de conocimiento hidrogeológico.

Hasta el momento a la mano solo tenemos en gran parte del país la posibilidad de usar las metodologías existentes a falta de la comprobación real de la recarga mediante la instrumentación en este caso de estudio se propone y se muestra la importancia de instrumentar y combinar diferentes metodologías, así como validación de conexiones entre acuíferos y sistemas hídricos mediante técnicas isotópicas.

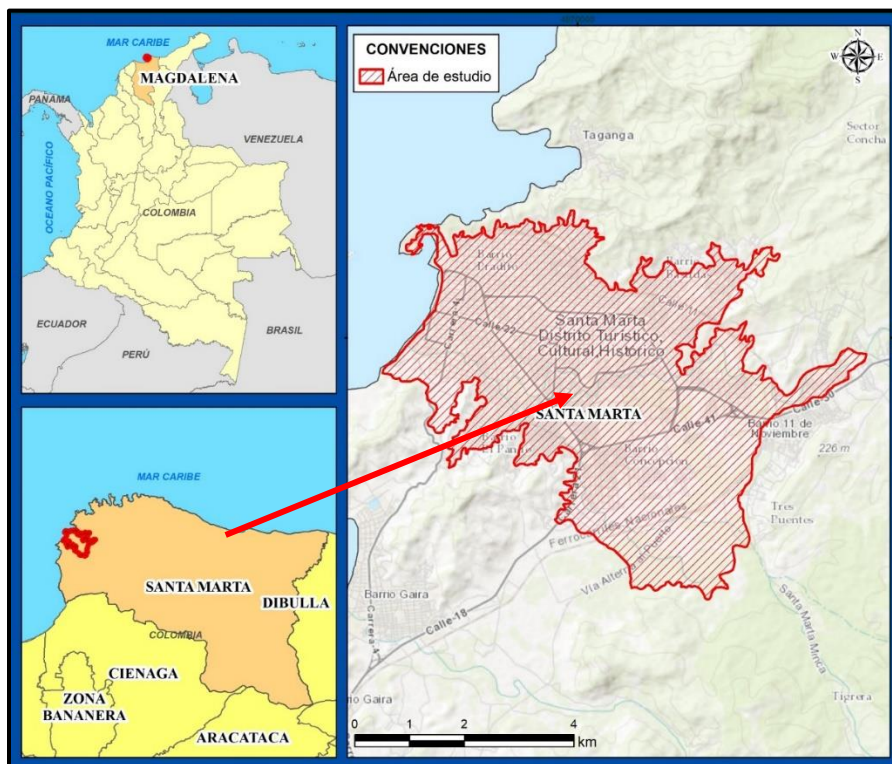
4 Área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en Santa Marta, la cual es capital del departamento del Magdalena, frente al mar caribe, dentro de la cuenca del río Manzanares, en estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta, posee aproximadamente una población de 500.000 habitantes, con una temperatura promedio de 28°C, la cual sufre al día de hoy de fuertes sequías, y una mala gestión del recurso hídrico. En épocas de bajas precipitaciones no llega el recurso a todos sus ciudadanos, mientras que, en épocas de lluvias, fácilmente se inunda e igual el recurso hídrico sigue siendo escaso en gran parte de la ciudad, esto merece mirar todas las aristas y las soluciones que se puedan para mejorar la gestión del recurso hídrico, en este caso nos adentramos en el estudio de las aguas subterráneas.

La ciudad tiene como principal fuente económica el turismo, lo cual genera una dinámica de demanda con picos que pueden llegar a equiparar las necesidades de la población base.

Figura 1

Ubicación del área de estudio



Fuente: El presente estudio

El área de estudio está delimitada por el Cuaternario aluvial (Qal), ver Figura 1, que representa el acuífero de Santa Marta, ubicado en la ciudad que lleva su mismo nombre, de todas formas, para estudiar la interacción río-acuífero se hace necesario hacer el análisis de la cuenca del río Manzanares, convirtiéndose en nuestra área de segundo interés, ver Figura 2.

Figura 2

Área Rio Manzanares y área de los acuíferos



Fuente: El presente estudio

Tabla 1

Datos ubicación Pozo Tayrona 1

Nombre del Punto	Coord N	Cord W	Altura GPS
Piezómetro_Tayrona 1	11° 13' 41.38"	74° 11' 14.83"	19

Fuente: Universidad del Magdalena⁷

⁷ Informe de Perforación de los Piezómetros de Monitoreo Universidad del Magdalena, Corcel Consultoría & Interventoría Ltda, 2020.

Tabla 2*Datos ubicación muestra Rio Manzanares Bonda*

Nombre del Punto	Coord N	Cord W	Altura GPS
Muestra Rio Bonda	11°14'5.257"	74° 6' 54.918"	62

Fuente: el presente estudio

5 Metodología

Desde el punto de vista metodológico se procedió a tomar datos de campo, los cuales fueron enviados a distintos laboratorios dependiendo de la necesidad, se procesó información geográfica, geológica, hidrológica e hidrogeoquímica que toda junta sirvió como complemento para caracterizar la recarga del acuífero, a continuación, se presenta la descripción de los procesos:

- Para la caracterización geológica se realizaron salidas de campo con toma de muestras de materiales geológicos asociados a roca parental y sedimentos aluviales (3), una por cada formación de interés las cuales fueron Georreferenciadas, luego se procedió a enviar estas muestras a laboratorio para la realización de secciones delgadas, las cuales fueron analizadas e interpretadas, para comprender la geología (análisis petrográfico) de las unidades presentes en el área de estudio. Al mismo tiempo y por medio del análisis de sistemas de información geográficos se procede a realizar el mapa geológico del área de estudio basado en los mapas Geológicos del Servicio Geológico Colombiano SGC, escala 1:100.000, de las planchas 11, 12 y 18 obteniendo así la geología del área de estudio.
- La hidrología corresponde a la cuenca del Rio manzanares, dentro de la cual se encuentra contenida nuestra principal área de estudio que son los depósitos (Qal) aluviales recientes que se encuentran en la ciudad de Santa Marta y forman la parte baja de la cuenca, se obtuvo información hidrometeorológica del IDEAM, de las estaciones presentes y relevantes la cual fue procesada para obtener el marco climatológico del área de estudio, también fue procesada información limnimétrica para realizar la evaluación de caudales versus la piezometría.
- La información hidrogeoquímica fue evaluada a partir de las muestras obtenidas en diferentes partes en este caso, Piezómetro Tayrona_1 y Muestras del Rio manzanares en la

zona de Bonda, las muestras del Piezómetro Tayrona_1, fueron usadas para caracterización fisicoquímica, con estos datos se realizaron los diagramas de Piper y Stiff. El análisis de isotopos estables se realizó con muestras obtenidas tanto Piezómetro Tayrona_1 como con muestra del rio manzanares en el sector de Bonda, estas muestras fueron analizadas en comparación a la línea meteórica loca de Rodríguez (2004), y la línea meteórica mundial de Craig (1961), el uso de esta metodología es confirmativa de la relación rio-acuífero y provee además información hidroambiental.

- Desde el punto de vista hidráulico, se definió el comportamiento hidráulico de los depósitos (Qal) aluviales recientes a partir de información proporcionada al momento de la construcción del pozo, luego de construido el pozo este se adecua como Piezómetro el cual está tomando datos en tiempo real, estos datos fueron suministrados por la Universidad del Magdalena, los cuales fueron analizados y complementados con la información antes mencionada, geológica, hidrológica, hidrogeoquímica conformando el armazón principal de nuestro objetivo dando como resultado la relación entre el comportamiento de la cuenca del rio manzanares y su influencia en la recarga del acuífero de Santa Marta.

6 Resultados

6.1 Modelo Geológico

6.1.1 Geología Regional

La geología regional del área de Corresponde a la parte occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta donde afloran rocas metamórficas e ígneas y se presentan depósitos cuaternarios aluviales, estos últimos pertenecientes al acuífero objeto de estudio, las edades de roca van desde el Proterozoico hasta el Cuaternario reciente.

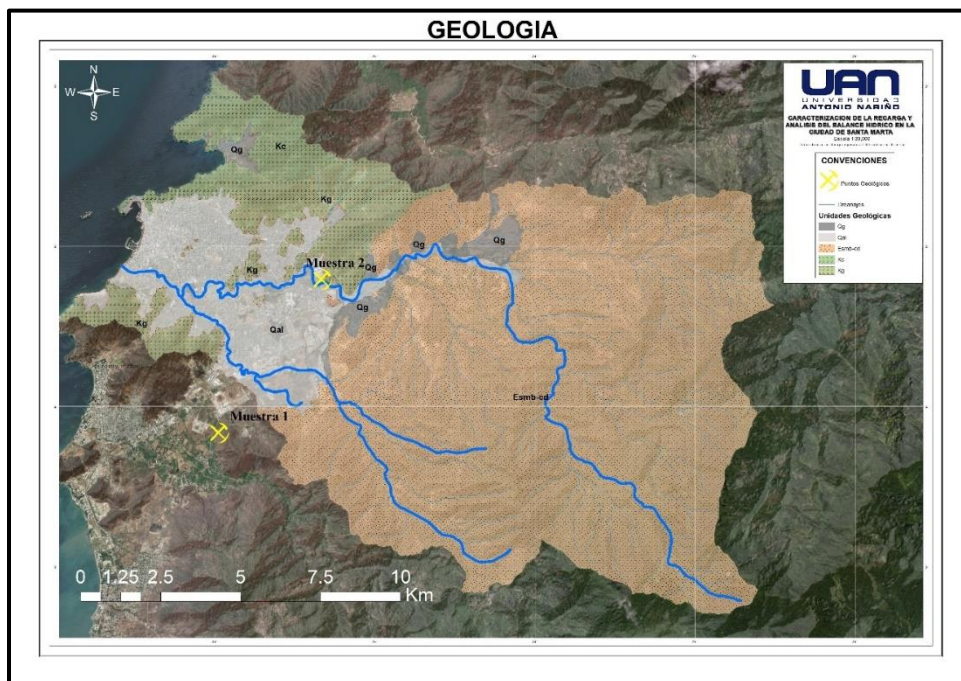
El Cretácico está conformado por rocas metamórficas sin diferenciar y los Esquistos de Santa Marta en los cuales se incluyen la Filita de Taganga, Esquistos de San Lorenzo, Esquistos de Gaira. El Paleógeno está representado por el Plutón de Latal y el Batolito de Santa Marta⁸.

6.1.2 Geología Local

Dentro del área de estudio delimitada para este trabajo de investigación se encontró la presencia de tres tipos principales de rocas, Esquistos de Gaira, Batolito de Santa Marta, y Cuaternario aluvial reciente, como se puede ver en la Figura 3, donde se tomaron muestras para su caracterización.

➤ *Rocas Cristalinas (Igneo-Metamórficas)*

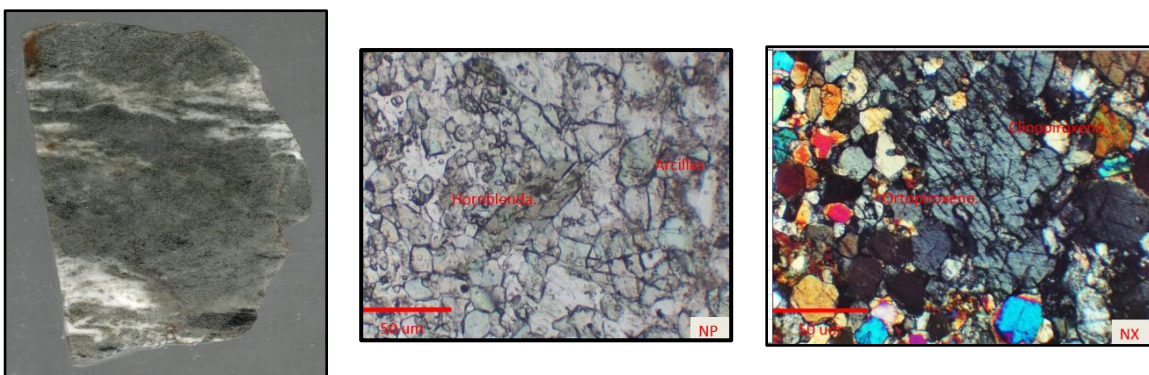
⁸ Memoria Explicativa Geología de las PLANCHAS 11 SANTA MARTA Y 18 CIÉNAGA Escala 1:100.000, Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero Ambiental y Nuclear Ingeominas.

Figura 3*Geología del área de estudio*

Fuente: el presente estudio.

- ***Esquistos de Gaira (Eeg)***

Esta unidad está conformada por Paraesquistos que fueron metamorfoseados y que en algunos casos están afectados por metasomatismo y esto permite la formación de rocas con texturas mixtas en algunos sectores que se encuentran muy cerca al contacto con el Batolito de Santa Marta, como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, muestra de mano, la cual muestra una estructura gneisosa donde se reconocen bandas de plagioclasa y cuarzo, con bandas oscuras con predominantes de piroxeno y epidota, a esta mineralogía se le sobreponen procesos metasomáticos de contacto donde los piroxenos son transformados a hornblenda y las plagioclasas son alteradas a sericita, como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3*Descripción de muestra de esquistos de Gaira*

(A) Muestra de mano

(B) Nicos Paralelos

(C) Nicos Cruzados

Fuente: El presente Estudio

Además, en análisis de sección delgada con nicos cruzados se observó Cristales de ortopiroxeno, los cuales son caracterizados por su clivaje característico a 90° , extinción recta y bajos colores de interferencia de primer orden. También se encuentran en contacto con clinopiroxeno los cuales tienen colores de interferencia moderados de segundo orden, además de presencia de maclado polisintético, como se puede observar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Dadas las características litológicas, los materiales metamórficos descritos no presentan porosidad primaria dados los procesos de recristalización metamórfica, catalogándolos como acuífugos a nivel de protolito.

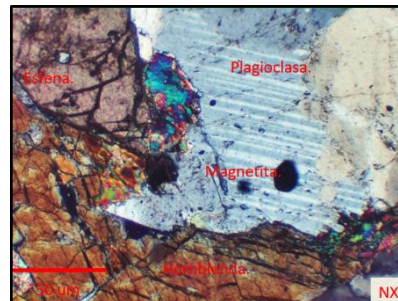
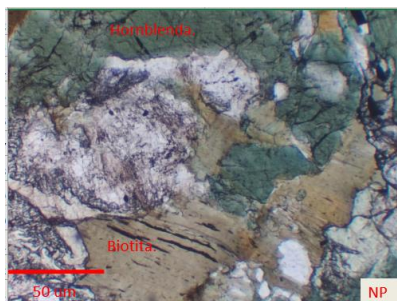
Cabe destacar que la potencial formación de niveles de meteorización y zonas fracturadas asociadas pueden generar niveles acuíferos en porosidad secundaria que ayuden a reforzar la dinámica de flujo subterráneo a nivel superficial.

- **Batolito de Santa Marta (Esmb)**

Es una unidad de carácter plutónico que aflora en la zona oriental de Santa Marta, denominada así por Tschanz et al (1969), la muestra de roca fue caracterizada como una Tonalita, con textura fanerítica con tamaños de grano que llegan hasta los 3,2 mm, con cristales de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico, además posee hornblenda y biotita, En la muestra el mineral opaco observado es del tipo magnetita la cual se reconoce por su forma poligonal posiblemente cúbica y por tener un color gris oscuro en muestra de mano, como se puede observar en la Tabla 4.

Tabla 4

Descripción de muestra Batolito de Santa Marta



(A) Muestra de mano

(B) Nicos Paralelos

(C) Nicos Cruzados

Fuente: El presente Estudio

Además, en análisis de sección delgada con nicos cruzados se observaron cristales de plagioclasa distinguidos por su maclado polisintético y por los colores de interferencia bajos de primer orden. También se reconocen algunos cristales de esfena observada con un relieve alto y

colores de interferencia altos de tercer orden; En medio de la plagioclasa también fue común encontrar inclusiones de magnetita.

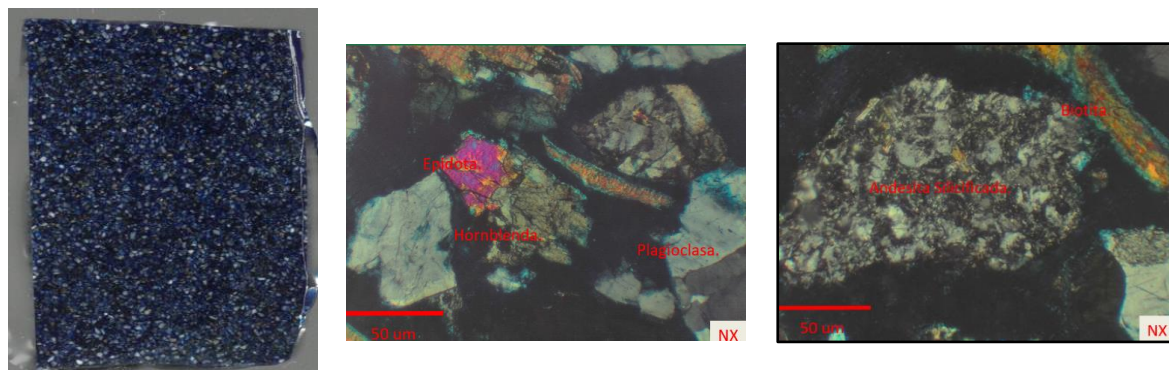
Dadas las características litológicas, los materiales ígneos descritos no presentan porosidad primaria dados los procesos de cristalización magmática, catalogándolos como acuitardo a nivel de protolito. Cabe destacar que la potencial formación de niveles de meteorización y zonas fracturadas asociadas pueden generar niveles acuíferos en porosidad secundaria que ayuden a reforzar la dinámica de flujo subterráneo a nivel superficial.

- ***Cuaternalio aluvial reciente (Qal)***

Estos depósitos están formados por sedimentos arrastrados en los ríos del área en este caso están los depósitos aluviales recientes del río Manzanares los cuales están constituidos por sedimentos de tamaño grava pertenecientes a fragmentos de rocas ígneas y metamórficas hasta arenas de tamaño muy fino, estos sedimentos se depositan a lo largo y ancho de las zonas con bajas pendientes los cuales se acrecentan en formas de terraza incluso, estas generan intercalaciones arcillosas y arenosas que conforman el acuífero de Santa Marta, en la Tabla 5, se pueden reconocer mayoritariamente fragmentos minerales los cuales corresponden a una mineralogía típica de una tonalita, donde se encuentran cuarzos caracterizados por las texturas de recristalización y deformación además de la presencia de contactos suturados, plagioclasas con procesos de sericitización, feldespatos potásicos también alterados arcillas además de minerales máficos como biotita y hornblenda parcialmente alterados a clorita.

Tabla 5

Descripción de muestra Depósitos aluviales Recientes, (Qal)



(A) Muestra de mano

(B) Nicoles Cruzados

(C) Nicoles Cruzados

Fuente: El presente Estudio

Además, en análisis de sección delgada doblemente pulida, con nicoles cruzados se observaron Fragmentos de andesita silicificada en la cual se encuentran algunos fenocristales de plagioclasa distribuidos en medio de una matriz transformada a pequeños cristales de cuarzo micro a criptocristalino, lo cual le da la apariencia oscura a esta zona del fragmento.

Estos materiales granulares, presentan una relación genética con los protolitos ígnea-metamórficos descritos anteriormente, los cuales debido al proceso sedimentario (erosión, transporte y depositación), adquieren porosidad efectiva y los cataloga como potenciales acuíferos de porosidad primaria, siendo los de mayor importancia en la zona de evaluación.

6.2 Modelo Geofísico

6.2.1 Registros Eléctricos

Para la realización del Piezómetro Tayrona 1, el cual se realizó mediante rotación mecánica y circulación directa con lodo bentónico se tomaron muestra de las capas donde se obtuvo la siguiente columna litológica ver Tabla 6, el pozo concluyó a una profundidad total de 50 metros donde se obtuvo columna estratigráfica y registros eléctricos para la ubicación de los sensores.

Tabla 6

Estratigrafía del Piezómetro Tayrona 1

Profundidad	Rata de Perforación	Tipo de Litología
1	4	Limo arenoso
2	4	Limo arenoso
3	3	Arenas limosa
4	5	Arcilla limosa
5	5	Arcilla limosa
6	3	Arena gruesa
7	3	Arena gruesa
8	3	Arena gruesa
9	3	Arenas limosa
10	4	Arenas limosa
11	4	Arcilla limosa
12	5	Arenas media
13	5	Arcilla limosa
14	4	Arenas gruesa y media
15	4	Arenas gruesa y media
16	4	Arenas media
17	3	Arenas media

18	4	Arenas gruesa
19	4	Arena gruesa con grava fina
20	3	Arena gruesa con grava fina
21	4	Arenas gruesa
22	5	Arena gruesa con grava fina
23	4	Arenas gruesa y media
24	4	Arenas media
25	3	Arenas media
26	4	Arena gruesa con grava fina
27	5	Arena gruesa con grava fina
28	4	Arena gruesa con grava fina
29	4	Arenas gruesa
30	3	Arenas gruesa y media
31	4	Arenas gruesa
32	4	Arenas gruesa
33	4	Arenas gruesa
34	5	Arenas gruesa
35	4	Arenas gruesa y media
36	4	Arenas gruesa
37	3	Arenas media
38	4	Arenas gruesa
39	4	Arenas gruesa
40	3	Arenas gruesa y media
41	3	Arenas gruesa y media
42	5	Arena gruesa con grava fina
43	5	Arena gruesa con grava fina
44	6	Arena gruesa con grava fina
45	4	Arenas gruesa y media

46	4	Arenas gruesa y media
47	3	Arenas media
48	5	Arenas gruesa
49	5	Arenas gruesa
50	6	Arenas gruesa

Fuente: Universidad del Magdalena⁹

Lo registros eléctricos son mediciones de propiedades físicas de la roca, que nos permiten entender e interpretar que tipo de litología se encuentra a profundidad, hay que tener en cuenta que como tal no son una medición directa de la roca, si no que a partir de la información obtenida por los mismos se interpreta y se concluye a que tipo de roca o sedimento nos enfrentamos, un registro graba una información vs una profundidad obteniendo una columna como se puede ver en la Figura 4. Para el piezómetro Tayrona se tomó información de registro de Gamma Ray (GR), Potencial espontaneo (SP), y resistivos.

Para el registro de Gamma Ray se mide la radioactividad natural de la roca, la cual está dada principalmente por 3 elemento U, Th y K, estos elementos están contenido principalmente en arcillas, por lo tanto, se interpreta que alto valores de GR, se asocian a arcillas y bajos valores a arenas o areniscas.

En el potencial espontaneo se mide la diferencia de potencial entre dos electrodos y se interpreta que las zonas con arenas pueden contener fluidos, por lo tanto, se observa deflexión en la curva, mientras las arcillas no contienen fluidos debido a que no poseen porosidad efectiva.

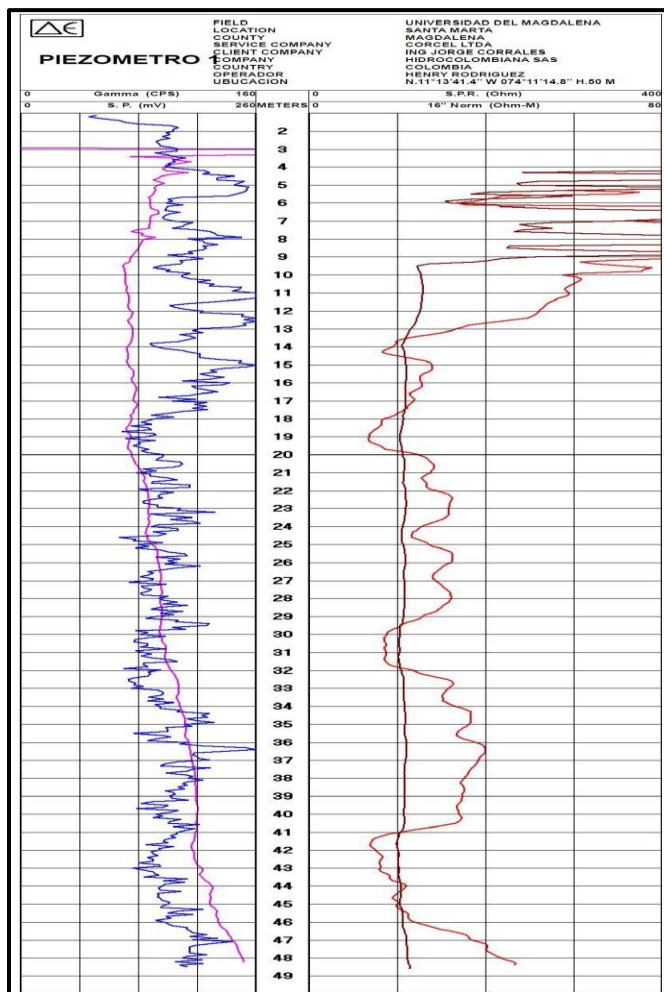
Los registros resistivos se induce una corriente a la roca y mide la capacidad de permitir o no el flujo de esta, rocas con fluidos tienden a tener mayor resistividad la cual se asocia a arenas y

⁹ Informe de Perforación de los Piezómetros de Monitoreo Universidad del Magdalena, Corcel Consultoría & Interventoría Ltda, 2020.

rocas con baja resistividad se asocian arcillas debido a los cationes que contienen en su estructura molecular y permiten un mayor fluido de la corriente en su estructura.

Figura 4

Registro de Pozo Tayrona_1

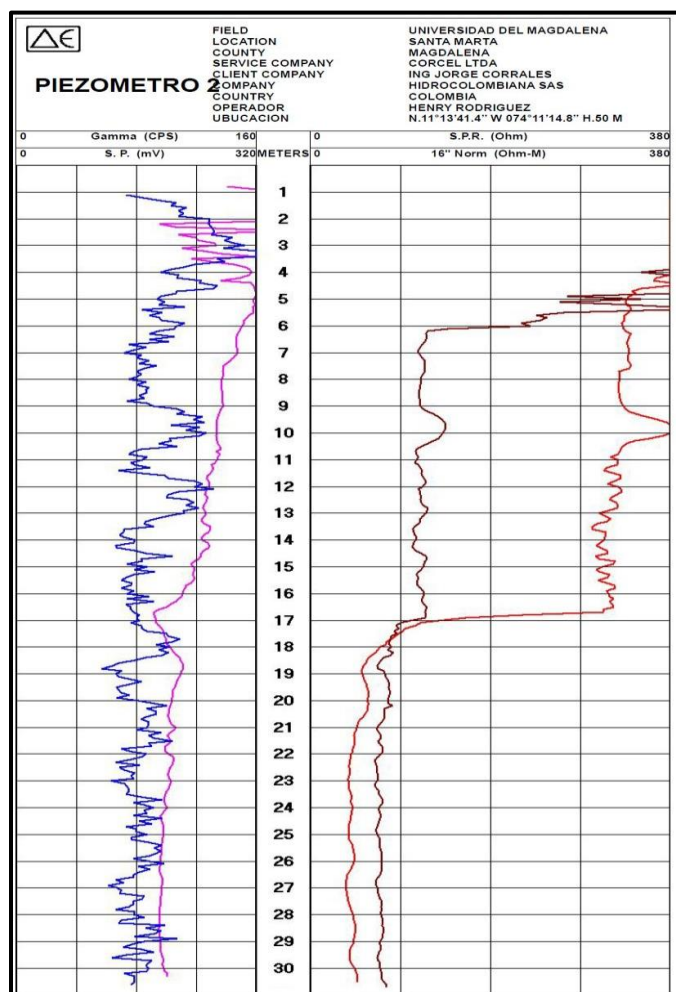


Fuente: Universidad del Magdalena¹⁰

¹⁰ Informe de Perforación de los Piezómetros de Monitoreo Universidad del Magdalena, Corcel Consultoría & Interventoría Ltda, 2020.

Figura 5

Registro de Pozo Tayrona_2



Fuente: Universidad del Magdalena¹¹

6.2.2 Tomografías

Las tomografías que se presentan en la Figura 6, se encuentran dentro del acuífero y se observa una alta correlación entre los datos de la tomografía 2, con los datos del piezómetro Tayrona_1, se observan litologías con poca saturación hasta los primeros 17-18 metros y luego

¹¹ Informe de Perforación de los Piezómetros de Monitoreo Universidad del Magdalena, Corcel Consultoría & Interventoría Ltda, 2020.

una alta saturación como se presenta en los registros de pozo hasta una profundidad aproximada de 48 metros aproximadamente.

Figura 6

Tomografías que caracterizan el área de estudio

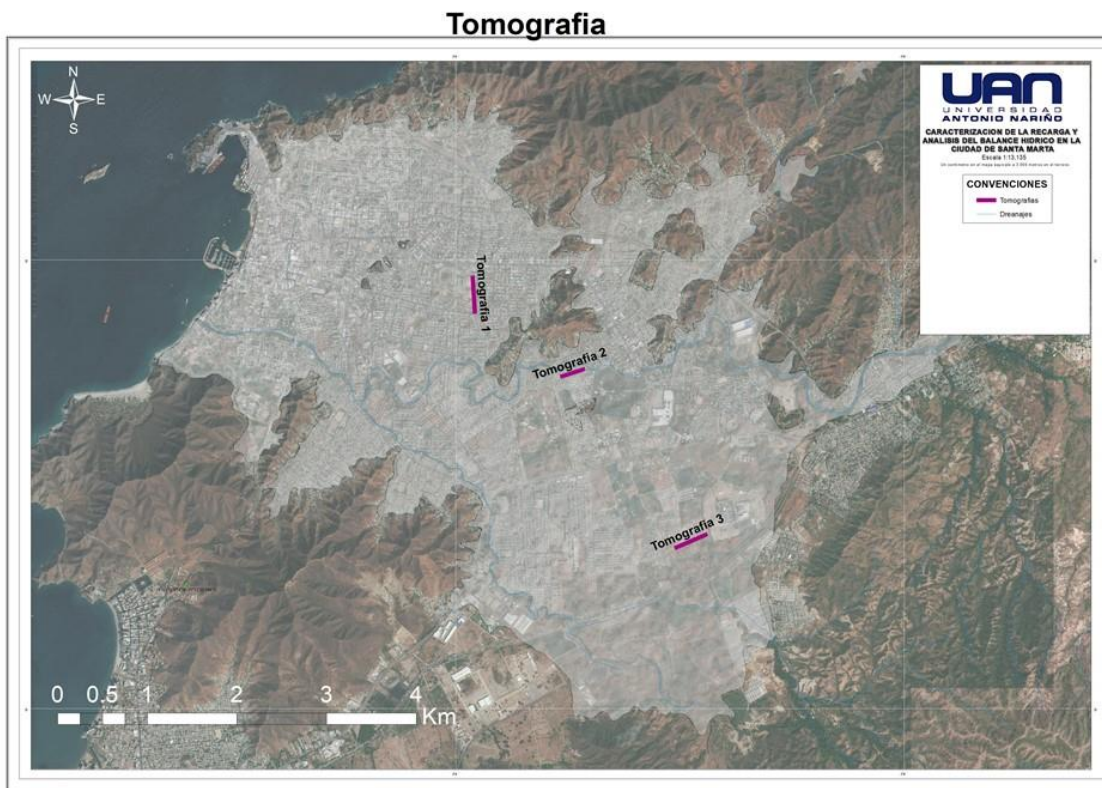
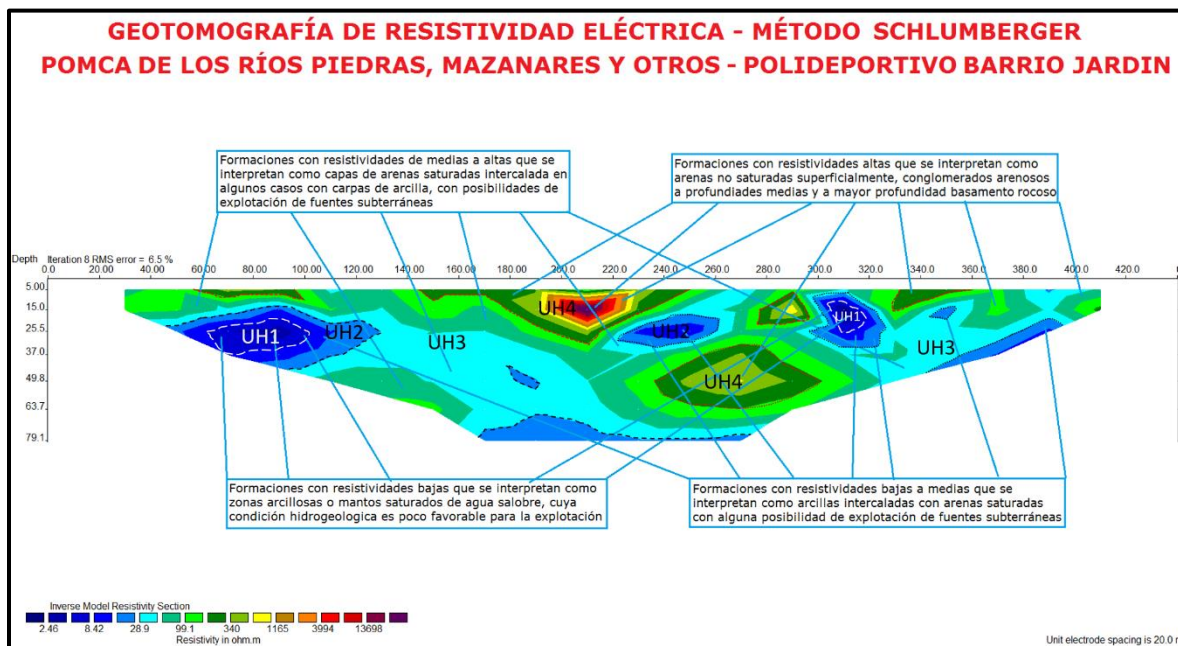


Figura 7

Tomografía de Resistividad Eléctrica Polideportivo.



Fuente: POMCA de la Cuenca Hidrográfica Río Piedras, río Manzanares y otros directos al Caribe (SZH 1501) (2019-05-09).

➤ **UH1**

Se detectan a lo largo del registro estratos con valores de resistividades bajas que oscilan entre los 2,0 a los 8,4 Ohm-m, que se interpretan como material fino o formaciones saturadas de agua salobre, cualesquiera de las dos interpretaciones indican condiciones hidrogeológicas poco favorables, esta característica se observa a lo largo del perfil en forma de capas aisladas de espesor medio (color azul oscuro a azul mate oscuro).

➤ **UH2**

Se observa un leve aumento de la resistividad con valores de 8,4 a 28,9 Ohm-m, asociado a la presencia de material fino intercalado con mantos arenosos saturados con condiciones

hidrogeológicas limitadas, distribuido a lo largo de todo el perfil especialmente en la parte central, en forma de capas de espesor medio (color azul mate claro a azul cielo).

➤ ***UH3***

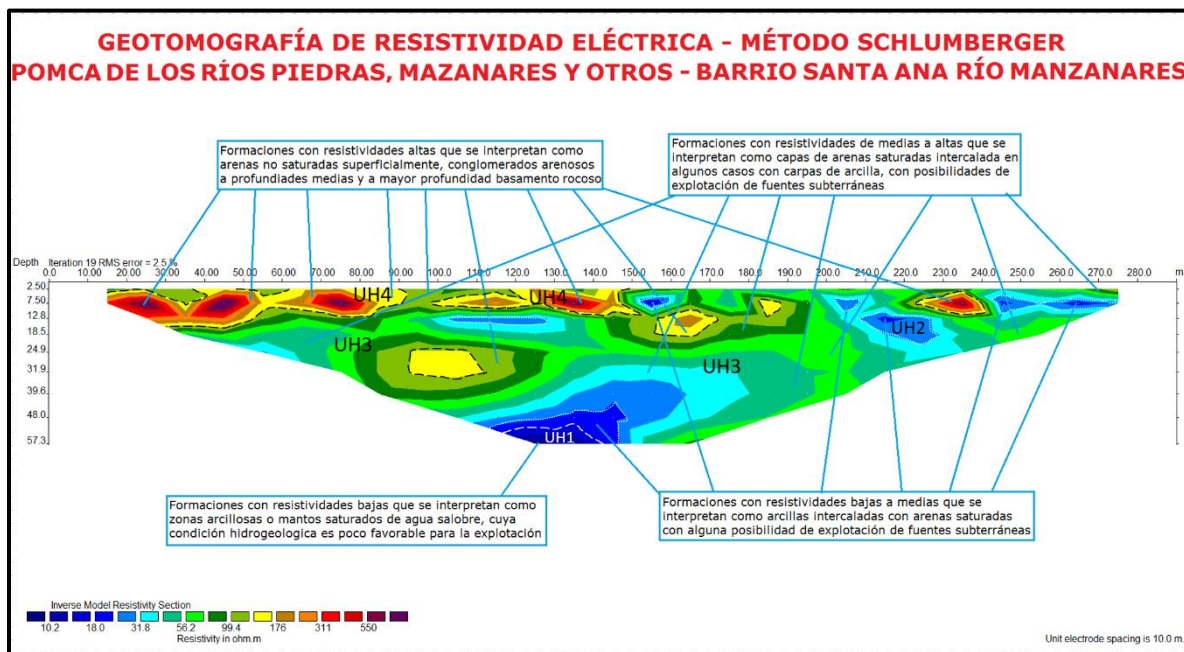
Se observa depósitos con resistividades medias a altas que varían entre los 28,9 a los 99,1 Ohm-m, que se interpretan como capas de arenas saturadas (en algunos casos de aguas duras), intercaladas con arcillas, con condiciones hidrogeológicas aceptables y posibilidad a explotación, el cual se distribuye a lo largo de todo el perfil en forma de capas de espesor medio, tanto superficialmente y como a profundidades medias (color azul marino a verde marino).

➤ ***UH4***

Finalmente se observa formaciones con resistividades altas a muy altas con valores que oscilan entre 99,1 a 25000 Ohm-m, que se interpretan como relictos del basamento rocoso (posiblemente metamórfico, color verde brillante a morado).

Figura 8

Tomografía de Resistividad Eléctrica barrio Santa Ana.



Fuente: POMCA de la Cuenca Hidrográfica Río Piedras, río Manzanares y otros directos al Caribe (SZH 1501) (2019-05-09).

➤ **UH1**

Se detectan a lo largo del registro estratos con valores de resistividades bajas que oscilan entre los 6.0 a los 10.2 Ohm-m, que se interpretan como material fino o formaciones saturadas de agua salobre, cualesquiera de las dos interpretaciones indican condiciones hidrogeológicas poco favorables, esta característica se extiende en la parte central de perfil en forma aislada (color azul oscuro).

➤ **UH2**

Se observa un leve aumento de la resistividad con valores de 10.2 a 31.8 Ohm-m, asociado a la presencia de material fino intercalado con mantos arenosos saturados con condiciones

hidrogeológicas limitadas, distribuido igualmente en forma aislada en el perfil (color azul mate a azul cielo).

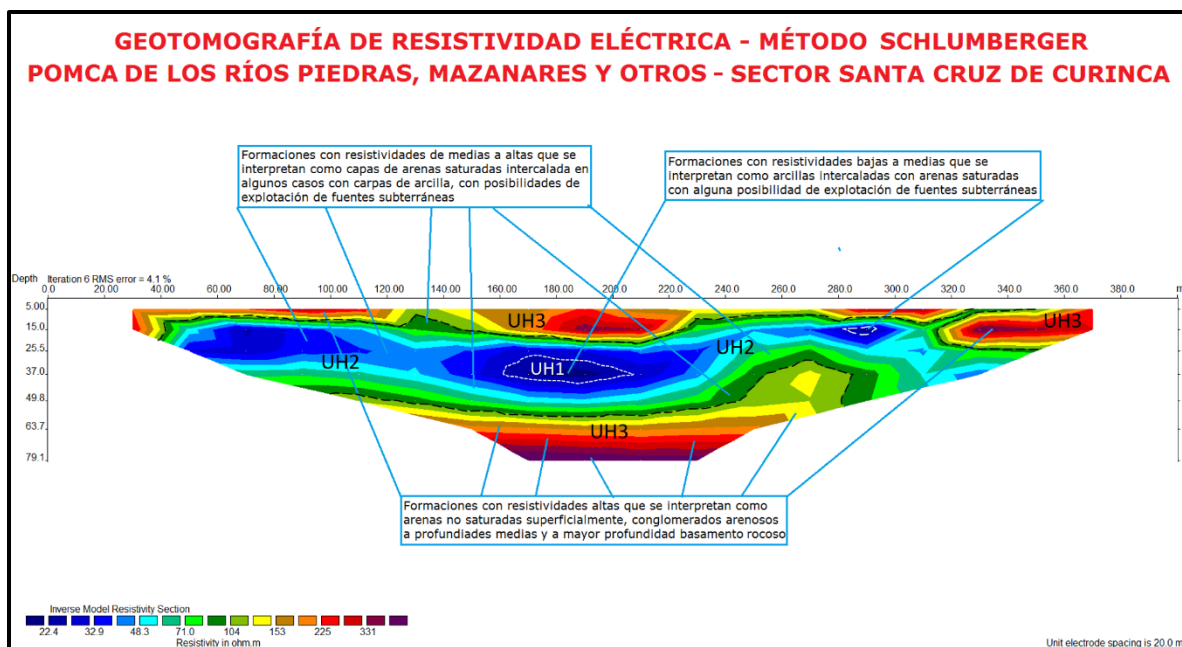
➤ ***UH3***

Se observa depósitos con resistividades medias a altas que varían entre los 31.8 a los 99.4 Ohm-m, que se interpretan como capas de arenas saturadas (en algunos casos de aguas duras), intercaladas con arcillas, con condiciones hidrogeológicas aceptables y posibilidad a explotación, el cual se distribuye a lo largo de todo el perfil, tanto superficialmente y como a profundidades medias (color azul marino a verde oscuro).

➤ ***UH4***

Finalmente se observan formaciones con resistividades altas a muy altas con valores que oscilan entre 99.4 a 800 Ohm-m, que se interpretan como relictos del basamento rocoso (posiblemente metamórfico, color verde claro a morado).

Tomografía de Resistividad Eléctrica barrio Curinca.



Fuente: POMCA de la Cuenca Hidrográfica Río Piedras, río Manzanares y otros directos al Caribe (SZH 1501) (2019-05-09).

➤ **UH1**

Se detectan a lo largo del registro estratos con valores de resistividades bajas que oscilan entre los 2,0 a los 8,4 Ohm-m, que se interpretan como material fino o formaciones saturadas de agua salobre, cualesquiera de las dos interpretaciones indican condiciones hidrogeológicas poco favorables, esta característica se observa a lo largo del perfil en forma de capas aisladas de espesor medio (color azul oscuro a azul mate oscuro).

➤ **UH2**

se observa un leve aumento de la resistividad con valores de 8,4 a 28,9 Ohm-m, asociado a la presencia de material fino intercalado con mantos arenosos saturados con condiciones hidrogeológicas limitadas, distribuido a lo largo de todo el perfil especialmente en la parte central, en forma de capas de espesor medio (color azul mate claro a azul cielo).

➤ ***UH3***

Se observa depósitos con resistividades medias a altas que varían entre los 28,9 a los 99,1 Ohm-m, que se interpretan como capas de arenas saturadas (en algunos casos de aguas duras), intercaladas con arcillas, con condiciones hidrogeológicas aceptables y posibilidad a explotación, el cual se distribuye a lo largo de todo el perfil en forma de capas de espesor medio, tanto superficialmente y como a profundidades medias (color azul marino a verde marino).

➤ ***UH4***

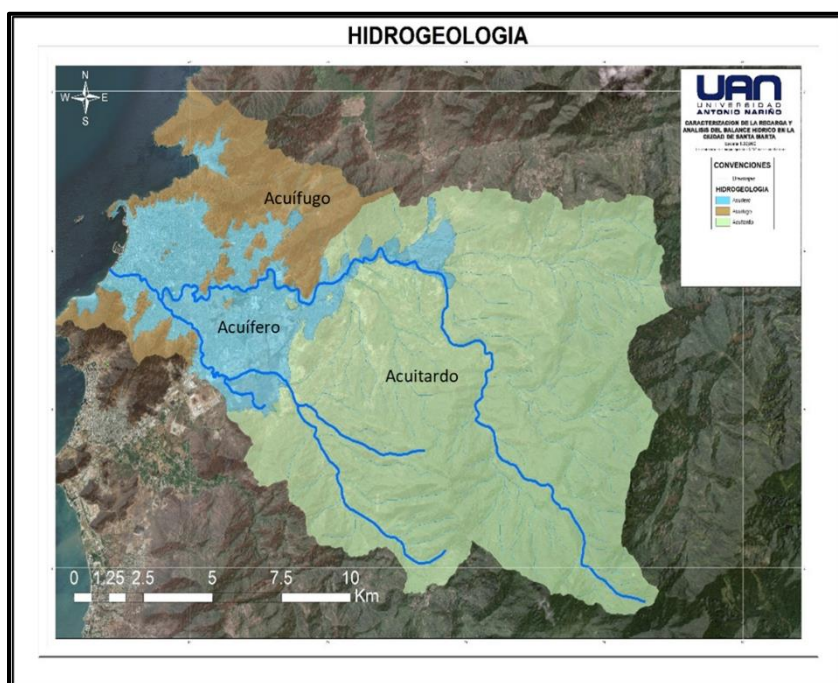
Finalmente se observa formaciones con resistividades altas a muy altas con valores que oscilan entre 99,1 a 25000 Ohm-m, que se interpretan como relictos del basamento rocoso (posiblemente metamórfico, color verde brillante a morado).

6.3 Hidrogeología

A partir de la información geológica se procede a realizar la descripción hidrogeológica del área de estudio, dependiendo de las características de la roca para permitir circular del agua dentro de su estructura se clasifican en, acuíferos, acuitardos y acuífugo, para el área de estudio se pueden diferenciar como se muestra en la Figura 9.

Figura 9

Mapa hidrogeológico área de estudio



Fuente: El presente Estudio

Las rocas en la hidrogeología se pueden clasificar según la capacidad que tienen o no de permitir el tránsito a través de su estructura, debido a características tales como la porosidad y la permeabilidad inherente a cada una ver estas se pueden clasificar de la siguiente manera¹²

¹² Perdomo V, Rojas C, Modelo Hidrogeológico Conceptual del municipio de Chiquinquirá, a partir de información secundaria. Universidad Católica de Bogotá, 2017.

➤ ***Acuífero***

Es un medio rocoso que es capaz de contener agua y permitir el movimiento de esta con facilidad, por lo general aplica a rocas muy permeables que contienen cantidades de agua económicamente explotables, por ejemplo, arenas y conglomerados.

➤ ***Acuicludo***

Es una formación que tiene grandes cantidades de agua que no es capaz de transmitirla en su estructura, por ejemplo, grandes paquetes de shales y lutitas.

➤ ***Acuitardo***

Es una formación Geológica que contiene cantidades de agua, pero tiene una baja permeabilidad o el movimiento del agua se realiza de manera demasiado lenta como para poder ser extraída, por ejemplo, rocas muy arcillosas y limosas.

➤ ***Acuífugo***

Es una formación geológica que no tiene la capacidad de contener ni transmitir agua en su estructura, por ejemplo, las rocas cristalinas.

Tabla 7

Clasificación Hidrogeológicas del área de estudio

Unidad Geológica	Litología	Unidad Hidrogeológica.	Características Hidrogeológicas.
Esquisto de Gaira	Unidad conformada por esquistos y paraesquistos metamorfoseados.	Acuífugo	Son esquistos densos con marcada foliación, presentando fracturas y diaclasas angostas, de poca

Batolito de Santa marta	Unidad conformada por un Plutón de carácter granítico.	Acuitardo	<p>extensión y rellenas con material milonitizado, originando una roca prácticamente impermeable. Destaca por presentar una muy baja porosidad primaria, pero existen posibilidades de porosidad secundaria al contener fracturas y diaclasas, hasta el momento es desconocido su potencial como acuífero.</p> <p>Hidrogeológicamente este acuífero se considera de tipo multicapa, continuo y de extensión regional con desarrollo de una porosidad primaria; la parte superior se comporta como libre y es explotada generalmente por aljibes mientras que la capa inferior se comporta como confinada y actualmente es explotada por numerosos pozos profundos. Posee una alta productividad.</p>
Depósitos aluviales recientes.	Depósitos aluviales recientes, de arenas y algunas gravas.	Acuífero	

6.4 Hidrología

Para la zona de estudio se encuentra ubicada dentro de la (SZH 1501) - (Rio Piedras, Rio Manzanares y otros directos al Caribe), siendo el código de la cuenca Rio Manzanares (150105), como se puede observar en la Figura 10, cuenta con un área de 174.5 km², longitud de cauce mayor de 33.497 km, cuenta con un kc, de 1.49 mostrando bajas tendencias a crecientes, la cuenca cuenta con una pendiente media de 23.6% aproximadamente

Figura 10

Cuenca Hidrográfica del rio manzanares



Fuente: El presente Estudio

6.4.1 Climatología

El proceso de recarga potencial está muy sujeto a las variables climatológicas de un área en especial y/o determinada, si las características físicas, tanto de los suelos como de la roca pueden

permiten el flujo de fluidos en su estructura se hace necesario las cantidades suficientes de agua en forma de precipitación o escorrentía para poder llevar el proceso de recarga a cabalidad.

La precipitación luego de generar saturación de suelo y proveer a las plantas la suficiencia hídrica para su subsistencia y evapotranspirar, posibilita la recarga directa a los acuíferos, por lo tanto para recargar directamente se hace necesario suplir estas necesidades del sistema suelo-planta, pero no solo existe este tipo de recarga al paso de las corrientes por rocas que tienen alta porosidad y permeabilidad permiten una recarga lateral, en el área de estudio y en cuestión, se presenta un cuerpo hídrico cortando un depósito aluvial reciente, (Qal), el cual presenta características de alta porosidad y permeabilidad, teniendo esto en cuenta podemos decir que el río Manzanares disecta un acuífero de que posee, buenas características para permitir y alojar buenas cantidades de recurso hídrico.

Para entender la climatología de la zona se hace necesario evaluar la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración, a continuación, se muestran los análisis realizados.

6.4.2 Precipitación

Para la zona de estudio en los alrededores de la ciudad de santa marta se realizó el análisis para 4 estaciones de precipitación como se puede observar en la Tabla 8.

Tabla 8

Estaciones de precipitación analizada

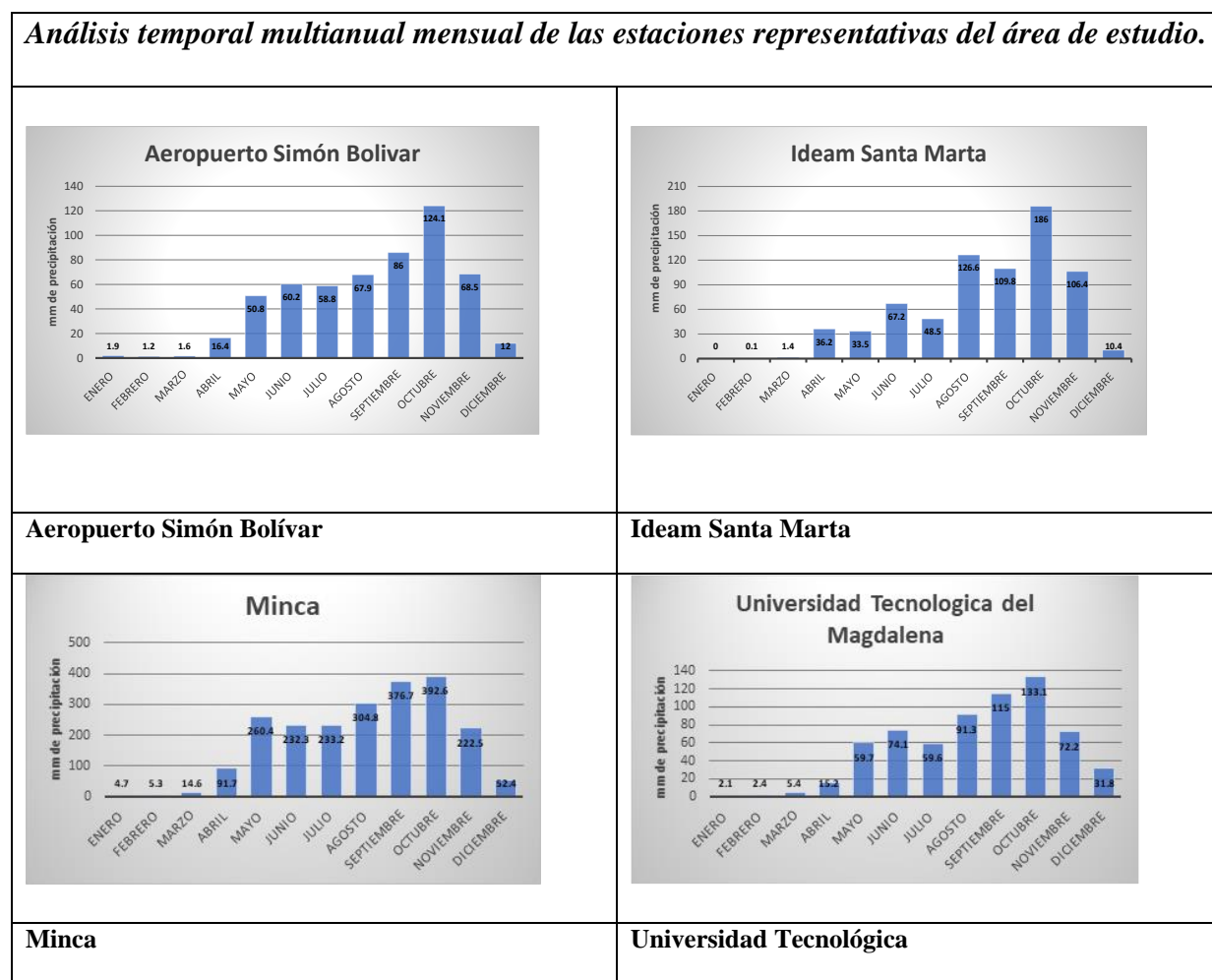
Estación	Código
Aeropuerto Simón Bolívar	15015050
Ideam Santa Marta	15010501
Minca	15010010
Universidad Tecnológica -AUT	15015120

Fuente: IDEAM, datos modificados para el presente Estudio

A partir de los datos y las series de precipitación diarias se realizó el promedio mensual multianual y se procedió a realizar el análisis temporal para cada estación meteorológica encontrando los siguientes resultados.

Figura 11

Análisis temporal multianual mensual de la precipitación



Fuente: IDEAM, datos modificados para el presente Estudio

Se puede observar un régimen bimodal anual, donde el primer régimen de lluvia comienza en abril con bajas precipitaciones aumentando poco a poco hasta julio, para luego incrementar de manera significativa en agosto hasta noviembre donde decae de manera abrupta en diciembre, los

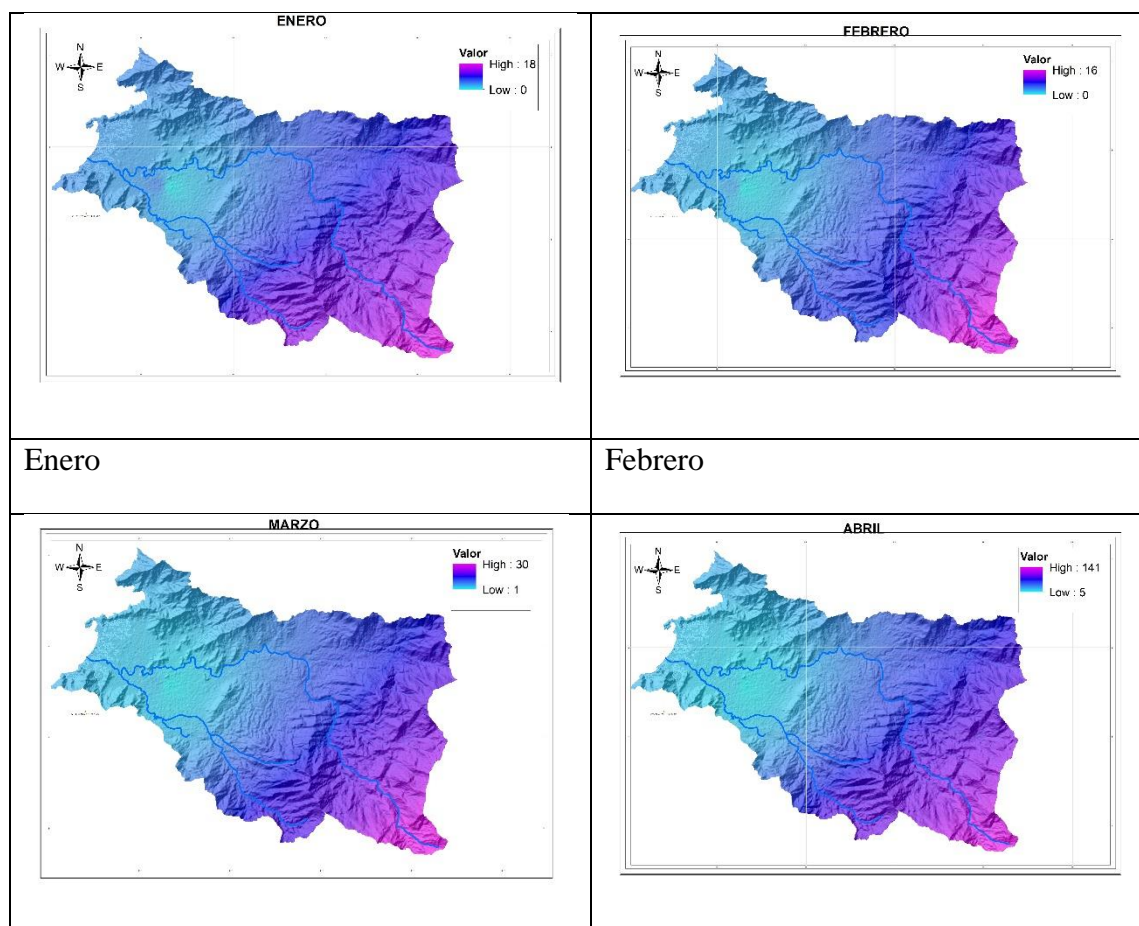
meses de enero, febrero, y marzo las precipitaciones son casi nulas, esto indica claramente cuales son los meses de mayores recarga hacia el acuífero ya que la relación lluvia-escorrentía es directa y la recarga del acuífero de Santa Marta está dada principalmente por la escorrentía del río Manzanares.

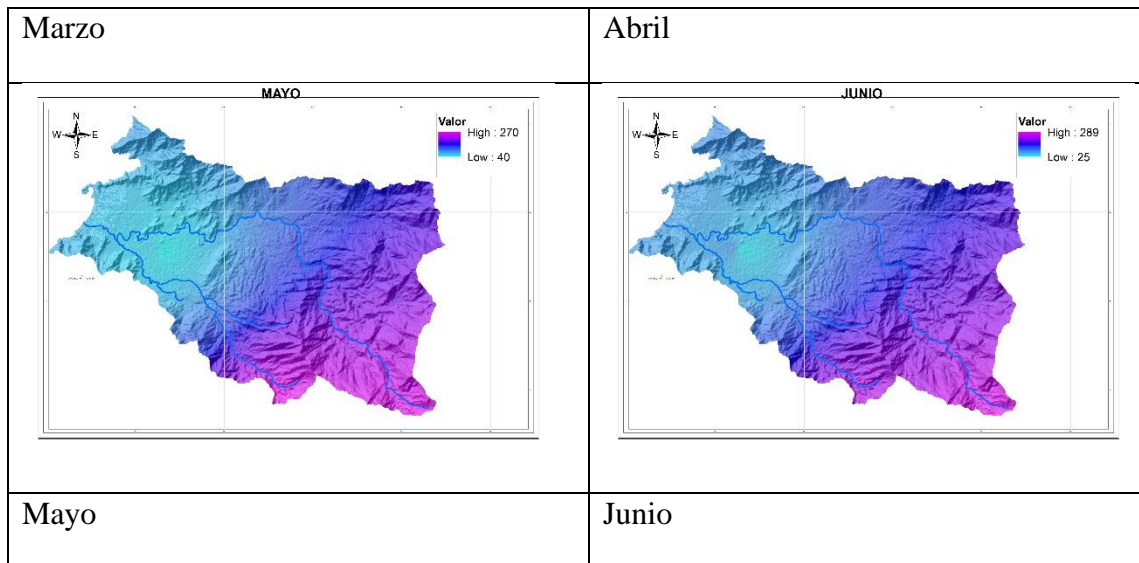
➤ *Análisis Espacio Temporal de la Precipitación*

Luego del análisis temporal se procedió a realizar el análisis espacio temporal de las precipitaciones realizando las isoyetas, usando el método de interpolación IDW (inverso de la distancia al cuadrado), hallando los siguientes resultados, ver Figura 12, ver Figura 13.

Figura 12

Isoyetas desde enero a junio

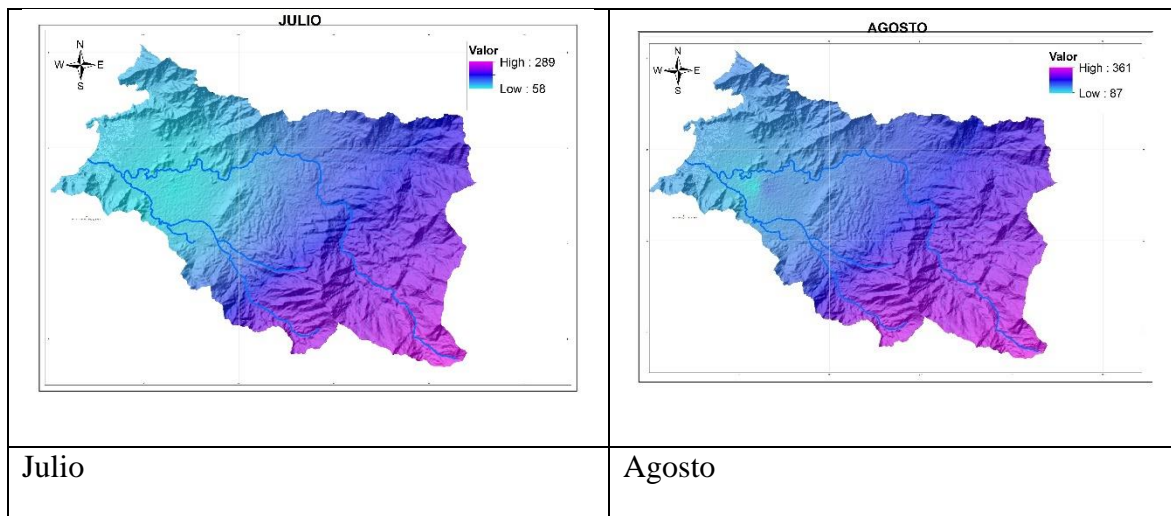


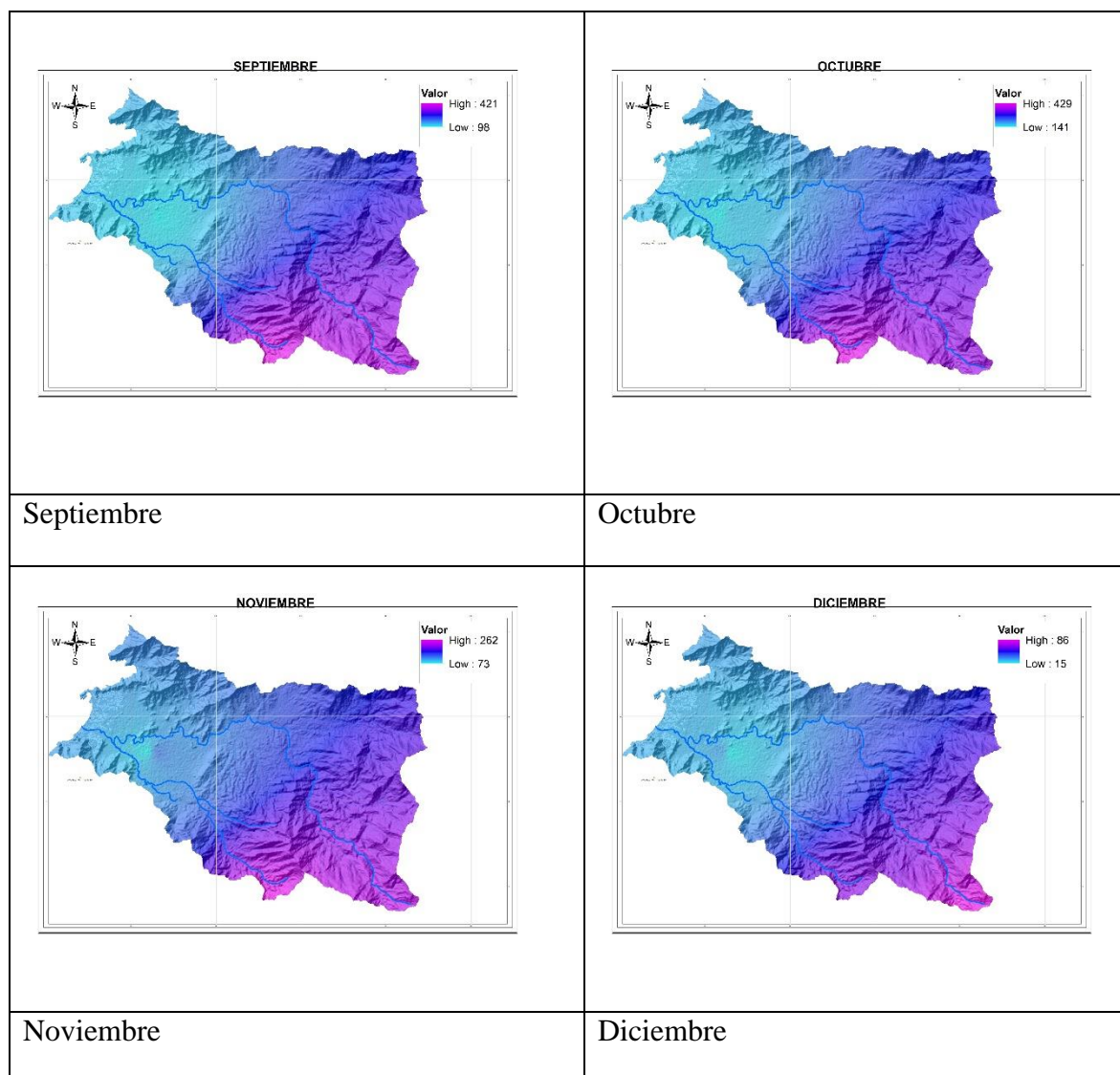


Fuente: IDEAM, datos modificados para el presente Estudio

Figura 13

Isoyetas desde julio a diciembre



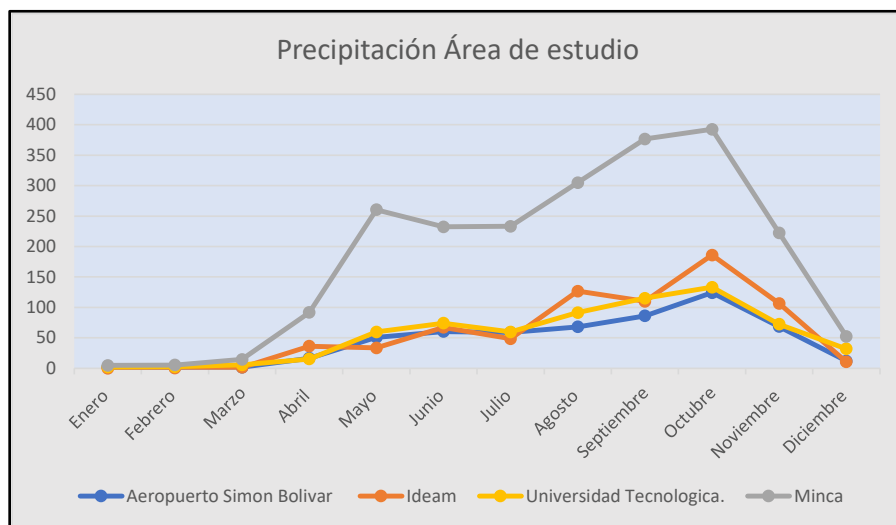


Fuente: IDEAM, datos modificados para el presente Estudio

Se observa que las precipitaciones hacia la parte alta de la cuenca son mayores durante todo el año, lo contrario se observa hacia la ciudad de santa marta precipitaciones muy bajas durante todo el año el comportamiento es muy similar para todos los meses siendo octubre y septiembre lo meses con mayores precipitaciones, mientras enero y febrero son los meses que presentan menores precipitaciones en el año. Los datos de precipitación nos ayudan a inferir un déficit hídrico hacia la parte baja de la cuenca, siendo la parte media y alta quienes mantienen los caudales del río Manzanares.

Figura 14

Precipitación para el área de estudio.



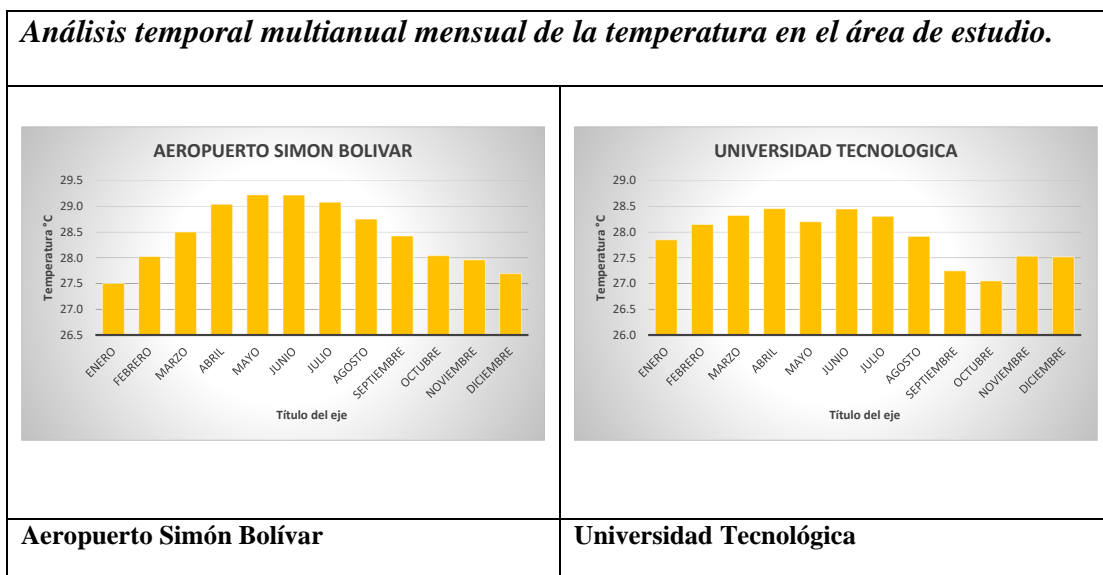
Fuente: IDEAM, datos modificados para el presente Estudio

➤ *Temperatura*

La temperatura es una medida de la cantidad de calor que posee un cuerpo o sistema, la cual se mide mediante un dispositivo llamado termómetro el cual recibe el calor expandiéndose el mercurio dentro del mismo otorgando la medida de calor presente en un cuerpo dado. Esta medida es importante para la evaluación de los balances hídricos debido a que a partir de esta se calcula la evapotranspiración potencial ETP. A mayor calor mayor posibilidad de evapotranspirar de las plantas, por lo mismo mayor necesidad hídrica, así entonces conocer la temperatura del ambiente sirve para comprender el sistema hídrico de la zona de estudio, Santa Marta es una ciudad costera, que cuenta con valores de temperatura promedio de 27.9°C, con temperaturas máximas en abril 28.5 °C y agosto 28.3 °C.

Figura 15

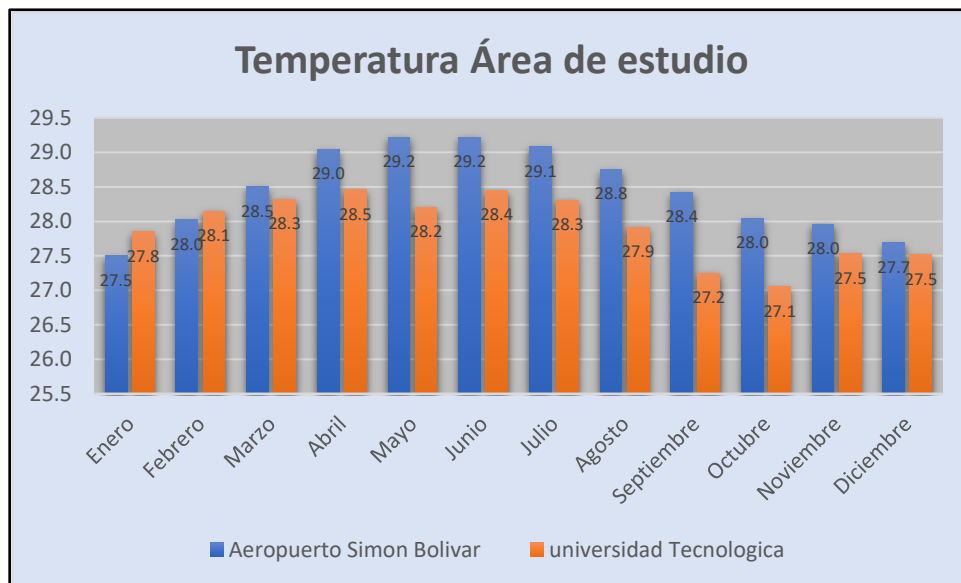
Análisis temporal multianual mensual de la temperatura.



Fuente: IDEAM, datos modificados para el presente Estudio.

Figura 16

Temperatura media para el área de estudio.

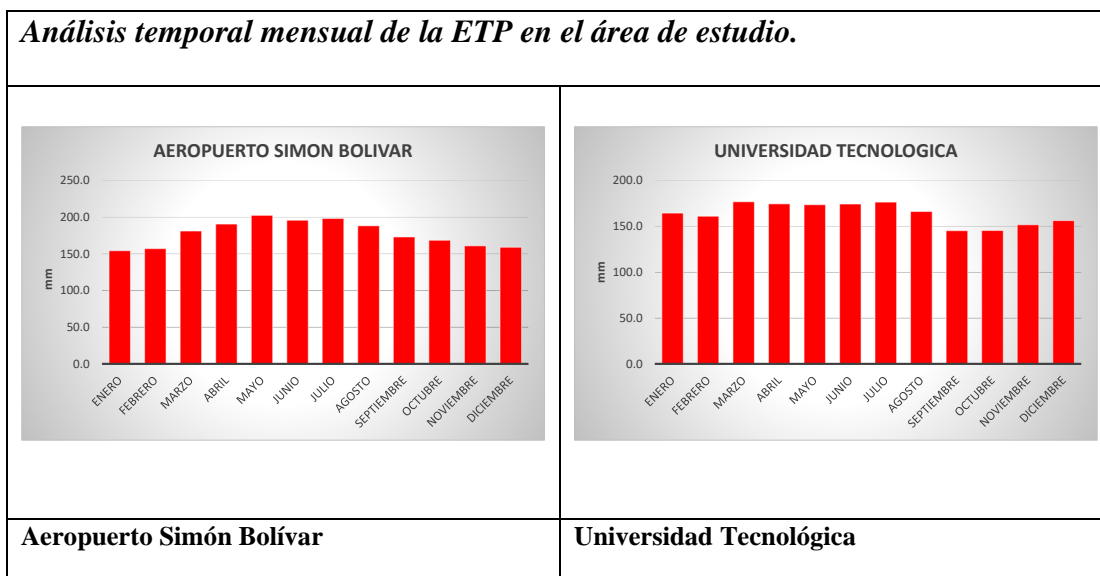


Fuente: IDEAM, datos modificados para el presente Estudio.

➤ *Evapotranspiración*

Figura 17

Análisis temporal mensual de la ETP



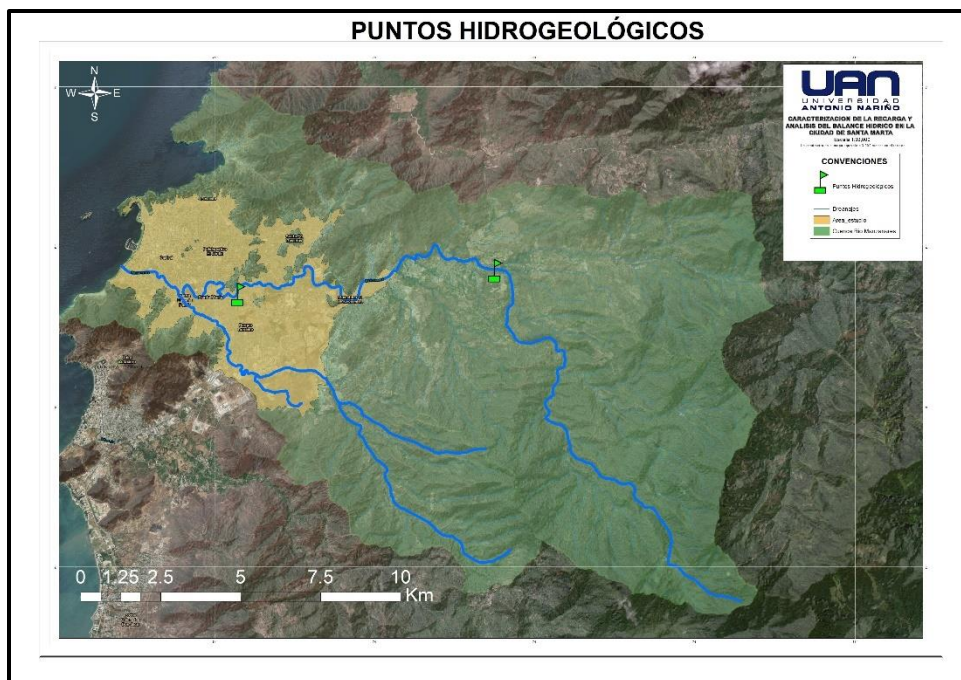
Fuente: IDEAM, datos modificados para el presente Estudio.

6.5 Modelo Hidrogeoquímico.

La ubicación de las muestras se presenta en la Figura 18 , una fue tomada en el piezómetro Tayrona _1 y la otra fue tomada en el rio Manzanares en el sector de Bonda.

Figura 18

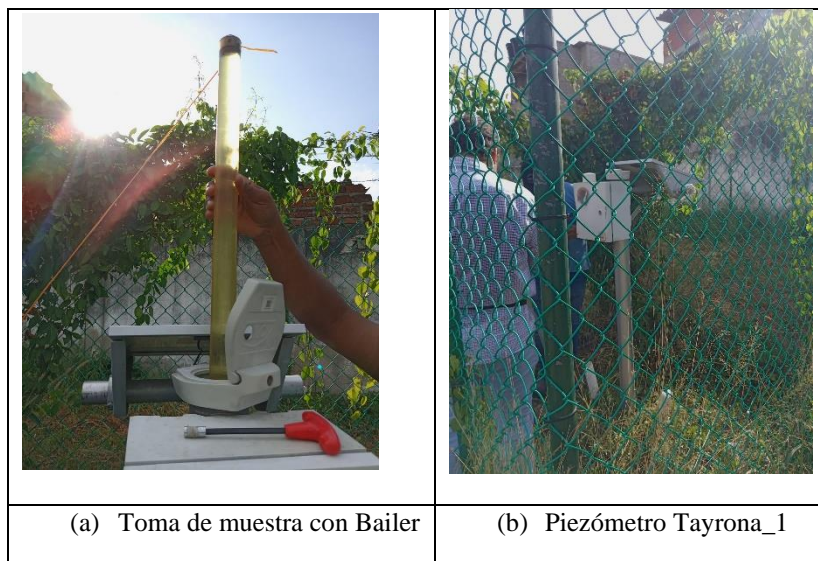
Ubicación de los puntos de muestras para caracterización hidrogeoquímica.



Fuente: El presente Estudio

6.5.1 Toma de Muestras

Los datos a continuación hacen parte de la realización del modelo hidrogequímico para el presente estudio, para obtener estos datos se procedió a usar un Bailer y extraer agua del piezómetro Tayrona_1, el Bailer es un dispositivo diseñado para la toma de muestras en los pozos, la muestra fue debidamente envasada, etiquetada y enviada al laboratorio el cual se encuentra certificado por el IDEAM, obteniendo los resultados que se pueden observar en la Tabla 10. Los datos obtenidos serán debidamente procesados y con los mismos se obtuvo la caracterización fisicoquímica de las aguas del acuífero de Santa Marta por medio de las metodologías de Piper y Stiff, diagramas que se muestran a continuación.

Tabla 9*Registro fotográfico Toma de muestras**Fuente:* El presente Estudio**Tabla 10***Datos de Calidad de agua tomados del pozo Tayrona 1*

Análisis Físicoquímicos				
Análisis	Método - Técnica	LCM	Fecha análisis	Resultados
Alcalinidad Total mg CaCO ₃ /L a	SM 2320 B - Volumétrico	0,500	2023/09/12	201
pH 4,5 (A)				
Bicarbonatos mgCaCO ₃ /L (A)	SM 2320 B - Volumétrico	0,50	2023/09/12	201
Calcio mg Ca/L (A)	SM 3030 K / SM 3111 D - Espectrométrico	0,5000	2023/09/18	62,8769
Carbonatos mg CaCO ₃ /L (A)	SM 2320 B - Volumétrico	0,50	2023/09/12	<0,50
Cloruros mg Cl/L (A)	SM 4500-Cl B - Argentométrico	2,00	2023/09/22	40,1
Color Real UPC (A)	SM 2120 C - Fotométrico	5,00	2023/09/12	<5,00
Conductividad (25°C) μS/cm (A)	SM 2510 B - Electrométrico	-	2023/09/18	605,0

Dureza Total (EDTA) mg CaCO ₃ /L (A)	SM 2340 C - Volumétrico - EDTA	0,500	2023/09/20	207
Hierro mg/L (A)	SM 3030 K / SM 3111 B - Espectrométrico	0,1000	2023/09/20	0,2950
Magnesio mg Mg/L (A)	SM 3030 K / SM 3111 B - Espectrométrico	0,1000	2023/09/20	19,4251
Potasio mg K/L (A)	SM 3030 K / SM 3500-K B - Espectrométrico	1,0000	2023/09/20	4,0627
Sódio mg Na/L (A)	SM 3030 K / SM 3500-Na B - Espectrométrico	1,0000	2023/09/20	42,9287
Sulfatos mg SO ₄ /L (A)	SM 4500-SO ₄ E - Turbidimétrico	10,0	2023/09/22	29,1
Turbiedad NTU (A)	SM 2130 B - Nefelométrico	0,500	2023/09/12	1,50

Fuente: El presente Estudio

6.5.2 *Diagramas de Piper*

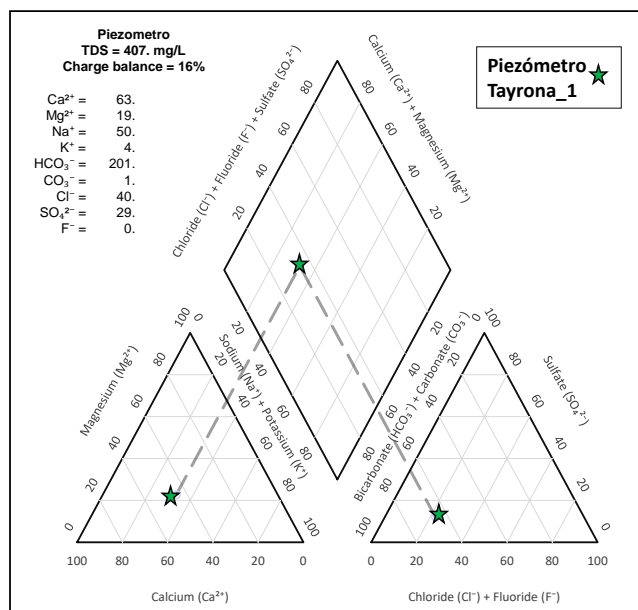
Es un diagrama diseñado para representar datos de los análisis químicos de las muestras de agua, las representaciones gráficas son muy fáciles de interpretar y analizar, por lo tanto, se emplean de manera extendida, para clasificar, agrupar e identificar las aguas por su contenido catiónico.

En el diagrama de Piper se muestra de forma simultánea la proporción existente entre cationes y aniones mayoritarios expresados en porcentaje de equivalentes por millón (%epm). Para construirlo se dibujan tres paneles: dos triángulos y un rombo. En el triángulo de la izquierda se

representan los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Na}^{++}\text{K}^{+}$), en el de la derecha los aniones ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, SO_4^{2-} , Cl^-) y en el rombo se proyectan los puntos representados en ambos triángulos¹³.

Figura 19

Diagrama de Piper



Fuente: El presente Estudio.

En la Figura 19, se presentan los datos analizados del Piezometro_1, se observa un agua bicarbonatada cálcica, con contenido bajo de magnesio, aguas que tienen buena calidad y pueden servir para uso humano, y demás usos posibles, ligeramente mineralizadas.

6.5.3 Diagramas de Stiff

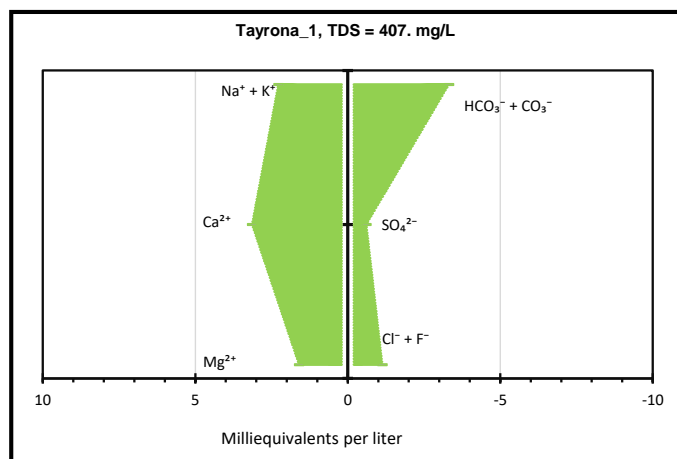
Los diagramas de Stiff, son otra forma de representar gráficamente la composición de los iones mayores en una muestra de agua subterránea, Los cationes son expresados en miliequivalentes por litro en el lado izquierdo del eje vertical, uno en cada eje horizontal. Lo

¹³ D-Piper (Diagrama Piper de Densidad) Representación de grandes conjuntos de datos mediante el diagrama de Piper. Manual de Uso / Instituto Geológico y Minero de España. Área de Geología Ambiental y Geomatemáticas. Moreno Merino, L., Aguilera Alonso, H., González Jiménez, M., Díaz Losada, E., Romero Prados, A. 2021.

aniones de igual forma, en lado derecho. Los diagramas son útiles para visualizar la relación iónica existente entre diferentes puntos de muestreo. A partir de la cual puede determinarse la dirección del flujo subterráneo¹⁴.

Figura 20

Diagrama de stiff



Fuente: El presente Estudio.

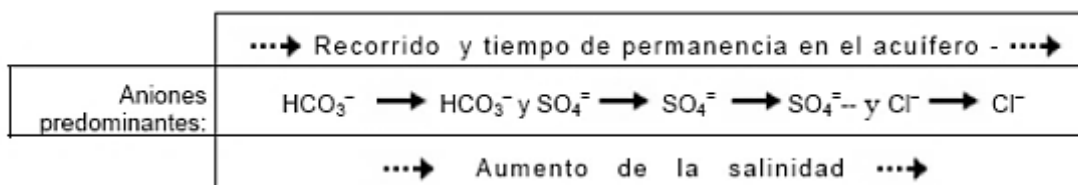
Se puede observar en la Figura 20, que el agua del piezómetro Tayrona_1, está enriquecida en carbonatos con muy bajas proporciones de sulfatos y cloruros, además muestra enriquecimiento de calcio y bajas proporciones magnesio, sodio y potasio.

6.5.4 Evolución Hidroquímica

Desde que el agua alcanza la superficie freática más próxima hasta que aflora en un río, manantial o captación, pueden transcurrir días o miles de años, y el recorrido puede ser de unos metros o de varios kilómetros. Por tanto, la evolución química del agua dependerá de los minerales con los que entre en contacto y de la duración de dicho contacto, que a su vez depende de la

¹⁴ Ministerio del Medio Ambiente y recursos Hídricos de El Salvador, página <https://srt.snet.gob.sv/sihi/public/app/1/caracterizacion>

velocidad del flujo subterráneo, las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo son generalmente bicarbonatadas. Después predomina el sulfato, y las aguas más salinas son cloruradas. Esta evolución se denomina secuencia de Chebotarev.



Fuente: Chebotarev, I. (1955)

6.5.5 Isotopía

Las técnicas de isotopía se aplican para resolver problemas asociadas a la hidrogeología al día de hoy se han convertido en una herramienta importante para la investigación en este caso en especial nos ocuparemos principalmente de las relaciones y la comprobación de la zona de recarga y proveniencias de las aguas que infiltran al acuífero de santa marta, el presente estudio combinando diferentes metodologías confirma y valida de manera muy precisa el uso de herramientas para una evaluación más robusta de la recarga de los acuíferos en un área cualquiera.

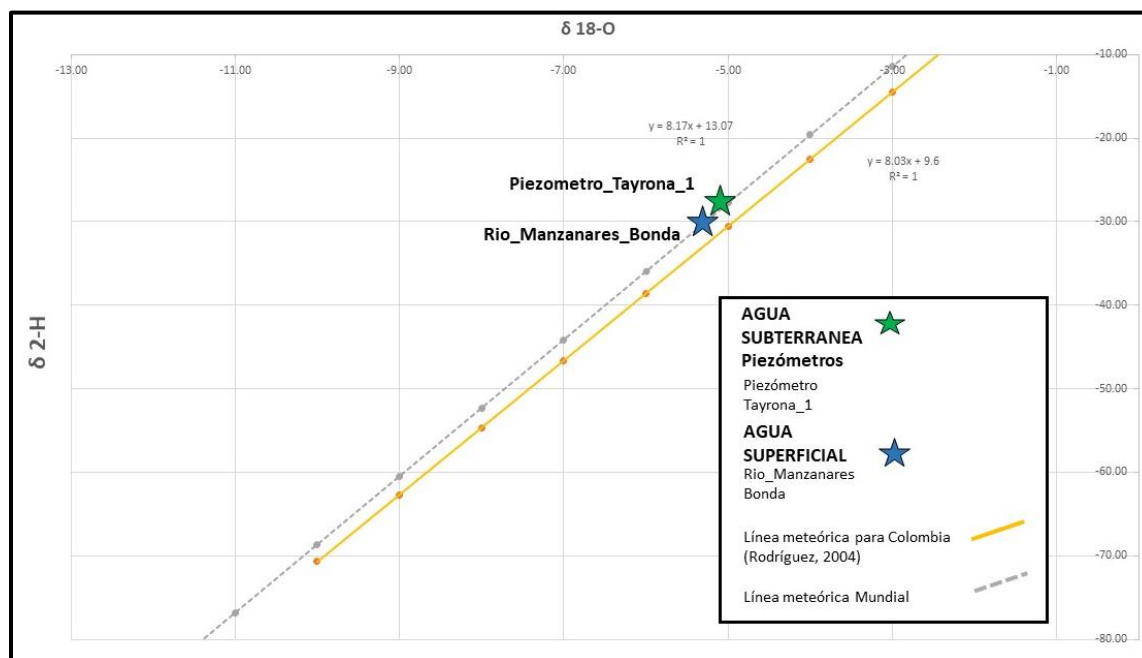
Los enriquecimientos isotópicos, en relación con el agua del océano, presentan una correlación lineal en todo el rango para las aguas que no han sufrido una evaporación excesiva, (Craig 1961).

$$\delta D = 8 \delta O^{18} + 10_{15}$$

¹⁵ Craig, H., 1961, Isotopic Variations in Meteoric Waters, Science, 133, pp. 1702 – 1703

Tabla 11

Resultados del análisis de isotopos estables para el acuífero de Santa Marta- Rio Manzanares



Fuente: El presente Estudio.

Tabla 12

Datos de Isotopía Obtenidos para el área de estudio.

Muestra	δ 18-O	δ 2-H
ISO-RM-BONDA-E	-5.29	-29.98
ISO-PZ-UM-T (ISO-PZ-UM-E)**	-5.13	-27.88
Precipitación	0.15	10.25

Fuente: El presente Estudio

A continuación, se describen las principales características isotópicas y su significado hidrogeológico para cada uno de los tipos de agua estudiados:

Aguas subterráneas (Piezómetro Tayrona – 1) y aguas superficiales (Rio Manzanares Bonda): De acuerdo en el inventario de aguas realizado, fueron objeto de muestreo con el fin de caracterizar a nivel isotópico del agua presente en los acuíferos de porosidad primaria asociado al

acuífero aluvial. Por medio de los datos isotópicos es posible interpretar que estas aguas son originadas por recarga directa del agua precipitada coherentes con la línea meteórica para Colombia, evidenciando ausencia de fenómenos de evaporación, hidrólisis de minerales o cualquier proceso que genere modificaciones isotópicas, por lo que es posible relacionar la presencia de estas aguas con cortos periodos de permanencia en el acuífero, así como una confirmación de un origen común en relación al tipo de conexión entre aguas del acuífero y el sistema de drenaje.

6.5.6 *Análisis de Isotopo Tritio*

Edad del agua subterránea del acuífero de Santa Marta. El tritio (H-3), es un isotopo radiactivo del hidrogeno que tiene un periodo de semidesintegración, o vida media, $T_{1/2}=12.43$ años. En zonas tropicales, el contenido natural de tritio es más o menos de 2 UT, valor que alcanzó hace aproximadamente 25 años.

Tabla 13

Datos Obtenido para el análisis de Tritio

Fuente de las aguas muestreadas	Lugar de Muestreo	Muestra	UE3H	+ - 1σ	PH	EC (uS/cm)	Tiempo Transito (años)
Aguas Subterránea	Piezómetro Tayrona_1	ISO-PZ-UM-T	1.8	0.6	7	586	2.5 – 9.9
Precipitación	Agua lluvia		2				

Fuente: El presente Estudio

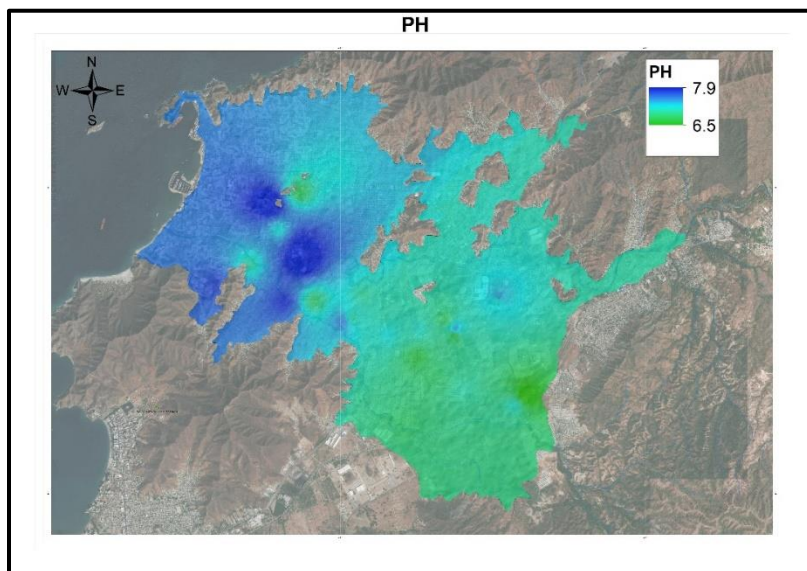
Se observa para el isotopo radiogénico tritio, que las aguas presentes del acuífero de Santa Marta son aguas que representan el agua lluvia de la cuenca, el tiempo estimado de 2.5 a 9.9 años nos muestra que ha transcurrido poco tiempo desde la precipitación hasta que entro al acuífero, mostrando que las aguas son actuales, validando una conexión directa y rápida del acuífero con el rio Manzanares.

➤ *PH*

El pH son las siglas del Potencial de Hidrogeno. Esta es una medida que se utiliza para estimar el grado de alcalinidad o acides de una solución. Este se mide en una escala de 1 a 14, donde el menor valor sería el más acido y el más alto el más alcalino, el 7 que sería la mitad de la escala se considera neutro. Se observan valores de pH de 7.9 a 7.5 hacia la zona occidental, contrastando con valores de PH hacia la parte oriental de 6.5 a 7, mostrando valores de pH con mejores características para su uso y consumo.

Figura 21

PH del acuífero de Santa Marta



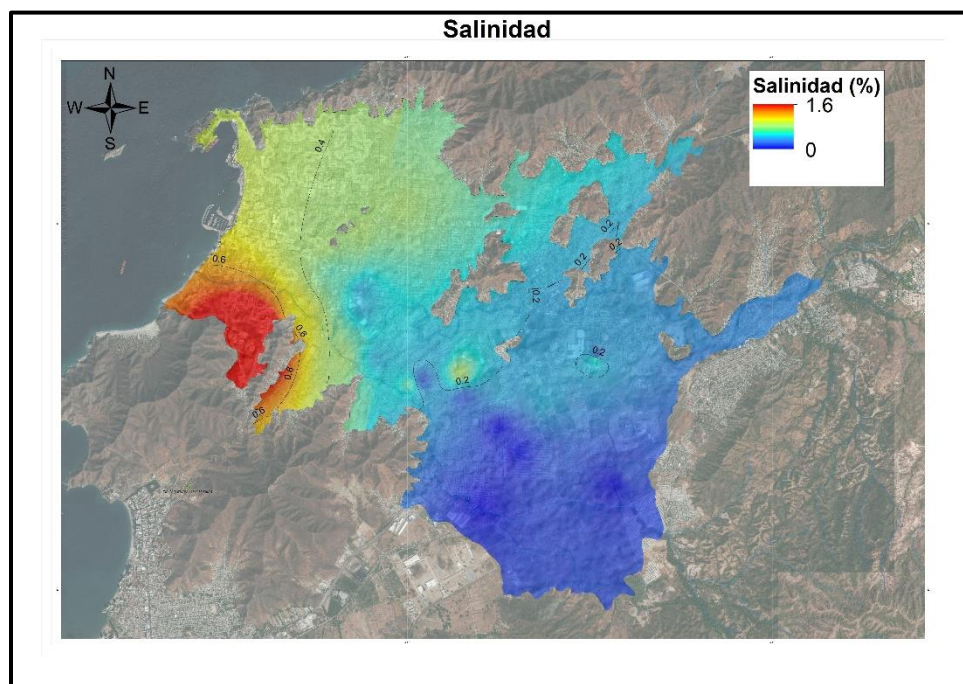
Fuente: El presente Estudio

➤ *Salinidad*

La salinidad se define como el contenido de sal disuelta en cierta cantidad de agua. En 1978 los oceanógrafos concluyen en que la salinidad debe medirse en Unidades Prácticas de Salinidad (psu), esta es la relación de la conductividad del agua de mar con una solución de cloruro de potasio (KCl). La unidad de psu es exactamente equivalente a g/L, es decir, 10 psu son 10 g/L. En la Figura 22 se observa un comportamiento similar al pH en el acuífero, mayores salinidades hacia la zona occidental mostrando contacto con la cuña salina, mientras hacia la parte occidental se presentan valores de salinidades cercanas a cero, presentando aguas con mejores características de calidad para su uso y aprovechamiento.

Figura 22

Salinidad del acuífero de Santa Marta

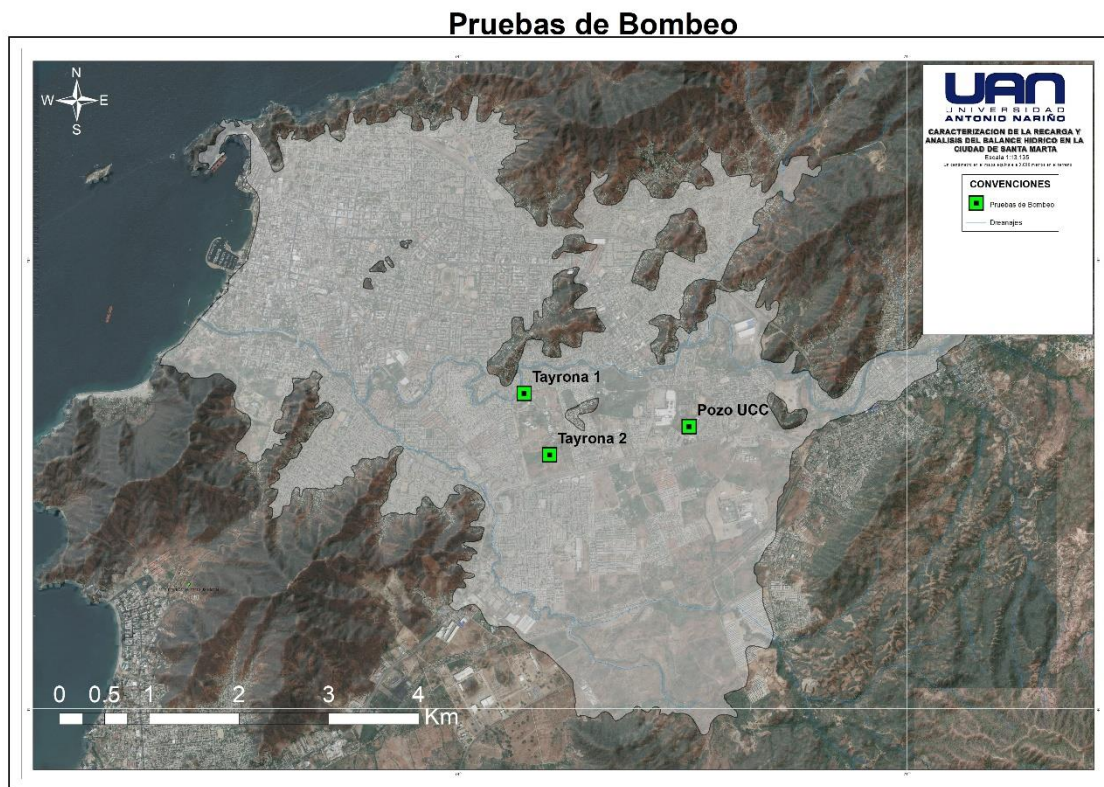


Fuente: El presente Estudio

6.6 Modelo Hidráulico y Piezometría Pozo Tayrona_1

Figura 23

Ubicación de pozos con pruebas de Bombeo



El modelo hidráulico está basado en una prueba de bombeo constante que se realizó al momento de la construcción del Piezómetro para definir el caudal de extracción y evaluar las características del acuífero tales como; Nivel estático, Nivel dinámico, Permeabilidad, Capacidad Especifica y Transmisividad, la evaluación de los resultados se realizó por el método de Jacob, el cual se basa en la ecuación de Thiem, cuya solución se da graficando en forma semilogarítmica el abatimiento contra el tiempo.

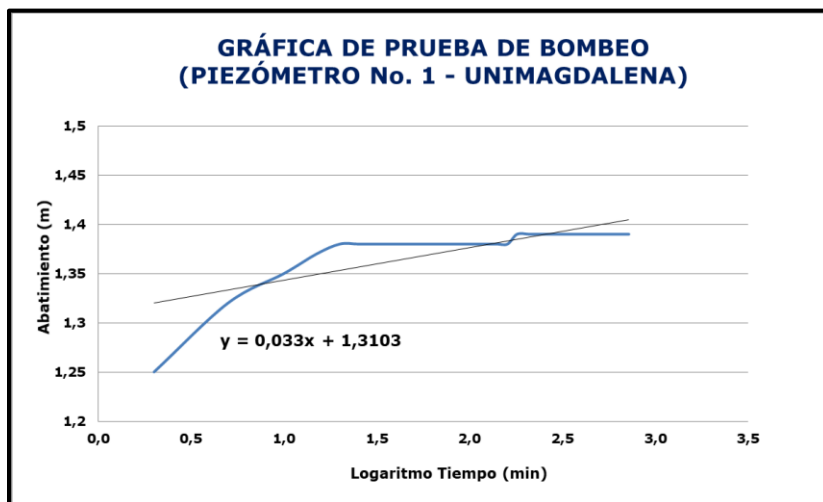
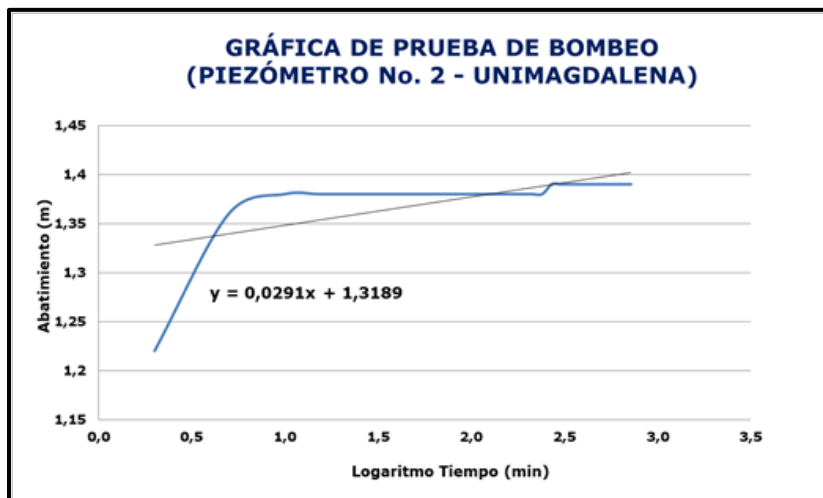
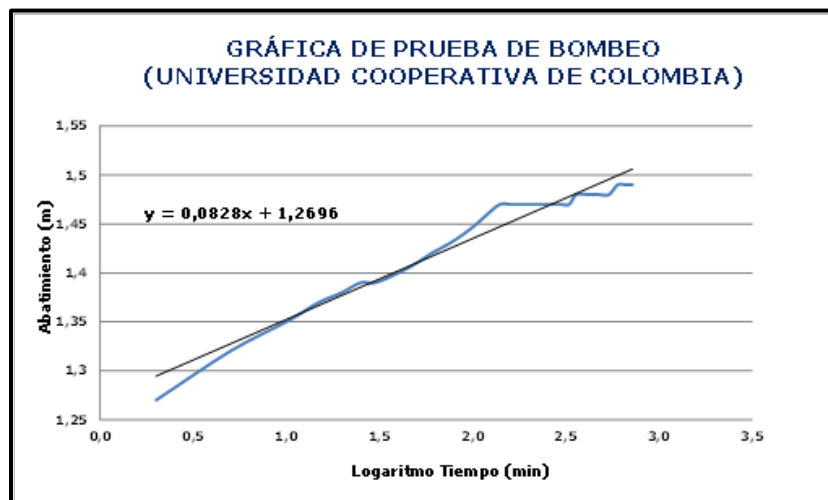
Figura 24*Prueba de Bombeo Piezómetro Tayrona_1**Fuente:* Universidad del Magdalena¹⁶**Figura 25***Prueba de Bombeo Piezómetro Tayrona_1**Fuente:* Universidad del Magdalena¹⁷¹⁶ Informe de Perforación de los Piezómetros de Monitoreo Universidad del Magdalena, Corcel Consultoría & Interventoría Ltda, 2020.¹⁷ Ibidem

Figura 26

Prueba de Bombeo Pozo universidad Cooperativa de Colombia



Fuente: POMCA de la Cuenca Hidrográfica Río Piedras, río Manzanares y otros directos al Caribe (SZH 1501)
(2019-05-09)

Las Características del acuífero son las siguientes, ver Tabla 14.

Tabla 14

Propiedades Hidráulicas del pozo Tayrona_1

Propiedad	Tayrona_1	Tayrona_2	Universidad Cooperativa
Capacidad específica	0.70 lps/m	0.79 lps/m	2.63 lps/m
Q promedio	0.97 lps	1.10 lps	3.87 lps
Q, Caudal	83.81 (m ³ /día)	96.04 (m ³ /día)	334.37 (m ³ /día)
Transmisibilidad	464,87 m ² /día	598.31 m ² /día	740.13 m ² /día
Conductividad Hidráulica.	47.01 m/día	14.68 m/día	32.05 m/día

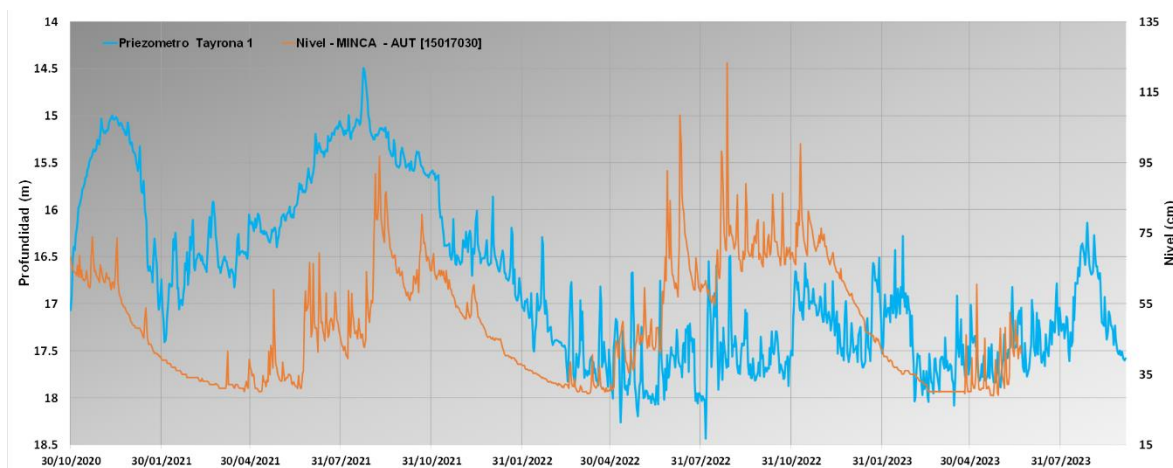
Fuente: Universidad del Magdalena¹⁸, POMCA de la Cuenca Hidrográfica Río Piedras, río Manzanares y otros directos al Caribe (SZH 1501) (2019-05-09).

Una de las principales características que vamos a evaluar es la recarga medida en la piezometría. Un piezómetro es un dispositivo que se utiliza para medir el nivel en perforaciones de agua, el piezómetro Tayrona _1 mide el nivel, y la conductividad, estas mediciones son de una gran importancia para conocer el comportamiento de la recarga del acuífero la cual está dada por la relación (rio-acuífero), a partir de la información.

Dentro del acuífero de Santa Marta está ubicado el piezómetro Tayrona_1, el cual se encuentra en los terrenos de la Universidad del Magdalena, ubicado más precisamente en las coordenadas que se muestran en la Tabla 1, este piezómetro es uno de los puntos más importantes del estudio presente, ya que de acá se tomó información importante que nos devela una parte real de la relación rio- acuífero.

Figura 27

Datos de piezometría Pozo Tayrona_1

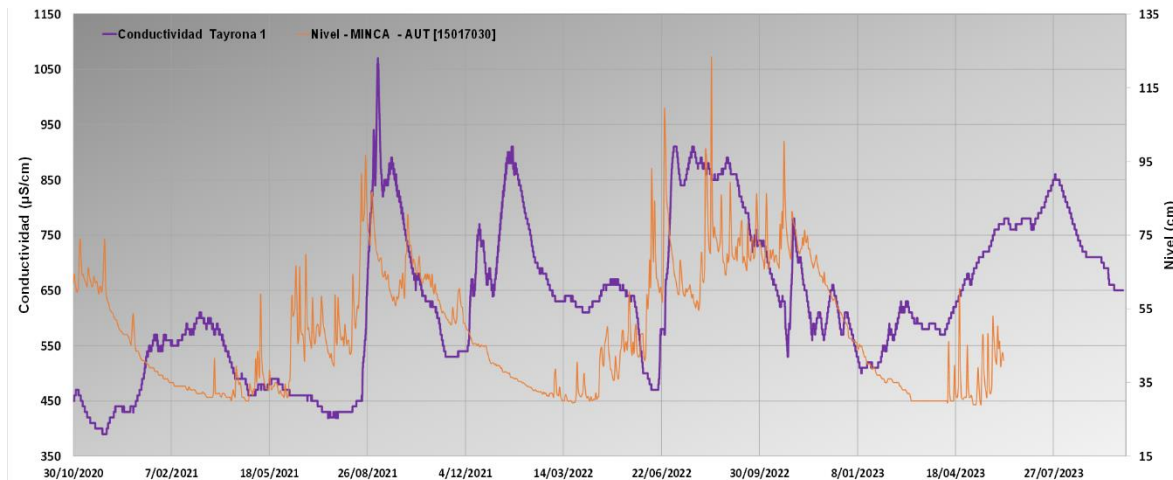


¹⁸ Ibidem

Fuente: Universidad del Magdalena¹⁹

Figura 28

Datos de Conductividad Pozo Tayrona_1



Fuente: Universidad del Magdalena²⁰

¹⁹ Ibidem

²⁰ Ibidem

7 Conclusiones

1) El acuífero de Santa Marta, está conformado por el cuaternario aluvial (Qal), se puede dividir en dos zonas, la zona oriental y la zona occidental, mostrando mejores características hidrogeoquímicas la zona oriental.

2) La zona occidental presenta aguas salobres, con valores de PH entre 7.3 y 7.9 que muestra contacto con aguas de la cuña salina, en cambio la zona oriental presenta PH entre 6.9 y 7.3 relacionados a aguas bicarbonatadas cálcicas de bajo tránsito.

3) A partir del balance se observa que Las precipitaciones en la ciudad (parte baja de la cuenca) son bajas, mostrando déficit hídrico.

4) Por análisis de isotopos estables (oxígeno 18 y deuterio) se deduce una proveniencia similar de las aguas del Piezómetro Tayrona_1, con las aguas del rio Manzanares.

5) Se demostró a partir de los datos de niveles del rio vs los datos del Piezómetro interacción entre el rio y el acuífero, en la que se deduce que el rio es la fuente de recarga del acuífero.

6) Se observa que el acuífero no recupera su nivel a pesar de aumentos en los niveles del río, esto se debe probablemente a sobre explotación del acuífero para satisfacer la demanda de la ciudad de Santa Marta.

7) Se obtuvo como resultado del análisis del isotopo radiogénico tritio, que las aguas presentes del acuífero de Santa Marta son aguas que representan el agua lluvia de la cuenca, el tiempo estimado de 2.5 a 9.9 años nos muestra que ha transcurrido poco tiempo desde la

precipitación hasta que entro al acuífero, mostrando que las aguas son actuales, validando una conexión directa y rápida del acuífero con el rio Manzanares.

8 Recomendaciones

1) Toma de muestras para Hidrogeoquímica, que abarque una mayor especialización, para poder caracterizar de mejor manera las aguas meteóricas.

2) Instalar una red de monitoreo piezométrico más amplia para realizar un plan de manejo adecuado a las condiciones de recarga del acuífero.

3) Se recomienda para estudios posteriores la combinación de las metodologías anteriormente expuestas para la determinación y validación de la recarga en los acuíferos del país, ya que podemos darnos cuenta de que la sobreestimación de la recarga se puede convertir en un factor en contra a la hora de realizar los planes de manejo de acuíferos, ya que se puede generar una sobreexplotación condicionados a una supuesta alta recarga.

4) Se hace necesario realizar manejo de la recarga al acuífero mediante recarga artificial y en su defecto el uso de (SUDS) Sistemas Urbanos de Drenajes Sostenibles, los cuales evitarían dos tipos de problemas la recarga del acuífero y las inundaciones que se presentan en la ciudad debido al deficiente sistema de alcantarillado.

9 Bibliografía

- [1] Colombia. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico. Bogotá, D.C.: Colombia, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010. 124 p.
- [2] Craig, H., 1961, Isotopic Variations in Meteoric Waters, Science, 133, pp. 1702 – 1703
- [3] D-Piper (Diagrama Piper de Densidad) Representación de grandes conjuntos de datos mediante el diagrama de Piper. Manual de Uso / Instituto Geológico y Minero de España. Área de Geología Ambiental y Geomatemáticas. Moreno Merino, L., Aguilera Alonso, H., González Jiménez, M., Díaz Losada, E., Romero Prados, A. 2021.
- [5] Escobar Villar, A. (2022). Hidrometeorología y Cálculo de Variables Preliminares de un Balance Hídrico para el Sistema Acuífero de Santa Marta y sus Alrededores [Trabajo de grado, Universidad del Magdalena].
- [6] Iguarán Hernández, H. (2022). Modelo de recarga potencial del sistema acuífero de santa marta y sus alrededores.
- [7] Memoria Explicativa Geología de las PLANCHAS 11 SANTA MARTA Y 18 CIÉNAGA Escala 1:100.000, Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero Ambiental y Nuclear Ingeominas.
- [8] Ministerio del Medio Ambiente y recursos Hídricos de El Salvador, página <https://srt.snet.gob.sv/sihi/public/app/1/caracterizacion>
- [9] Informe de Perforación de los Piezómetros de Monitoreo Universidad del Magdalena, Corcel Consultoría & Interventoría Ltda, 2020.
- [10] Perdomo V, Rojas C, Modelo Hidrogeológico Conceptual del municipio de Chiquinquirá, a partir de información secundaria. Universidad Católica de Bogotá, 2017.
- [11] Schosinsky, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. Revista Geológica de América Central. 34-35: 13-30.
- [12] Thornthwaite, C.W., Mather, J.R. (1957). Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and Water Balance. Climatology. 10: 185-311.
- [13] Westenbroek, S.M., Kelson, V.A., Dripps, W.R., Hunt, R.J., and Bradbury, K.R., 2010, SWB-A modified Thornthwaite-Mather Soil-Water-Balance code for estimating groundwater recharge: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A31, 60 p.