

Evaluación del abatimiento de las aguas subterráneas en La Mesa de Los Santos (Santander)

Daniel Ricardo Roenes Mejía, Aura Marcela Peña La Rotta

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Civil

Director

Isabel Cristina Domínguez Rivera

PhD in Agriculture, Food and Rural Development

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

### **Dedicatoria**

Yo Daniel Ricardo Roenes Mejía dedico este proyecto enteramente a mi familia, en especial a mi abuela Fernanda Angarita que siempre estuvo dispuesta a brindarme su apoyo incondicional y su buen consejo en momentos difíciles, a mi abuelo Edmundo Mejía que desde pequeño me enseñó a esforzarme por mis sueños, a mi madre Claudia Mejía por inculcarme el amor por el aprendizaje, a mi tía Sandra Mejía que siempre confió en mí y en mis capacidades, y en general a todos mis compañeros, amigos y maestros que hicieron de mi proceso formativo una muy hermosa experiencia.

Yo Aura Marcela Peña La Rotta dedico este proyecto especialmente a mi madre Fany Yolanda Peña La Rotta por creer en mí y siempre animarme a realizar y cumplir cada uno de mis sueños; a mis tías Mary Luz Peña La Rotta y Aurora Peña La Rotta por brindarme su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida; a mis abuelos Rosaura La Rotta Barrios y Juan de Dios Peña, por enseñarme que cada persona y situación que encuentre en el camino trae un aprendizaje y por siempre estar cuando más los necesito; a Alonso Izaquita Naranjo que siempre fue un gran apoyo en cada momento de esta etapa; a mis compañeros, amigos, y docentes los cuales estuvieron a mi lado acompañándome en este proceso para poder obtener mi título profesional.

### **Agradecimientos**

Agradecemos a La Universidad Industrial de Santander y al grupo GPH de la escuela de ingeniería civil por brindarnos todas las herramientas y brindarnos apoyo económico para culminar el proyecto. Agradecemos también a la directora del proyecto, la profesora Isabel Cristina Domínguez Rivera, a la profesora María Alejandra Cetina y a la profesora Sully Gómez Isidro, por compartir sus conocimientos y guiarnos en el desarrollo del proyecto. Por último, quisiéramos dar un especial agradecimiento a las personas que nos regalaron un poco de su tiempo y nos abrieron las puertas de sus fincas, sin ellos hubiera sido imposible recopilar la información usada.

**Tabla de contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	11
1. Objetivos.....	14
1.1 Objetivo General.....	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Marco Teórico.....	15
2.1 Agua Subterránea .....	15
2.2 Acuíferos.....	15
2.3 Captación de aguas subterráneas.....	16
2.4 Abatimiento de aguas subterráneas .....	17
2.5 Gestión Integral del Recurso Hídrico .....	18
3. Metodología.....	18
3.1 Caracterización de los Principales Puntos de Agua Aprovechables .....	20
3.1.1 Toma del nivel estático.....	20
3.2 Verificación de las Direcciones de Flujo del Agua Subterránea a Partir de Mapas de Isopiezas .....	21
3.3 Definición de los cambios en los niveles de agua mediante la comparación entre las isopiezas actuales e isopiezas históricas.....	22
4. Resultados.....	23
4.1 Recopilación de Información Secundaria.....	23
4.2 Ubicación y Selección de los Puntos a Comparar.....	24

4.3 Medición de Niveles Piezométricos .....	25
4.4 Geolocalización de las Captaciones .....	27
4.5 Isopiezas Actuales e Histórica .....	28
4.6 Análisis del Abatimiento .....	31
4.7 Direcciones de Flujo.....	34
5. Conclusiones.....	37
6. Recomendaciones.....	37
Referencias Bibliográficas.....	38

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 <i>Distribución, ubicación y niveles piezométricos en captaciones seleccionadas.</i>	
<i>Diciembre 2020</i> .....	26

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1 <i>Geolocalización de la Mesa de Los Santos</i> .....	19
Figura 2 <i>Distribución de los puntos de agua del inventario 2007</i> .....	23
Figura 3 <i>Distribución de los puntos de agua del inventario 2016</i> .....	24
Figura 4 <i>Distribución de los puntos de agua del 2020</i> .....	25
Figura 5 <i>Geolocalización de captaciones de aguas subterráneas en la Mesa de Los Santos</i> .	28
Figura 6 <i>Mapa de Isopiezas vs Curvas de Nivel 2007</i> .....	29
Figura 7 <i>Mapa de Isopiezas vs Curvas de Nivel 2007</i> .....	30
Figura 8 <i>Niveles estáticos entre inventarios</i> .....	32
Figura 9 <i>Niveles piezométricos entre inventarios</i> .....	33
Figura 10 <i>Direcciones de flujo 2007</i> .....	35
Figura 11 <i>Direcciones de flujo 2020</i> .....	36

### **Lista de Apéndices**

“Los apéndices están adjuntos y puede visualizarlos en la base de datos de la biblioteca UIS”

Apéndice A. Formulario FUNIAS.

Apéndice B. Inventario de puntos de agua 2007.

Apéndice C. Inventario de puntos de agua 2016.

Apéndice D. Inventario de puntos de agua 2020.

Apéndice E. Mapa de precipitaciones diciembre 2020.

Apéndice F. Mapa geológico de la Mesa de los Santos

Apéndice G. Mapa de isopiezas 2007.

Apéndice H. Mapa de isopiezas 2020.

Apéndice I. Niveles estáticos 2016.

Apéndice J. Niveles piezométricos 2016

Apéndice K. Uso del suelo.

## Resumen

**Título:**

Evaluación del abatimiento de las aguas subterráneas en La Mesa de Los Santos (Santander)\*

**Autores:**

Daniel Ricardo Roenes Mejía, Aura Marcela Peña La Rotta\*\*

**Palabras Clave:**

Aguas subterráneas, abatimiento, pozo, aljibe, mapa de isopiezas

**Descripción:**

La investigación expuesta a lo largo de este documento tuvo lugar en la Mesa de los Santos en Santander. Su objetivo principal fue evaluar el abatimiento de las aguas subterráneas presentes en esa meseta. La investigación se desarrolló en tres etapas. En la primera etapa se caracterizaron los principales puntos de agua que están siendo aprovechados por la comunidad, para esto se buscó información histórica de puntos de recolección de agua subterránea ubicados en la Mesa de los Santos, recopilada por INGEOMINAS y un proyecto de investigación de estudiantes UIS realizado en el 2016. Así mismo, se hizo una visita de campo para seleccionar los pozos y aljibes que se monitorearon durante el tiempo de investigación. En la segunda etapa se verificaron las direcciones de flujo del agua subterránea mediante mapas de isopiezas creados en el software QGIS, con los cuales se obtuvieron las cotas en toda la superficie. Por último, en la tercera etapa, mediante el análisis estadístico de los resultados, se logró identificar el cambio en el nivel del agua de cada pozo. Se evidenció que el nivel freático descendió en 9 de las 13 captaciones estudiadas, y por lo tanto, estas captaciones presentaron abatimiento, lo cual es muestra de explotación continua del recurso hídrico subterráneo contenido en el acuífero superior de la Mesa de los Santos. Por otro lado, las direcciones de flujo parecen mantenerse iguales por el momento mostrando una disminución uniforme del nivel de las aguas subterráneas. La información recopilada en este estudio amplía el conocimiento del estado real de los sistemas de almacenamiento de las aguas subterráneas en la zona y es una herramienta valiosa para que la comunidad y las autoridades implementen soluciones para prevenir o controlar el agotamiento de esta fuente de agua.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Isabel Cristina Domínguez Rivera Doctora en Agricultura, Alimentación y Desarrollo Rural.

### Abstract

**Title:**

Evaluation of groundwater depletion in La Mesa de Los Santos (Santander)\*

**Author(s):**

Daniel Ricardo Roenes Mejía, Aura Marcela Peña La Rotta\*\*

**Key Words:**

Groundwater, depletion, well, cistern, isopieces map.

**Description:**

This research was developed in la Mesa de los Santos in Santander and has as main objective to evaluate the of groundwater depletion in this area. The research has three phases. In the first stage, the main water points that are being used by the community were characterized, based on historical information from groundwater inventories compiled by INGEOMINAS and a student research project from UIS carried out in 2016. Likewise, a field visit was made to select the wells and cisterns that were monitored during the research period. In the second phase, the groundwater flow directions were verified using isopiece maps created in the QGIS software. Finally, in the third phase involved the statistical analysis of the results to identify the change in the water level of each well. It was evidenced that the water table fell in 9 of the 13 studied wells, and therefore, these intakes showed depletion, which is a sign of continuous exploitation of the groundwater resource contained in the upper aquifer of the Mesa de los Santos. On the other hand, the flow directions remained the same during the studied period, showing a uniform lowering of the groundwater level. The information collected in this study expands the knowledge of the real state of the groundwater storage systems in the area and is a valuable tool for the community and the authorities to implement solutions to prevent or control the depletion of this water source.

---

\* Degree Work

\*\*Industrial University of Santander. Faculty of Physic-mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Isabel Cristina Domínguez Rivera PhD in Agriculture, Food and Rural Development.

## Introducción

El agua subterránea es el resultado de la infiltración profunda de aguas derivadas de precipitaciones o fuentes superficiales conectadas a través de poros u orificios en los sedimentos, suelos y rocas, constituyendo un eslabón muy importante en la cadena del ciclo hidrológico. Los reservorios del agua subterránea se denominan acuíferos, que finalmente son embalses naturales subterráneos, que pueden o no retornar de forma natural hacia otros sistemas acuáticos, regulando las corrientes hídricas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014b).

El agua subterránea es uno de los patrimonios naturales más importantes para el ser humano, debido a que en el subsuelo se alberga la mayor parte de los recursos hídricos que se utilizan en el planeta (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014b), pues las estadísticas señalan que el 75% del planeta está cubierto por agua, de la cual el 29.7% corresponde a aguas subterráneas. Además, estas mismas representan más del 95% de aguas dulces de continentes e islas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014a).

Uno de los factores que evidencian la importancia del almacenamiento del agua subterránea es el uso que se le da a la misma como amortiguación natural en periodos de sequía, en donde el agua superficial disminuye su caudal debido a cambios climáticos generados por el calentamiento global, o en regiones áridas con poca o nula escorrentía superficial (Asociación Internacional de Hidrogeología (AIH), 2017). Por ello, la potencial accesibilidad a los acuíferos a través de pozos, aljibes y cisternas es una solución práctica para estas problemáticas (UNESCO, 2019).

En Colombia, existe una amplia red de aguas subterráneas y acuíferos utilizables. Sin embargo, existe un bajo nivel de conocimiento, preparación técnica y académica, así como un escaso trabajo que permita contar con información institucional suficiente para el manejo integral

del recurso hídrico subterráneo (Instituto Colombiano de Geología y Minería-INGEOMINAS, 2004). Por lo tanto, para aumentar el conocimiento científico en el área, este estudio evaluó el abatimiento de las aguas subterráneas, tomando como caso el acuífero superior de la Mesa de los Santos en el departamento de Santander, región que hace parte de la jurisdicción de la Corporación Autónoma de Santander (CAS) y de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), instituciones que vigilan y regulan este recurso. Para ello, se identificaron y caracterizaron en un inventario los puntos de agua subterránea existentes con mayor y mejor información recopilada en los estudios realizados por: i) el Servicio Geológico Colombiano - SGC en el año 2007 (INGEOMINAS, 2007); ii) el proyecto de grado “BALANCE HIDRÍCO PARA ESTIMAR RECARGA POTENCIAL EN LA MESA DE LOS SANTOS”, realizado en el año 2016 (Becerra Hernández & Parra Estepa, 2016); y iii) datos tomados por el grupo de investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH) de la Universidad industrial de Santander (UIS) y los autores del proyecto en el año 2020, teniendo en cuenta niveles freáticos, coordenadas, cotas y unidades geológicas. Con esta información se construyeron mapas de isopiezas por cada año con la finalidad de analizar los cambios en las direcciones de flujo del agua subterránea con el paso del tiempo, además de facilitar el análisis estadístico y comparativo entre isopiezas nuevas e históricas, datos, que conglomerados permitieron evaluar el abatimiento del acuífero superior de la Mesa de los Santos.

La información recopilada permite ampliar el conocimiento del estado real en el que se encuentran los sistemas de almacenamiento de las aguas subterráneas de nuestro país, un aspecto de vital importancia, pues este es un recurso indispensable para los seres vivos. Los estudios de abatimiento son herramientas valiosas para que la comunidad y las autoridades de la Mesa de los Santos conozcan el estado del recurso subterráneo y puedan diseñar y aplicar soluciones para

prevenir o controlar el agotamiento de esta fuente de agua. Además, se aporta información real y reciente a la base de datos de los acuíferos en Colombia, administrada por las Corporaciones Autónomas Regionales.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Realizar una evaluación del abatimiento de las aguas subterráneas en el acuífero superior de la Mesa de Los Santos.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Caracterizar los principales puntos de agua aprovechables en el municipio de la Mesa de Los Santos, departamento de Santander – Colombia.

Verificar las direcciones de flujo del agua subterránea a partir de mapas de isopiezas.

Definir cambios en los niveles de agua mediante la comparación entre isopiezas actuales e históricas disponibles.

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Agua Subterránea

El Servicio Geológico Colombiano - SGC (anteriormente INGEOMINAS) resalta en el Atlas de aguas subterráneas de Colombia (2003-2004), que más del 75% del territorio cuenta con zonas favorables para el almacenamiento de agua subterránea (Instituto Colombiano de Geología y Minería-INGEOMINAS, 2004).

Estas aguas se encuentran en el subsuelo, y por gravedad se infiltran y se almacenan a través de fisuras y poros (Astorga Espeleta, 2013) en las diferentes formaciones geológicas, abasteciendo pozos profundos, aljibes y manantiales (Vélez Otálvaro et al., 2011).

Las aguas subterráneas se distribuyen en dos capas principales, la primera es una zona aireada en la que se pueden encontrar poros con aire y otros con agua; la segunda capa es una zona saturada también llamada zona de aguas subterráneas, que se encuentra bajo presión hidrostática (INGEOEXPLORACIONES S.A.S, 2016).

### 2.2 Acuíferos

El almacenamiento de aguas durante periodos de lluvia es indispensable para mejorar la seguridad y la sostenibilidad del suministro de agua, ya que esta puede ser utilizada para abastecer de agua potable a la población, como mecanismo de riego y en proyectos para la restauración de los ecosistemas (Daus, 2019). La recolección de aguas se realiza en formaciones geológicas constituidas por rocas permeables, pueden estar en reposo o en movimiento, y reciben el nombre de acuíferos (Astorga Espeleta, 2013).

Los acuíferos se clasifican según la presión hidrostática a la que está sometida el agua almacenada. *Los acuíferos libres o no confinados* son almacenamientos que presentan una

superficie freática sin agua, están sometidos a una presión atmosférica y su nivel freático varía dependiendo del clima y de las precipitaciones de la región. Los *acuíferos cautivos, a presión, confinados o artesianos* están limitados por rocas o estratos de muy baja permeabilidad, están completamente saturados, por tanto, la presión hidrostática es mayor que en el resto, y su nivel hidrostático se puede medir con un piezómetro. Los *acuíferos semiconfinados* están limitados por rocas o estratos semipermeables, permitiendo el flujo de agua que se da en dirección de la diferencia de niveles piezométricos (Vélez Otálvaro et al., 2011).

Para hacerse a una idea del funcionamiento del sistema acuífero de una zona es necesario llevar registro de información geológica, geofísica, hidrológica, datos de localización de los puntos y de la accesibilidad a los mismos. Esta información se recopila en un documento que lleva por nombre ‘inventario de puntos de agua’, compilando datos secundarios obtenidos de registros anteriores y datos actualizados mediante un trabajo de campo (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014a).

### **2.3 Captación de aguas subterráneas**

Una captación es una instalación usada en la extracción del agua almacenada en los acuíferos (Vélez Otálvaro et al., 2011) con fines de abastecimiento para las actividades humanas (Salinas et al., 2016). Esta extracción se realiza por medio de un sistema de bombeo, ya sea manual o con una máquina, dependiendo del tipo de captación (Ardila Romero, 2018).

La extracción de agua de los *pozos profundos* se da por bombeo pues son excavaciones profundas logradas a partir de perforaciones verticales generalmente realizadas con máquinas. En estos pozos se suele tener agua de muy buena calidad. Los *aljibes* se obtienen realizando perforaciones poco profundas, hechas de forma manual, generalmente revestidas de ladrillo,

destinadas para almacenar agua de nivel freático; y en el caso de los *manantiales* no requieren de una mano de obra pues sus aguas afloran a la superficie naturalmente, estos se conocen mejor con el nombre de nacimientos (INGEOEXPLORACIONES S.A.S, 2016).

#### **2.4 Abatimiento de aguas subterráneas**

El nivel estático es la altura de la superficie libre del agua (Pérez Villarreal et al., 2018) y su medición se realiza en los acuíferos en los que el acceso a estos esté garantizado. Estas mediciones se deben tomar con instrumentos adecuados para obtener datos acertados (Mejía Ramírez & Ramírez Güina, 2016). El constante uso de captaciones y la sobreexplotación de las aguas subterráneas puede crear un descenso acelerado en el nivel estático de las aguas subterráneas, fenómeno conocido como abatimiento. Cuando se comparan los niveles estáticos de una captación a lo largo del tiempo se puede determinar si el acuífero experimenta abatimiento (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014a).

Al recopilar una gran cantidad de datos de niveles piezométricos (el cual se obtiene de la resta entre la altitud y el nivel estático de la captación) en un inventario de una misma zona de estudio es posible crear mapas de isopiezas, los cuales representan la distribución del potencial hidráulico del agua en un acuífero. Esta representación se hace a partir de isolíneas que muestran puntos de igual potencial hidráulico, y sobre un mapa que contenga una base geológica simplificada (Becerra Hernández & Parra Estepa, 2016). A partir de estos mapas de isopiezas se obtienen las direcciones del flujo del agua subterránea las cuales indican la forma en la que se mueve la misma por el subsuelo, se representan como líneas y van perpendiculares a las isolíneas (líneas de interpolación entre dos alturas piezométricas) y son una representación gráfica del flujo real del agua subterránea en movimiento (Vélez Otálvaro et al., 2011), además la representación

gráfica del flujo posibilita identificar rápidamente el abatimiento, pues un cambio del flujo en alguna zona significa el cambio de los niveles estáticos y por ende piezométricos allí.

## **2.5 Gestión Integral del Recurso Hídrico**

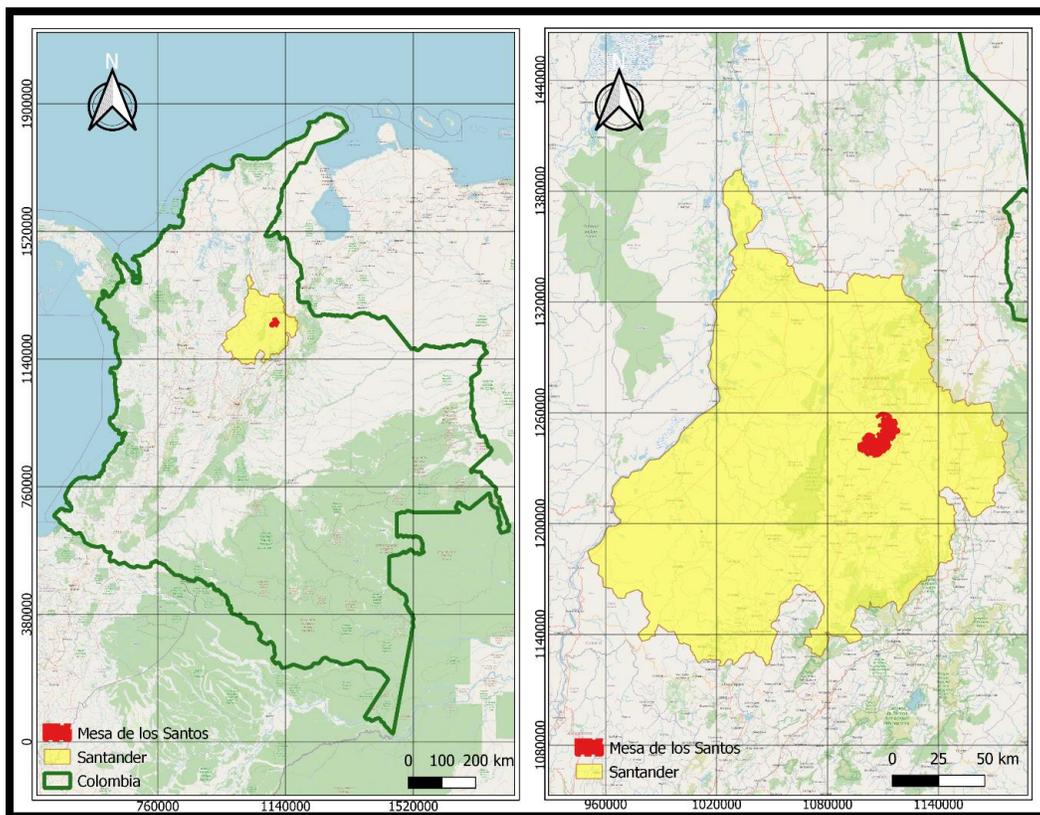
La Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH), busca conciliar el desarrollo económico, social, y ambiental cuidando el ciclo hidrológico y las interrelaciones que este tiene con los diversos componentes naturales y antrópicos (Asociación Internacional de Hidrogeología (AIH), 2017). La GIRH incluye la gestión de las aguas subterráneas, reconociendo que cada vez es más importante preservar y proteger los ecosistemas para garantizar la sostenibilidad del agua (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010). Debido a esto, se deriva la necesidad de planificar el uso del recurso, conociendo que el agua subterránea no es renovable, evitando así su agotamiento. Para ello es de suma importancia conocer en qué condiciones se encuentran los acuíferos, recopilando información real y reciente de diversas fuentes con características medibles como el nivel estático, el nivel piezométrico, la conductividad y el pH entre otros, y su análisis a través de estudios de abatimiento y representación mediante mapas de isopiezas que faciliten comunicar los hallazgos del estado del recurso a quien lo quisiera.

## **3. Metodología**

La Mesa de los Santos, está localizada en la región central del Departamento de Santander, al nororiente del país, en la vertiente occidental de la Cordillera Oriental, conformada por los municipios de Los Santos, Piedecuesta y Girón, con una extensión de 430 km<sup>2</sup> (Figura 1). Está delimitada al norte por la quebrada Los Montes; al noroeste por el río Manco hasta su desembocadura en el río Chicamocha, el cual se encuentra limitando hacia el sur y al oeste con el

río Sogamoso, desde el sitio conocido como Las Juntas, lugar donde se unen los ríos Chicamocha y Suárez para formar el río Sogamoso. Se ubica a una latitud de  $60^{\circ} 46' 00''$  N y una longitud de  $73^{\circ} 05' 00''$  W (Díaz et al., 2009). Se encuentra sobre la meseta de Jéridas, entre los 300 y los 1790 m.s.n.

**Figura 1** Geolocalización de la Mesa de Los Santos



El desarrollo de esta investigación se llevó a cabo a lo largo de 4 meses y se dividió en 3 fases. En la primera fase se realizó la caracterización de los principales puntos de agua aprovechables, en la segunda fase se verificaron las direcciones de flujo del agua subterránea a partir de mapas de Isopiezas, y en la tercera fase se definieron los cambios en los niveles de agua

mediante la comparación entre las isopiezas actuales e isopiezas históricas. A continuación, se describen las tres fases del proyecto.

### **3.1 Caracterización de los Principales Puntos de Agua Aprovechables**

En la primera etapa de la investigación se realizó una búsqueda de inventarios de puntos de agua con datos de pozos ubicados en la Mesa de los Santos, tomados de INGEOMINAS (INGEOMINAS, 2007) y el trabajo de grado “BALANCE HÍDRICO PARA ESTIMAR RECARGA POTENCIAL EN LA MESA DE LOS SANTOS” (Becerra Hernández & Parra Estepa, 2016), de estos inventarios se eligieron una serie de pozos, los cuales contaban con información completa con respecto a niveles freáticos, coordenadas, cotas y unidades geológicas.

Luego, se corroboró la ubicación y accesibilidad para obtener información de cada pozo mediante una salida en campo de reconocimiento en el mes de marzo del 2020. En esta visita se encontró que por el paso del tiempo algunos pozos ya no estaban en funcionamiento o estaban secos. Además, en ciertos puntos el acceso fue imposible por negativa de los propietarios. Tomando en cuenta la suma de los aspectos anteriores se eligieron los puntos que se monitorearon durante el transcurso de esta investigación, siendo en total 11 aljibes y 2 pozos perforados.

#### **3.1.1 Toma del nivel estático**

Se realizó la toma del nivel estático en los 11 aljibes y 2 pozos perforados seleccionados en la fase anterior. Este procedimiento se realizó con una sonda de contacto de la marca Seba Hydrometrie, modelo kll-1550m, la cual se introdujo en el pozo o aljibe desde su boca de manera lenta y cuidadosa. En el momento en que la sonda tocó el agua, esta emitió un sonido, y en ese momento se tomó el valor del nivel estático en metros.

La toma de datos se hizo entre el 21 y el 30 de diciembre del año 2020, y fue realizada por la estudiante María Alejandra Cetina, integrante del grupo GPH, quien tiene una tesis de doctorado en desarrollo que lleva como nombre "Flujos de agua subterránea y procesos geoquímicos en acuíferos con doble porosidad en una geoforma de mesa". Estos datos se registraron en el Formulario Único Nacional de Inventario de Puntos de Agua Subterránea (FUNIAS), diseñado por INGEOMINAS, IDEAM, y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014a) (*Apéndice A*), para registrar información en campo sobre puntos de aguas subterráneas en Colombia. Adicionalmente, las coordenadas y altitudes de los puntos fueron corroboradas con el receptor GNSS s800 de la marca Stonex.

Con esta nueva información se realizó un inventario de los puntos elegidos que contiene la identificación de cada uno además del tipo de perforación, sitio de referencia, coordenadas, altitud, nivel estático y datos extra como la conductividad y el pH (para estudios próximos).

### **3.2 Verificación de las Direcciones de Flujo del Agua Subterránea a Partir de Mapas de Isopiezas**

Con la información recopilada y organizada se realizó la geolocalización de todos los puntos de cada uno de los inventarios utilizando el software "QGIS", con ello se corroboró que los puntos datados en diciembre del 2020 tenían datos históricos en los inventarios anteriores, y con ellos llevar a cabo las comparaciones y el análisis del abatimiento. Para diseñar los mapas de isopiezas actuales e históricas se calculó el nivel piezométrico en metros sobre el nivel del mar de cada punto utilizando la información recopilada, aplicando la ecuación (1):

$$\text{Nivel piezométrico (m. s. n. m)} = \text{Altitud} - \text{Nivel estático} \quad (1)$$

Utilizando los datos de nivel piezométrico y la herramienta de interpolación de QGIS se hallaron las isopiezas (líneas de igual nivel piezométrico) y las superficies piezométricas (importantes para hallar las direcciones de flujo del agua). Por último, aplicando la corrección de sumideros a la capa raster generada de superficies piezométricas y utilizando la herramienta “Flow direction” en QGIS, se hallaron las direcciones de flujo de los puntos y las superficies piezométricas en la zona de estudio. Las condiciones que se necesitaron para establecer el flujo de agua fueron (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014a):

- Contar con una nivelación topográfica a cabeza de pozo, o a nivel del terreno que permita determinar la cota del agua subterránea.
- Tener una distribución espacial apropiada de los pozos para poder correlacionar la información y construir las líneas piezométrica.
- Contar con condiciones técnicas en campo para la toma de niveles.
- Obtener los niveles estáticos.

### **3.3 Definición de los cambios en los niveles de agua mediante la comparación entre las isopiezas actuales e isopiezas históricas.**

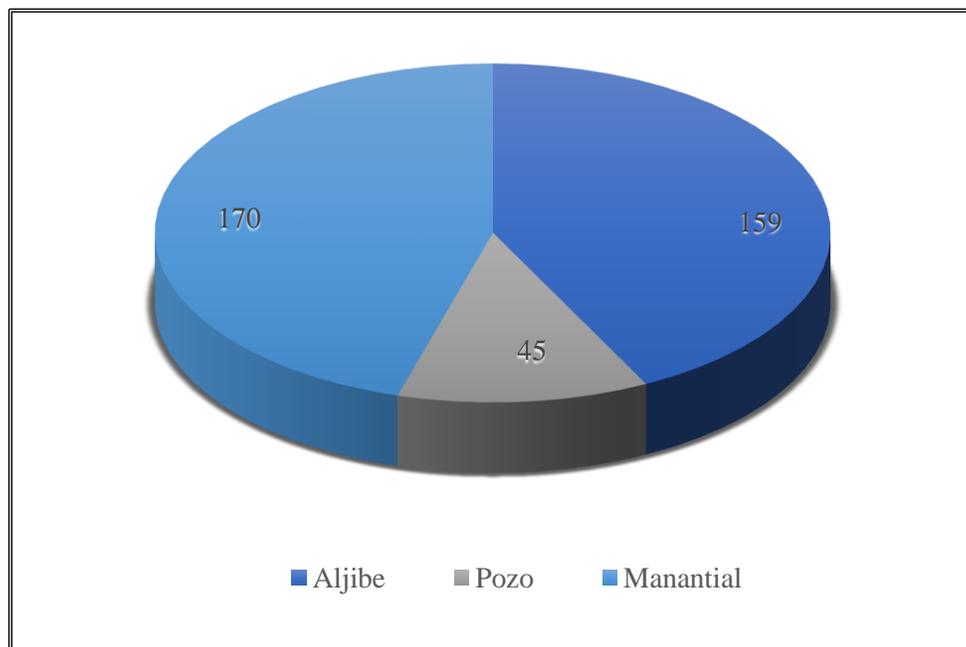
Mediante gráficas de barras se hizo la comparativa entre niveles piezométricos actuales (diciembre del 2020) e históricos (2007). Se compararon los niveles piezométricos, captación por captación, visualizando si se presentaba un descenso en el nivel, pues esto significaría la presencia de abatimiento en el acuífero, posiblemente por la sobreexplotación del mismo.

## 4. Resultados

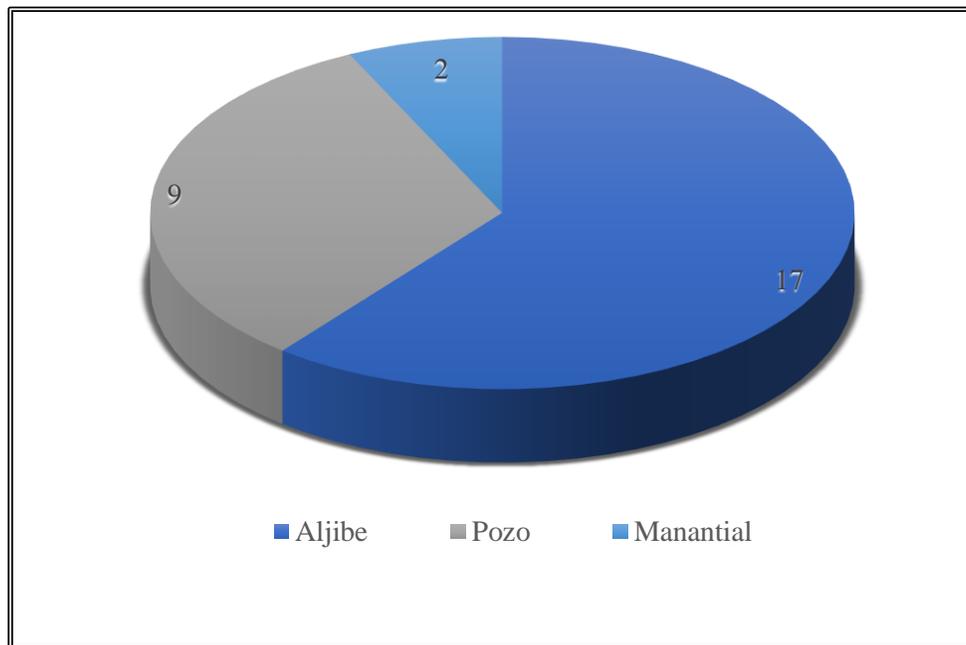
### 4.1 Recopilación de Información Secundaria

En el año 2007 INGEOMINAS caracterizó 374 captaciones de agua subterránea en la Mesa de los Santos. Cada una de estas captaciones fue revisada y su información digitalizada, para luego recopilarla en un inventario de puntos de agua subterránea (*Ver Apéndice B*). Al hacer el inventario, los puntos se dividieron en aljibes, pozos y manantiales, distribuidos como se muestra en la Figura 2.

**Figura 2** *Distribución de los puntos de agua del inventario 2007*



La otra parte de la información secundaria recopilada se tomó del inventario de puntos de agua realizado en el proyecto de investigación que lleva por nombre “BALANCE HÍDRICO PARA ESTIMAR RECARGA POTENCIAL EN LA MESA DE LOS SANTOS” en el año 2016 (*Apéndice C*). Este inventario consta de 28 puntos y su distribución se muestra en a Figura 3.

**Figura 3** *Distribución de los puntos de agua del inventario 2016*

#### 4.2 Ubicación y Selección de los Puntos a Comparar

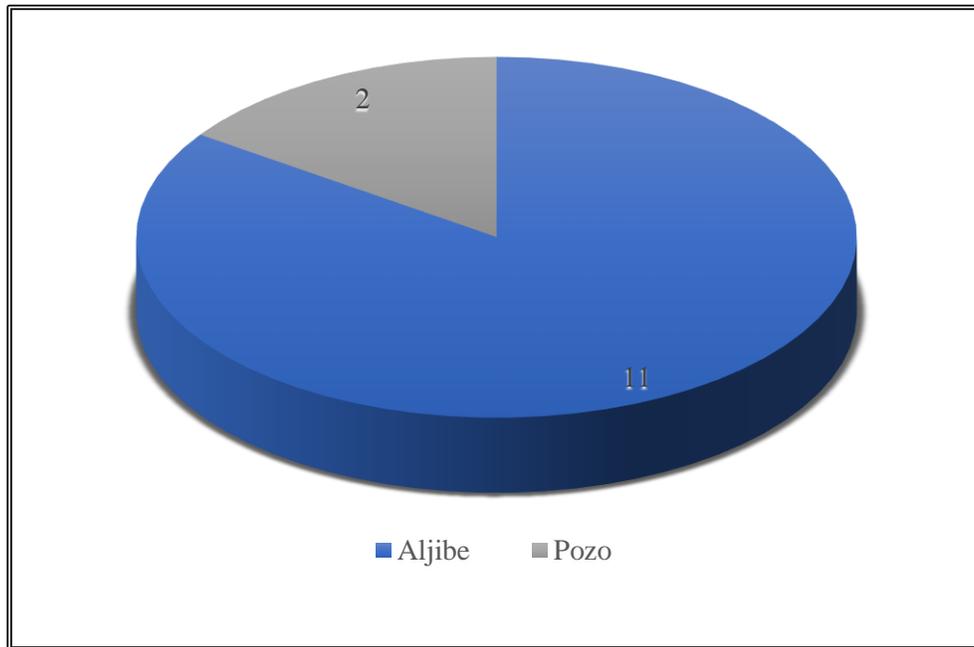
Se realizó una salida de reconocimiento entre el 6 y el 7 de marzo del 2020 con el objeto de visitar los puntos de los anteriores inventarios para determinar en cuales se pudieren realizar mediciones actualizadas de los niveles estáticos. Sin embargo, se presentaron varios impedimentos para la medición de niveles en varios puntos. Algunos de los impedimentos fueron:

- ✓ La sonda no lograba descender hasta el punto de tocar el agua.
- ✓ Negación del ingreso al punto por parte de la comunidad.
- ✓ El pozo había sido bombeado recientemente.
- ✓ La captación había sido sellada.

De esta forma, se logró seleccionar 13 puntos accesibles, con información de niveles estáticos y distribuidos en toda la zona de la Mesa de los Santos, con los cuales se realizó un

inventario de puntos de agua en diciembre del 2020 (*Apéndice D*). La distribución de los puntos se puede observar en la *Figura 4*

**Figura 4** *Distribución de los puntos de agua del 2020*



#### 4.3 Medición de Niveles Piezométricos

La medida de los niveles piezométricos de un acuífero debe realizarse en un periodo de tiempo corto para evitar variaciones fuertes en el nivel freático. En Colombia, usualmente, estas mediciones se realizan dos veces al año (en épocas de lluvia, y en épocas de sequía) (Vélez Otálvaro et al., 2011).

Teniendo en cuenta que los inventarios históricos tenían datos captados en época lluviosa y época seca, se hizo una revisión de los mapas de precipitación mensual en Colombia en el mes de diciembre del 2020 para determinar los datos a utilizar.

Al revisar los mapas del boletín climatológico mensual de diciembre del año 2020 (fecha en la que se tomaron las mediciones del nivel estático de las captaciones) publicados por el IDEAM (*Apéndice E*), se encontró que las precipitaciones habían sido realmente bajas, por lo tanto, se consideró pertinente definir la época como seca.

La distribución, ubicación, niveles estáticos y niveles piezométricos de las 13 captaciones seleccionadas se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1** *Distribución, ubicación y niveles piezométricos en captaciones seleccionadas.*

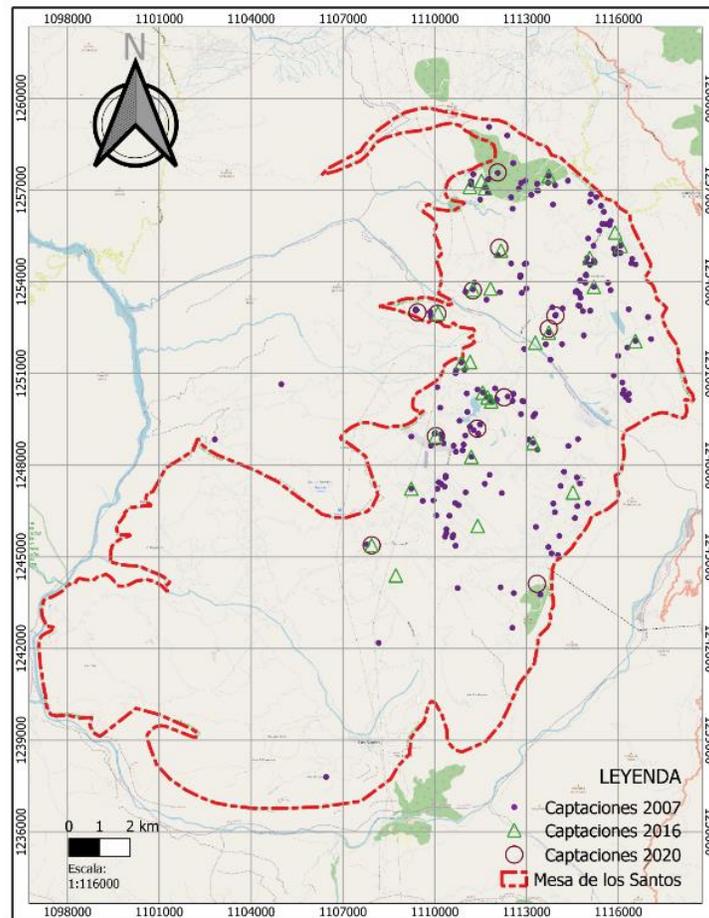
*Diciembre 2020*

ID	TIPO	NORTE	ESTE	ALTITUD (m.s.n.m)	NIVEL ESTÁTICO (m)	NIVEL PIEZOMETRICO (2020) (m)
1	Aljibe	1248948	1110039	1682	5,04	1676,96
2	Aljibe	1252894	1113945	1678	1,48	1676,52
3	Pozo	1252465	1113730	1659	1,34	1657,66
4	Aljibe	1255116	1112110	1640	1,33	1638,67
5	Aljibe	1249196	1111392	1678	8,51	1669,49
6	Aljibe	1245378	1107942	1669	3,28	1665,72
7	Aljibe	1244118	1113343	1724	0,76	1723,24
8	Aljibe	1250219	1112270	1690	3,36	1686,64
9	Aljibe	1250219	1112270	1690	2,90	1687,10
10	Aljibe	1250219	1112270	1690	4,37	1685,63
11	Aljibe	1253000	1109439	1611	4,08	1606,92
12	Aljibe	1253720	1111250	1626	4,26	1621,74
13	Pozo	1257580	1112057	1616	1,47	1614,53

#### **4.4 Geolocalización de las Captaciones**

Las 13 captaciones elegidas se localizaron en un mapa desarrollado con el SIG QGIS, junto a las captaciones de los inventarios de 2007 y 2016 (Figura 5). Luego de la construcción de este mapa, se encontró que había un pequeño desfase en las coordenadas de los puntos datados por INGEOMINAS en el 2007, pero al no tener el conocimiento de las herramientas y de la exactitud que se usó, no se realizó ninguna corrección.

Se logra observar que la distribución geográfica de las captaciones no es uniforme, pues la localización de ellas se concentra en la parte Norte y Centro De la Mesa de los Santos. Esto se debe a que en esta zona predomina la formación geológica “Los Santos”, formación con gran potencial hidrogeológico por contar con porosidad y permeabilidad altas, por otro lado, la zona, sur de La Mesa carece de puntos datados puesto que, aunque en ella afloran 3 formaciones geológicas (Rosa blanca, Tablazo, Silgará) (Apéndice F) todas poseen un potencial hidrológico muy bajo pues cuentan con porosidad y permeabilidad muy baja. Lo anterior sumado a que la toma de datos se realizó en época de verano imposibilitó el hallazgo de captaciones útiles para realizar las mediciones en la zona sur (Jimena Días et al., 2009).

**Figura 5** Geolocalización de captaciones de aguas subterráneas en la Mesa de Los Santos

#### 4.5 Isopiezas Actuales e Históricas

Con el SIG QGIS y los datos de niveles piezométricos se construyeron las superficies piezométricas, definidas como un lugar geométrico de los puntos que señalan la altura piezométrica de cada una de las porciones de un acuífero a una determinada profundidad y dirección (Vélez Otálvaro et al., 2011). Por lo tanto, son superficies con nivel piezométrico similar, y con la misma dirección de flujo. El Apéndice G y el Apéndice H muestran los mapas de isopiezas para 2007 y 2020, respectivamente. En los mapas, las superficies de tonos azules representan los

niveles piezométricos más altos y las superficies de tonos más rojizos representan los niveles más bajos.

Para entender un poco mejor los mapas de isopiezas es necesario hacer una comparación entre el mapa de isopiezas generado y un mapa de alturas con las curvas de nivel, tanto para el inventario del 2007 (Figura 6) como para el inventario del 2020 (Figura 7).

**Figura 6** Mapa de Isopiezas vs Curvas de Nivel 2007

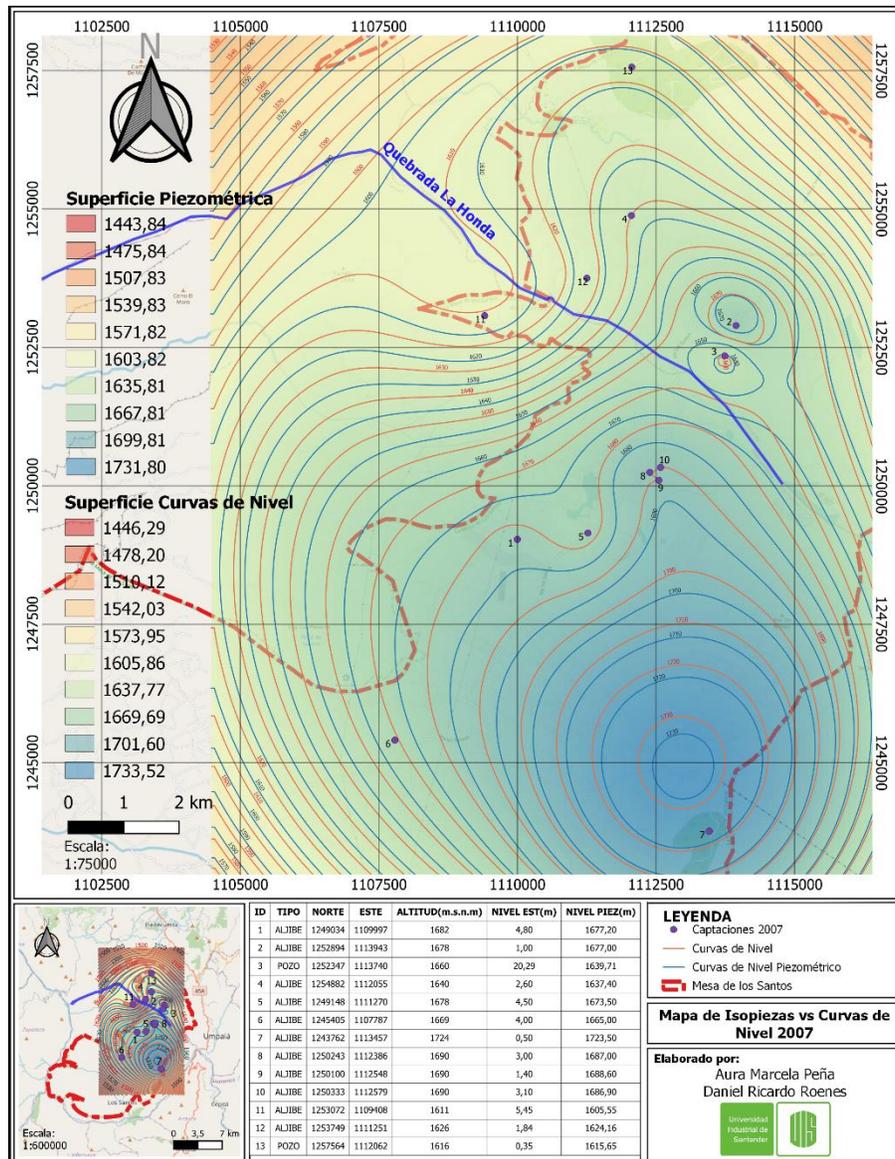
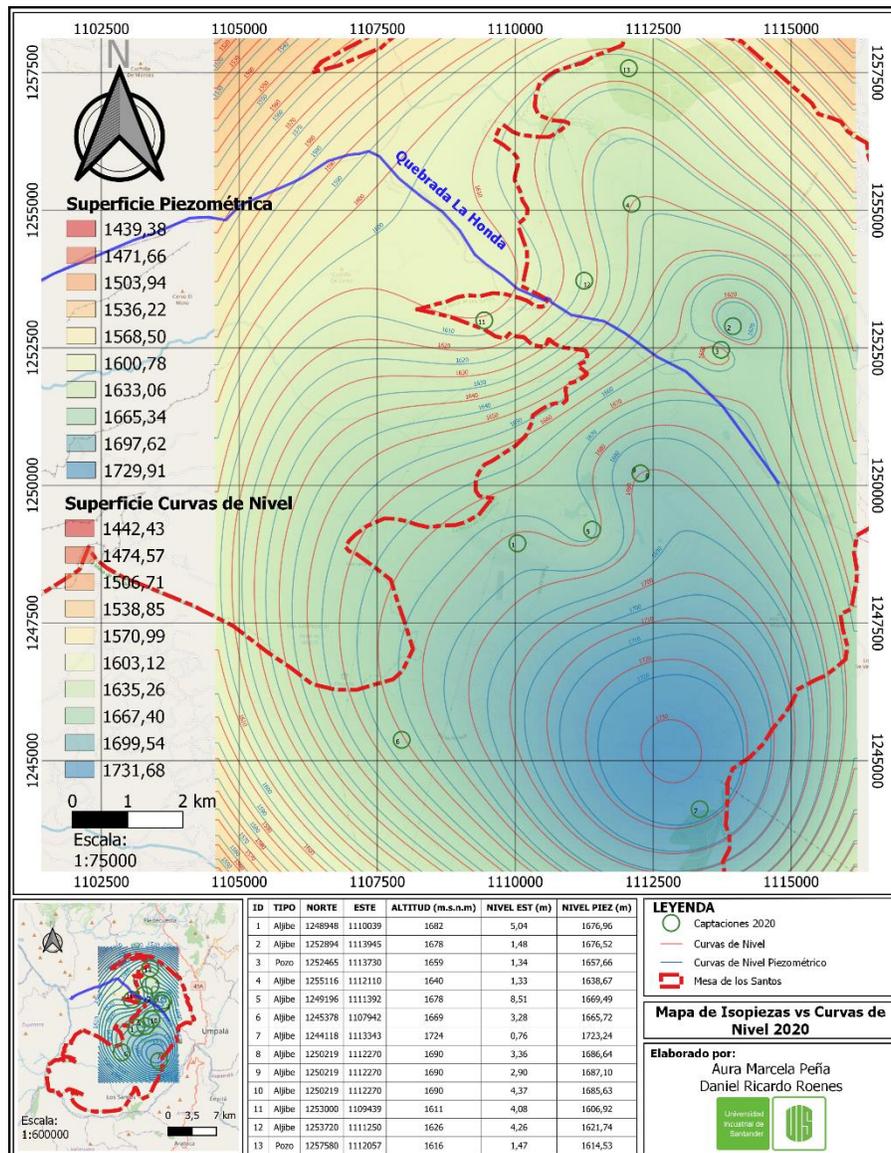


Figura 7 Mapa de Isopiezas vs Curvas de Nivel 2007



Se puede observar que no hay diferencias apreciables entre las isopiezas y las curvas de nivel, indicando que la profundidad media del nivel estático de las captaciones es pequeña a excepción del punto 3 que presentó un descenso de 18,95 metros, esto indica que podría estar relacionando niveles de 2 acuíferos diferentes y por lo tanto este valor no se tendrá en cuenta para análisis y conclusiones. La igualdad en la profundidad del nivel estático se aprecia mucho mejor

en las partes bajas de la Mesa de los Santos en donde las curvas de nivel y las isopiezas casi se solapan, especialmente en las zonas aledañas a la quebrada la Honda lo que demuestra que las zonas bajas además de tener el agua en la superficie son zonas de descarga. Adicionalmente se muestra que acorde a la topografía de la zona, el nivel piezométrico más alto con cota 1720 msnm se encuentra al sur oriente, lugar donde también se encuentra el punto con mayor altitud con cota 1730 msnm. Además, se observa que los niveles piezométricos van disminuyendo uniformemente alrededor de ese punto, al igual que las curvas de nivel, siempre con las isopiezas por debajo de las curvas de nivel hasta las partes más bajas. Esto último es un indicio de la conexión subterránea del acuífero superior de la Mesa de los Santos que va desde el punto más alto hasta el punto más bajo de la zona de estudio, aunque esto se analizará mejor en la sección de direcciones de flujo.

## **4.6 Análisis del Abatimiento**

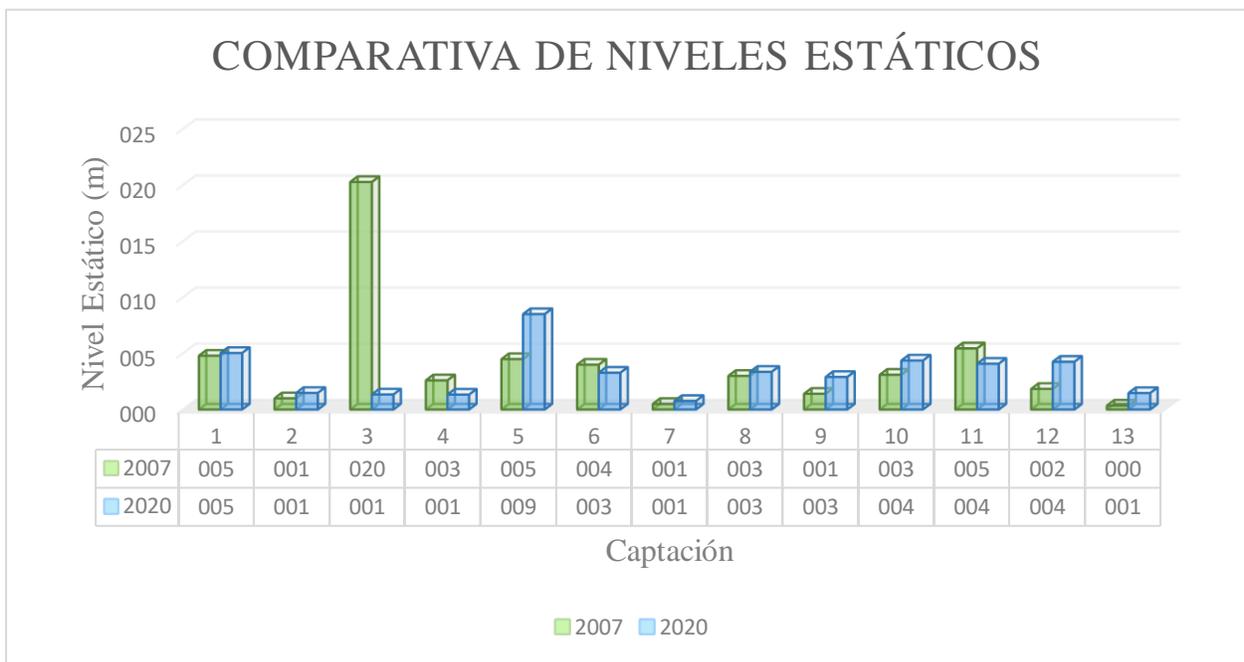
### **4.6.1 Nivel Estático**

El nivel estático es el valor que representa la profundidad de la superficie superior del agua en una captación. La Figura 8 representa el nivel estático en cada una de las 13 captaciones que se dataron, además compara estos valores con los datos históricos del 2007. Los niveles estáticos de los puntos tomados del inventario 2016 se pueden observar en el Apéndice I. Los puntos del inventario de 2016 no se incluyeron en esta comparación, pues solo 5 captaciones coincidieron con las elegidas para este proyecto

En la comparación de los resultados obtenidos en el 2020 con los datos del 2007 se puede identificar que 4 de los 13 puntos (3,4,6,11) presentan un descenso en el valor del nivel estático, es decir la profundidad de la superficie superior del agua en el año 2020 es menor que en el año

2007, todas las demás captaciones (1,2,5,7,8,9,10,12,13) presentan un aumento del nivel estático por lo tanto la profundidad del agua en el año 2020 es mayor que en el año 2007. Teniendo en cuenta que el abatimiento se da cuando la profundidad del agua aumenta año tras año se puede afirmar que 9 de los 13 puntos presentan abatimiento.

**Figura 8** Niveles estáticos entre inventarios

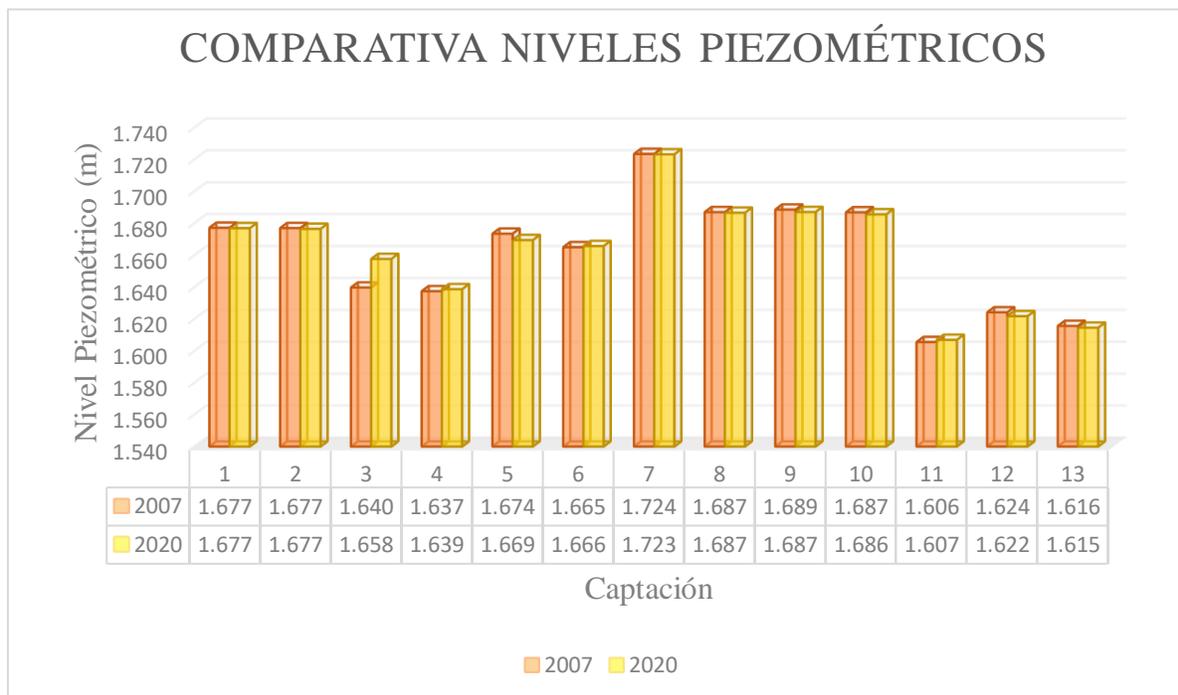


Se puede observar que 7 de las 9 captaciones que presentaron abatimiento están ubicadas en superficies piezométricas con tonos azules, es decir en las zonas con mayor altitud, además de concentran en su mayoría en la zona centro del área de estudio. Las dos captaciones restantes (12,13) que presentan abatimiento comparten la misma superficie piezométrica.

**4.6.2 Nivel Piezométrico**

El nivel piezométrico es el valor de la cota de la superficie de agua dada en metros sobre el nivel del mar. Cuando el nivel piezométrico y la altitud de la captación tengan valores similares, el agua subterránea estará cerca de la superficie. La Figura 9 presenta los niveles piezométricos de los 13 puntos datados y los valores de los mismos puntos tomados en el año 2007. Podemos observar que, a lo largo de estos años, 4 de las 13 captaciones han tenido un aumento en el nivel piezométrico, y en los 9 restantes ha ocurrido un descenso de este, lo que significa que en 9 captaciones la cota de la superficie de agua ha descendido y por tanto se pudo corroborar que en efecto tal y como lo predijo la comparativa de niveles estáticos estas captaciones presentaron abatimiento. Los niveles piezométricos de los puntos tomados del inventario 2016 se pueden observar en el Apéndice J.

**Figura 9** Niveles piezométricos entre inventarios



Una de las causas principales del abatimiento de las aguas subterráneas es el uso que se le da al suelo por donde fluyen. Por ello se verificaron los usos de suelo de las captaciones en donde se evidenció abatimiento de su nivel piezométrico para encontrar si había una correlación usando el mapa de usos de suelo preparado por el proyecto de investigación titulado “Inventario de fuentes de contaminación del acuífero superior de la Mesa de los Santos (Santander)”(Romero Pimiento & Urrea Merchán, 2021)i. Apéndice K, este proyecto clasifica zonalmente el suelo del área de estudio en 3 usos principales (agricultura, ganadería extensiva y ganadería local). Al hacer la comparativa se encontró que todos los usos de suelo presentan captaciones con abatimiento, aunque la mayor presencia de puntos con esta característica (6 captaciones en total) se encuentran en el área de ganadería extensiva, que, además, es el único uso en el que todas sus captaciones presentan abatimiento.

#### **4.7 Direcciones de Flujo**

Las Figuras 10 y 11 presentan los mapas de direcciones de flujo del agua subterránea para 2007 y 2020, respectivamente.

Se logra observar que tal y como se analizaba en los mapas de isopiezas el agua contenida en el acuífero superior de la Mesa fluye de la zona con mayor altitud (zona azul) a las zonas aledañas llegando hasta las partes más bajas (zonas rojas). Al comparar ambos mapas, se observa que no se ha generado un cambio significativo a lo largo de los años en las direcciones de flujo, esto indica que, a pesar de la proliferación de perforaciones y captaciones, tanto legales como ilegales, con el paso del tiempo el acuífero estudiado conserva su capacidad de transporte del agua subterránea.

Figura 10 Direcciones de flujo 2007

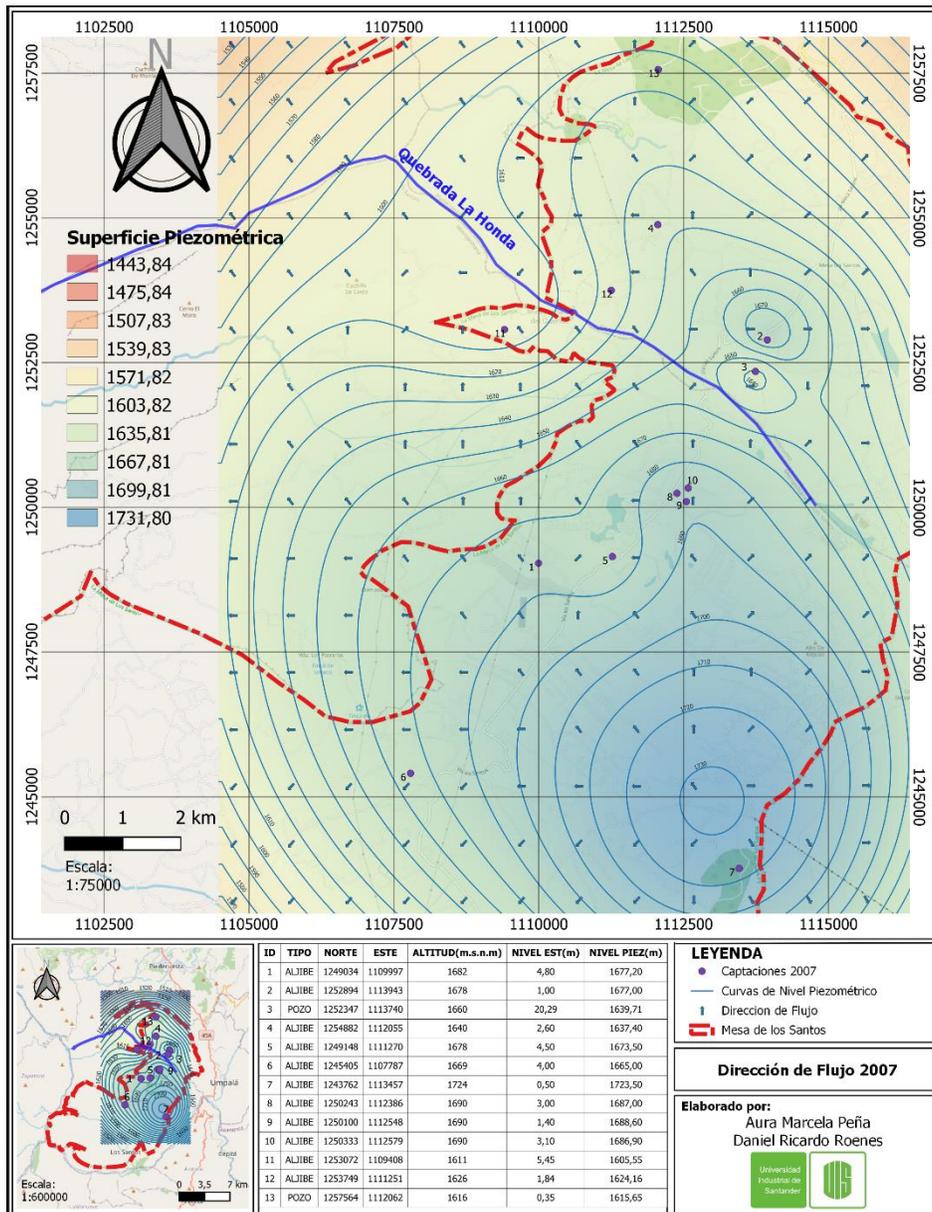
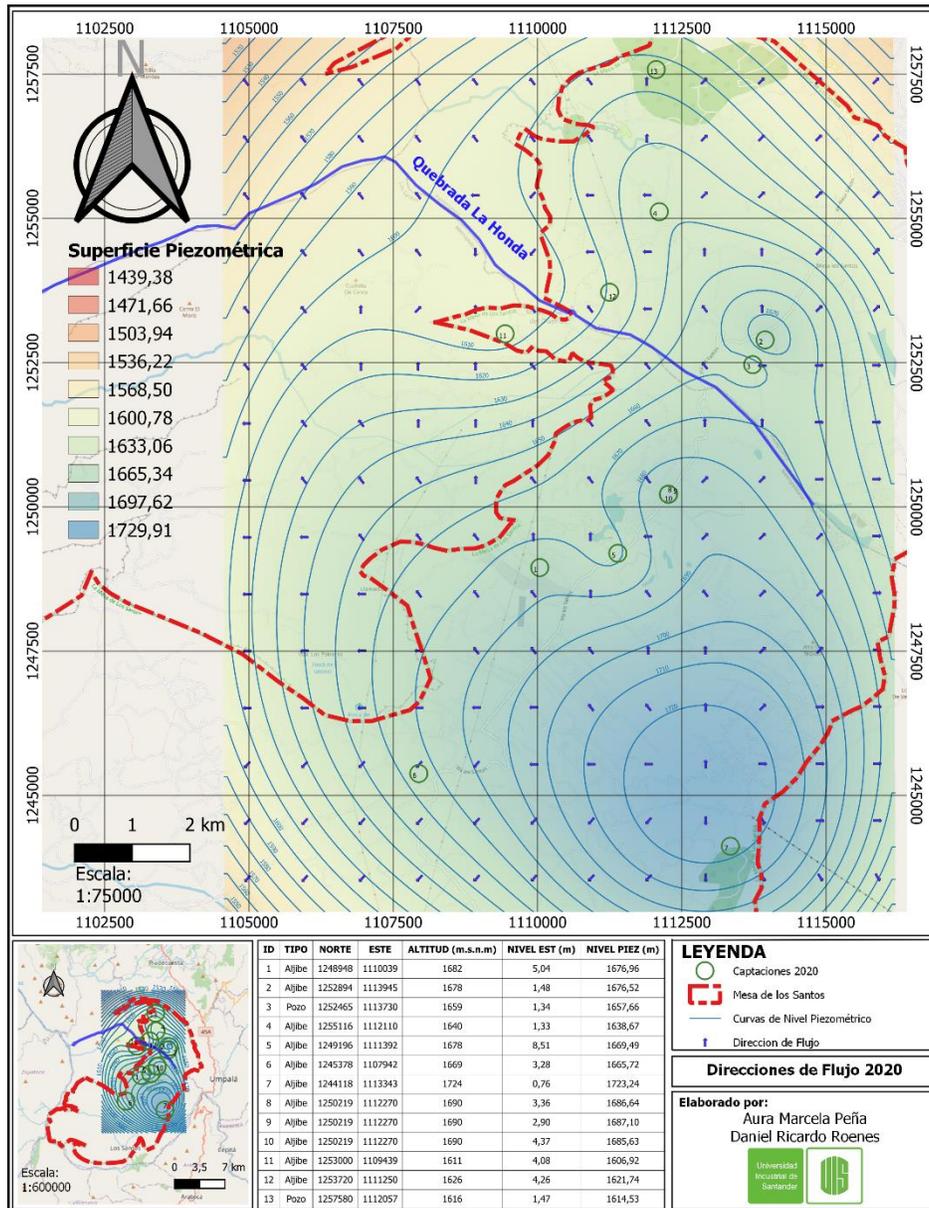


Figura 11 Direcciones de flujo 2020



## 5. Conclusiones

Según el análisis realizado a las 13 captaciones y comparando los datos actuales e históricos, se encontró que se presenta abatimiento en 9 puntos que representan un 69,23% de la muestra datada. Se concluye entonces que el abatimiento, alcanza casi el 70% de las captaciones y teniendo en cuenta que su causa principal es el uso desmedido del agua subterránea, demuestra una explotación continua que a diciembre de 2020 es un problema, que con el pasar de los años y sin la aplicación de acciones para el mejoramiento de la gestión integral del recurso hídrico, puede empeorar.

Se encontró que la variabilidad máxima de los niveles estáticos entre épocas de las captaciones fue de 4 metros y la mínima de 0,24 metros.

La gran mayoría de captaciones en la Mesa de Los Santos se encuentran en la zona norte, centro y sur este, zona con gran capacidad hidrológica debido a su geología.

Se encontró una correlación directa entre el abatimiento y el uso de suelos para la ganadería extensiva, pues además de ser el uso de suelo con mayor número de captaciones con abatimiento, fue el único uso de suelo en el que todas las captaciones en la zona presentaron abatimiento.

Las direcciones de flujo del agua subterránea entre épocas parecen mantenerse iguales, esto se debe a que los descensos en los niveles piezométricos han sido similares.

## 6. Recomendaciones

Se recomienda realizar control y seguimiento anual del nivel estático principalmente en las zonas en las cuales las captaciones presentaron mayor abatimiento.

### Referencias Bibliográficas

- Ardila Romero, V. A. (2018). *Diseño, análisis y pruebas, para la concesión de aguas subterráneas en pozo profundo para el frigorífico dem municipio de Guamal . Metal, de acuerdo a requerimientos de la CAR.*
- Asociación Internacional de Hidrogeología (AIH). (2017). *Los objetivos de desarrollo sustentable (ODS) de la Organización de Naciones Unidas (ONU) para el 2030 INDICADORES ESENCIALES PARA EL AGUA SUBTERRÁNEA.* www.iah.org
- Astorga Espeleta, Y. (2013). *Guía para la aplicación de la Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) a nivel municipal.*
- Becerra Hernández, N. J., & Parra Estepa, C. G. (2016). *Balace hídrico para estimar recarga potencial en La Mesa de Los Santos y dirección de flujo de agua subterránea.*
- Daus, A. (2019). *Almacenamiento y Recuperación de Agua en Acuíferos: Mejoramiento de la Seguridad en el Abastecimiento de Agua en el Caribe.* GSI Environmental, Inc. <http://www.iadb.org>
- Díaz, E., Contreras, N., Pinto, J., Velandia, F., Morales, C., & Hincapie, G. (2009). Evaluación hidrogeológica preliminar de las unidades geológicas de la Mesa de Los Santos, Santander. *Boletín de Geología, 31.*
- INGEOEXPLORACIONES S.A.S. (2016). *Elaboración y formulación del plan de manejo de aguas subterráneas en el sector de La Mesa, municipio de Los Santos. Fase II.* www.ingeoexploraciones.com
- INGEOMINAS. (2007). *Investigación Geológica e Hidrogeológica en La Mesa de los Santos, Sector Nordeste de Curití y Borde Occidental del Macizo de Santander, Departamento de Santander.*

- Instituto Colombiano de Geología y Minería-INGEOMINAS. (2004). *Atlas de aguas subterráneas de Colombia*.
- Jimena Días, E., Contreras, N. M., Pinto, J. E., Velandia, F., Morales, C. J., & Hincapie, G. (2009). *Evaluación hidrogeológica preliminar de las unidades geológicas de la Mesa de Los Santos, Santander* (Vol. 31).
- Mejía Ramírez, M. V., & Ramírez Güina, E. J. (2016). *Análisis de las variaciones de niveles piezométricos del complejo acuífero cuaternario, registrados dentro de pozos profundos, por la CAR, entre 1998 y 2007, en la Sabana de Bogotá*.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Hecurso hídrico*. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014a). *Guía Metodológica para la Formulación de Planes de Manejo Ambiental de Acuíferos*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014b). *Programa Nacional de Aguas Subterráneas-PNASUB*.
- Pérez Villarreal, J., Ávila Olivera, J. A., & Israde Alcántara, I. (2018). Análisis de los sistemas de flujo en un acuífero perturbado por la extracción de aguas subterráneas. Caso zona Morelia-Capula, Michoacán. *Boletín de La Sociedad Geologica Mexicana*, 70(3), 675–688. <https://doi.org/10.18268/BSGM2018v70n3a5>
- UNESCO. (2019). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás*. UNESCO. [www.unwater.org](http://www.unwater.org).
- Romero Pimiento, I. Y., & Urrea Merchán, C. A. (2021). *Inventario de fuentes de contaminación en el acuífero superior de La Mesa de Los Santos (Santander)*.

- Salinas, J., Cavazos, R., & Vera, J. (2016). Evaluación de un sistema de captación de agua de lluvia en la zona metropolitana de Monterrey, para su aprovechamiento como medio alternativo. *Ingeniería, Revista Académica*, 20(1).
- Vélez Otálvaro, M. V., Ortiz Pimienta, C., & Vargas Quintero, M. C. (2011). *Las aguas subterráneas enfoque práctico*. Servicio Geológico Colombiano.