



**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA CONCEPTUAL COMO BASE DE
ANÁLISIS EN LA DETERMINACIÓN DE AFECTACIONES EN LA DINÁMICA
HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DE POROSIDAD PRIMARIA “BETULIA” EN
EL SECTOR NOROESTE DE LA DEPRESIÓN DE SAN JORGE (CUENCA DEL
VALLE INFERIOR DEL MAGDALENA).**

Neida Alvarado Vargas
Cod.11961911618

Universidad Antonio Nariño

Programa Maestría en Hidrogeología Ambiental

Facultad Ingeniería Ambiental

Bogotá, Colombia

2022

**CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA CONCEPTUAL COMO BASE DE
ANÁLISIS EN LA DETERMINACIÓN DE AFECTACIONES EN LA DINÁMICA
HIDROGEOLÓGICA DEL ACUÍFERO DE POROSIDAD PRIMARIA “BETULIA” EN
EL SECTOR NOROESTE DE LA DEPRESIÓN DE SAN JORGE (CUENCA DEL
VALLE INFERIOR DEL MAGDALENA).**

Neida Alvarado Vargas

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Hidrogeología Ambiental

Director

Prof. Diego Felipe Gómez Gutiérrez

Ph.D., Recursos Minerales e Hidrogeología.

Línea de Investigación:

Universidad Antonio Nariño

Programa Maestría En Hidrogeología Ambiental

Facultad de Ingeniería Ambiental

Bogotá D.C Colombia

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado: Caracterización hidrogeológica conceptual como base de análisis en la determinación de afectaciones en la dinámica hidrogeológica del acuífero de porosidad primaria “Betulia” en el sector noroeste de la depresión de San Jorge (Cuenca del Valle Inferior del Magdalena), Cumple con los requisitos para optar Al título de Magíster en Hidrogeología Ambiental

Firma del director del Trabajo de Maestría.

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., 7 de noviembre de 2022

“Para los seres vivos del planeta tierra el agua es vital, paremos las acciones irresponsables que interfieren con el agotamiento de este recurso”.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primero que todo a Dios por concederme la vida, el tiempo, la paciencia y la sabiduría, para obtener este logro y luego a la Universidad Antonio Nariño por la oportunidad de cursar en el programa de la maestría en Hidrogeología Ambiental y a cada uno de los docentes que nos compartieron sus conocimientos en las diferentes áreas para formarnos en el programa académico.

Luego al Ingeniero Gabriel Peñaranda Gómez gerente de la empresa INGECSA por la oportunidad que me permitió participar en proyecto “Hidrogeológico del Programa sísmico Mayupa 3D” para desarrollar el trabajo de tesis con su empresa, para aplicar los conocimientos adquiridos en la universidad.

Po otra parte quiero hacer mención y agradecerle al Dr. Diego Felipe Gómez Gutiérrez por su dirección, acompañamiento y apoyo incondicional a lo largo del desarrollo del proyecto.

En lo personal agradezco al ingeniero geólogo Gustavo Arturo Lara Camargo por su acompañamiento en los días de campo y en el análisis de la información recolectada.

Agradezco el apoyo total de mi familia mi esposo Gustavo, mis hijos Fabian Leonardo y Laura Camila por su amor y su paciencia.

RESUMEN

Es importante reconocer que en la actualidad los hidrocarburos se posicionan a nivel global en uno de los primeros puestos, como materia prima en el desarrollo industrial y de la economía del país para obtener energía y productos relevantes. Por tal razón se hace necesario e importante tener conocimiento del subsuelo para determinar donde se encuentran los potenciales yacimientos de hidrocarburos (petróleo y/o gas). En este sentido el hombre hace uso de la geofísica para obtener información referente a la geometría de los diferentes estratos de interés geológico. La herramienta más utilizada para su prospección y exploración es la prospección sísmica 3 D para obtiene información a grandes profundidades del subsuelo.

El método geofísico denominado sísmica 3D, se fundamenta en generar la emisión de ondas de sonido sobre la superficie del terreno mediante una fuente sísmica, la cual crea una onda elástica que penetra en el subsuelo y es devuelta a la superficie como onda reflejada, los datos obtenidos de este proceso son interpretados para generar mapas del subsuelo.

La actividad de prospección suele generar en las comunidades del área directa, incertidumbre sobre la afectación en relación con la disponibilidad y contaminación del recurso hídrico superficial y subterráneo. Como respuesta a los interrogantes, se plantea elaborar la Caracterización hidrogeológica conceptual como base de análisis en la determinación de afectaciones en la dinámica hidrogeológica del acuífero de porosidad primaria "Betulia" en el sector noroeste de la depresión de San Jorge (Cuenca del Valle Inferior del Magdalena), teniendo en cuenta las condiciones previas y posteriores al desarrollo del registro sísmico 3D.

Para el desarrollo de la caracterización hidrogeológica conceptual se parte de la recopilación de información secundaria publicada por entidades públicas y privadas como el Servicio Geológico Colombiano (SGC), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de

Colombia (IDEAM), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) e informe de Plan de Manejo Ambiental del Programa Sísmico Mayupa 3D, 2019 capítulo 2 Medio Abiótico.

Luego se aplica una metodología para la recolección de información en campo para dos etapas un pre y otra pos registros sísmicos: para el componente geológico se ejecutaron de 30 tomografías y 10 sondeos eléctricos verticales. Para el hidrológico se realizó el inventario de puntos de agua subterránea donde se recopiló la información de 81 puntos, de los cuales 37 pertenecen a pozos profundos, 32 a aljibes y 12 manantiales. Para determinar el comportamiento de las características hidráulicas de las unidades presentes, antes y después de la exploración sísmica se realizaron 30 pruebas de bombeo: 15 previas y 15 posteriores a la ejecución de la sísmica. Adicionalmente, los acuíferos se caracterizaron hidrogeoquímicamente, lo cual permite realizar la clasificación del agua, estimación de los orígenes y direcciones probables de flujo e identificación de áreas de recarga.

De acuerdo con la metodología desarrollada como base de análisis en la definición de posibles afectaciones/impactos asociados a la actividad sísmica, se concluye que La Caracterización Hidrogeológica Conceptual, nos permite determinar el comportamiento del acuífero ante agentes externos. Interpretando que las ondas de desplazamiento generados por los registros sísmicos no causan desplazamiento verticales ni horizontales susceptibles en las unidades hidrogeológicas, por lo tanto no alteran el comportamiento hidráulico del acuífero afirmación que se reafirma la conductividad hidráulica ya que esta presenta valores similares en las pruebas de bombeo ejecutadas en las dos campañas, lo que nos indica que la velocidad de desplazamiento de los fluidos es constante y directamente proporcional a la textura de la litología de las unidades intervenidas, indicando que estas no presentan alteración en su estructura por acción de la sísmica.

Palabras Claves: Acuífero, Caracterización Hidrogeológica, Exploración Sísmica 3D.

ABSTRACT

It is important to recognize that currently the hydrocarbons are positioned globally in one of the first places, as a raw material in industrial and economy development of the country to get energy and relevant products. For this reason it is necessary and important to have the knowledge about subsoil/strata to determinate where the potentials hydrocarbons deposit are (Oils and gas). In this sense the man uses the geophysics to obtain information about the geometry of the different strata of geological interest. The most useful tool for prospecting and exploration is the seismic 3D, to get information deep underground.

The geophysical method denominated seismic 3D, it is based on generating the emission of sound waves on the ground surface by means a seismic source, which creates a elastic wave that goes through the strata and it goes back to the surface as a reflect wave, the data obtained from this process are interpreted to generate subsoil maps.

The prospecting activity usually generates uncertainty among the population about the affectation in relation to the availability and contamination of the surface and ground water resource. In response to the questions, it is propose to elaborate the conceptual hydrogeological characterization as the base analysis in the determination of affections in the hydrogeological dynamic of the primary porosity aquifer "Betulia" in the northwest sector of the San Jorge hollow (Lower Magdalena Valley Basin) taking into account the conditions before and after the development of the 3D seismic record.

For the development of the conceptual hydrogeological characterization it is based on the collection of secondary information published by public and private entities as the Servicio Geológico Colombiano (SGC), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) and the Plan de Manejo Ambiental report of the Seismic survey Mayupa 3D, 2019 chapter 2 abiotic environment.

The applied a methodology to recollect the information in the field for two stages, one previous and the other one after seismic records: for the geological component 30 tomographies and 10 vertical electrical soundings were carried out in the study area.

For the hydrogeological component the points inventory of groundwater were carried out where it was compiled the information of 81 points in total, of which 37 are related to deep wells, 32 underground tanks and 12 springs. To determinate the pattern of the units hydraulic characteristics, 30 pumping tests were performed: 15 before and 15 after the seismic test. Additionally the aquifers were hydrogeochemically characterized, which allows for water classification, estimation of the probable origins and directions of flow and identification of recharge areas.

According to the developed methodology as the analysis base in the definition of possible affectation/impacts related to the seismic activity, it is concluded that the Conceptual Hydrogeological Characterization allows to determine the behavior of the aquifer before external agents. Interpreting that the displacement waves generated by the seismic records do not cause vertical or horizontal displacement susceptible in the hydrogeological units, therefore they do not alter the hydraulic behavior of the aquifer reaffirming the hydraulic conductivity since it is present similar values in the pumping test carried out in the two campaigns, which indicated that the displacement speed of the fluids is constant and directly proportional to the texture of the lithology of the intervened units, indicating that these do not present alterations in their structure due to seismic action.

Key words: aquifer, hydrogeological characterization, seismic exploration 3D.

TABLA DE CONTENIDO

1. PROPÓSITO DEL TRABAJO DE MAESTRÍA	24
1.1 Descripción del proyecto sísmico 3D.....	24
1.2 Localización del proyecto	25
2. OBJETIVOS	27
2.1 Objetivo general	27
2.2 Objetivos Específicos	27
2.2.1 Recopilación y revisión de Información.	27
2.2.2 Caracterización geológica y Geofísica	27
2.2.3 Caracterización hidrológica.....	27
2.2.4 Caracterización Hidráulica	28
2.2.5 Caracterización Hidrogeoquímica	28
2.2.6 Caracterización Hidrogeológica	28
3. MARCO TEÓRICO	29
3.1 Caracterización Geológica y Geofísica.....	29
3.1.1 Entorno Geológico Regional.	29
3.2 Caracterización Hidrológica (Niveles De Agua Subterránea).....	33
3.2.1 El Ciclo hidrológico	34
3.2.2 Inventario de Puntos de Agua Subterránea.....	34
3.2.3 Niveles de agua subterránea	35
3.3 Caracterización Hidráulica.....	36
3.3.1 Características Hidráulicas de los Acuíferos	36
3.4 Caracterización Hidro geoquímica.....	39

3.4.1	Muestreo Hidrogeoquímico	41
3.5	Caracterización Hidrogeológica Conceptual	42
4.	MARCO METODOLOGICO.....	44
4.1	Fase I. recopilación de Información	46
4.1.1	Geología y Geofísica	46
4.1.2	Hidrología	47
4.1.3	Hidráulica.....	47
4.1.4	Hidrogeoquímica.....	48
4.2	Fase II Trabajo De Campo.	48
4.2.1	Geología y Geofísica	48
4.2.2	Hidrología	49
4.2.3	Hidráulica.....	50
4.2.4	Hidrogeoquímica.....	52
4.3	Fase III de Análisis de Integración e Interpretación de Datos	55
4.4	Fase IV de elaboración de reporte de resultados	55
5.	ANALISIS DE RESULTADOS.....	56
5.1	Caracterización Geológica	56
5.1.1	Geología Local.....	56
5.1.2	Sondeos Eléctricos Verticales.....	63
5.1.3	Tomografías.....	69
5.1.4	Caracterización Geológica.	80
5.2	Caracterización Hidrológica.....	81
5.3	Características Hidráulicas de los Acuíferos.....	93
5.3.1	Pruebas de Bombeo de los puntos de agua subterránea en la Fm Betulia.	93
5.4	Caracterización Hidrogeoquímicas	101

5.4.1	Monitoreo de aguas subterráneas.....	101
5.4.2	Análisis de resultados aguas subterráneas	101
5.5	Caracterización Hidrogeológica Conceptual	115
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	120
6.1	Conclusiones.....	120
6.2	Recomendaciones.....	124
7.	BIBLIOGRAFIA.....	125
8.	ANEXOS	127

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Registros Geofísicos	127
Anexo 2. Inventario de puntos de agua	127
Anexo 3. Pruebas de bombeo	127
Anexo 4. Resultados fisicoquímicos de aguas subterráneas pre y pos Registro sísmico....	127
Anexo 5. Cartografía	127

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Registro sísmico	25
Figura 2. Localización del polígono del Programa Sísmico 3D.....	26
Figura 3. Mapa Geológico Regional.....	30
Figura 4. Representación del ciclo hidrológico.....	34
Figura 5. Ciclo Hidrogeoquímico (Escuder et al., 2009)	40
Figura 6. Esquema del desarrollo del proyecto	44
Figura 7. Localización de los pozos para prueba de bombeo	52
Figura 8. Localización de los puntos de muestreo para Caracterización Hidrogeoquímica ..	53
Figura 9. columna estratigráfica de la Fm Betulia	58
Figura 10. Unidades geológicas del área de programa sísmico 3D	59
Figura 11. Sección geológica de la formación Betulia	59
Figura 12. Localización de los SEV	64
Figura 13. Representación gráfica del SEV-1	65
Figura 14. Localización de las tomografías ejecutadas en el programa sísmico 3D.....	71
Figura 15. Imagen de la Tomografía TOM 11	72
Figura 16. Mapa de Isoresistividad a 5 metros de Profundidad.....	78
Figura 17. Modelo Geológico conceptual.....	81
Figura 18. Localización de los puntos inventariados	85
Figura 19. Distribución de los puntos de agua inventariados	89
Figura 20. Mapa de Isopiezas pre sísmica.....	91
Figura 21. Mapa de Isopiezas pos sísmica	92
Figura 22. Curva de tiempo / abatimiento para el pozo PRE PZ-02	97
Figura 23. Línea de tendencia de los aniones y cationes de la primera y segunda campaña de muestreo en campo	104

Figura 24. Diagrama Piper para los análisis de laboratorio de la primera campaña de muestreo en campo	105
Figura 25. Diagrama Piper para la segunda campaña de muestreo fisicoquímico	106
Figura 26. Interpretación del diagrama Schoeller para los tipos de agua subterránea caracterizados la primera y segunda campaña.	107
Figura 27. Interpretación del diagrama Schöeller para los tipos de agua subterránea caracterizados la segunda campaña.....	108
Figura 28. Interpretación del diagrama Stiff para algunos tipos de agua.....	109
Figura 29. Diagramas Stiff obtenidos para la primera y segunda campaña de muestreo geoquímico	110
Figura 30. Diagramas de Gibbs para dispersión de aniones y cationes obtenidos para la primera y segunda campaña de muestreo geoquímico.	111
Figura 31. Mapa Hidrogeológico	116
Figura 32. Perfil Hidrogeológico.....	117
Figura 33. Modelo Hidrogeológico Conceptual	119

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Unidades Estratigrafía regional	31
Tabla 2. Coeficiente de Almacenamiento de acuerdo con el Tipo de Acuífero	37
Tabla 3. Transmisividad, capacidad específica, productividad del acuífero y caudal esperado en pozos	37
Tabla 4. Iones dominantes tenidos en cuenta para análisis hidrogeoquímico	41
Tabla 5. Error aceptable en el balance iónico, según conductividad eléctrica	42
Tabla 6. Clasificación general de las unidades hidrogeológicas	43
Tabla 7. Descripción de la metodología para la construcción de la Caracterización Hidrogeológica Conceptual.	44
Tabla 8. Coordenadas y características de los Pozos utilizados para las pruebas de bombeo	51
Tabla 9. Puntos de muestreo de calidad del agua subterránea	54
Tabla 10. Estratigrafía local del área donde se enmarca el Proyecto	57
Tabla 11. Interpretación litológica de los SEV	68
Tabla 12. Coordenadas de las líneas de tomografías ejecutadas en el área de programa sísmico 3D	69
Tabla 13. Inventario de los puntos de agua subterránea	81
Tabla 14. Características de algunos Puntos de agua subterránea inventariados	86
Tabla 15. Resumen de puntos de agua subterránea inventariados	88
Tabla 16. Datos de campo de las pruebas de bombeo y recuperación (Pre - registro sísmico) en la Fm Betulia.	93
Tabla 17. Datos de campo de las pruebas de bombeo y recuperación (Post registro sísmico)	95

Tabla 18. Resumen de parámetros hidráulicos obtenidos de las pruebas de bombeo (Pre - registro sísmico).....	99
Tabla 19. Resumen de parámetros hidráulicos obtenidos de las pruebas de bombeo (Post registro sísmico).....	100
Tabla 20. Porcentaje de los iones mayores considerados para los puntos muestreados en la primera campaña y clasificación del tipo de facie (Pre - registro sísmico)	103
Tabla 21. Porcentaje de los iones mayores considerados para los puntos muestreados en la segunda campaña y clasificación del tipo de facie (Post - registro sísmico)	103
Tabla 22. Sistemas acuíferos presentes en la zona del programa sísmico	116

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. Prueba de bombeo, Pre y Pos registro sísmico 3D	51
Fotografía 2. Toma de muestras de agua para laboratorio.....	55
Fotografía 3. Formación Betulia (Q1b)	60
Fotografía 4. Afloramiento de la Fm Betulia.....	61
Fotografía 5. Meteorización Formación Betulia	61
Fotografía 6. Disposición Morfológica.....	62
Fotografía 7. <i>Cuaternario aluvial (Q2a)</i>	63

GLOSARIO

ACUÍFERO. Formación geológica permeable capaz de almacenar, transmitir y proporcionar cantidades aprovechables de agua.

ACUÍFERO LIBRE. Acuífero cuyo límite superior representado por una superficie de agua llamada nivel freático o tabla de agua está a presión atmosférica.

ACUÍFERO SEMICONFINADO. Acuífero que está a presión mayor que la atmosférica, cubierto y/o sustentado por una capa de material semipermeable a través de la cuál existe flujo hacia o desde el acuífero.

AGUA SUBTERRÁNEA. Parte del agua subsuperficial que está en la zona saturada.

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA CONCEPTUAL. Es una simplificación con una descripción plausible para representar un sistema hidrogeológico real.

CARSUCRE. Corporación Autónoma Regional de Sucre

CE. Conductividad eléctrica

Ce. Capacidad específica.

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO. Volumen de agua liberado o añadido a un acuífero por unidad de superficie del acuífero y por unidad de variación de carga hidráulica.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA. Capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica que se utiliza para obtener una estimación del total de sólidos disueltos.

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA. Es el caudal a través de un área unitaria de un medio poroso por unidad de gradiente hidráulico.

CONFINADO. Acuífero a presión mayor que la atmosférica, limitado superior e inferiormente por formaciones impermeables o casi impermeables.

DRENAJES DIFERIDOS. Es la respuesta diferida que se presenta por la recarga desde el almacenamiento del acuífero durante una prueba de bombeo en un acuífero libre.

ESPAP. Empresa de Servicios Públicos Aguas de Padilla S A E S P

ERA. Estudio regional del agua

EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL. Cantidad de agua evaporada y transpirada desde el suelo y la cubierta vegetal.

EXPLORACIÓN SÍSMICA. Proceso mediante el cual ondas de energía atraviesan las capas de roca, se devuelven hasta la superficie y llegan a unos equipos especiales que se llaman geófonos, los cuales reciben la información y la transmiten a un computador. El producto final que se obtiene de la exploración sísmica es una imagen representativa de las capas que hay debajo de la tierra.

IDEAM. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.

IGAC. INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI

IMPERMEABLES. Material que no permite el flujo de agua.

MANANTIAL. Lugar en el que el agua emerge de forma natural desde una roca o el suelo y fluye hacia la superficie o hacia una masa de agua superficial.

MIGRACIÓN DE AGUA. Movimiento del agua a través de un medio poroso.

MAVDT. Ministerio De Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

MHC. Modelo Hidrogeológico Conceptual

NIVEL DINÁMICO. Altura a la que se mantiene el agua en un pozo para un caudal de bombeo dado.

NIVEL ESTÁTICO. Altura a la que se mantiene el agua en un pozo que no está sometido a bombeo o a recarga.

NIVEL FREÁTICO. Llamado también tabla de agua. Es el límite superior de la zona saturada en donde la presión hidrostática es igual a la presión atmosférica.

PIEZÓMETRO. Instrumento para medir la carga de presión en un suelo saturado. consiste en una tubería ciega, con ranuras en la zona donde se quiere medir la presión.

PMAPSM3D. Plan de Manejo Ambiental del Programa Sísmico Mayupa 3d

PNGIRH. Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico

PRUEBA DE BOMBEO. Ensayo realizado en un pozo de agua que consiste en bombear un caudal conocido y medir las variaciones de la carga hidráulica en función del tiempo, en el mismo pozo y en pozos de observación próximos al de bombeo.

PRUEBAS DE PULSO (SLUG). Tipo de ensayo donde se realiza un cambio instantáneo en la carga presión en un pozo, registrando la variación de los niveles, en función del tiempo.

RAS. Reglamento Técnico Del Sector de Agua Potable Saneamiento Básico

RECARGA. Proceso que involucra la adición de agua a la zona saturada.

RECUPERACIÓN DE LOS NIVELES DE UN POZO. Es la tasa a la cual se recuperan los niveles de agua después de terminar el bombeo en un pozo.

SEV. Sondeo Eléctrico Vertical

SGC. Servicio Geológico Colombiano

TME. Tomografías Eléctricas

TRANSMISIVIDAD. Caudal a través de todo el espesor de un acuífero de ancho unitario, bajo un gradiente hidráulico unitario.

INTRODUCCIÓN

A treves del tiempo y en especial en los últimos años hemos visto como la oferta de hidrocarburos se hace necesaria para obtener energía y productos relevantes en el desarrollo de la economía del país, para su prospección, exploración, evaluación y extracción se requiere conocer el subsuelo, siendo la geofísica una de las herramientas más utilizadas mediante la prospección sísmica 3D, con el propósito de obtener la información referente a la geometría de los diferentes estratos de interés geológico.

El método geofísico denominado sísmica 3D, actúa principalmente en captar las respuestas de reflexión de los estratos rocosos que se encuentra en subsuelo mediante geófonos , el cual al desarrollarse a partir de la activación de una carga de explosivos enterrada, genera incertidumbre en la población en relación a las posibles afectaciones en la disponibilidad y contaminación del recurso hídrico superficial y subterráneo, dado que la metodología se desarrolla cerca de la superficie, donde afloran materiales geológicos con potencial acuífero. Por tal razón se hace necesario realizar una caracterización hidrogeológica, a partir del modelo geológico, hidráulico e hidroquímica con la finalidad de conocer la dinámica de los materiales geológicos que conforman los acuíferos de la región y así establecer una línea base para el monitoreo del recurso hídrico subterráneo en términos de calidad y variación en cuanto a disminución del recurso, teniendo en cuenta las condiciones previas y posteriores al desarrollo del programa sísmico.

El presente documento expone los resultados de las actividades ejecutadas en campo para la identificación y caracterización hidrogeológica en el área de estudio Programa Sísmico 3D; también, presenta la recopilación de información secundaria publicada por entidades públicas y privadas como el Servicio Geológico Colombiano (SGC), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) e

informe de Plan de Manejo Ambiental del Programa Sísmico Mayupa 3D, 2019 capítulo 2 Medio Abiótico.

Este estudio parte de la descripción de las unidades geológicas aflorantes, seguido de las campañas realizadas en campo como el inventario de puntos de agua subterránea donde se recopiló la información de un total de 81 puntos, de los cuales 37 pertenecen a pozos profundos, 32 a aljibes y 12 manantiales. Posteriormente, se realizó el análisis de la geometría de las diferentes capas en el subsuelo a través de métodos indirectos como la geoelectrónica, mediante el empleo de Sondeos Eléctricos Verticales SEVs y Tomografías Eléctricas. Con este propósito se ejecutaron 30 tomografías y 10 sondeos eléctricos verticales distribuidos en el área de estudio.

Para determinar el comportamiento de las características hidráulicas de las unidades presentes, antes y después de la exploración sísmica se realizaron 30 pruebas de bombeo: 15 previas y 15 posteriores a la ejecución de la sísmica. Adicionalmente, los acuíferos se caracterizaron hidrogeoquímicamente, lo cual permite realizar la clasificación del agua, estimación de los orígenes y direcciones probables de flujo e identificación de áreas de recarga.

Con la información analizada y evaluada se desarrolla la caracterización hidrogeológica conceptual del área de estudio, que permitirá determinar su dinámica con el objetivo de determinar posibles afectaciones como consecuencia de la ejecución de la campaña de prospección geofísica (sísmica 3D).

1. PROPÓSITO DEL TRABAJO DE MAESTRÍA

La elaboración de una caracterización hidrogeológica conceptual permitirá conocer el estado actual del sistema de aguas subterráneas en los municipios de San Luis de Sincé, Corozal, El Roble, Galeras, Sampués y San Benito Abad, en el Departamento de Sucre y Chinú, localizadas en el Departamento de Córdoba y además determinar de manera experimental las posibles modificaciones en la dinámica hidrogeológica ante el desarrollo de la prospección sísmica.

En la actualidad los municipios de San Luis de Sincé, Corozal, El Roble, Galeras, Sampués y San Benito Abad, en el Departamento de Sucre y Chinú, en el Departamento de Córdoba se abastecen del recurso subterráneo mediante pozos profundos y nacimientos debido a la escasez del recurso hídrico superficial.

Se propone a nivel metodológico determinar la afectación que ejerce la prospección sísmica 3D sobre el recurso hídrico, una partir de la caracterización hidrogeológica conceptual que integra incluye el modelo geológico, hidrológico e hidráulico lo cual permitirá realizar un comparativo entre las características antes y después de desarrollada la actividad sísmica.

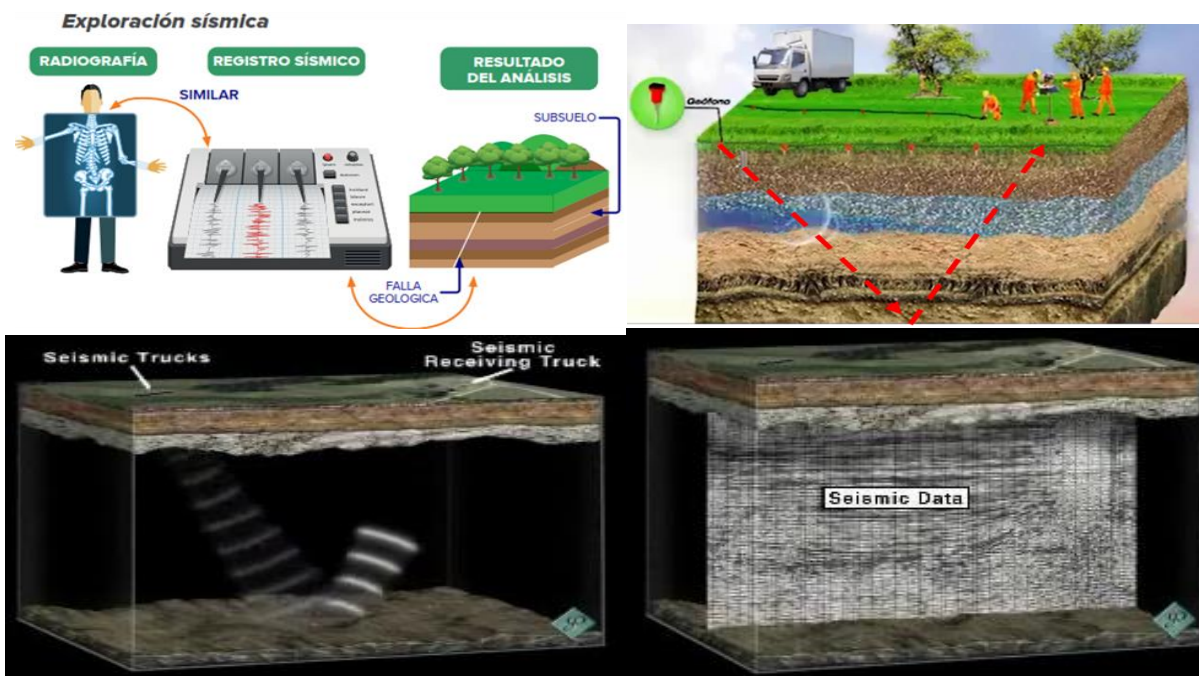
1.1 Descripción del proyecto sísmico 3D

El proyecto sísmico 3D se localiza en un área de 19.677,18 ha, con 62 líneas sísmicas receptoras separadas 420 m entre sí y 20 líneas fuente separadas 540 m entre sí, ubicado en los municipios San Luis de Sincé, Corozal, El Roble, Galeras, Sampués y San Benito Abad, en el departamento de Sucre y en el municipio Chinú, departamento de Córdoba.

A la vez que se ejecuta el programa sísmico se hace importante conocer la incidencia que este tiene sobre el recurso hídrico subterráneo respecto a la calidad y disponibilidad de este, dada la preocupación de los habitantes del sector que con el estudio el recurso desaparezca o que se contamine. Por tal razón se consideró necesario realizar una caracterización

hidrogeológica conceptual, basados en la información existente, la recolectada en un primer momento antes de la prospección sísmica para tener una línea base y la información recolectada después de la intervención sísmica. En la **Figura 1** se muestra gráficamente un registro sísmico.

Figura 1. Registro sísmico

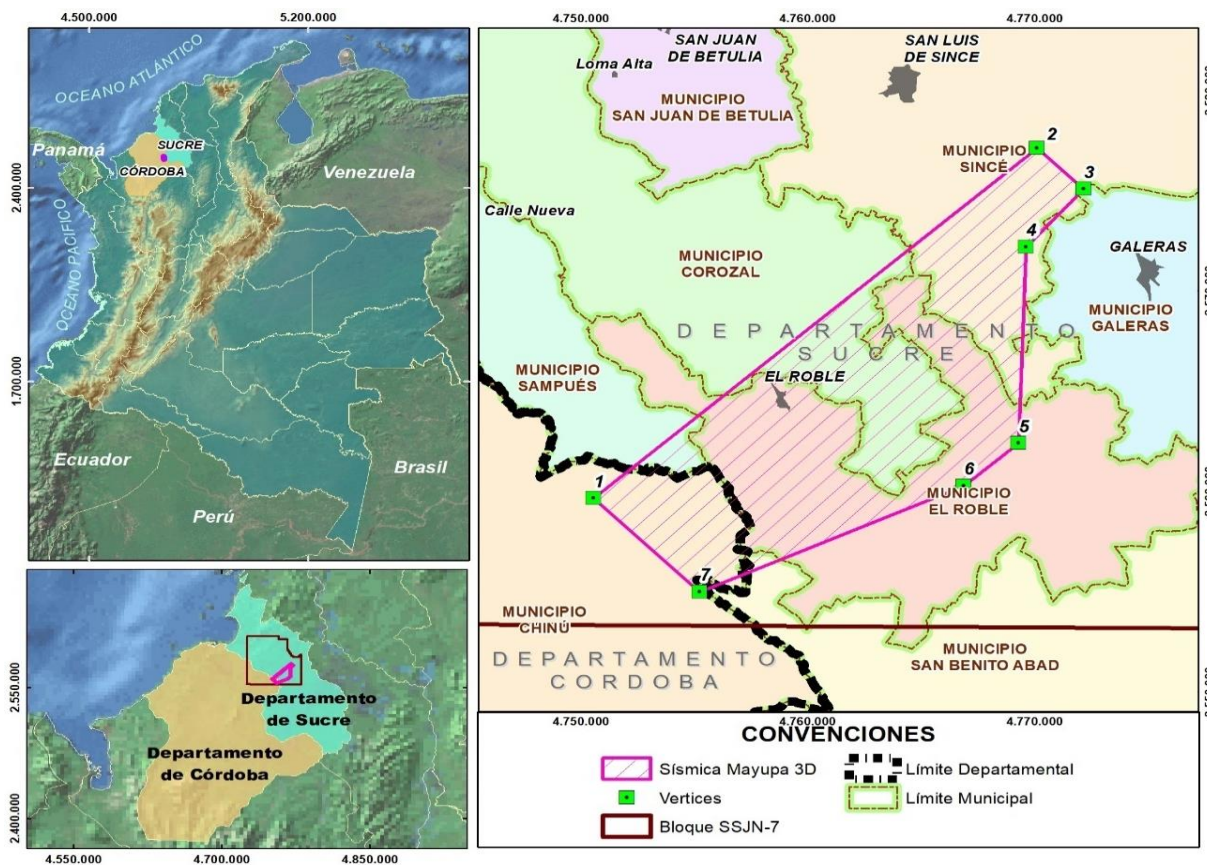


Nota. <https://www.paperflite.com> Seismic Vs Paperflite - Share & Track Sales Content.2016

1.2 Localización del proyecto

El proyecto Área de Exploración Sísmica 3D se ubica en la cuenca de Sinú-San Jacinto (CSSJ) al NW de Colombia, localizado en los municipios de San Luis de Sincé, Corozal, El Roble, Galeras, Sampedo y San Benito Abad, en el departamento de Sucre- y en el municipio de Chinú, departamento de Córdoba, se encuentra inmerso en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Sucre – CARSUCRE, Corporación para el Desarrollo Sostenible de la Mojana y el San Jorge – CORPOMOJANA y Corporación Autónoma Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge – CVS. En la Figura 2 se muestra su localización.

Figura 2. Localización del polígono del Programa Sísmico 3D.



Nota. Elaboración Propia, 2022

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Elaborar la caracterización hidrogeológica fundamentada en las caracterizaciones: geológica, hidrológica, hidráulica e hidroquímica como base de análisis en la determinación de la posible incidencia por la prospección sísmica 3D en la dinámica hidrogeológica de los depósitos acuíferos presentes en el área donde se desarrolla dicha prospección.

2.2 Objetivos Específicos

2.2.1 Recopilación y revisión de Información.

- Recopilación y revisión de información bibliográfica secundaria referidas a geología, cartografía e hidrología disponible de la zona de estudio y áreas adyacentes obtenida de entidades como IDEAM, IGAC, CARs, Universidades y entidades públicas y privadas, etc.

2.2.2 Caracterización geológica y Geofísica

- Elaborar la caracterización: Geológica, mediante la identificación de unidades geológicas, litológicas y estructuras geológicas, información que será especializada en un plano geológico, perfiles y columnas estratigráficas.
- Determinación de las variaciones litológicas verticales del subsuelo usando los parámetros geofísicos y los valores de resistividades registrados a través de los materiales del subsuelo obtenidos en los diferentes arreglos lineales de los sondeos eléctricos verticales (S.E.V.) y tomografías eléctricas.
- Definición y análisis de la geometría del subsuelo, distribución espacial y modelo de capas de las unidades hidrogeológicas, a partir de métodos geofísicos.

2.2.3 Caracterización hidrológica

- Caracterizar los niveles de agua subterránea.

- Identificar y georreferenciar los puntos de agua subterránea (aljibes, pozos y manantiales) presentes en el área de influencia del programa sísmico.

2.2.4 Caracterización Hidráulica

- Elaborar la caracterización hidráulica del área de estudio con lo cual se obtiene las propiedades hidráulicas de las rocas almacenadoras y la dinámica de la red de flujo.
- Determinación y definición de parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas presentes en el área de estudio, mediante la ejecución e interpretación de pruebas de bombeo a caudal constante y recuperación, en las captaciones seleccionadas durante el inventario de puntos de agua subterránea.

2.2.5 Caracterización Hidrogeoquímica

- Caracterizar los acuíferos presentes en esta área de estudio a partir de la toma y análisis de los parámetros físico químico de muestras de agua subterránea en puntos de interés, definidos durante el inventario de puntos de agua subterránea (aljibes, pozos y manantiales).

2.2.6 Caracterización Hidrogeológica

- Identificar las unidades hidrogeológicas basados en la caracterización geológica, hidrológica, hidráulica e hidrogeoquímica de la zona de estudio.
- Elaboración de la Caracterización Hidrogeológica Conceptual, estimando su origen, condiciones naturales de flujo, sistema de infiltración en las unidades hidrogeológicas aflorantes, definición de zonas de recarga, la dirección preferencial del flujo y establecer si existe una afectación en el recurso.

3. MARCO TEÓRICO

Considerando que el agua es uno de los elementos indispensables para la subsistencia de la humanidad, así como su importancia como base del desarrollo de la civilización, se considera fundamental determinar la incidencia que ejercen los programas de prospección. en este caso de estudio específicamente del subsuelo como es la sísmica 3D, a partir del desarrollo de un estudio hidrogeológico que determine que variaciones existen sobre el recurso.

La caracterización hidrogeológica conceptual del acuífero de Betulia para determinar si estas zonas son afectadas potencialmente por la prospección sísmica, donde repercute de manera social, económica y ambiental.

A partir del análisis e interpretación de información geológica, hidrológica, hidráulica e hidrogeoquímica, permitirá tener una visión integral del comportamiento de los acuíferos o sistemas acuíferos del área, las características de almacenamiento y transmisión de agua, las condiciones hidráulicas de las unidades hidrogeológicas, direcciones del flujo de las aguas subterráneas.

3.1 Caracterización Geológica y Geofísica

3.1.1 Entorno Geológico Regional.

El área donde se desarrolló el Programa Sísmico a nivel regional se ubica en la parte noroccidental del Valle Inferior del Magdalena, que corresponde a una cuenca con tectónica distensiva producto de transtensión, los plays identificados corresponden a pliegues compresivos, truncamientos del reservorio por fallas, sobrelape del reservorio contra el basamento y altos de basamento; (Marín et al., 2010).

La evolución geológica de la Cuenca del Valle Inferior del Magdalena indica que el basamento del Cinturón de San Jacinto está constituido por rocas cretácicas pertenecientes a un complejo ofiolítico o a depósitos sedimentario volcánicos (máficos), adosado a la Placa Continental Suramericana a lo largo de la Falla de Romeral (Ingeominas & Geotec Ltda, 2003).

A nivel regional se diferencian doce unidades litoestratigráficas algunas se subdividieron en miembros, las cuales hacen parte de las anteriormente denominadas Grupo Cansona y El Carmen (Duque – Caro, 1971, 1984). (Guzmán et al., 1994). Las Formaciones son las siguientes: Cansona (Ksc), San Cayetano (Pgsc), Maco (Pgm), Toluviejo (Pgt), San Jacinto (Pgsj), Ciénaga de Oro (Pgc), El Carmen (PgNgc), Cerrito (Ngc), Sincelejo (NgQs), Betulia (Qpb), y unos depósitos recientes Depósitos de Llanura de Inundación (Qli), Depósitos Coluvio - Aluviales (Qcal). Las edades de las unidades varían del Cretácico Superior a Plioceno – Pleistoceno. En la Figura 3 se muestra la geología regional y en la Tabla 1 las unidades Cronoestratigráficas.

Figura 3. Mapa Geológico Regional.



Nota. Tomado y modificado del Mapa geológico de Colombia 2007, INGEOMINAS hoy Servicio Geológico Colombiano SGC.

Tabla 1. Unidades Estratigrafía regional

ERA	PERÍODO	ÉPOCA	COLUMNA ESTRATIGRÁFICA		DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA	
Cenozoico CZ	Cuaternario Q	Holoceno Q2	Depósito Aluvial	(Qal)	*** Depósitos de llanura de inundación.	
			Depósito Coluvioaluvial	(Qcal)	Abanicos aluviales y depósitos coluviales	
		Pleistoceno Q1	Formación Betulia	(Qpb)	Miembro Superior (Q2b) Litoarenitas de grano medio a grueso y litoarenitas gravosas poco compactadas con procesos locales de lixiviación que dan lugar a calcretas o caliches. Localmente cuarzoarenitas de grano fino a medio de forma subredondeada a subangular, subelongados, con pobre selección.	
					*** Miembro inferior (Q1b) Depósitos compuestos por litoarenitas conglomeráticas, de color rojo, poco litificadas; lodolitas arenosas varicoloreadas. Con estructuras lenticulares correspondientes a depósitos de canal, compuestos de conglomerados arenosos polimignitos, que varían de gránulos a guijos de forma subangulosa a redondeados con matriz arenosa pobremente seleccionada.	
	Neógeno N	Plioceno N2	Formación Sincelejo	NgQs	Areniscas de grano fino a grueso compuestas por cuarzo, chert, minerales pesados y líticos. Intercalaciones de conglomerados matriz soportados.	
			Formación Cerrito	Ngc	Areniscas bioclásticas calcáreas y conglomerados que varían hacia el techo a areniscas de grano fino, limolitas y arcillolitas gris verdosas.	
		Mioceno N1				
	Cenozoico CZ	Paleógeno E	Oligoceno E3	Formación Carmen	PgNgc	Grueso paquete de lodolitas de color gris oscuro medio y pardo amarillento en muestras alteradas.
			Eoceno E2	Formación San Jacinto	Pgsj	Areniscas de grano medio a grueso levemente conglomeráticas, sublíticas, cemento calcáreo, en capas gruesas, hacia el tope intercalaciones de lodolitas. En la base areniscas cuarzosas de grano grueso y niveles de conglomerados.
				Formación Toluviejo	Pgt	Calizas terrígenas con macroforaminíferos y algas con intercalaciones de margas y lodolitas.
Formación Maco				Pgm	Areniscas conglomeráticas de grano medio a grueso en capas medianas a muy gruesas, con intercalaciones arcillo limosas. Hacia la parte superior capas medianas de areniscas líticas a sublíticas.	
Formación Ciénaga De Oro				Pgc	Areniscas alternadas con limolitas intensamente bioturbadas, en capas planas paralelas.	
Paleoceno E1			Formación San Cayetano	Pgsc	Secuencia rítmica de areniscas líticas granodecrecientes. Intercalaciones de arcillolitas y niveles delgados de calizas.	
Mesozoico MZ	Cretácico K		Formación Cansona	Ksc	Interestratificaciones de chert, calizas micríticas de color gris, lodolitas negras calcáreas; laminadas y con concreciones de caliza en afloramientos discontinuos, lodolita gris verdosa intercaladas con areniscas arcóscas en capas de hasta 50 cm y finalmente conglomerado.	
***	Unidades geológicas que están presentes en el área de investigación					

Nota. Tomado y modificado del Mapa geológico de Colombia 2020, Servicio Geológico Colombiano SGC.

Regionalmente el área del proyecto sísmico hace parte de dos provincias tectónicas: el Cinturón de San Jacinto al NW y la Cuenca de San Jorge al SE. Las cuales se encuentran en su mayoría cubiertas por depósitos cuaternarios. Estas dos provincias están limitadas por el lineamiento de Romeral.

El Cinturón de San Jacinto es una faja replegada caracterizada por fallas inversas y de cabalgamiento y pliegues apretados (anticlinales), que evidencian una dinámica compresiva actuando en las Formaciones Cansona y San Cayetano del Paleógeno. La Cuenca de San Jorge se caracteriza por fallamiento normal, generado por una dinámica distensiva. (Clavijo Torres & Barrera Olmos, 2001). La cuenca de San Jorge es una provincia hundida, tipo graben, generada por una dinámica distensiva, colmatada por sedimentos miocénicos y recientes (Formación Betulia) (Clavijo Torres & Barrera Olmos, 2001).

3.1.1.1 Geología estructural

En el Cinturón de San Jacinto se presentan dos sistemas principales de fallas: longitudinales y transversales. Los primeros son los de mayor extensión, predominantemente inversos, de dirección NNE; éstos son desplazados por los segundos de menor extensión y de dirección E-W, WNW y ENE. (Clavijo Torres & Barrera Olmos, 2001).

Al sistema de Fallas de dirección NNE pertenecen: la Falla de Palmito: Aflora al SE del municipio del mismo nombre, Falla de Guaimí: Se presenta, entre las poblaciones de Guaimí y Varsovia está cubierta por sedimentos recientes pone en contacto rocas de la Formación San Cayetano con rocas de la Formación Carmen. Falla de Tolviejo, pone en contacto rocas de la Formación Tolviejo sobre las de la Formación San Cayetano, Falla de Palenquillo, afecta rocas de las formaciones Maco y San Jacinto. Falla de Chinulito: pone en contacto las formaciones San Cayetano y Maco y la Falla de Chalán: Afecta rocas de la Formación Tolviejo; pone en contactos las formaciones San Cayetano – Tolviejo y Maco.

El sistema de Fallas de dirección WNW. Está conformado por fallas transversales que desplazan las fallas de dirección NNE de extensiones cortas. Asociado a la cuenca de San Jorge está el Lineamiento de Romeral que constituye el límite oriental de la Provincia (Cinturón) de San Jacinto y el occidente de la provincia (Cuenca) de San Jorge.

A nivel regional los principales pliegues que se presentan en la región corresponden a anticlinales estrechos, alargados, fallados y sinclinales amplios. Entre los principales está el Sinclinal de Carbón que corresponde a un pliegue simétrico, cuyo núcleo está constituido por arcillolitas de la Formación Carmen. Otro es el Anticlinal de Tolú viejo es un pliegue asimétrico, fallado constituido por areniscas, lodolitas y conglomerados de la Formación San Cayetano (Clavijo Torres & Barrera Olmos, 2001). Entre otras estructuras están el Sinclinal de Caracolí, El Anticlinal de Tuchín. el Anticlinal del Cedro (Providencia) y El Sinclinal de Sincelejo.

3.2 Caracterización Hidrológica (Niveles De Agua Subterránea)

Para este proyecto la caracterización de niveles de agua subterránea es una herramienta fundamental que nos facilita tener un conocimiento del comportamiento del ciclo hidrológico relacionando con el almacenamiento y el flujo de agua subterránea, además del comportamiento del agua tanto superficial como subterránea y permitir junto a la caracterización geológica e hidráulica la incidencia de la sísmica en el acuífero de la región.

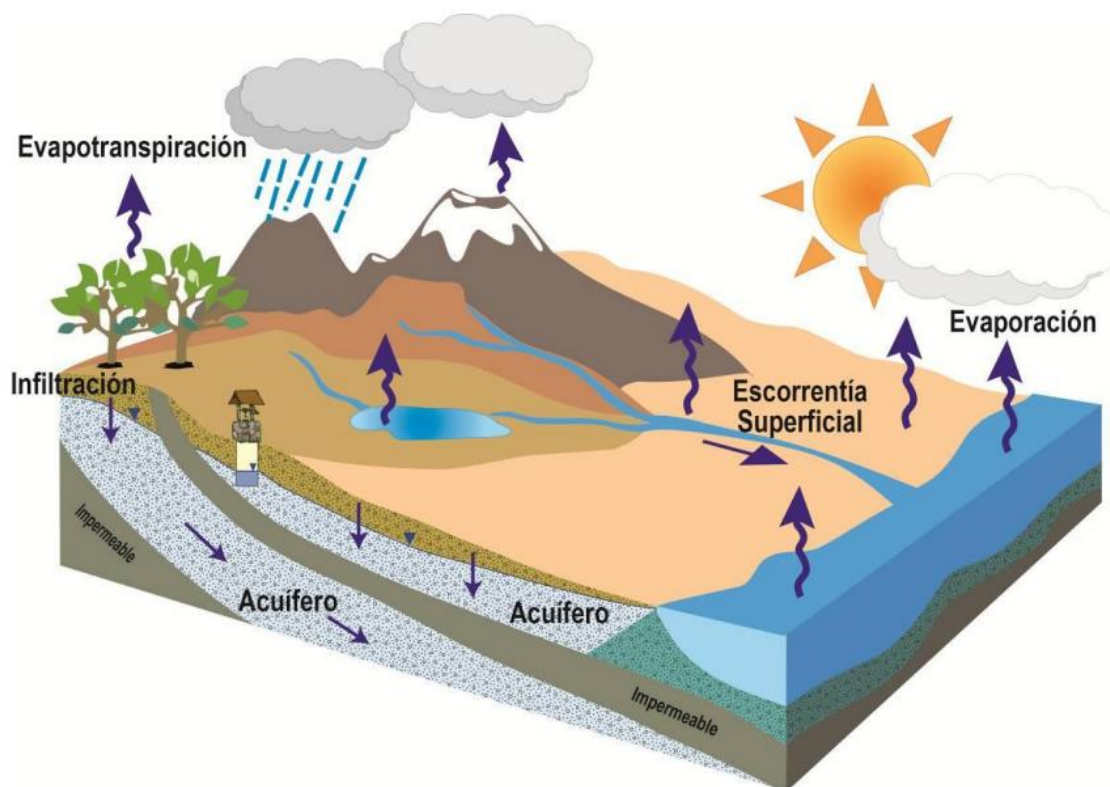
Para esta caracterización partimos de la información tomada en campo y las condiciones de flujo, como la determinación de zonas de carga recarga y descarga, teniendo en cuenta que las aguas atmosféricas, superficiales y subterráneas hacen parte del ciclo hidrológico y se encuentran constantemente en interacción.

Mediante esta caracterización de niveles de agua subterránea podemos establecer el comportamiento hidrológico de las aguas subterráneas como un diseño distribuido.

3.2.1 El Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico se define como la secuencia de fenómenos por medio de los cuales el agua pasa de la superficie terrestre, en la fase de vapor, a la atmósfera y regresa en sus fases líquida y sólida (Fattorelli & Fernandez, 2011). En la Figura 4 se observa el ciclo hidrológico. Conformado por el agua atmosférica, agua superficial y agua subsuperficial.

Figura 4. Representación del ciclo hidrológico.



Nota. A. I. Santana Armas et al. – Ideas preconcebidas sobre el ciclo del agua y las aguas subterráneas en la educación.

3.2.2 Inventario de Puntos de Agua Subterránea

Un punto de agua subterránea se puede definir como un lugar, obra civil o circunstancia que permita el acceso directo o indirecto a un acuífero. Estas pueden incluir perforaciones existentes, ya sea o no explotadas, abandonadas o colapsadas como pozos, aljibes y piezómetros, que

corten el nivel de la tabla de agua. Los manantiales o surgencias son consideradas como descargas naturales de los acuíferos (Cormacarena & UT, 2016).

El inventario de puntos de agua subterránea permite evaluar la disponibilidad y uso del recurso hídrico subterráneo para tener una visión global de las características y comportamiento de las diferentes unidades geológicas potencialmente acuíferas. Además, permite establecer la posible afectación que estos puntos puedan presentar con el desarrollo de las actividades del proyecto.

3.2.3 Niveles de agua subterránea

Es importante diferenciar los términos del nivel freático y el piezométrico. El nivel freático es el nivel o altura física que tiene una columna de agua o el agua en el suelo y el nivel piezométrico es la altura o nivel que tendría si se dejara subir o bajar a placer. Por eso en un pozo que lleva mucho tiempo sin sacarle o meterle agua, el nivel freático es el mismo que el piezométrico. Si a ese mismo pozo se le extrae el agua, el nivel del agua bajara, pero con el tiempo tendera a regresar a su nivel es decir que el nivel freático habrá bajado mientras el piezométrico se conserva igual.

El nivel de la superficie piezométrica se representa en un plano mediante las curvas isopiezométricas o Isopiezas que corresponden a los puntos de igual presión de un acuífero, se identifican con las líneas equipotenciales, las cuales son las líneas de igual elevación de nivel estático, generalmente se expresan en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). (Schmidt, n.d.)

Mediante la interpretación de las curvas Isopiezas se determina, las características del movimiento de las aguas subterráneas o la dirección de un flujo regional de agua subterránea, en sentido predominante.

3.3 Caracterización Hidráulica

La caracterización hidráulica nos permite determinar el potencial de las aguas subterráneas contenidas en las formaciones hidrogeológicas mediante ensayos de bombeo realizados a pozos profundos para determinar las variables hidráulicas como la conductividad hidráulica, capacidad específica y transmisividad.

3.3.1 Características Hidráulicas de los Acuíferos

Los parámetros hidráulicos más relevantes para determinar las características de los acuíferos son (1) transmisividad, (2) conductividad hidráulica y (3) capacidad específica. A continuación, se describen y analizan los resultados de cada una de las constantes hidráulicas encontradas en este estudio. A continuación, se describen los parámetros hidráulicos:

Conductividad Hidráulica (K-m/día): La conductividad hidráulica mide la facilidad que un acuífero ofrece a ser atravesado por un fluido. Este parámetro es medido como la constante de proporcionalidad entre el caudal y el gradiente hidráulico.

Transmisividad (T-m²/día): Este parámetro indica la facilidad del agua para circular horizontalmente por una formación acuífera. La Transmisividad se calcula multiplicando la conductividad hidráulica horizontal del acuífero por el espesor saturado del mismo.

Coefficiente de Almacenamiento (S): Este coeficiente describe el volumen de agua que un acuífero puede almacenar y ceder después y mide el volumen de agua liberado por una columna de agua (cuya base es una unidad y la altura es todo el espesor del acuífero), cuando el nivel piezométrico desciende una unidad. Este parámetro es adimensional.

En el caso de acuíferos libres, el coeficiente de almacenamiento representa el volumen de agua que el acuífero drena por gravedad y coincide con la porosidad eficaz. En caso de acuíferos

confinados el volumen de agua drenado no proviene de la que se encuentra almacenada en los poros, sino por descompresión del acuífero. El valor del coeficiente de almacenamiento varía de acuerdo con el tipo de acuífero Tabla 2.

Tabla 2. Coeficiente de Almacenamiento de acuerdo con el Tipo de Acuífero

ACUÍFERO	EXPONENCIAL
Libre	$<10^{-3}$
Semiconfinado	$10^{-3} - 10^{-4}$
Confinado	$10^{-4} - 10^{-7}$

Nota. Sánchez San Román, F.J, El agua en el suelo 2001.

Capacidad específica (l/s/m): Es la relación existente entre el caudal de bombeo de un pozo y el abatimiento máximo alcanzado en una prueba de bombeo o en un rango de explotación conocido. Sus unidades corresponden a caudal sobre longitud de abatimiento del nivel de la tabla de agua y sirven para clasificar los acuíferos de acuerdo con su productividad. A su vez los parámetros hidráulicos teóricos obtenidos de los acuíferos permiten realizar estimaciones de los caudales que podría producir un pozo perforado en la zona como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Transmisividad, capacidad específica, productividad del acuífero y caudal esperado en pozos

Transmisividad (m ² /día) **IGME, 1984	Capacidad Específica (l/s/m) *UNESCO, IAH, IAHS, 1983	Productividad del Acuífero	Caudal estimado de producción de pozos (l/s)
T < 10	<0,05	Muy baja	< 1
10 < T < 100	0,05 – 1,0	Baja	1 – 10
100 < T < 500	1,0 – 2,0	Media	10 – 50
500 < T < 1000	2,0 – 5,0	Alta	50 – 100
T > 1000	>5,0	Muy Alta	> 100

Nota. * UNESCO, IAH, IAHS. International Legend for Hydrogeological Maps.

**Adaptado de VILLANUEVA MARTÍNEZ, M; IGLESIAS LÓPEZ, A. Pozos y Acuíferos. Técnicas de Evaluación Mediante Ensayos de Bombeo.

Al enfocar la solución de problemas de Hidrología Subterránea en pequeña o gran escala, nos encontramos continuamente ante la situación de poder obtener valores confiables y representativos de las características hidráulicas de los acuíferos. Para lo cual nos valemos de los ensayos o pruebas de bombeo siendo este el método más adecuado para alcanzar ese objetivo.

3.3.1.1 Pruebas de Bombeo de los puntos de agua subterránea

Las pruebas de bombeo son utilizadas para determinar los parámetros hidrogeológicos de un acuífero, como son: Conductividad hidráulica K , transmisividad T y el coeficiente de almacenamiento S , determinar el comportamiento del acuífero frente a un bombeo, hallar fronteras como flujo impuesto o potencial constante.

Los ensayos de bombeo a caudal constante necesitan para su realización, pozos perforados, de tal manera que se cumplan las condiciones teóricas necesarias para aplicar las ecuaciones de la hidráulica de pozos, como:

- Pozo totalmente penetrante en el acuífero.
- Acuífero horizontal de extensión infinita.
- Medio homogéneo e isotrópico.
- Flujo radial.

En el Área del proyecto, se observó gran cantidad de captaciones hechas a mano (pozos profundos y aljibes), donde las condiciones anteriores no se cumplen, se debe mirar críticamente los resultados de los ensayos de bombeo tradicional, basado en el ajuste de los registros de abatimiento vs tiempo a la ecuación de Theis:

$$S = \frac{Q}{4\pi T} * W(u)$$

Siendo,

$$u = \frac{Sr^2}{4T}$$

Donde,

s: abatimiento en metros en un punto cualquiera.

R: distancia del punto donde se mide al pozo en metros.

Q: caudal bombeado en m³/día.

S: coeficiente de almacenamiento en metros.

T: transmisividad del acuífero en m³/día/m.

t: tiempo de bombeo en días.

La función $W(u)$, se conoce con el nombre de función de pozo en acuífero cautivo y es un parámetro adimensional. Si $u = 0.01$, el abatimiento puede calcularse con la ecuación de Jacob:

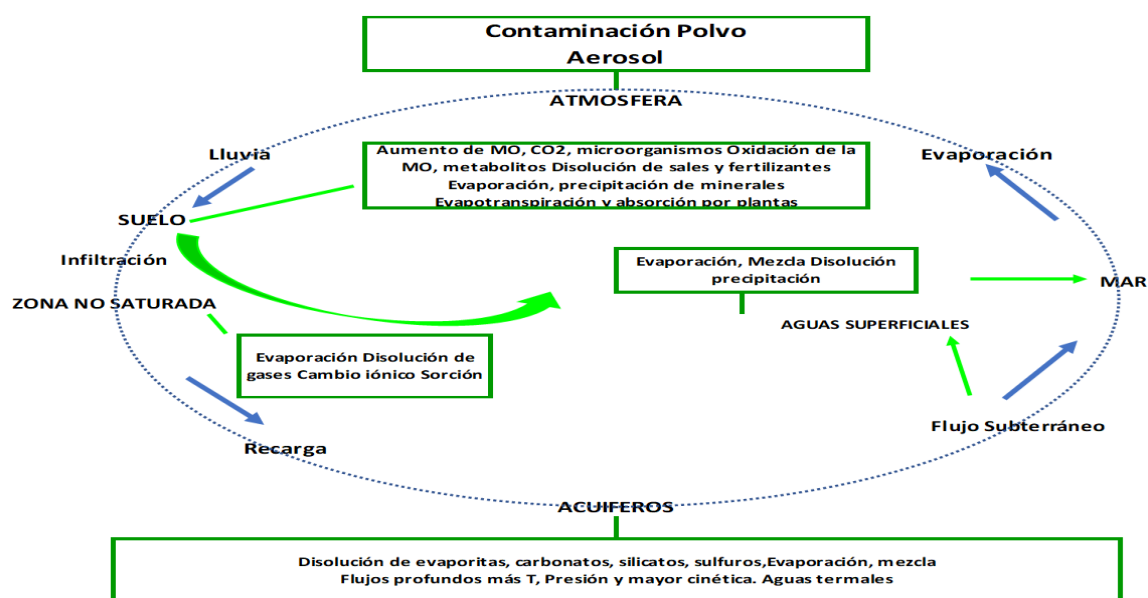
$$S = \frac{Q}{4\pi T} \operatorname{Ln} \frac{2.25 T}{r^2 S}$$

3.4 Caracterización Hidro geoquímica

Una de las ramas más importantes que tiene la hidrogeología es la hidro geoquímica, por medio de la cual se puede determinar las propiedades químicas del agua superficial y en nuestro caso el agua subterránea y la relación con las unidades geológicas, mediante el análisis de los iones disueltos y los procesos de interacción agua roca.

Una caracterización hidro geoquímica conceptual se puede definir como la integración e interpretación de las variaciones espaciales de los elementos que componen el agua mediante procesos modificadores. La caracterización se desarrolla a través de una representación simplificada del sistema y la interpretación hidroquímica se fundamenta en la identificación y la explicación de la composición del agua (hidroquímica) y la distribución espacial y variación temporal, mediante el análisis de datos, cálculo y valoración de relaciones iónicas, cuyos resultados se representan en gráficas, diagramas y mapas. En la Figura 5 se representa un Ciclo Hidrogeoquímico del agua.

Figura 5. Ciclo Hidrogeoquímico (Escuder et al., 2009)



Nota. Ciclo Hidrogeoquímico (Escuder et al., 2009)

La variación en la composición química del agua subterránea sirve para inferir cual ha sido la ruta de migración y con información adicional (por ejemplo, pozos de monitoreo, contenido isotópico), se puede calibrar y determinar en forma aproximada el tiempo de viaje que ha tenido el agua desde su recarga o ingreso al sistema hidrogeológico, hasta su descarga en pozos,

manantiales o en un cuerpo hídrico superficial. De esta forma el análisis hidrogeoquímico sirve para delinear las áreas de recarga y descarga, evaluar los cambios progresivos en los componentes hidrogeoquímicos del agua subterránea y los factores que controlan el origen de la composición química del agua.

La caracterización Hidrogeoquímica, se hace teniendo en cuenta el comportamiento de los iones dominantes. Un ion es dominante cuando su concentración en meq/L, es representativo con respecto a los otros iones. En la Tabla 4, se presentan los iones dominantes con carga positiva (cationes) y con carga negativa (aniones).

Tabla 4. Iones dominantes tenidos en cuenta para análisis hidrogeoquímico

Cationes principales	Aniones principales
Na ⁺	Cl ⁻
K ⁺	HCO ₃ ⁻
Ca ₂ ⁺	CO ₃ ²⁻
Mg ₂ ⁺	SO ₄ ²⁻

Nota. Elaboración Propia, 2022

3.4.1 Muestreo Hidrogeoquímico

Para el muestreo hidrogeoquímico se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: pH, conductividad eléctrica (Capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica que se utiliza para obtener una estimación del total de sólidos disueltos), aniones y cationes.

El balance iónico debe ser igual en cargas positivas (cationes) y negativas (aniones).

$$\sum x^{+} = \sum y^{-}$$

Este error **e** se calcula como:

$$e = \frac{(rc - ra)}{rc + ra} * 100$$

donde rc y ra son la suma de cationes y aniones en meq/l respectivamente.

(Appelo & Postma, 2005), indica que las diferencias hasta del 2% son inevitables en casi todos los laboratorios, algunas veces errores aún más grandes pueden ser aceptados, pero para las desviaciones mayores al 5% deben revisarse los procedimientos de muestreo y los analíticos; según (Anderson K. E. 1966) citado por (Custodio & Llamas, 1983), el error admisible depende un poco de la concentración y del tipo de agua, a título indicativo puede establecerse como se indica en la Tabla 5.

Tabla 5. Error aceptable en el balance iónico, según conductividad eléctrica

CE (µS/cm)	50	200	500	2,000	> 2,000
Error aceptable %	± 30	± 10	± 8	± 4	± 4

µS/cm: microsiemens por centímetro.

Nota. Custodio E., Llamas M. R., 2006.

3.5 Caracterización Hidrogeológica Conceptual

En el desarrollo de una caracterización Hidrogeológica intervienen cuatro medios físicos como son la geología, hidrología, hidráulica e hidrogeoquímica los cuales serán la base de evaluación para la caracterización hidrogeológica que permitirá determinar la incidencia de la prospección sísmica sobre el acuífero de Betulia.

Las características hidrogeológicas de las unidades geológicas que afloran en el área se fundamentan además del trabajo de campo, con el inventario de puntos de agua, el análisis de las unidades geológicas y sus materiales constituyentes donde se integra además un conjunto de variables intermedias como el relieve, las coberturas vegetales, unidades de suelos y su textura, entre otras (Tabla 6).

Tabla 6. Clasificación general de las unidades hidrogeológicas

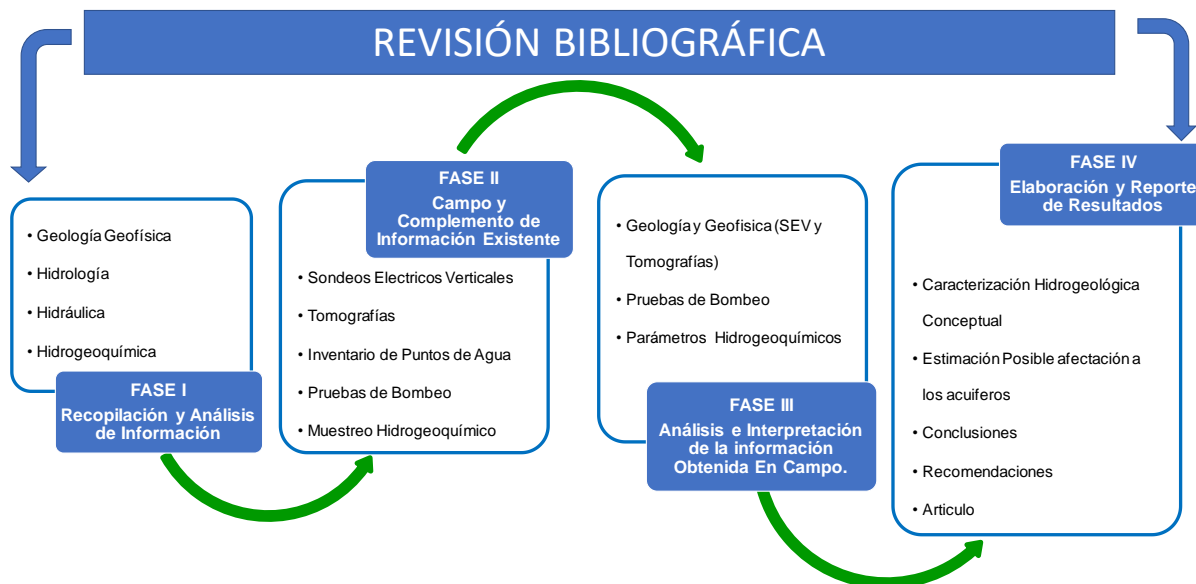
CLASIFICACIÓN GENERAL DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS		
CONVENCIONES	CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS	CAPACIDAD ESPECÍFICA PROMEDIO (l/s/m)
A. SEDIMENTOS Y ROCAS CON FLUJO ESENCIALMENTE INTERGRANULAR		
A1	Acuíferos continuos de extensión regional, de muy alta productividad, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente fluvial. Acuíferos libres y confinados con agua generalmente de buena calidad química.	Muy Alta Mayor de 5.0
A2	Acuíferos continuos de extensión regional, de alta productividad, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados y rocas sedimentarias terciarias poco consolidadas de ambiente fluvial, glacioluvial, marino y volcánoclastico. Acuíferos libres y confinados con agua de buena calidad química.	Alta Entre 2.0 y 5.0
A3	Acuíferos continuos de extensión regional de mediana productividad, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados y rocas sedimentarias terciarias poco consolidadas de ambiente fluvial, glacioluvial, marino y volcánoclastico. Acuíferos generalmente confinados con agua de buena calidad química.	Media Entre 1.0 y 2.0
A4	Acuíferos discontinuos de extensión local de baja productividad, conformados por sedimentos cuaternarios y rocas sedimentarias terciarias poco consolidadas de ambiente aluvial, lacustre, coluvial, eólico y marino marginal. Acuíferos libres y confinados con agua de regular calidad química.	Baja Entre 0.05 y 1.0
B. ROCAS CON FLUJO ESENCIALMENTE Y A TRAVÉS DE FRACTURAS (ROCAS FRACTURADAS Y/O CARSTIFICADAS).		
B1	Acuíferos discontinuos de extensión regional de muy alta productividad, conformados por rocas sedimentarias carbonatadas cretácicas, consolidadas de ambiente marino. Acuíferos generalmente confinados con agua de buena calidad química.	Muy Alta Mayor de 5.0
B2	Acuíferos discontinuos de extensión regional, de alta productividad, conformados por rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias bien consolidadas en las cuales el flujo se da a través de fracturas o planos de foliación	Alta Entre 2.0 y 5.0
B3	Acuíferos continuos de extensión regional de mediana productividad, conformados por rocas sedimentarias y volcánicas piroclásticas de ambiente marino continental. Acuíferos libres y confinados con aguas de buena calidad química. Con frecuencia se encuentran fuentes termales asociadas a la tectónica.	Media Entre 1.0 y 2.0
B4	Acuíferos discontinuos de extensión regional y local, de baja productividad, conformados por rocas sedimentarias y volcánicas, terciarias a paleozoicas consolidadas, de ambiente marino y continental. Acuíferos generalmente confinados con aguas de buena calidad química.	Baja Entre 0.05 y 1.0
C. SEDIMENTOS Y ROCAS CON LIMITADOS A NINGÚN RECURSO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.		
C1	Complejo de sedimentos y rocas con muy baja productividad, constituidos por depósitos cuaternarios no consolidados de ambientes lacustres, deltaicos y marinos y por rocas sedimentarias terciarias a cretácicas poco consolidadas a muy consolidadas, de origen continental o marino. Almacenan aguas de regular a mala calidad química, aislada en las regiones costeras.	Muy Baja Menor de 0.05
C2	Complejo de rocas ígneo-metamórficas con muy baja a ninguna productividad, muy compactas y en ocasiones fracturadas, terciarias a precámbricas. Almacenan aguas de buena calidad química. Con frecuencia se encuentran fuentes termales asociadas a la tectónica.	Muy Baja a ninguna Menor de 0.05

Nota. Guía Metodológica para la Formulación de Proyectos de Protección de Aguas Subterráneas, Ministerio del Medio Ambiente 2002. Atlas de aguas subterráneas Colombia V2.0.

4. MARCO METODOLOGICO

Para la caracterización hidrogeológica conceptual del área de estudio, como base de evaluación de las posibles en el sistema acuífero de Betulia como consecuencia de la ejecución de métodos geofísicos de exploración, se aplicó una metodológica sistemática secuencial que permitiera desarrollar de manera lógica los modelos de insumo (geológico, hidrológico, hidráulico e hidroquímico) de acuerdo con la descripción de la metodología expuesta en la Tabla 7.

Figura 6. Esquema del desarrollo del proyecto



Nota, Elaboración Propia, 2022

Tabla 7. Descripción de la metodología para la construcción de la Caracterización Hidrogeológica Conceptual.

caracterización de insumo para el MHC	Campañas de Campo y Análisis de información	Resultados
Geología y Geofísica	<ul style="list-style-type: none"> - Levantamiento de información geológica. - 10 sondeos Eléctricos Verticales (SEV) - 30 tomografías. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mapa geológico. - Determinación de la porosidad primaria. - Espesores y profundidades de las Unidades litoestratigráficas. - Modelo geológico - geofísico

caracterización de insumo para el MHC	Campañas de Campo y Análisis de información	Resultados
Hidrológica	<ul style="list-style-type: none"> - Inventario de puntos de agua subterránea. - Levantamiento de información donde se usó el Formulario Único Nacional de Aguas Subterráneas (FUNIAS). - 81 puntos de agua subterránea: 37 pozos, 32 aljibes y 12 manantiales. 	<ul style="list-style-type: none"> - Actualización del inventario de puntos de agua subterránea. - Sistema y dirección de los flujos de agua subterránea (mapa de Isopiezas)
Hidráulica	<p>Realización de 30 pruebas de bombeo.</p> <ul style="list-style-type: none"> - 15 Pre-prospección sísmica en febrero de 2021. - 15 Pos-prospección Sísmica en julio de 2021. 	<ul style="list-style-type: none"> - Estimar los parámetros hidráulicos del acuífero
Hidrogeoquímica	<p>Recolección de 10 muestras de agua, a las cuales se les realizó análisis de los parámetros físico - químicos y bacteriológicos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Determinar la calidad del agua. - Clasificación de las aguas a partir de las concentraciones de los iones y cationes (facies hidrogeoquímicas).

Nota. Elaboración Propia, 2022

- Consulta de fuentes de información secundaria y labores de campo con el inventario de puntos de agua subterránea (manantiales, pozos y aljibes), mediante el empleo de un formato para la toma de datos diseñado para el proyecto.
- Se efectuó una zonificación de unidades hidrogeológicas de acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano y la Unesco (Guía Internacional para Leyenda de Mapas Hidrogeológicos).
- La caracterización y clasificación de las unidades hidrogeológicas, se realizó de acuerdo a las consideraciones que se plantean en la Guía metodológica de las zonas hidrogeológicas homogéneas de Colombia, utilizada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), por medio del cual se reglamentan los instrumentos para la planificación, ordenación y manejo de las cuencas hidrográficas y acuíferos que, a su vez, acoge los lineamientos propuestos en los estándares internacionales que asigna las categorías hidrogeológicas con base en el potencial de rocas y sedimentos para almacenar y transmitir agua subterránea.
- La definición de esta clasificación se soporta en conceptos de permeabilidad e impermeabilidad, de acuerdo con las características lito estratigráficas de cada formación geológica. Para el área de estudio, se toma la capacidad específica promedio (l/s/m), tal como se desarrolla a continuación.

4.1 Fase I. recopilación de Información

4.1.1 *Geología y Geofísica*

Recopilación y Análisis de Información Existente. Se recopiló y analizó la información existente en el IGAC, SGC, IDEAM, sobre cartografía, topografía, geología y geomorfología. Se consultaron estudios geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos ejecutados en la zona de estudio. El análisis de la información permite obtener una comprensión general de la caracterización hidrogeológica del área de estudio.

Información Cartográfica. Para la elaboración de la cartografía base y temática del estudio fue necesaria la consulta de diferentes fuentes de información oficiales a nivel Nacional, y Regional, según lo establecido en la metodología general para la elaboración y presentación de Estudios Ambientales. Adicionalmente, para la elaboración del estudio se consultaron imágenes Lidar y Ortofoto en formato Shape, que cubren la totalidad del área de influencia del proyecto, lo cual permite realizar el ajuste de la información base y temática a la escala de trabajo. Esta Información fue corroborada y/o actualizada en campo por medio de las salidas realizadas en cada uno de los medios y componentes.

Información Geofísica. Se seleccionó, consulto y analizó información de Sondeos Eléctricos Verticales – SEV y Tomografías de estudios anterior.

La caracterización geológica y geofísica se desarrolla como parte integral de la caracterización hidrogeológica conceptual donde se incluyen conceptos y descripciones a nivel litológico, estructural y cartográfico de la zona de estudio, las cuales se completan con datos obtenidos a partir de la ejecución de Sondeos eléctricos Verticales y tomografías.

Los aspectos metodológicos y procedimentales adoptados para desarrollar el análisis del aspecto geológico del área de estudio se describen a continuación:

Se toma la cartografía base e información del Servicio Geológico Colombiano de los departamentos de Sucre y Córdoba, como son las planchas geológicas 52 - Sahagún y 53 - Magangué a escala 1:100.000 y los respectivos informes geológicos de dichas planchas, así como otros estudios realizados en el área de interés, además se identificaron y analizaron las unidades de suelo y roca aflorantes en el área de estudio y las principales estructuras geológicas. Después de este proceso se adelantó el control de campo a través de recorridos al área de influencia del proyecto. Se realizaron SEV y Tomografías eléctricas del terreno. Posteriormente con la información obtenida en campo, se adelantó el análisis geológico del área de estudio, como base para obtener la descripción de los componentes de Geología e Hidrogeología.

4.1.2 Hidrología

4.1.2.1 Inventario de Puntos de agua

Corresponde a un método de recopilación y análisis de los datos relacionados con la hidrogeología que procede de la información proporcionada por los usuarios de los denominados puntos de agua subterránea (aljibes, manantiales y pozos profundos) es decir de los lugares donde se tiene acceso directo o indirecto a un acuífero determinado. Es una herramienta útil para empezar a conocer las características hidrogeológicas de una zona.

4.1.3 Hidráulica

De acuerdo con los pozos y aljibes, inventariados en campo, se escogieron quince puntos de agua subterránea (pozos profundos y aljibes), con profundidades que varían de 10 a 165 metros, los cuales se les realizó pruebas de bombeo.

4.1.4 Hidrogeoquímica

De la información consultada se obtuvieron los pasos para determinar la calidad del agua, la clasificación de las aguas a partir de las concentraciones de los iones y cationes (facies hidrogeoquímicas) y si obtener la caracterización hidrogeoquímica.

4.2 Fase II Trabajo De Campo.

4.2.1 Geología y Geofísica

La prospección geofísica a partir de un método geoelectrico permite obtener una aproximación de la distribución de los materiales en el subsuelo, así como también su composición desde el punto de vista litológico, analizando la variación de la resistividad del subsuelo ante el paso de corriente. Por tanto, la resistividad eléctrica del subsuelo va a depender del volumen de los poros, de su distribución y del comportamiento del fluido contenido en ellos.

La exploración geofísica realizada para la caracterización hidrogeológica del programa sísmico se efectuó mediante métodos indirectos, tales como: Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) y Tomografías Eléctricas.

Los SEV tienen como objetivo evaluar las características geométricas de las unidades geológicas con potencial acuífero, de manera puntual; hasta la profundidad que lo permite el método de investigación.

El método de Prospección Geoelectrica Continua (tomografía eléctrica) busca evaluar las condiciones y características de los materiales que conforman el subsuelo a través de una imagen bidimensional, la cual resulta del procesamiento de la información de campo; con este método, es posible identificar los principales rasgos geológicos y estructurales del subsuelo.

4.2.1.1 Sondeos Eléctricos Verticales

Para el área de estudio se efectuaron 10 sondeos eléctricos verticales con un AB/2 de 100 metros, ubicados en los sitios cercanos a los pozos inventariados, donde se incluye el corregimiento Santa Fe, municipio de Chinú (SEV 1), corregimiento El Deseo, municipio de Chinú (SEV 2), vereda El Roble, municipio El Roble (SEV 3 y SEV 4), corregimiento Hato Nuevo, municipio de Corozal (SEV 5, SEV 7, SEV 9), corregimiento Cayo de Palma, municipio de Corozal (SEV 6), corregimiento de Vélez, municipio de Corozal (SEV 8) y el corregimiento Valencia, municipio de Since (SEV 10), cuyo objeto es identificar las capas geoelectricas, objeto de captación, y su profundidad.

4.2.1.2 Tomografías

También se incluyeron 30 tomografías eléctricas con una longitud de 220 metros y un espaciamiento entre electrodos de 10 metros, distribuidas en el área de estudio, lo que permite observar la variación lateral de las capas geoelectricas y su profundidad mediante una imagen bimodal (2D) a una profundidad de 55 metros. Los datos son interpretables desde el punto de vista físico a partir de la imagen. Para la adquisición de estas tomografías, se utilizó un equipo GeoAmp (Subsuelo 3D), con alta efectividad en la adquisición de datos para modelos en dos dimensiones.

4.2.2 Hidrología

4.2.2.1 Inventario de puntos de agua Subterránea

En el área de estudio, se realizó el inventario de puntos de agua subterránea, donde las condiciones de acceso y permiso de los propietarios lo permitieron. El trabajo de campo fue

ejecutado en febrero de 2021, y en julio de 2021, durante el periodo climático seco mediante la ubicación directa en campo de dichos puntos de agua utilizando la información provista por la misma comunidad con el fin de ubicar la mayor parte de los aprovechamientos de agua existentes en el área.

Para los sitios a inventariar, se hizo la nivelación y posicionamiento del punto, utilizando GPS submétrico y determinando el nivel estático del pozo o aljibe, utilizando la medición hecha con sonda eléctrica para medición de niveles. En cada punto, se toma la información suministrada por los propietarios de los predios y se verifican las condiciones observadas; además se realizaron mediciones directas sobre los puntos inventariados y se diligencio un Formulario Único Nacional para inventario de puntos de agua subterránea (FUNIAS), elaborado por el IDEAM, SGC y el MADS.

En este formato se registran entre otros aspectos, la localización y características constructivas de las captaciones, usos y usuarios, caudales e información relacionada con la medida de parámetros físicos *in-situ*, del agua (pH, conductividad eléctrica y temperatura) y el diagnostico sanitario de los mismos.

4.2.3 Hidráulica

4.2.3.1 Pruebas de Bombeo

De acuerdo con los pozos y aljibes, inventariados en campo, se escogieron quince (15) puntos de agua subterránea (pozos profundos y aljibes), con profundidades que varían de 10 a 165 metros, los cuales se les realizo pruebas de bombeo. Las coordenadas de los puntos de agua subterránea, se presenta en la Tabla 8, en la **Figura 7** su espaciamento en la **Fotografía 1** el registro.

Tabla 8. *Coordenadas y características de los Pozos utilizados para las pruebas de bombeo*

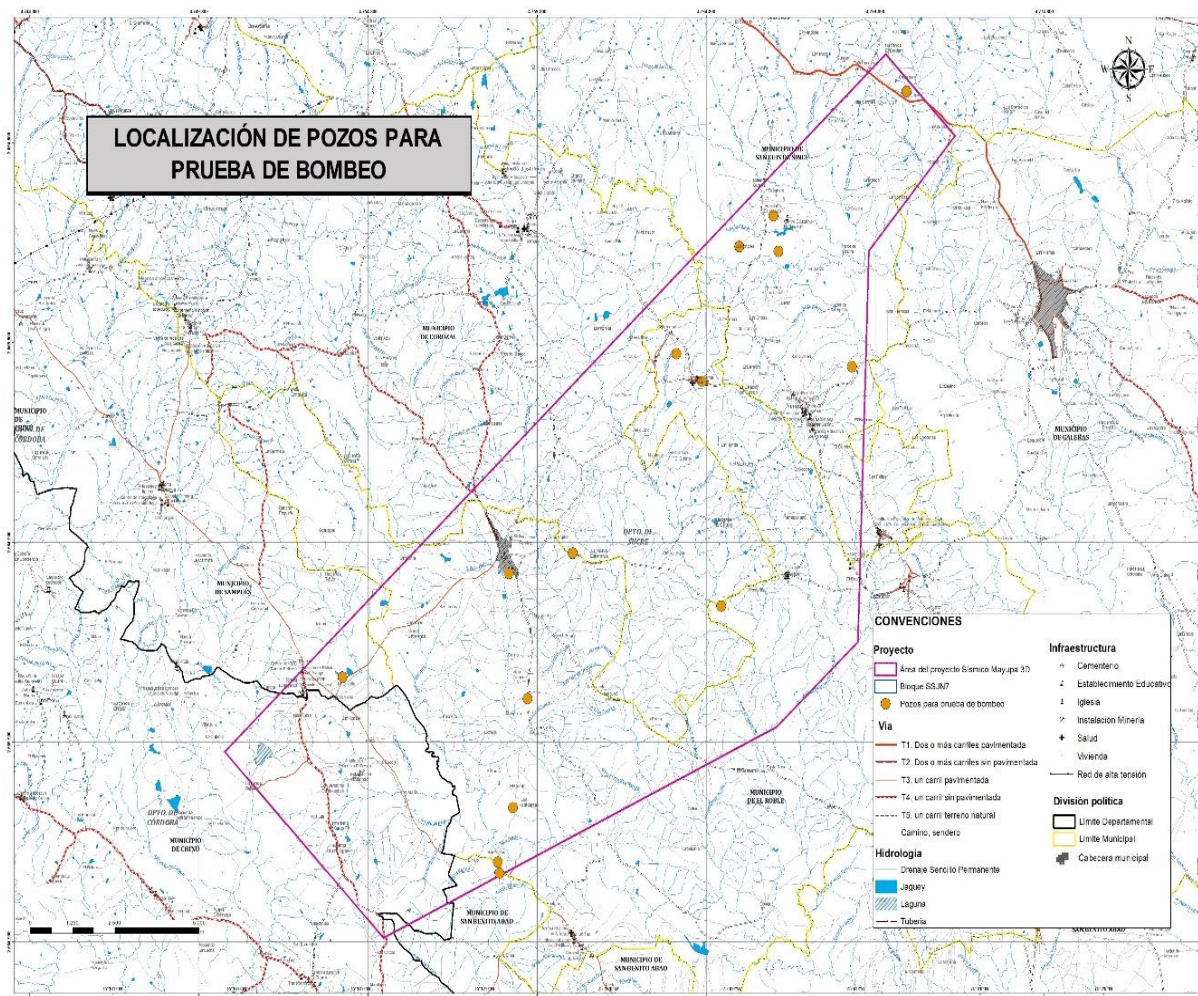
PRUEBA DE BOMBEO	ID	DATUM MAGNAS SIRGAS ORIGEN BOGOTÁ		TIPO DE BOMBA	DIÁMETRO INTERNO (pul)	CAUDAL (l/s)	NE (m)	PROF. (m)	ND (m)	TUBERÍA DE PRODUCCIÓN (pul)
		NORTE	ESTE							
PB-01	PRE PZ-02	1498432	876882	Bomba electro sumergible	8"	5.8	11.63	102	34.35	2"
PB-02	PRE PZ-03	1498862	878243	Bomba electro sumergible	8"	19	17.27	165	36.69	3"
PB-03	PRE PZ-10	1497632	883168	Bomba electrobomba	8"	1.8	1.89	60	6.68	2"
PB-04	PRE AL-05	1498947	878781	Bomba electrobomba	36"	1.5	1.7	7	4.19	1.5"
PB-05	PRE PZ-12	1503256	882581	Bomba electro sumergible	6"	2	18.45	116	21.15	1.5"
PB-06	PRE PZ-13	1503949	881822	Bomba electro sumergible	6"	3.5	25.89	100	58.25	1"
PB-07	PRE PZ-15	1495497	872352	Bomba electrobomba	4"	2.3	6.59	54	8.76	1"
PB-08	PRE AL-13	1490881	876954	Bomba electrobomba	40"	1.3	3.8	5.50	4.118	2"
PB-09	PRE AL-14	1490602	877009	Bomba electrobomba	36"	1.4	4.28	7	5.64	2"
PB-10	PRE PZ-22	1492249	877397	Bomba electrobomba	4"	1.4	5.3	30	6.16	1"
PB-11	PRE AL-23	1494976	877828	Bomba electrobomba	36"	1.2	4.75	8	5.75	1.5"
PB-12	PRE AL-24	1507093	885063	Bomba electrobomba	40"	1.3	13.26	17	13.93	1"
PB-13	PRE PZ-31	1506317	884050	Bomba electro sumergible	6"	1.8	4.7	30	6.7	1.5"
PB-14	PRE PZ-101	1510216	888994	Bomba electro sumergible	6"	2.2	15.20	140	23.32	2"
PB-15	PRE AL-28	1503320	887403	Bomba electrobomba	40"	0.9	11.32	15.50	12.03	2"

Nota. Elaboración Propia, 2022

Fotografía 1. *Prueba de bombeo, Pre y Pos registro sísmico 3D*

Pozo profundo (PZ 101) localizado en la finca La Victoria, municipio de Sincé, Sucre. (A) prueba pre registro. (B), pos registro sísmico

Figura 7. Localización de los pozos para prueba de bombeo

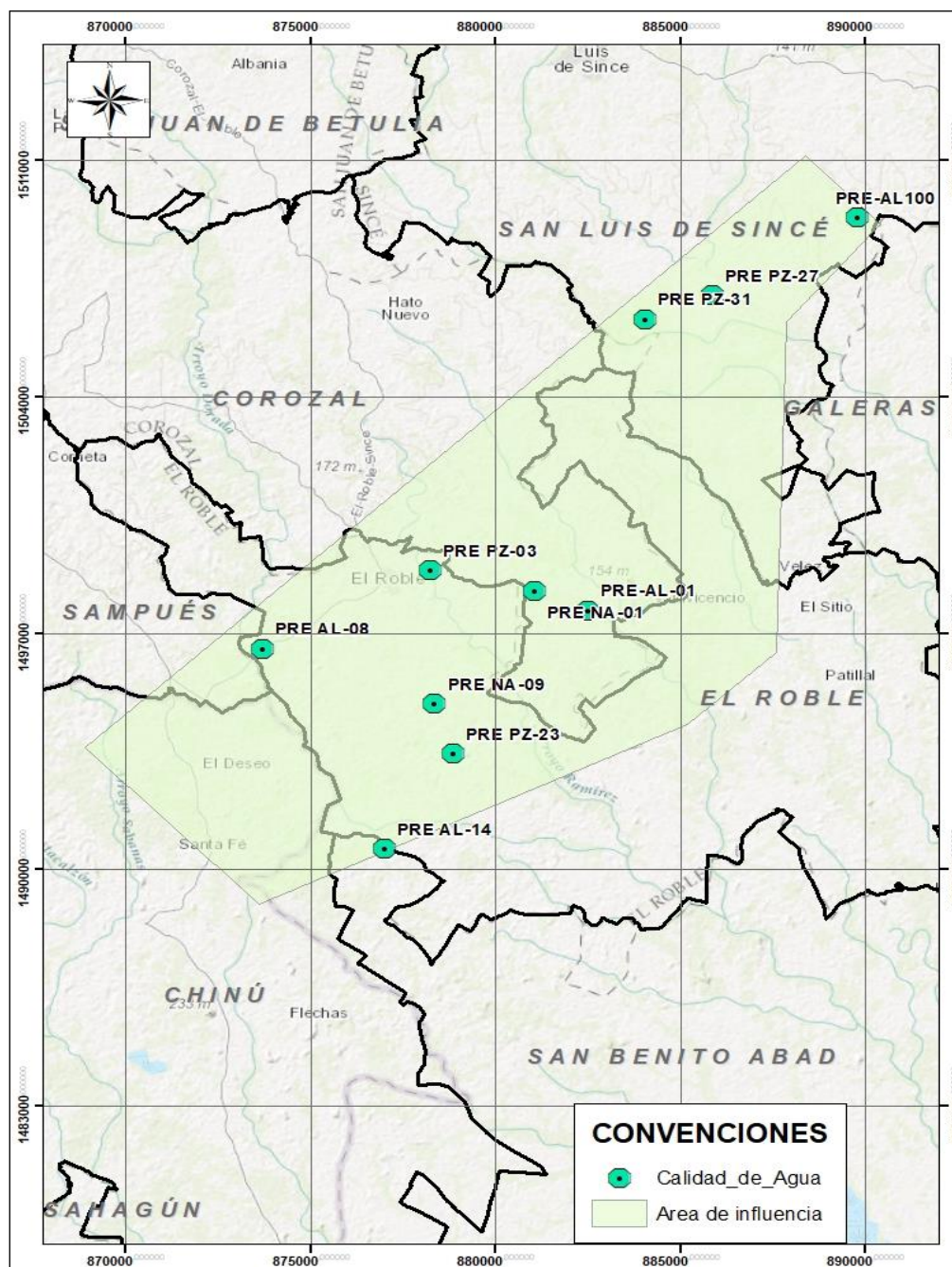


Nota. Elaboración Propia

4.2.4 Hidrogeoquímica

Para la caracterización hidrogeoquímica del área de PSM3D, se llevó a cabo el muestreo fisicoquímico que incluyó la toma de muestras en diez (10) puntos de agua subterránea. Este se llevó a cabo en dos campañas durante el mes de febrero y el mes de julio de 2021, antes y después de la prospección sísmica, los cuales se distribuyen de la siguiente manera 04 pozos profundos, 04 aljibes y 02 manantiales. (Figura 8).

Figura 8. Localización de los puntos de muestreo para Caracterización Hidrogeoquímica



Nota. Elaboración Propia, 2022

4.2.4.1 Toma de Muestras

Se usó el muestreo a profundidad que consiste en hacer bajar un dispositivo de muestreo, o bailer, en el interior del pozo, aljibe o manantial, dejando que se llene con agua a una profundidad

conocida, sistema que perturba menos la estratificación hidroquímica original; luego se cierra el cilindro y se atrapa el agua en su interior, se recupera la muestra y se transfiere a un balde y se repite el procedimiento para obtener el volumen necesario para llenar los frascos de los diferentes analíticos. Para el parámetro puntual de grasas, la muestra se tomó directamente del bailer al recipiente de muestra, sin trasvasar y llenando el volumen requerido. Para la medición de parámetros *in situ* (temperatura, oxígeno disuelto, pH y conductividad), se sumerge directamente

En la Tabla 9, se describe la ubicación y características de los puntos de monitoreo de agua subterránea, posterior a la toma, las muestras fueron almacenadas, conservadas y transportadas al laboratorio acreditado por el IDEAM para el análisis de los parámetros requeridos (Anexo 3 Resultados fisicoquímicos de aguas subterráneas pre y pos Registro sísmico). En la **Fotografía 2** el registro de la toma de muestras.

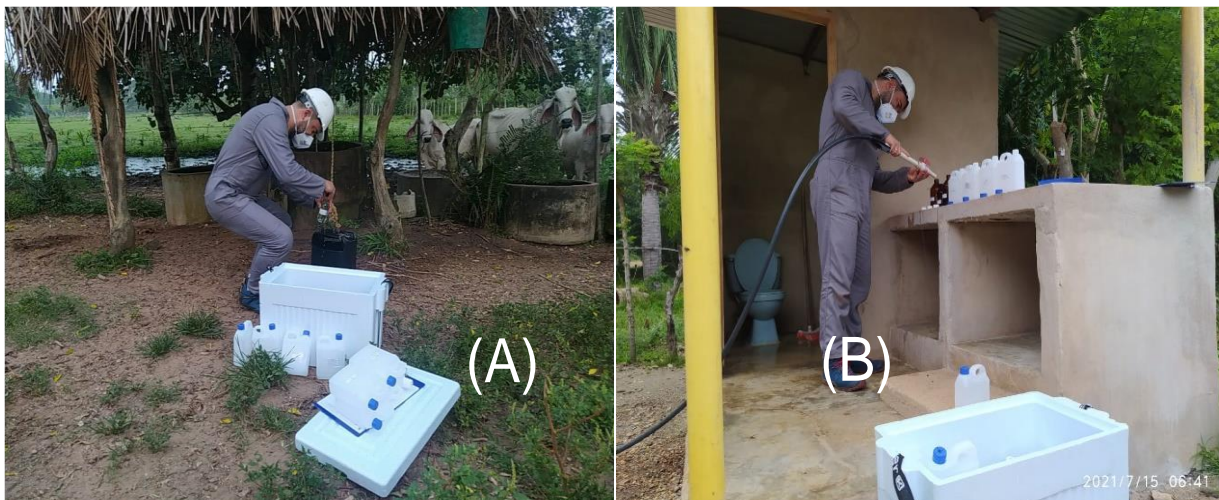
Tabla 9. *Puntos de muestreo de calidad del agua subterránea*

ID	TIPO	MUN / VEREDA	PROPIETARIO	COORDENADAS MAGNA		USO	PRO F. (m)
				SIRGAS NORTE	ORIGEN ESTE		
PRE NA-09	Manantial	El Roble	José Vitola	1,494,900	878,364	Domestico	NA
PRE NA-01	Manantial	Corozal	S.I.	1,498,246	881,049	Doméstico y pecuario	NA
PRE PZ-23	Pozo profundo	El Roble	S.I.	1,493,423	878,857	Doméstico y pecuario	60
PRE PZ-03	Pozo profundo	El Roble	Municipio El Roble	1,498,862	878,243	Domestico	165
PRE PZ-31	Pozo profundo	Sincé	Jairo Hernández	1,506,317	884,050	Doméstico y pecuario	30
PRE PZ-27	Pozo profundo	Sincé	Mario Rodríguez	1,507,012	885,890	Doméstico y pecuario	18
PRE-AL-01	Aljibe	Corozal	María Teresa Amaya	1,497,684	882,520	Doméstico y pecuario	5.50
PRE AL-08	Aljibe	El Roble	Olimpo Vergara	1,496,546	873,716	Domestico	6
PRE-AL100	Aljibe	Sincé	Jorge Lara	1,509,317	889,795	Domestico	S.I.
PRE AL-14	Aljibe	El Roble	Julio Cesar Álvarez	1,490,602	877,009	Domestico	7

Prof.: Profundidad
N.A: No aplica

Nota. Elaboración Propia, 2022

Fotografía 2. Toma de muestras de agua para laboratorio.



Protocolo de toma de muestras para análisis fisicoquímicos (A) pre AL-100, aljibe de diámetro 36, municipio de Sincé, Sucre y (B) Pre AL-14, aljibe de diámetro 36", municipio de El Roble, Sucre.

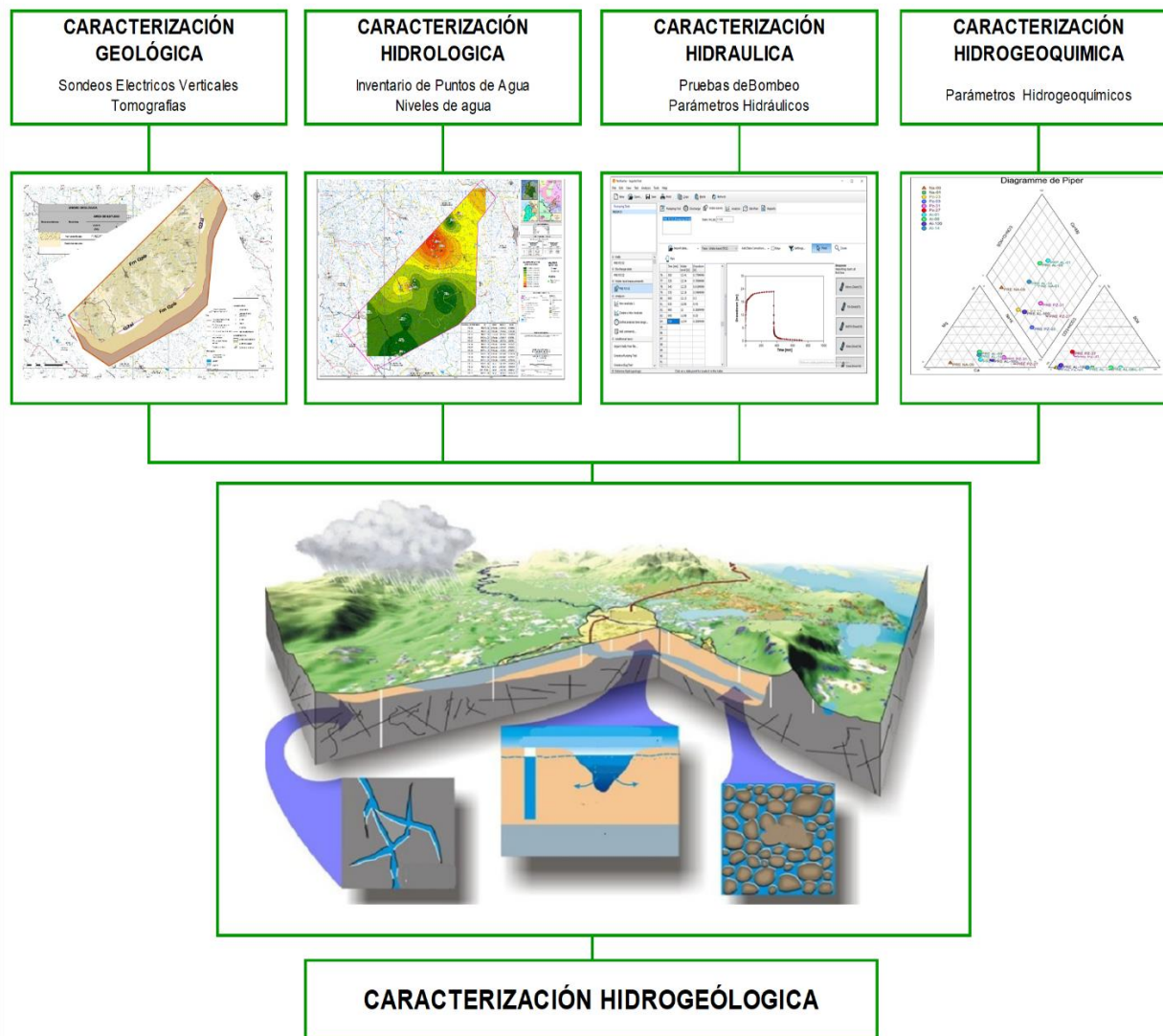
4.3 Fase III de Análisis de Integración e Interpretación de Datos

A partir de la información bibliográfica recopilada, y los resultados obtenidos para los modelos de insumo (geológico, hidrológico, hidráulico e hidroquímico), los cuales son generados a partir de información primaria y secundaria, se concluye con la caracterización hidrogeológica Conceptual.

4.4 Fase IV de elaboración de reporte de resultados

Con la información obtenida en campo, para el procesamiento y el respectivo análisis se procede a integrar las diferentes caracterizaciones (geológica y geofísica, hidrológica, hidráulica e hidrogeoquímica) para obtener la caracterización Hidrogeológica Conceptual:

5. ANALISIS DE RESULTADOS



Nota. Elaboración Propia, 2022. Bloque diagrama <https://gidahatari.com/cu-es/>

5.1 Caracterización Geológica

5.1.1 Geología Local

El área de estudio se encuentra ubicada en la parte inferior de la cuenca del Valle Inferior del Río Magdalena, en la margen occidental. En este sector afloran unidades del Pleistoceno y Holoceno

representadas por los conglomerados, arenas y lodos de la Formación Betulia y por depósitos Cuaternarios asociados en su mayoría a la dinámica del río Magdalena y sus afluentes.

Con el análisis de interpretación de la información secundaria de las planchas geológicas 52 Sahagún y la plancha 53 Magangué a Escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano (SGC), e imágenes satélites y el reconocimiento de campo, se identificó que el proyecto, se localiza geológicamente en la Formación Betulia (Qpb) la cual consta de dos miembros el (Q1b) Miembro inferior del Pleistoceno y el (Q2b) Miembro superior del Holoceno y algunos depósitos cuaternarios aluviales (Q2a).

La secuencia litológica corresponde de base a techo de por litoarenitas conglomeráticas, de color rojo, poco litificadas; lodolitas arenosas varicoloreados del (Q1b) seguidos por litoarenitas de grano medio a grueso y litoarenitas gravosas poco compactadas de (Q2b) cubiertas por depósitos aluviales.

Geomorfológicamente estos depósitos conforman un relieve suavemente ondulado a plano, disectado con facilidad por la baja compactación de los materiales depositados y por la acción erosiva los drenajes menores. En la Tabla 10, se presenta la correlación de las unidades identificadas en la columna estratigráfica a nivel local y en la Figura 9 la columna estratigráfica de la Fm Betulia.

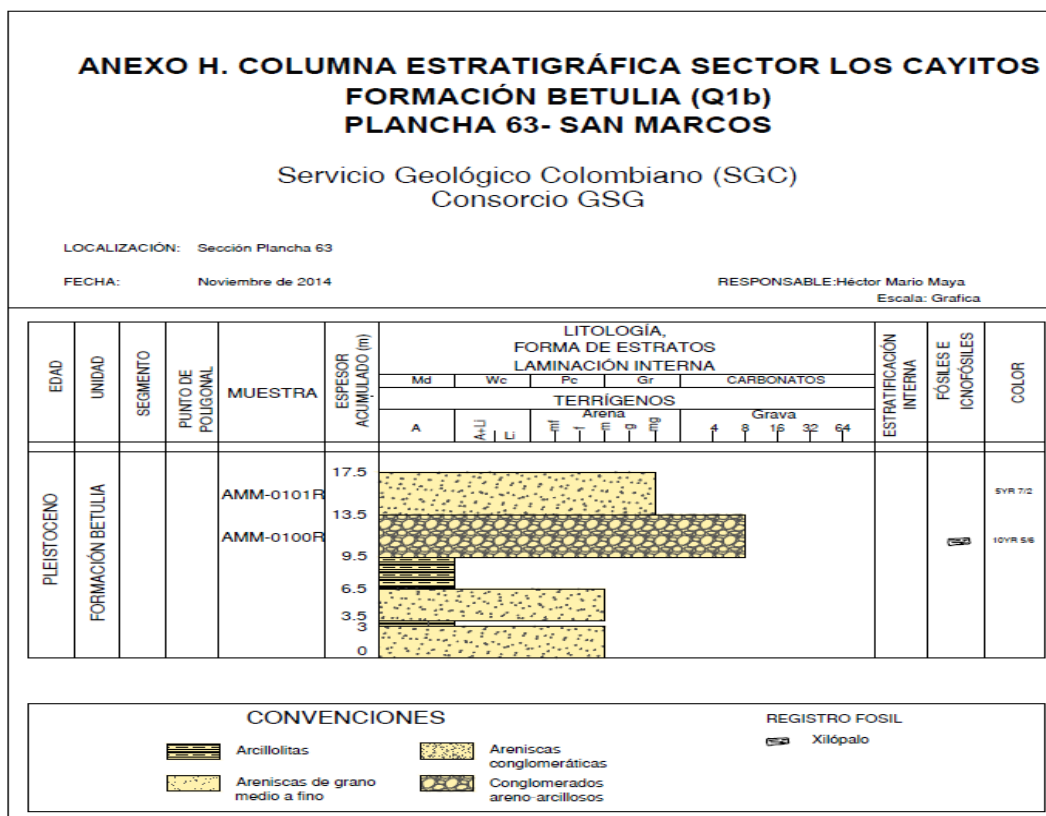
Tabla 10. *Estratigrafía local del área donde se enmarca el Proyecto*

ERA	PERÍODO	ÉPOCA	COLUMNA ESTRATIGRÁFICA		DESCRIPCIÓN LITOLOGICA
Cenozoico CZ	Cuaternario Q	Holoceno Q2	Depósito Aluvial	(Q2a)	Compuesto por lodos negros con alto porcentaje en arcilla, lodos arenosos de color amarillo moderado y arenas lodosas de grano muy fino.
		Pleistoceno Q1	Formación Betulia	(Q1b)	Depósitos compuestos por litoarenitas conglomeráticas, de color rojo, poco litificadas; lodolitas arenosas varicoloreados. Con estructuras lenticulares correspondientes a depósitos de canal, compuestos de conglomerados arenosos polimignitos, que varían de gránulos a guijos de forma subangulosa a redondeados con matriz arenosa pobremente seleccionada.

Nota. Elaboración propia, 2022

Las unidades aflorantes y que ocupa la totalidad del área corresponden a depósitos Cuaternarios. Dentro de los depósitos se encuentran morfogénicamente diferenciados tres (2) tipos de depósito cuaternarios, los cuales a su vez son pertenecientes dos épocas diferentes, una (1) unidades al Pleistoceno y la otra unidad al Holoceno.

Figura 9. columna estratigráfica de la Fm Betulia

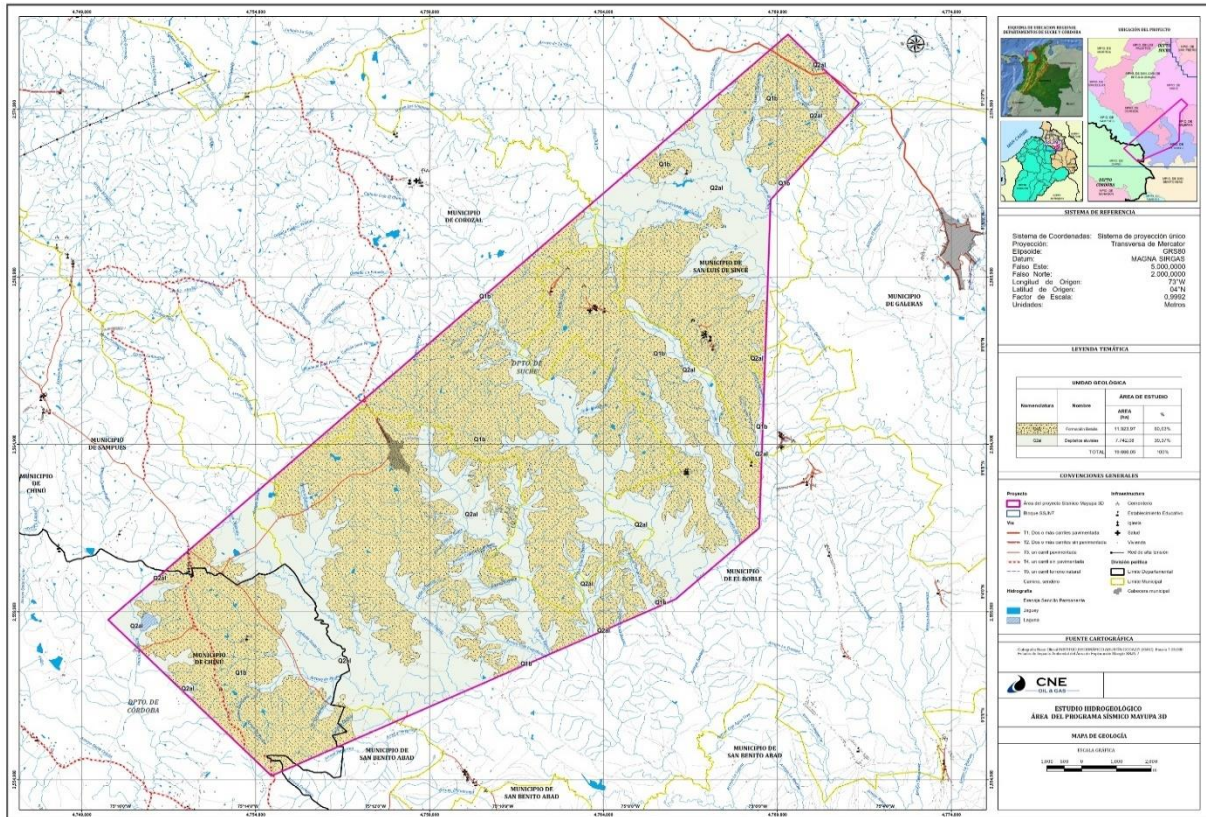


Nota. Anexo H Columna Estratigráfica Sector los Cayitos. Plancha 63 - San Marcos Servicio Geológico Colombiano SGC 2014.

Su litología agrupa los materiales que conforman la Formación Betulia correspondientes a depósitos compuestos por litoarenitas conglomeráticas, de color rojo, poco litificadas; lodolitas arenosas varicoloreadas. Con estructuras lenticulares correspondientes a depósitos de canal, compuestos de conglomerados arenosos polimignitos, que varían de gránulos a guijos de forma subangulosa a redondeados con matriz arenosa pobremente seleccionada y los depósitos aluviales.

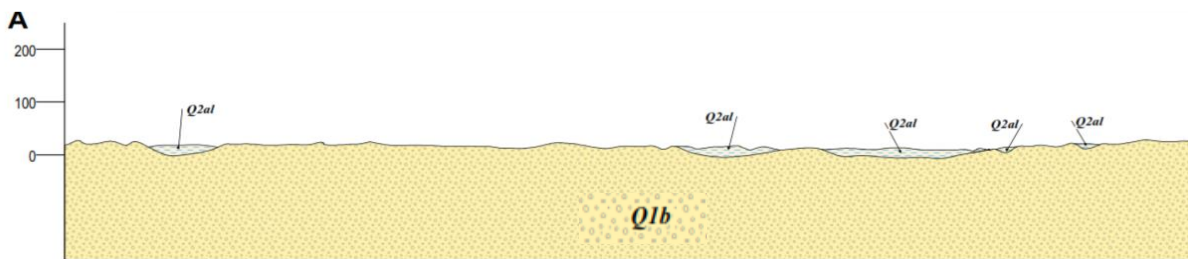
En la Figura 10 se presenta la distribución de las unidades geológicas a nivel local identificadas en el área del proyecto a escala 1:35.000; la definición de colores corresponde a los establecidos en la Tabla Cronoestratigráfica Internacional 2021. En la Figura 11. Sección geológica de la formación Betulia El perfil geológico.

Figura 10. Unidades geológicas del área de programa sísmico 3D



Nota. Elaboración Propia, 2022

Figura 11. Sección geológica de la formación Betulia



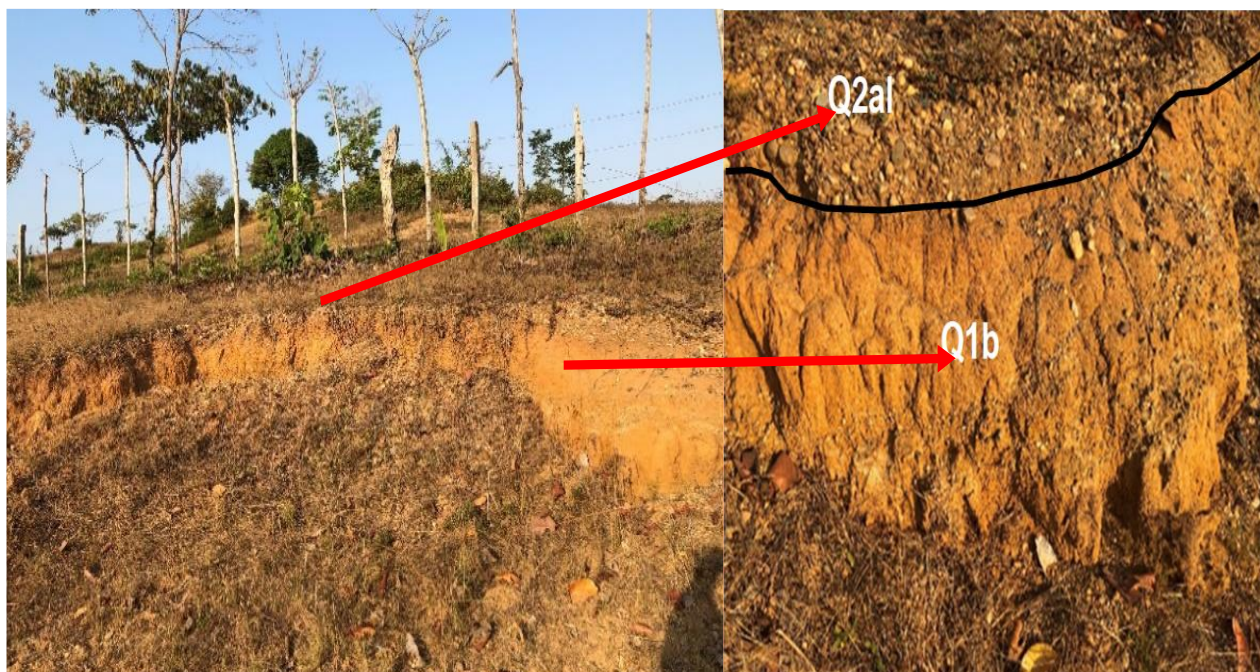
Nota. Adaptado de la Plancha 53 Magangué a Escala 1:100.000 del Servicio Geológico Colombiano (SGC),

3.1.2.1 Formación Betulia. (Q1b)

Se extiende desde las estribaciones más orientales de los Montes de María, en el Departamento de Sucre hasta las riberas de los ríos Magdalena y San Jorge; forma zonas bajas y planicies. Definida por Kassem (1967) en Clavijo y Becerra (2001) en un informe del cuadrángulo E-8 (planchas 44 y 52) como una unidad que se compone de una alternancia de “Arcillas arenáceas friables y limos, en parte estratificada con notables cambios de facies” del Grupo Sincelejo (Ochoa & SGC, 2017), así mismo se le asigna a la Formación Betulia edad del Pleistoceno (Clavijo, J. & Barrera, R. 2001).

La Formación Betulia, en el área del proyecto está muy mal expuesta por lo cual es muy difícil la caracterización litológica y el levantamiento de columnas estratigráficas, se encuentra cubierta parcialmente por depósitos Aluviales (Q2a1), la formación hacia la base, está constituida por una serie monótona de arcillas ligeramente arenosas de color amarillo mostaza, plásticas con algunos niveles delgados de gravas, que incluyen cantos de cuarzo, chert, fragmentos de caliche, grandes fragmentos de xilópalos, en una matriz areno-limosa rojiza, dispuestos en capas cuneiformes irregulares (Guzmán Ospitia et al., 2004).

Fotografía 3. Formación Betulia (Q1b)



Contacto de la Fm Betulia y el cuaternario. Municipio el Roble Coordenadas.

Fotografía 4. Afloramiento de la Fm Betulia



Se observa la exposición de arenas de grano fino a medio de color amarillo rojizo, de selección mala a moderada, con granos esféricos a subredondeados.

Fotografía 5. Meteorización Formación Betulia



Afloramiento Vía entrada al municipio El Roble, se muestra la superficie erosionada de la Fm Q1b de coloración rojiza

Geomorfológicamente la unidad de la formación Betulia presenta una topografía de relieve bajo conformado por montículos con crestas redondeadas y laderas cortas de baja pendiente.

Fotografía 6. *Disposición Morfológica*

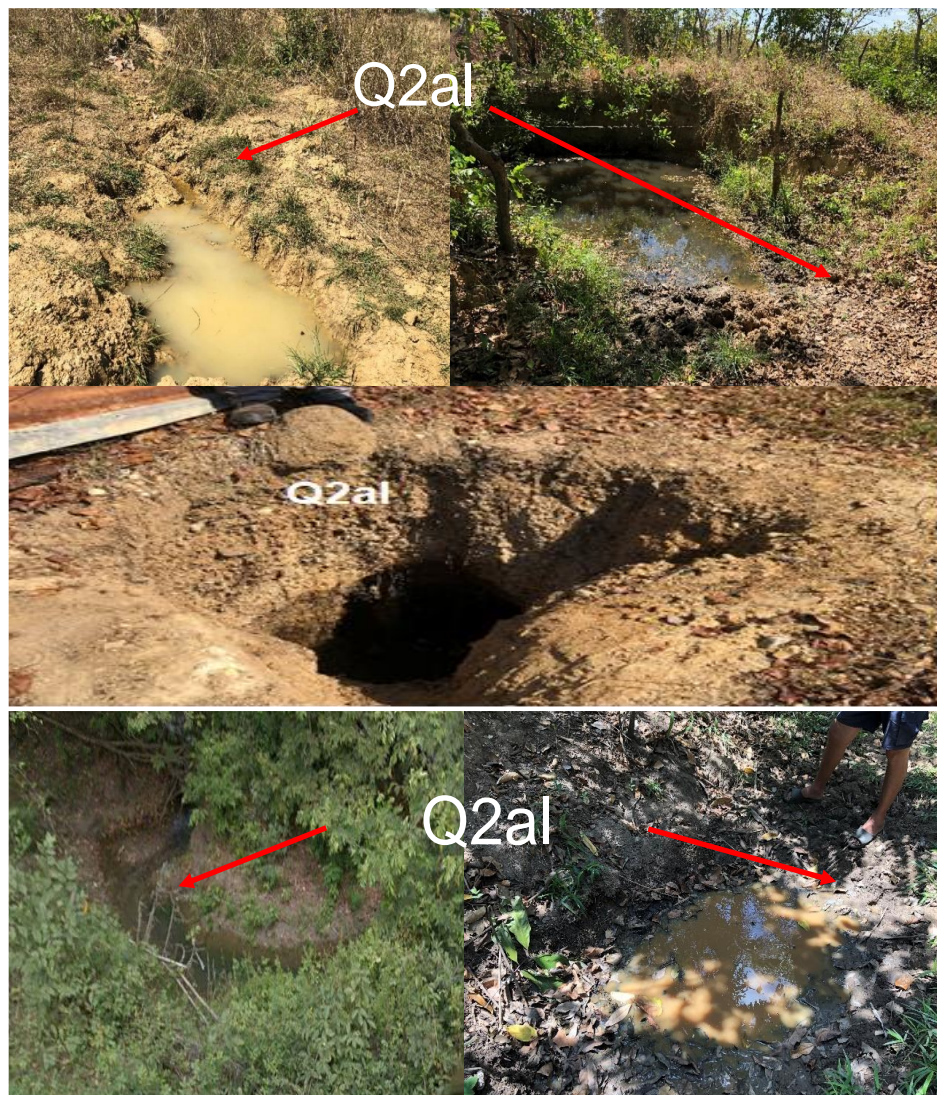


Geoforma de la formación Betulia sector Noreste del polígono

3.1.2.2 Depósitos Aluviales (Q2a1)

Compuesto por una serie de materiales de lodos negros, arcilla de color negro a marrón claro y lodos arenosos de color amarillo claro y arenas lodosas de grano muy fino. Al ser depósitos propios de la dinámica de los drenajes activos se les asigna una edad de Holoceno. Con un ambiente continental fluvial. Esta unidad no presenta afloramientos que permitan estimar su espesor. (Ochoa & SGC, 2017).

Fotografía 7. Cuaternario aluvial (Q2al)

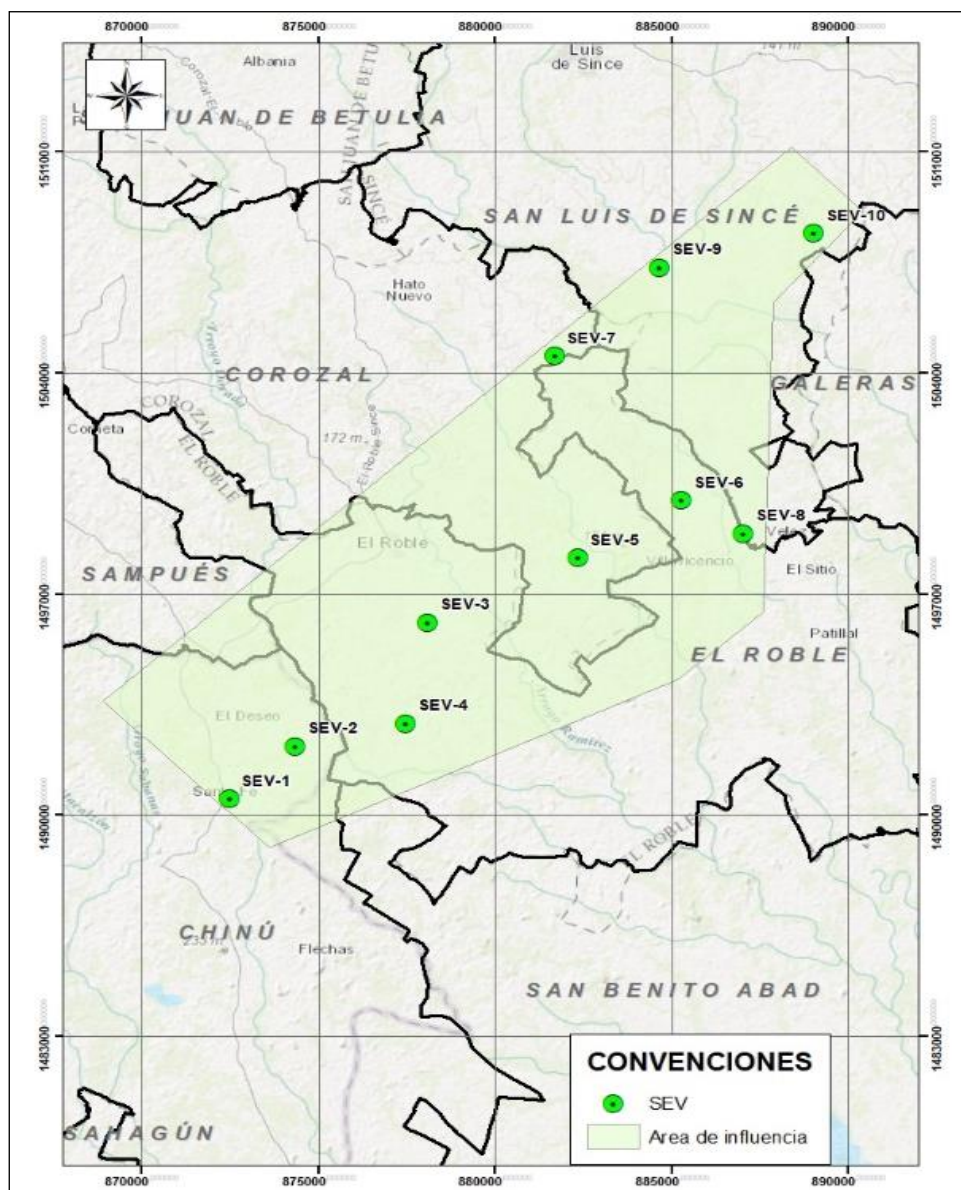


Exposición del cuaternario aluvial (Q2al) en varios sectores del área del proyecto

5.1.2 Sondeos Eléctricos Verticales

A continuación, se presenta la interpretación litológica integrada de cada uno de los SEV, realizados y su localización la Figura 12. En el Anexo 1 se relacionan las figuras de la interpretación para cada SEV.

Figura 12. Localización de los SEV

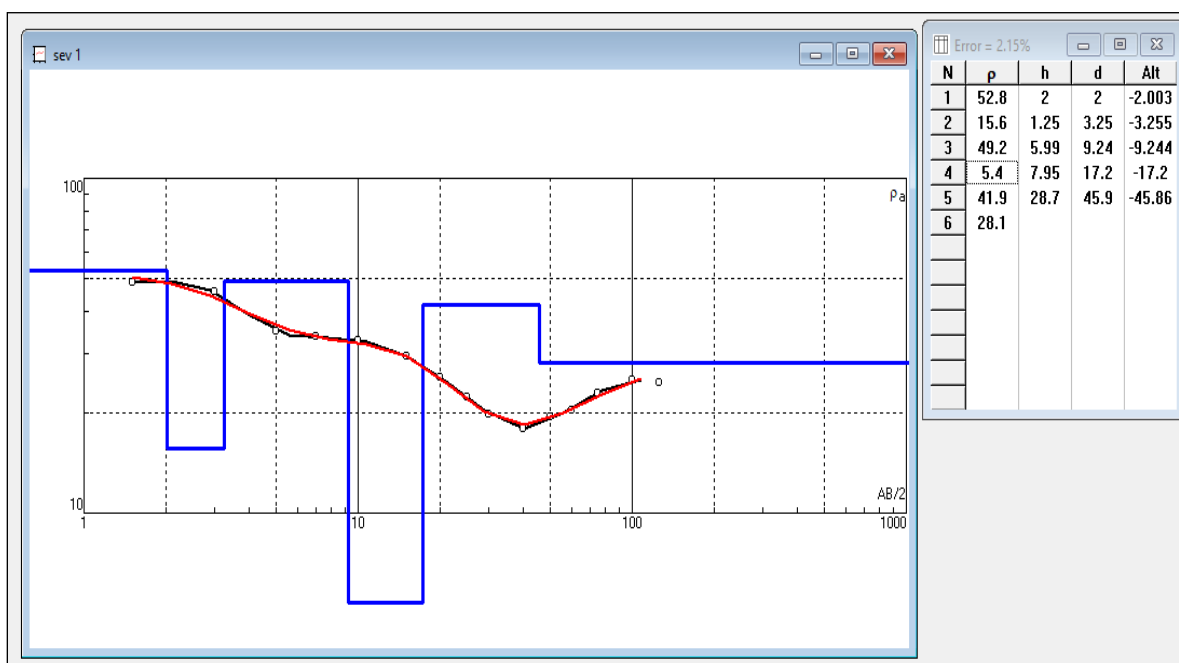


Nota. Elaboración propia, 2022

En el SEV - 1, se aprecia en la parte superior un nivel de gravas, arenas y limos, con un espesor de 2 metros y valores de resistividad de 52.8 Ohm-m; luego se presentan niveles de arcillas, limos y arenas, con un espesor de 1.25 metros y valores de resistividades de 15.6 Ohm-m; a partir de los 3.25 metros y hasta una profundidad de 9.25 metros, se aprecian niveles de gravas, arenas, limos y arcillas, con valores de resistividad de 49.2 Ohm-m; a continuación se

aprecia niveles de limos y arcillas, con espesor de 7.95 metros y valores de resistividad de 5.4 Ohm-m, luego se presenta una secuencia de gravas, arenas, limos y arcillas, saturadas con espesor de 28.70 metros y valores de resistividad de 41.9 Ohm-m, a partir de los 45.9 metros se aprecian gravas, arenas, limos y arcillas, saturadas que presentan valores de resistividad de 28.1 Ohm-m (Figura 13).

Figura 13. Representación gráfica del SEV-1



El **SEV - 2**, muestra en la parte superior un nivel de arcillas y limos, con espesor de 3.4 metros, con valores de resistividad de 9.09 Ohm-m; luego se presentan niveles de gravas, arenas, limos y arcillas, con espesor de 2.50 metros y valores de resistividades de 51.3 Ohm-m; infrayaciendo este nivel se encuentra una secuencia de arcillas y limos, con espesor de 4.55 metros y valores de resistividades de 2.85 Ohm-m; luego se presentan gravas, arenas, limos, saturados, con espesor de 6.35 metros y valores de resistividad de 40 Ohm-m; a continuación se presentan arenas, arcillas y limos, con espesor de 37.70 metros y valores de resistividad de 3.49 Ohm-m; un nivel inferior consta de gravas, arenas, limos y arcillas, con valores de resistividad de 135 Ohm-m. En el Anexo 1 se relacionan las figuras de los SEV.

En el SEV - 3, se observa una secuencia litoestratigráfica conformada en su parte superior por gravas, arenas, limos y arcillas, con espesor de 7-70 metros y valores de resistividad que van de 31.6 a 218 Ohm-m; luego se aprecia una secuencia de arenas, limos y arcillas, saturadas, con espesor de 9.95 metros y valores de resistividades de 7.93 Ohm-m; a partir de los 17.70 metros y hasta los 34.20 metros de profundidad se aprecia una secuencia de gravas, arenas, limos y arcillas, saturadas, con valores de resistividad de 292 Ohm-m, a continuación se presentan arenas, limos y arcillas, saturadas que presentan valores de resistividad de 3.82 Ohm-m.

En el SEV - 4, se observa una secuencia litoestratigráfica conformada en su parte superior por un perfil de suelo de carácter areno limoso, de color grisáceo con espesor de 0.75 metros y valores de resistividades de 34.1 Ohm-m; luego se aprecia una secuencia de arenas, limos y arcillas, con espesor de 0.35 metros y valores de resistividades de 5.45 Ohm-m; infrayaciendo este nivel se encuentra una alternancia de gravas, arenas, limos, que se caracteriza por un espesor de 12.10 metros y valores de resistividades de 55.8 Ohm-m, a continuación se presentan arenas, limos y arcillas, saturadas, con espesor de 9.70 metros y valores de resistividades de 5.96 Ohm-m; a partir de los 22.90 metros y hasta una profundidad de 62.40 metros, se aprecian niveles de gravas, arenas, limos, saturadas, con valores de resistividad de 121 Ohm-m, luego se aprecian arenas, limos y arcillas con valores de resistividades de 7.23 Ohm-m.

En el SEV - 5, se observa en su parte superior un nivel de gravas, arenas, limos, con espesor de 8.60 metros y valores de resistividades que van de 29 a 66 Ohm-m; luego se aprecia una secuencia de arenas, limos y arcillas, saturadas, con espesor de 9.40 metros y valores de resistividades de 4.78 Ohm-m; a partir de los 18 metros y hasta los 25 metros de profundidad se presenta una secuencia de gravas, arenas, limos, saturados, con valores de resistividad de 457 Ohm-m, a continuación se aprecia arenas, saturadas, con espesor de 18 metros y valores de

resistividad de 15.3 Ohm-m, un nivel inferior consta de arenas, limos y arcillas, fracturadas, saturadas, que presentan valores de resistividad de 2.26 Ohm-m.

En el SEV - 6, se observa una secuencia litoestratigráfica conformada por gravas, arenas, limos, con espesor de 1.75 metros y valores de resistividades de 29.21 Ohm-m; luego se aprecia una secuencia de arenas, limos y arcillas, con espesor de 2.15 metros y valores de resistividades de 11.93 Ohm-m; infrayaciendo este nivel se encuentra una secuencia de gravas, arenas, limos, saturados, que se caracteriza por un espesor de 2.75 metros y valores de resistividades de 190 Ohm-m, a continuación se presentan arenas, limos y arcillas, saturadas, con espesor de 19.30 metros y valores de resistividades de 21.73 Ohm-m; a partir de los 25.90 metros y hasta una profundidad de 68.40 metros, se aprecian niveles de gravas, arenas, limos, saturados, con valores de resistividad de 41.49 Ohm-m, luego se aprecian arenas, limos y arcillas, saturadas, con valores de resistividad de 1.38 Ohm-m.

En el SEV - 7, se observa una secuencia conformada por gravas, arenas, limos y arcillas, con espesor de 14.80 metros y valores de resistividades que van de 31.7 a 279 Ohm-m; luego se aprecia una secuencia de arenas, limos y arcillas, saturadas, con espesor de 13.10 metros y valores de resistividades de 7.81 Ohm-m; a partir de los 28 metros y hasta los 56.90 metros de profundidad se aprecia una secuencia de gravas, arenas, limos, arcillas, saturadas, con valores de resistividad de 104 Ohm-m, a partir de los 56.90 metros se aprecian arenas, limos, arcillas, saturadas que presentan valores de resistividad de 2.96 Ohm-m.

En el SEV - 8, se observa una secuencia litoestratigráfica conformada en su parte superior por gravas, arenas, limos y arcillas, con espesor de 9.15 metros y valores de resistividades de van de 47.4 a 278 Ohm-m; luego se aprecia un nivel de arenas, limos y arcillas, saturadas, con espesor de 9.80 metros y valores de resistividad de 9.16 Ohm-m; infrayaciendo este nivel se encuentra una secuencia de gravas, arenas, limos y arcillas, saturadas, que se caracteriza por

un espesor de 24.90 metros y valores de resistividad de 68.9 Ohm-m, luego se aprecian arenas, limos y arcillas, saturadas, con valores de resistividades de 0.23 Ohm-m.

En el SEV - 9, se observa una secuencia litoestratigráfica conformada en su parte superior por un nivel de gravas, arenas, limos y arcillas, con espesor de 2.25 metros y valores de resistividades que van de 44.7 a 164 Ohm-m; luego se aprecia un nivel de gravas, arenas, limos, saturadas, con espesor de 23.45 metros y valores de resistividades de 25.4 a 35 Ohm-m; a partir de los 25.70 metros y hasta los 53.20 metros de profundidad se aprecia arenas, limos y arcillas, saturadas, con valores de resistividad de 7.07 Ohm-m, a partir de los 53.20 metros se aprecian gravas, arenas, limos, saturadas que presentan valores de resistividad de 99.3 Ohm-m.

En el SEV - 10, se observa una secuencia conformada por gravas, cantos, arenas, limos, arcillas, con espesor de 1.10 metros y valores de resistividades de 17.26 a 165.5 Ohm-m; luego se aprecia gravas, arenas, limos y arcillas, saturadas, con espesor de 31.20 metros y valores de resistividades de 31.94 a 35 Ohm-m; infrayaciendo este nivel se encuentra una secuencia de arenas, limos y arcillas, saturadas, con espesor de 28.50 metros y valores de resistividades de 7.55 Ohm-m, luego se aprecian gravas, arenas, limos, saturados, con valores de resistividades de 774.6 Ohm-m. Integrando los sondeos eléctricos verticales - SEV realizados, se obtiene el siguiente modelo de capas.

Tabla 11. Interpretación litológica de los SEV

Zona de resistividad	Resistividad (Ohm/m)	Espesor promedio (m)	Prof. techo (m)	Correlación Hidrogeológica	Unidad Geológica
Z1	9 - 52	1.1	Superficie	Suelo limo-areno-arcilloso	Suelo
Z2	15 - 60	5	1 - 5	Arenas, gravas, arcillas	Depósito aluvial o niveles litológicos de la Formación Betulia
Z3	35 - 50	8	5 - 15	Gravas, limos arenas, arcillas	Depósito aluvial o niveles litológicos de la Formación Betulia

Zona de resistividad	Resistividad (Ohm/m)	Espesor promedio (m)	Prof. techo (m)	Correlación Hidrogeológica	Unidad Geológica
Z4	10-45	25	15-40	Arenas, gravas, arcillas	Depósito aluvial o niveles litológicos de la Formación Betulia
Z5	70-125	40	40 - 80	Gravas, limos arenas, arcillas	Depósito aluvial o niveles litológicos de la Formación Betulia
Z6	44-1000	ND	>80	Arenas, gravas, arcillas	Depósito aluvial o niveles litológicos de la Formación Betulia

Nota. Elaboración propia 2022

5.1.3 Tomografías

El objetivo de la Tomografía Eléctrica es detectar y localizar estructuras geológicas, basado en el contraste de resistividad en el subsuelo.

La ejecución de tomografías eléctricas se proyectó en el área del programa sísmico, donde se realizaron 30 líneas de 240 metros, con 24 electrodos, localizados con un espaciamiento de 10 metros cada uno. En la Tabla 12 se muestra la relación entre los puntos de referencia en cada tomografía, con sus coordenadas y la localización de las tomografías en la Figura 14.

Tabla 12. *Coordenadas de las líneas de tomografías ejecutadas en el área de programa sísmico 3D*

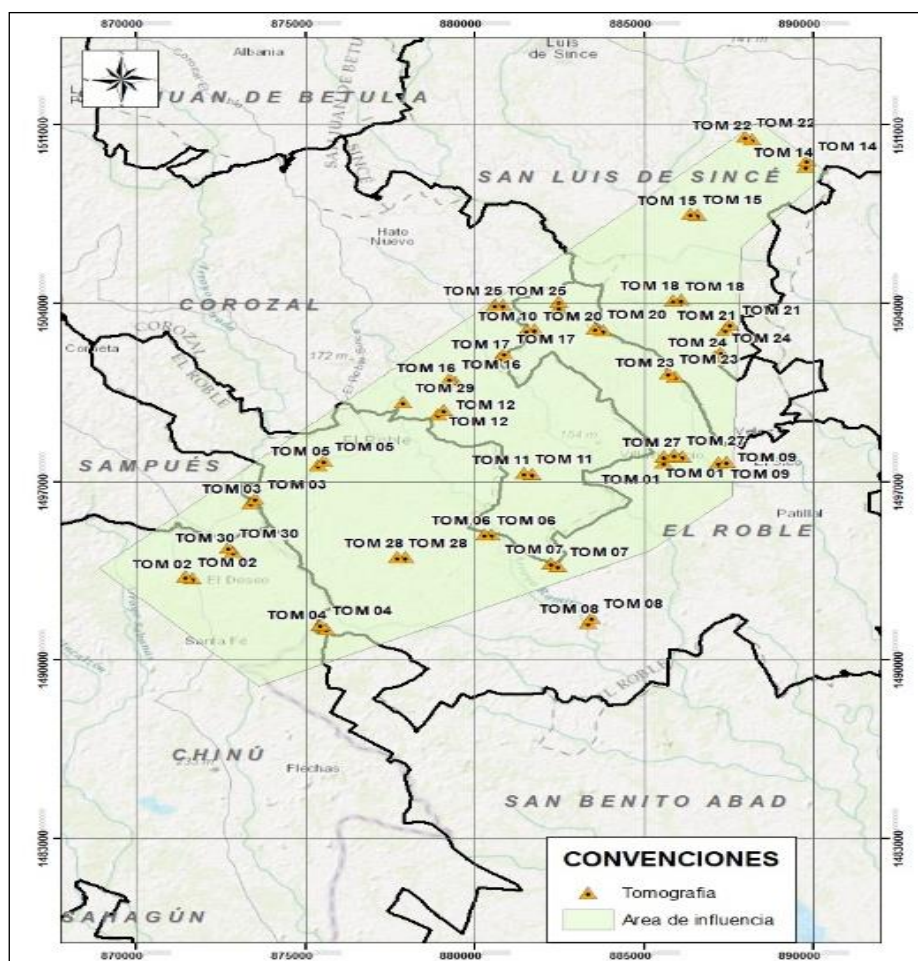
ID_ LÍNEA	PUNTOS	COORDENADAS ORIGEN MAGNA SIRGAS		VEREDA	MUNICIPIO
		NORTE	ESTE		
TOM 01	Inicio	1.497.749	885.606	El Sitio	El Roble
	Final	1.497.988	885.614		
TOM 02	Inicio	1.493.181	871.681	El Deseo	Chinú
	Final	1.493.282	871.464		
TOM 03	Inicio	1.496.139	873.403	Ceja del Mango	Sampués
	Final	1.496.342	873.530		
TOM 04	Inicio	1.491.212	875.626	El Roble	El Roble
	Final	1.491.381	875.456		
TOM 05	Inicio	1.497.635	875.386	El Roble	El Roble
	Final	1.497.804	875.555		
TOM 06	Inicio	1.494.913	880.531	Hato Nuevo	Corozal

ID_ LÍNEA	PUNTOS	COORDENADAS ORIGEN MAGNA SIRGAS		VEREDA	MUNICIPIO
		NORTE	ESTE		
	Final	1.494.933	880.305		
TOM 07	Inicio	1.493.779	882.252	Hato Nuevo	Corozal
	Final	1.493.696	882.477		
TOM 08	Inicio	1.491.459	883.353	El sitio	El Roble
	Final	1.491.662	883.480		
TOM 09	Inicio	1.497.725	887.215	El sitio	El Roble
	Final	1.497.766	887.451		
TOM 10	Inicio	1.502.979	881.770	San Francisco	El Roble
	Final	1.502.937	881.533		
TOM 11	Inicio	1.497.282	881.714	Hato Nuevo	Corozal
	Final	1.497.323	881.477		
TOM 12	Inicio	1.499.627	878.923	Hato Nuevo	Corozal
	Final	1.499.787	879.101		
TOM 13	Inicio	1.499.722	977.135	Hato Nuevo	Corozal
	Final	1.499.731	977.374		
TOM 14	Inicio	1.509.366	889.791	Valencia	San Luis de Sincé
	Final	1.509.603	889.824		
TOM 15	Inicio	1.507.465	886.597	Valencia	San Luis de Sincé
	Final	1.507.498	886.397		
TOM 16	Inicio	1.500.886	879.454	Hato Nuevo	Corozal
	Final	1.501.046	879.275		
TOM 17	Inicio	1.501.838	880.750	Hato Nuevo	Corozal
	Final	1.502.034	880.887		
TOM 18	Inicio	1.504.124	886.115	Valencia	San Luis de Sincé
	Final	1.504.115	885.875		
TOM 19	Inicio	1.503.814	882.523	San Francisco	El Roble
	Final	1.504.053	882.514		
TOM 20	Inicio	1.502.934	883.824	Valencia	San Luis de Sincé
	Final	1.502.996	883.592		
TOM 21	Inicio	1.502.968	887.426	Valencia	San Luis de Sincé
	Final	1.503.164	887.563		
TOM 22	Inicio	1.510.422	888.203	Valencia	San Luis de Sincé
	Final	1.510.542	887.995		
TOM 23	Inicio	1.501.123	885.943	Valencia	San Luis de Sincé
	Final	1.501.243	885.735		
TOM 24	Inicio	1.501.903	887.115	Valencia	San Luis de Sincé
	Final	1.502.081	887.275		
TOM 25	Inicio	1.503.935	880.864	Hato Nuevo	Corozal
	Final	1.503.926	880.624		
TOM 26	Inicio	1.498.547	860.443	Hato Nuevo	Corozal
	Final	1.498.786	860.452		
TOM 27	Inicio	1.497.987	886.163	El Sitio	El Roble
	Final	1.498.036	885.928		
TOM 28	Inicio	1.494.035	877.953	Las Tablitas	El Roble
	Final	1.494.036	877.715		
TOM 29	Inicio	1.500.100	877.897	Hato Nuevo	Corozal

ID_LÍNEA	PUNTOS	COORDENADAS ORIGEN MAGNA SIRGAS		VEREDA	MUNICIPIO
		NORTE	ESTE		
	Final	1.550.301	878.027		
TOM 30	Inicio	1.494.214	872.888	El Deseo	Chinú
	Final	1.494.397	872.733		

Nota. Elaboración Propia, 2022

Figura 14. Localización de las tomografías ejecutadas en el programa sísmico 3D



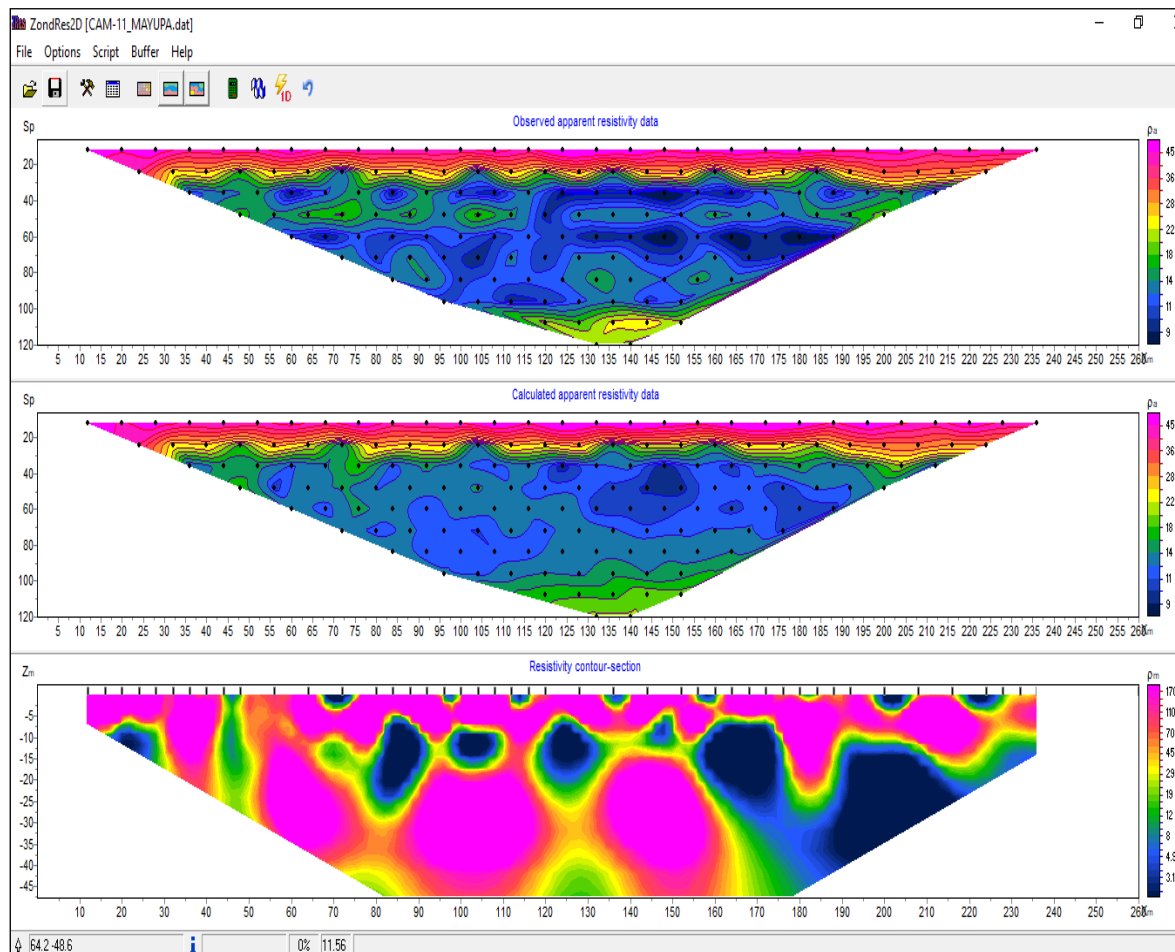
Nota. Elaboración propia 2022

5.1.2.1 Procesamiento de datos de las Tomografías Eléctricas

Para el procesamiento e interpretación de los perfiles, se utiliza el programa EarthImager 2D de la compañía AGI con sede en Austin, Texas, EE. UU., integrando la topografía de cada línea

para llegar a modelos cuantificados en 2D, tanto en profundidad como en sentido lateral de la resistividad. La visualización de los datos se observa mediante una imagen de pseudosecciones tal como se observa en la Figura 15.

Figura 15. Imagen de la Tomografía TOM 11



Nota. Imagen Earthimager 2D, 2022.

5.1.2.3 Interpretación de Tomografías

Se realiza el análisis de 30 líneas de tomografías con una longitud de 240 metros, ejecutadas en el área del programa sísmico 3D. A continuación, se describen algunos perfiles ejecutados por unidad geológica; los demás se presentan en el Anexo 1 de este documento.

Tomografía TOM 01

La línea de Tomografía TOM-01, se realizó en la vereda El Sitio, municipio El Roble, departamento de Sucre, con una longitud de 240 metros alcanzando una profundidad de 45 metros, con orientación N25°W. Para la captura de datos se empleó el arreglo Wenner. La Tomografía se ejecutó sobre una secuencia estratigráfica de la Formación Betulia (Q1b), localizado en el área del programa sísmico.

En el perfil de la tomografía TOM 01, se observan 3 capas geoelectricas definidas por el contraste de los valores de resistividad registrados en el perfil.

La capa superior corresponde a una alternancia de arenas, limos y arcillas con un espesor que alcanza los 20 metros y con valores de resistividad de 1 a 23 Ohm-m, que corresponde a los colores azul, verde y amarillo, donde se aprecia que los niveles litológicos presentan acunamientos laterales.

Infrayaciendo la capa superior se aprecia una secuencia de gravas, arenas de grano fino a medio y limos, saturados, caracterizados por el color amarillo, rojizo y magenta con un espesor de 20 a 25 metros y valores de resistividad de 15 a 90 Ohm-m, estos niveles litológicos presentan interdigitaciones lateralmente, el espesor de este nivel varia lateralmente corresponde a niveles litológicos de la Formación Betulia.

En la parte inferior del perfil geoelectrico se aprecia capas de arcillas, limos y arenas, saturadas, con valores de resistividad bajos que varía de 1 a 18 Ohm-m, corresponde a los colores verde y azul.

- **Tomografía TOM 02**

La línea de Tomografía TOM-02, se realizó en la vereda El Deseo, municipio de Chinú, departamento de Córdoba, con una longitud de 240 metros alcanzando una profundidad de 45

metros, con orientación N30°W. Para la captura de datos se empleó el arreglo Wenner. La Tomografía se ejecutó sobre una secuencia estratigráfica de la Formación Betulia (Q1b), localizado en el área del programa sísmico 3D.

En el perfil de la TOM 02, se observan 3 capas geoeléctricas definidas por el contraste de los valores de resistividad registrados en el perfil.

La capa superior corresponde a una alternancia de arenas, limos y arcillas con un espesor que alcanza los 10 metros y con valores de resistividad de 6 a 35 Ohm-m, que corresponde a los colores azul, verde y amarillo, donde se aprecia que los niveles litológicos presentan interdigitaciones o acuñaientos lateralmente.

Infrayaciendo la capa superior se aprecia una secuencia de gravas, arenas de grano fino a medio y limos, saturados, caracterizados por el color amarillo, rojizo y magenta con un espesor de 20 a 25 metros y valores de resistividad de 15 a 90 Ohm-m, estos niveles litológicos presentan interdigitaciones lateralmente, el espesor de este nivel varía lateralmente. Estos niveles litológicos corresponden a la Formación Betulia.

En la parte inferior del perfil geoeléctrico se aprecia capas de arcillas, limos y arenas, saturadas, con valores de resistividad bajos que varía de 1 a 15 Ohm-m, corresponde a los colores verde y azul.

- **Tomografía TOM 03**

La línea de Tomografía TOM-03, se realizó en la vereda Ceja del Mango, municipio de Sampedo, Sucre, con longitud de 240 metros, 45 metros de profundidad, con orientación de N25°E.

En el perfil de la TOM 03, se observan 3 capas geoeléctricas.

- La capa superior presenta una alternancia de gravas y arenas, con un espesor de 7 metros y valores de resistividad de 45 a 90 Ohm-m, que corresponde a los niveles de color rojizo y magenta, donde se aprecia que los niveles litológicos presentan interdigitaciones o acuñamientos de forma lateral.
- La segunda capa que infrayace la capa superior corresponde a niveles de arcillas, limos y arenas de grano fino a medio, caracterizados por el color azul, verde, amarillo con un espesor de 7 a 20 metros y valores de resistividad de 1.6 a 15 Ohm-m, estos niveles litológicos presentan acuñamientos laterales.
- En la capa inferior del perfil aprecia niveles de gravas, arenas de grano fino a medio y limos, caracterizados por el color amarillo, rojizo y magenta con un espesor que alcanza 30 metros y valores de resistividad de 20 a 90 Ohm-m. Estos niveles litológicos corresponden a la Formación Betulia.

- **Tomografía TOM 09**

La línea de Tomografía TOM-09, se ejecutó en la vereda El Sitio, municipio El Roble, Sucre, con una longitud de 240 metros, profundidad de 45 metros y una orientación de N78°E.

En el perfil de la TOM 09, se observan tres capas geoelectricas definidas por el contraste de sus valores de resistividad que se encuentran en un rango moderado a bajo.

La capa I de color azul oscuro a claro y verde presenta valores de resistividad bajos (0.2 - 10 Ohm-m) asociados a materiales finos depositados en ambientes de baja energía, constituidos por arcillas, limos y arenas, se acuñan lateralmente con la capa geoelectrica II. Tiene un espesor variable que alcanza 15 metros.

Infrayaciendo la capa I se registra la capa II de color amarillo, rojizo y magenta, interpretada como una secuencia de gravas, arenas de grano fino a medio y limos, asociadas a rocas de la Formación Betulia (Q1b) que afloran en el sector SW del área del programa sísmico. La capa II presenta valores de resistividad que varían entre 30 a 90 Ohm-m y una profundidad de 30 metros, el espesor es variable en su extensión, se muestran cambios de espesor lateralmente.

La capa III, inferior corresponde a niveles de arcillas, limos y arenas de grano fino a medio, caracterizados por el color amarillo con un espesor que alcanza 10 metros y valores de resistividad de 10 a 25 Ohm-m, estos niveles litológicos presentan acuñamientos laterales.

- **Tomografía TOM 25**

La línea de Tomografía TOM-25, se realizó en la vereda Hato Nuevo, municipio de Corozal, Sucre, con una longitud de 240 metros, 45 metros de profundidad y una orientación de N82°W.

En el perfil TOM 25, se observan cuatro capas geoelectricas definidas por el contraste de sus valores de resistividad.

Capa I de color amarillo, rojizo y magenta, interpretada como una secuencia de gravas, arenas de grano fino a medio y limos, asociadas a rocas de la Formación Betulia (Q2b) presenta valores de resistividad de 30 a 90 Ohm-m, la capa es continua y sufre acuñamiento lateralmente con la capa geoelectrica II.

Debajo de la capa I se muestra la capa II de color azul oscuro, verde, interpretadas como una secuencia de materiales finos depositados en ambientes de baja energía, constituidos por arcillas, limos y arenas. La capa II presenta valores de resistividad que varían entre 0.2 a 15 Ohm-m y un espesor variable lateralmente que alcanza 10 metros.

La capa III de color amarillo, rojizo y magenta, interpretada como una secuencia de gravas, arenas de grano fino a medio y limos, saturados, registra valores de resistividad de 30 a 90 Ohm-m, se acuñan lateralmente con la capa supra e infrayacente.

La capa IV de color azul oscuro, verde, interpretadas como una secuencia de materiales finos depositados en ambientes de baja energía, constituidos por arcillas, limos y arenas, saturados. La capa II presenta valores de resistividad que varían entre 0.2 a 20 Ohm-m y un espesor variable lateralmente que alcanza 20 metros.

- **Tomografía TOM 28**

La línea de Tomografía TOM-28, se realizó en la vereda Las Tablitas, municipio El Roble, Sucre, con una longitud de 240 metros alcanzando una profundidad de 45 metros y una orientación de N70°W. En el perfil TOM 28, se observan cuatro capas geoelectricas definidas por el contraste de sus valores de resistividad.

La capa I de color amarillo, rojizo y magenta, interpretada como una secuencia de gravas, arenas de grano fino a medio y limos, asociadas a rocas de la Formación Betulia (Q2b) presenta valores de resistividad de 30 a 90 Ohm-m, la capa presenta interdigitaciones y acuñamiento lateralmente.

Debajo de la capa I se muestra la capa II de color azul oscuro, verde, interpretadas como una secuencia de materiales finos depositados en ambientes de baja energía, constituidos por arcillas, limos y arenas. La capa II presenta valores de resistividad que varían entre 0.2 a 15 Ohm-m y un espesor variable lateralmente que alcanza 8 metros.

La capa III de color amarillo, rojizo y magenta, corresponde a una secuencia de gravas, arenas de grano fino a medio y limos, saturados, registra valores de resistividad de 30 a 90 Ohm-m, se acuñan lateralmente con la capa supra e infrayacente.

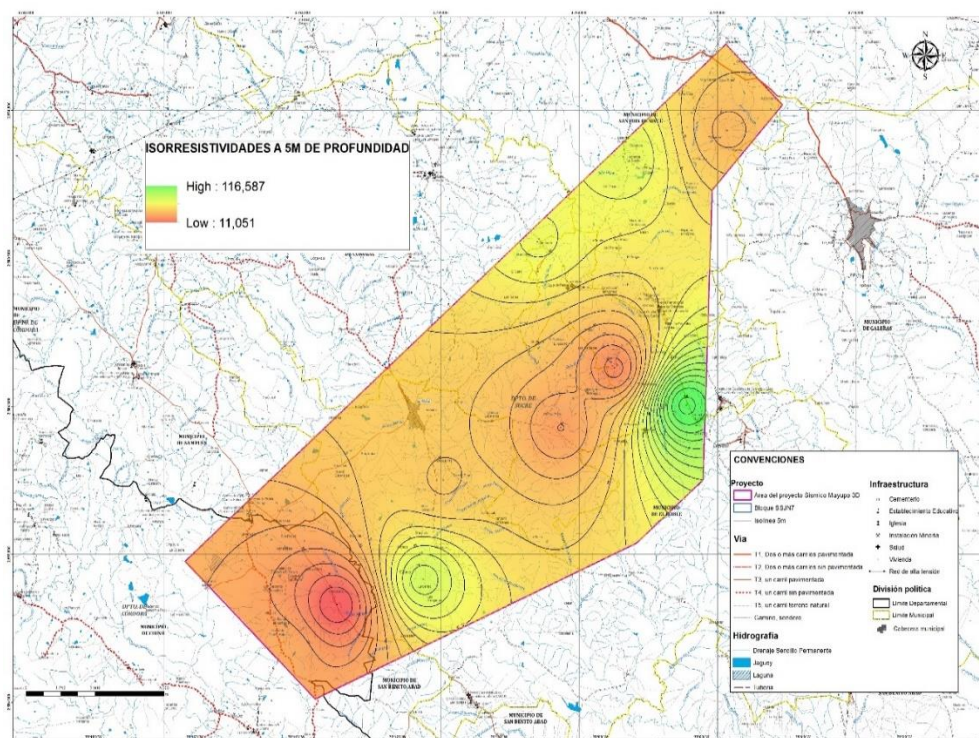
La capa IV de color azul oscuro, verde, interpretadas como una secuencia de materiales finos depositados en ambientes de baja energía, constituidos por arcillas, limos y arenas, saturados. La capa II presenta valores de resistividad que varían entre 0.2 a 20 Ohm-m y un espesor variable lateralmente que alcanza 12 metros.

5.1.2.4 Mapa de contornos Isoresistividad de 5 metros

En la Figura 16, se observa que hacia el sector suroeste donde se localizan las veredas Santa Fe, Jarabas y El Deseo (municipio de Chinú) del programa sísmico, se registran resistividades bajas a moderadas con valores del orden de 15 a 40 Ohm-m que se asocian con materiales finos, constituidos por arcillas, limos y arenas. Esta litología se representa con las tonalidades rojizo a amarillento.

Hacia la parte norte y oriental del área del programa sísmico los valores de resistividades aumentan considerablemente, se muestra que la litología cambia, mostrando una textura más arenosa que se evidencia en los valores de resistividad moderados a altos (30 a 115 Ohm-m), en el sector de las veredas Cayo de Palma, Villavicencio, Vélez, Valencia y El Sitio, se registran los mayores valores de resistividades (70 a 115 Ohm-m).

Figura 16. Mapa de Isoresistividad a 5 metros de Profundidad



Nota. Elaboración Propia, 2022

5.1.2.5 Mapa Isoresistividad de 10 metros

En el mapa de contornos de 10 metros de profundidad, se observan valores de resistividad entre 20 a 50 Ohm-m, asociados a materiales granulares y finos correspondientes a gravas, arenas, limos y arcillas, saturados, que cubren gran parte de la zona del programa sísmico. Los valores más bajos de resistividades se registran en la parte suroeste, donde se encuentran las veredas Santa Fe, Jarabas y El Deseo (municipio de Chinú).

En La zona noreste, sector de las veredas Cayo de Palma, Villavicencio, Vélez, Valencia y El Sitio, se registran incremento de las resistividades, con valores que van de los 50 a 100 Ohm-m, asociadas con materiales más gruesos como gravas, cantos, arenas de grano fino a medio. Estas resistividades están representadas con color amarillo a verde.

5.1.2.6 Mapa de Isoresistividad de 20 metros

A una profundidad de 20 metros, el rango de resistividades se mantiene entre 20 y 80 Ohm-m tanto en el sector norte como en el sur, estos valores están representados como franjas de color amarillo, rojizo y verde, que se asocia litológicamente con gravas, arenas y limos. Este material se mezcla gradualmente con arcillas y limos. Los incrementos puntuales en la resistividad hasta alcanzar los 80 Ohm-m, en las veredas Cayo de Palma, Villavicencio, Vélez, Valencia y El Sitio, se interpretan como cantos, gravas y arenas Anexo 1.

5.1.2.7 Mapa de Isoresistividad de 40 metros

En la Anexo 1 se relaciona el mapa de isoresistividad de 40 m, se observa un rango de resistividad que varía de los 10 - 20 Ohm-m correspondiente a materiales arenosos, para el área del programa sísmico 3D.

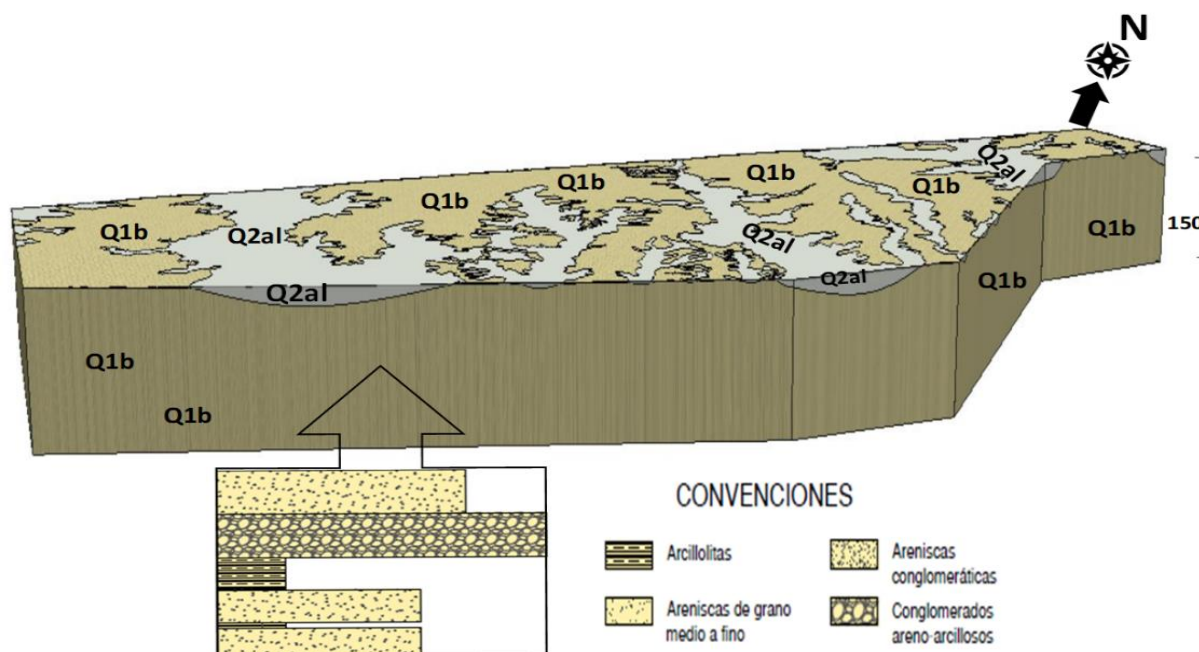
5.1.4 Caracterización Geológica.

Geológicamente el proyecto se localiza en la margen occidental de la parte inferior de la cuenca del Valle Inferior del Río Magdalena (VIM). En este sector afloran unidades del Neógeno representadas por los conglomerados, arenas y lodos de la Formación Betulia y por depósitos Cuaternarios asociados en su mayoría a la dinámica del río Magdalena y el afluente el río San Jorge. Estructuralmente la zona no presenta deformación, no obstante, no se descarta la existencia de fallas ciegas a profundidad. Los lineamientos que se observan son de los drenajes, pero sin que estos tengan alguna relevancia regional.

Para el modelo de la caracterización geológica se partió del reconocimiento de campo y la prospección geofísica mediante geoelectrica (SEV y Tomografías) para determinar las características litológicas de las unidades geológicas presentes, actividades que se realizaron antes del desarrollo de la prospección sísmica 3D con la cual se obtienen imágenes tridimensionales de las rocas porosas que almacenan hidrocarburos en el caso del proyecto gas, mediante la detención de ondas sísmicas, estas se propagan a través del subsuelo y se detectan en superficie mediante sensores (geófonos).

Prospección que en superficie se evidencia que no desencadena riesgos ni amenazas físicas o naturales en el medio ambiente, dado que las unidades intervenidas como es La Formación Betulia presentan un interés económico ya que de esta se explotan materiales de construcción además de tener importancia como reservorio de aguas subterráneas. Sin embargo, es importante notar que la región a nivel local no presenta actividad tectónica o estructural que pueda incidir o interactuar con la prospección sísmica. Como resultado se obtuvo el modelo de la caracterización geológica Figura 17. donde se determinaron las unidades litoestratigráficas.

Figura 17. Modelo Geológico conceptual



Nota. Elaboración Propia, 2022

5.2 Caracterización Hidrológica

En total se registraron 81 puntos de agua subterránea. La relación de los puntos inventariados se presenta en la Tabla 13 en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** su ubicación.

Tabla 13. Inventario de los puntos de agua subterránea.

No.	Id	Tipo	Mun / Vereda	Finca	Coordenadas Magna Sirgas		Diámetro	Prof. (m)
					Norte	Este		
1	PRE AL-01	Aljibe	Corozal	Villa María	1,497,684	882,520	1 m	5.5
2	PRE AL-02	Aljibe	Corozal	La 11	1,497,774	882,593	1 m	3.5
3	PRE AL-03	Aljibe	Corozal, Vereda Tambó	Santa Rita	1,497,573	883,786		3
4	PRE AL-04	Aljibe	Corozal, Vereda San Antonio del Gallinazo	La Mora	1,497,611	882,857	1 m	3
5	PRE AL-05	Aljibe	El Roble	El Milagro	1,498,947	878,781	1.1 m	7
6	PRE AL-06	Aljibe	Sampués, vereda La Ceja del Mango	La Envidia	1,495,385	872,406	1 m	12

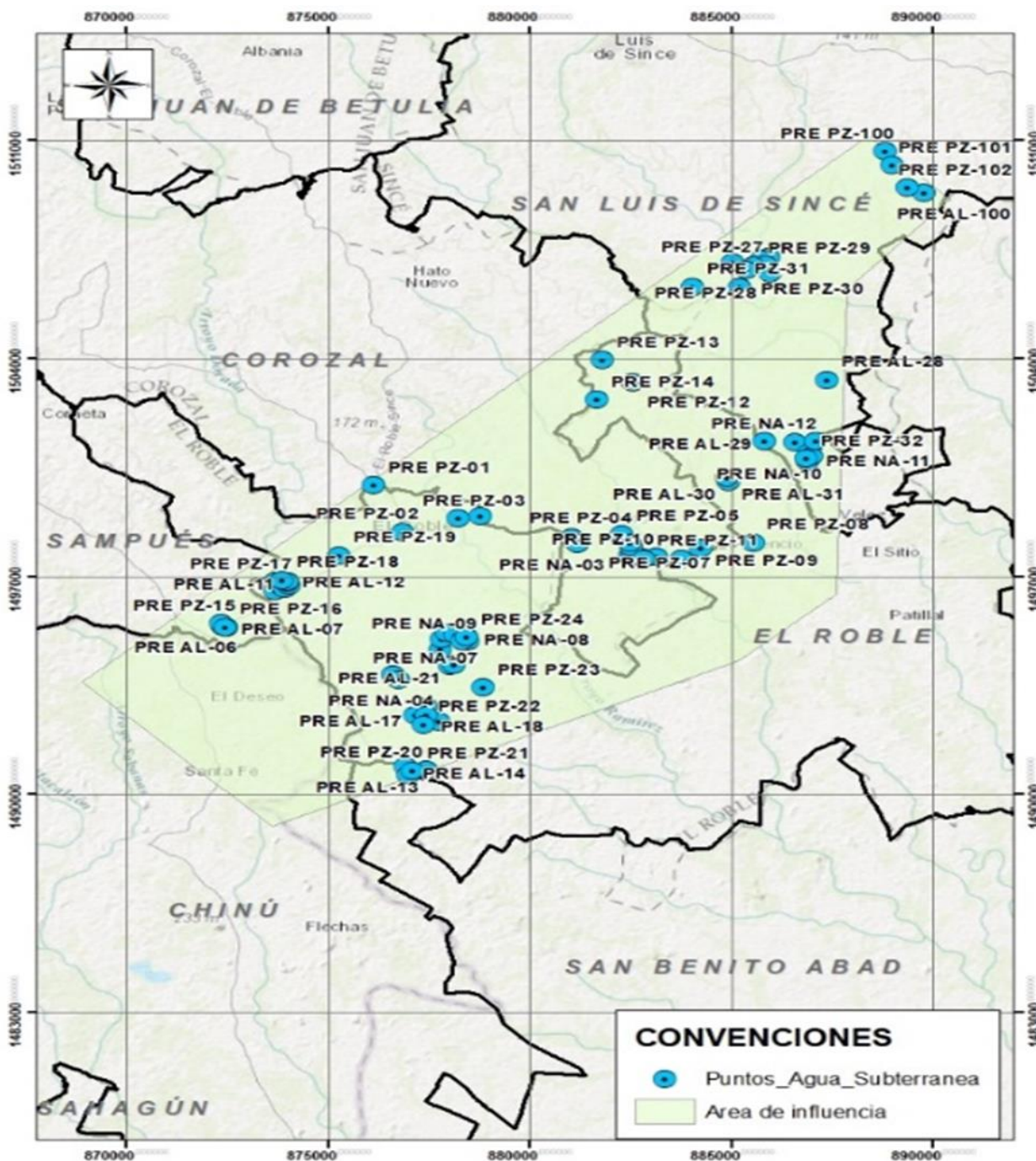
No.	Id	Tipo	Mun / Vereda	Finca	Coordenadas Magna Sirgas		Diámetro	Prof. (m)
					Norte	Este		
7	PRE AL-07	Aljibe	Sampués, vereda La Ceja del Mango		1,495,364	872,488	1.1 m	6
8	PRE AL-08	Aljibe	El Roble, Vereda El Roble	Miraflores, La Aurora	1,496,546	873,716	0.9 m	6
9	PRE AL-09	Aljibe	El Roble, Vereda El Roble	Buenos Aires	1,496,829	873,690	0.8 m	7
10	PRE AL-10	Aljibe	El Roble, Vereda El Roble	La Aurora	1,496,597	873,929	1 m	4
11	PRE AL-100	Aljibe	Sincé	La Aduana	1,509,317	889,795	1.2 m	
12	PRE AL-11	Aljibe	El Roble, Vereda El Roble	Buenos Aires	1,496,693	874,052	1 m	4.8
13	PRE AL-12	Aljibe	El Roble, Vereda El Roble	Villa Guadalupe	1,496,801	874,008	1.1 m	8
14	PRE AL-13	Aljibe	El Roble, Vereda Colorado	El Algarrobo 2	1,490,881	876,954	0,9 m	5.5
15	PRE AL-14	Aljibe	El Roble, Vereda Colorado	No Hay Como Dios	1,490,602	877,009	0,9 m	7
16	PRE AL-15	Aljibe	El Roble	Las Margaritas	1,492,342	877,768	1 m	9
17	PRE AL-16	Aljibe	El Roble	San Miguel	1,492,807	877,465	1 m	15
18	PRE AL-17	Aljibe	El Roble	San Miguel	1,492,553	877,188	1.1 m	5
19	PRE AL-18	Aljibe	El Roble	San Miguel	1,492,547	877,464	1.1 m	2.3
20	PRE AL-19	Aljibe	El Roble		1,493,859	876,634	0.8 m	2
21	PRE AL-20	Aljibe	El Roble	Margarita	1,494,118	878,035	1.1 m	12
22	PRE AL-21	Aljibe	El Roble	Margarita	1,494,147	878,128	0,8 m	2
23	PRE AL-22	Aljibe	El Roble	La Mariquita	1,494,646	877,803	0.9 m	11
24	PRE AL-23	Aljibe	El Roble, Mesetas	El Rodeo	1,494,976	877,828	0.9 m	8
25	PRE AL-24	Aljibe	Sincé, La Guajira	Villa Dani	1,507,093	885,063	1.1 m	17
26	PRE AL-25	Aljibe	Sincé, Valencia	Villa Katy	1,500,709	886,905	1.1 m	12
27	PRE AL-26	Aljibe	Sincé, Valencia	El Diamante	1,501,321	886,615	1.15	3
28	PRE AL-27	Aljibe	Sincé, Valencia		1,501,335	887,123	0.76	1.5
29	PRE AL-28	Aljibe	Sincé, Valencia	Las Delicias	1,503,320	887,403	1.1	15.5
30	PRE AL-29	Aljibe	Sincé, Valencia	Villa Cabrales	1,501,334	885,854	1.1	10
31	PRE AL-30	Aljibe	El Roble, Villavicencio	Nueva Vida	1,500,026	884,950	0.56	6
32	PRE AL-31	Aljibe	El Roble, Villavicencio	El Piñal	1,500,167	884,922	0.5	1
33	PRE NA-01	Manantial	Corozal, vereda Hato Nuevo		1,498,246	881,049	NA	NA

No.	Id	Tipo	Mun / Vereda	Finca	Coordenadas Magna Sirgas		Diámetro	Prof. (m)
					Norte	Este		
34	PRE NA-02	Manantial	Corozal, vereda Hato Nuevo		1,498,076	881,199	NA	NA
35	PRE NA-03	Manantial	Corozal, vereda Hato Nuevo		1,498,040	881,201	NA	NA
36	PRE NA-04	Manantial	El Roble		1,493,676	876,754	NA	NA
37	PRE NA-05	Manantial	El Roble, Mesetas	El Esfuerzo	1,495,183	877,980	NA	NA
38	PRE NA-06	Manantial	El Roble, Mesetas	El Esfuerzo	1,495,121	878,189	NA	NA
39	PRE NA-07	Manantial	El Roble, Mesetas	El Esfuerzo	1,495,049	878,463	NA	NA
40	PRE NA-08	Manantial	El Roble, Mesetas	El Esfuerzo	1,494,903	878,502	NA	NA
41	PRE NA-09	Manantial	El Roble, Mesetas	El Esfuerzo	1,494,900	878,364	NA	NA
42	PRE NA-10	Manantial	Sincé, Valencia	Villa Raquel	1,500,957	886,931	NA	NA
43	PRE NA-11	Manantial	Sincé, Valencia	Cocolina	1,500,859	887,013	NA	NA
44	PRE NA-12	Manantial	Sincé, Valencia		1,501,348	887,121	NA	NA
45	PRE PZ-01	Pozo Profundo	El Roble	La Victoria	1,499,932	876,147	6"	110
46	PRE PZ-02	Pozo Profundo	El Roble	Centro	1,498,432	876,882	6"	102
47	PRE PZ-03	Pozo Profundo	El Roble	La Argentina	1,498,862	878,243	4"	165
48	PRE PZ-04	Pozo Profundo	Corozal		1,498,298	882,300	1"	10
49	PRE PZ-05	Pozo Profundo	Corozal	Charco Prieto	1,498,363	882,297	4"	38
50	PRE PZ-06	Pozo Profundo	Corozal	Villa Aida	1,497,960	882,537	4"	30
51	PRE PZ-07	Pozo Profundo	Corozal	Bendición de Dios	1,498,086	882,496	4"	42
52	PRE PZ-08	Pozo Profundo	El Roble, Corregimiento Villavicencio		1,498,094	885,554	3"	NA
53	PRE PZ-09	Pozo Profundo	El Roble, Vereda Montañita	Villa Helena	1,497,922	884,273	4"	37
54	PRE PZ-10	Pozo Profundo	Corozal, Vereda Tambó		1,497,632	883,168	3"	Desconocida
55	PRE PZ-100	Pozo Profundo	Sincé	Garonca	1,510,660	888,820	2"	100
56	PRE PZ-101	Pozo Profundo	Sincé		1,510,216	888,994	4"	140
57	PRE PZ-102	Pozo Profundo	Sincé	Rosario	1,509,496	889,397	4"	Sin Información
58	PRE PZ-103	Pozo Profundo	Sincé, La Guajira	La Bendición	1,506,202	885,217	2"	78
59	PRE PZ-104	Pozo Profundo	Sincé, La Guajira	La Bendición	1,506,304	885,212	1"	17
60	PRE PZ-11	Pozo Profundo	Corozal, Vereda San Antonio del Gallinazo	La Mora	1,497,578	882,845	2"	22

No.	Id	Tipo	Mun / Vereda	Finca	Coordenadas Magna Sirgas		Diámetro	Prof. (m)
					Norte	Este		
61	PRE PZ-12	Pozo Profundo	El Roble	Corregimiento	1,503,256	882,581	3"	116
62	PRE PZ-13	Pozo Profundo	El Roble, vereda San Francisco	Empresa Almidones Calle de Palma	1,503,949	881,822	3"	Sin Información
63	PRE PZ-14	Pozo Profundo	El Roble, vereda San Francisco		1,502,678	881,679	4"	Sin Información
64	PRE PZ-15	Pozo Profundo	Sampués, vereda La Ceja del Mango	Villa Luisa	1,495,497	872,352	2"	54
65	PRE PZ-16	Pozo Profundo	Sampués, vereda La Ceja del Mango	La Envidia	1,495,380	872,474	2"	21
66	PRE PZ-17	Pozo Profundo	El Roble, Vereda El Roble	Villa Guadalupe	1,496,831	874,010	1"	8
67	PRE PZ-18	Pozo Profundo	El Roble, Vereda El Roble	Villa Guadalupe	1,496,885	873,865	2"	60
68	PRE PZ-19	Pozo Profundo	El Roble, Vereda El Roble	Villa L	1,497,684	875,279	2"	41
69	PRE PZ-20	Pozo Profundo	El Roble, Vereda Colorado		1,490,784	877,439		
70	PRE PZ-21	Pozo Profundo	El Roble, Vereda Colorado		1,490,750	877,116	4"	
71	PRE PZ-22	Pozo Profundo	El Roble, Vereda Colorado	San Mateo	1,492,249	877,397	2"	30
72	PRE PZ-23	Pozo Profundo	El Roble	Margarita	1,493,423	878,857	2"	60
73	PRE PZ-24	Pozo Profundo	El Roble, Mesetas	El Esfuerzo	1,495,049	878,463	3"	
74	PRE PZ-25	Pozo Profundo	Sincé, La Guajira	Dinamarca	1,507,255	885,959	2"	18
75	PRE PZ-26	Pozo Profundo	Sincé, La Guajira	Carmen	1,507,193	885,792	2"	
76	PRE PZ-27	Pozo Profundo	Sincé, La Guajira	La Bendición	1,507,012	885,890	2"	18
77	PRE PZ-28	Pozo Profundo	Sincé, La Guajira	Parcela 23	1,506,751	885,978	2"	18
78	PRE PZ-29	Pozo Profundo	Sincé, La Guajira	Parcela 10	1,506,972	885,580	2"	20
79	PRE PZ-30	Pozo Profundo	Sincé, La Guajira	El Descanso	1,506,837	885,404	2"	12
80	PRE PZ-31	Pozo Profundo	Sincé, La Guajira	Los Quipes	1,506,317	884,050	2"	30
81	PRE PZ-32	Pozo Profundo	Sincé, Valencia	Villa Katy	1,500,791	886,884	2"	12

Nota. Elaboración Propia, 2022




Figura 18. Localización de los puntos inventariados








Las Características de algunos Puntos de agua subterránea inventariados se muestran en la Tabla 14. Y su distribución en la Figura 19. La información específica de cada punto se presenta

en el FUNIAS – Formulario Único Nacional para Inventario de Puntos de Agua Subterránea – Anexo 2).

Tabla 14. Características de algunos Puntos de agua subterránea inventariados

NOMBRE / COORDENADAS* *Coordenadas Magna Sirgas origen Bogotá	DESCRIPCIÓN
<p>(PRE NA-09) - N: 1.494.900 - E: 878.364.</p> 	<p>Manantial ubicado en la vereda Mesetas, municipio El Roble, Sucre.</p> <p>Manantial ubicado en una zona protegida por una mancha de arbustos y pastos. El agua presenta una coloración algo amarillenta, sin olor.</p> <p>Esta en una zona semiplana, el agua es usada por los habitantes de la finca para consumo doméstico.</p>
<p>(PRE NA-01) – N: 1.498.246 - E: 881.049.</p> 	<p>Manantial ubicado en la vereda Hato Nuevo, municipio de Corozal, Sucre.</p> <p>Manantial ubicado en una zona protegida por una mancha de arbustos, rastrojo y pastos. El agua no presenta coloración, sin olor.</p> <p>Esta en una zona semiplana, el agua es usada por los habitantes de la finca para consumo doméstico.</p>
<p>(PRE PZ-23) - N: 1.493.423 - E: 878.857</p> 	<p>Pozo profundo en la finca Margarita, municipio El Roble.</p> <p>Pozo profundo ubicado en una zona descubierta cerca de una vivienda, con profundidad de 60 metros. El agua no presenta coloración, ni olor.</p> <p>Está en una zona verde, potreros. Se bombea a unos tanques de almacenamiento para uso de los habitantes de la finca y uso pecuario como fuente de agua.</p>

NOMBRE / COORDENADAS*	DESCRIPCIÓN
<p data-bbox="224 226 776 254">*Coordenadas Magna Sirgas origen Bogotá</p> <p data-bbox="256 264 743 291">(PRE PZ-03) - N: 1.498.862 - E: 878.243</p> 	<p data-bbox="816 291 1425 342">Pozo profundo del acueducto El Roble, municipio de El Roble.</p> <p data-bbox="816 369 1425 449">Pozo profundo ubicado en una zona descubierta con cerca de malla electrosoldada, con profundidad de 165 metros. El agua no presenta coloración, ni olor.</p> <p data-bbox="816 476 1425 615">Está en una zona verde, potreros. Se bombea unos tanques de almacenamiento y planta de tratamiento para uso de los habitantes de la parte urbana del municipio El Roble, para el uso doméstico y consumo directo como fuente de agua.</p>
<p data-bbox="256 678 743 705">(PRE PZ-31) - N: 1.506.317 - E: 884.050</p> 	<p data-bbox="816 690 1425 741">Pozo profundo en la finca Los Kipes, vereda La Guajira, municipio El Roble.</p> <p data-bbox="816 768 1425 848">Pozo profundo ubicado en una zona descubierta, con profundidad de 30 metros. El agua no presenta coloración, ni olor.</p> <p data-bbox="816 875 1425 955">Está en una zona verde, potreros. Se bombea a un tanque de almacenamiento para uso de los habitantes de la finca y uso pecuario como fuente de agua.</p>
<p data-bbox="256 1014 743 1041">(PRE PZ-27) - N: 1.507.012 - E: 885.890.</p> 	<p data-bbox="816 1062 1425 1113">Pozo profundo en la finca La Bendición – Parcela 32, vereda La Guajira, municipio El Roble.</p> <p data-bbox="816 1140 1425 1220">Pozo profundo ubicado en una zona descubierta cerca de una vivienda, con profundidad de 18 metros. El agua no presenta coloración, ni olor.</p> <p data-bbox="816 1247 1425 1327">Está en una zona verde, potreros. Se bombea a un tanque de almacenamiento para uso de los habitantes de la finca y uso pecuario como fuente de agua.</p>
<p data-bbox="256 1419 743 1446">(PRE AL-01) – N: 1.497.684 - E: 882.520.</p> 	<p data-bbox="816 1470 1425 1497">Aljibe de la finca Villa María, municipio de Corozal.</p> <p data-bbox="816 1524 1425 1604">Aljibe ubicado en una zona descubierta cerca de una vivienda, con profundidad de 5.50 metros. El agua no presenta coloración, ni olor.</p> <p data-bbox="816 1631 1425 1711">Está en una zona verde, potreros. Se bombea a un tanque de almacenamiento para uso de los habitantes de la finca y uso pecuario como fuente de agua.</p>

NOMBRE / COORDENADAS* *Coordenadas Magna Sirgas origen Bogotá	DESCRIPCIÓN
<p>(PRE AL-08) - N: 1.496.546 - E: 873.716</p> 	<p>Aljibe de la finca Miraflores, municipio El Roble.</p> <p>Aljibe ubicado en una zona descubierta cerca de una vivienda, con profundidad de 6 metros. El agua no presenta coloración, ni olor.</p> <p>Está en una zona verde, potreros. Se bombea a un tanque de almacenamiento para uso de los habitantes de la finca y uso pecuario como fuente de agua.</p>
<p>(PRE AL-100) - N: 1.509.317 - E: 889.795</p> 	<p>Aljibe de la finca La Aduana, municipio de Sincé.</p> <p>Aljibe ubicado en una zona descubierta cerca de una vivienda, con profundidad de 6.50 metros. El agua no presenta coloración, ni olor.</p> <p>Está en una zona verde, potreros. Se bombea a un tanque de almacenamiento para uso de los habitantes de la finca y uso pecuario como fuente de agua.</p>
<p>(PRE AL-14) - N: 1.490.602 - E: 877.009</p> 	<p>Aljibe de la finca No hay como Dios, municipio El Roble.</p> <p>Aljibe ubicado en una zona descubierta cerca de una vivienda, con profundidad de 7 metros. El agua no presenta coloración, ni olor.</p> <p>Está en una zona verde, potreros. Se bombea a un tanque de almacenamiento para uso de los habitantes de la finca y uso pecuario como fuente de agua.</p>

Nota. Elaboración Propia, 2022

La distribución porcentual de los tipos de puntos de agua se resume en la Tabla 15.

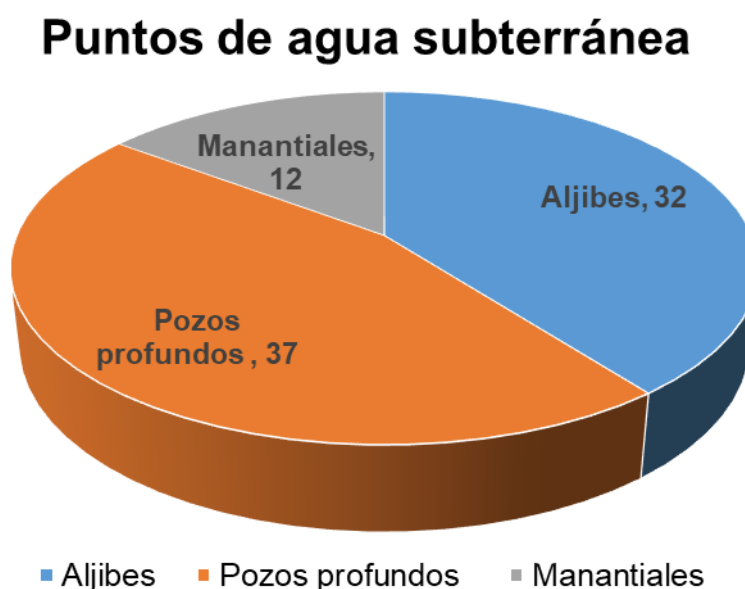
Tabla 15. Resumen de puntos de agua subterránea inventariados.

Tipo de punto	Números de puntos	Profundidad (m)	Caudal de explotación (l/s)	Nivel de la tabla de agua (m)
Aljibes	32	1.00 – 17.00	0.10 – 2.50	0.50 – 13.50
Pozos profundos	37	8.00 – 165.00	0.10 – 19.00	1.57 – 57.50
Manantiales	12	NA	NA	Superficie

Tipo de punto	Números de puntos	Profundidad (m)	Caudal de explotación (l/s)	Nivel de la tabla de agua (m)
N.A.: No aplica *Corresponde al caudal de surgencia				

Nota. Elaboración Propia, 2022

Figura 19. Distribución de los puntos de agua inventariados



Nota. Elaboración Propia, 2022

Caracterización hidrológica conceptual.

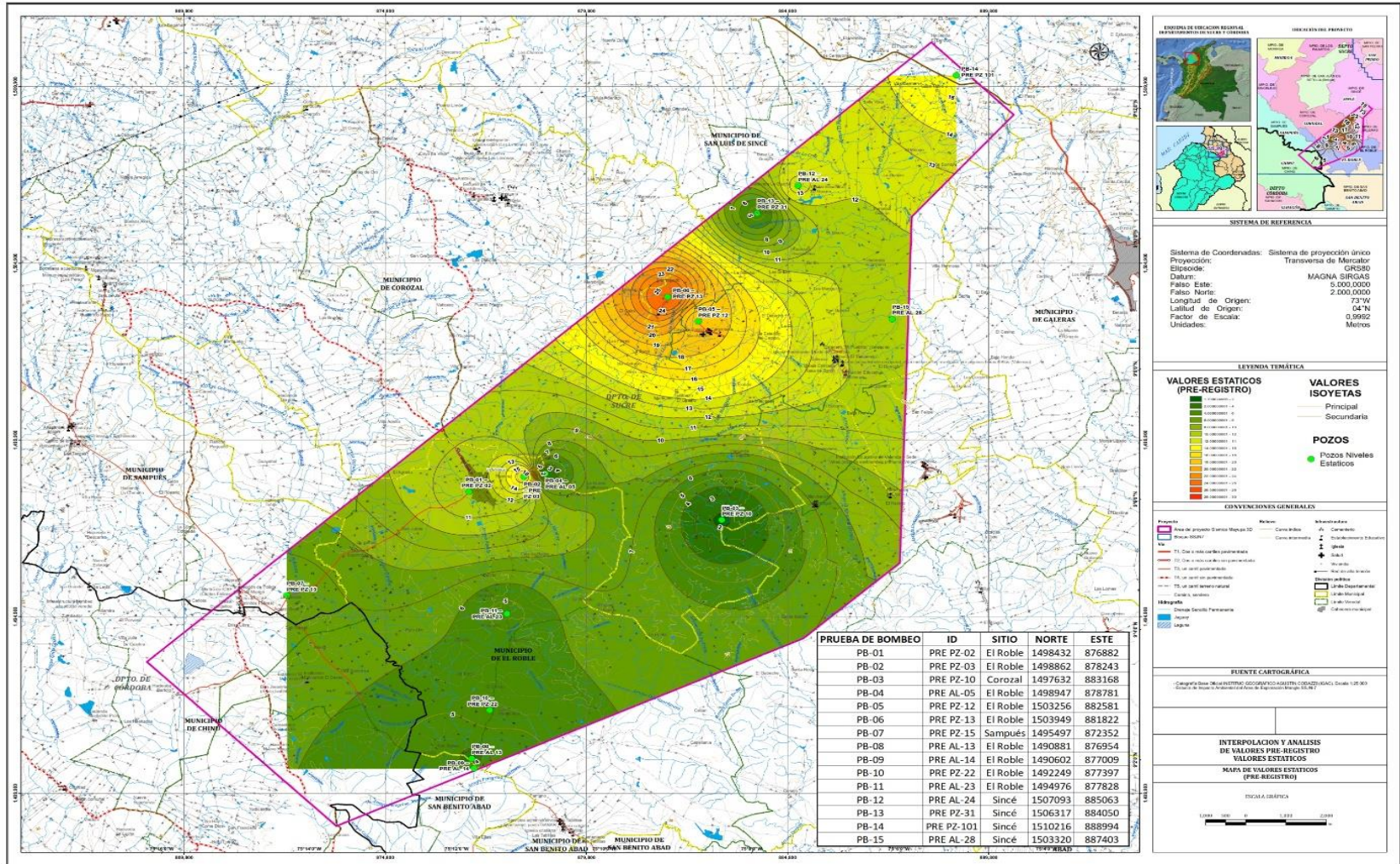
Para el desarrollo de este modelo se determinaron 2 etapas una antes de la prospección sísmica y la segunda después. Con el fin de obtener la información de los cambios, alteraciones o modificaciones del comportamiento de los acuíferos.

Para la ejecución de las labores antes de realizar la prospección sísmica en el mes de febrero-marzo de 2021 en campo se realizó un inventario de puntos de agua subterránea como aljibes, nacimientos y pozos profundos para lo cual se visitaron los predios en donde existe un punto de agua, allí se tomaron coordenadas y toma de niveles. En la segunda etapa en julio del mismo año es decir después de la prospección sísmica se retomó el inventario para tomar la información

de niveles estáticos, información que se analizó para determinar la caracterización conceptual hidrológica.

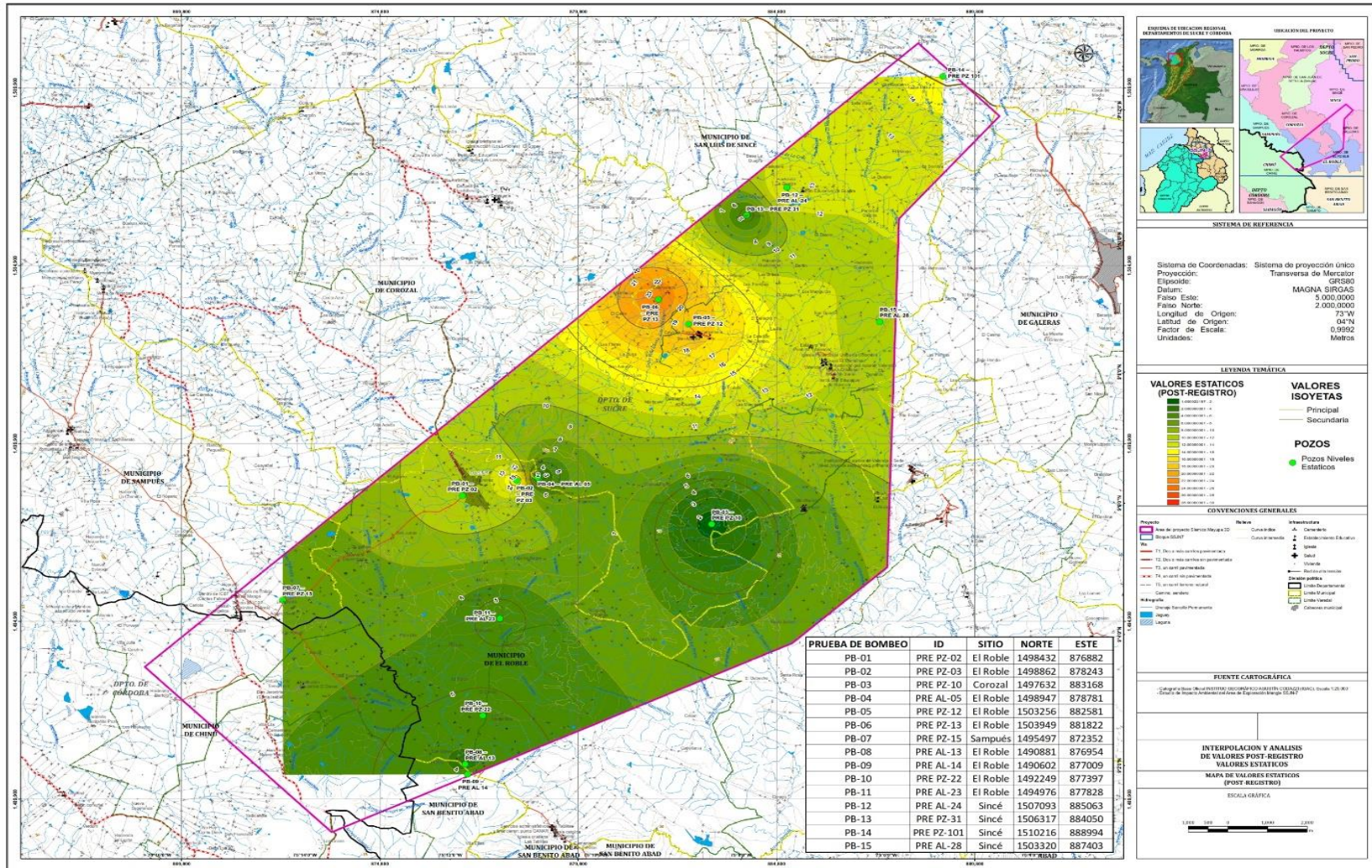
A fin de poder determinar el comportamiento del agua subterránea en el área del proyecto sísmico; en la Figura 20 y Figura 21 se presenta el resultado de los mapas de isopiezas, para cada una de las campañas realizadas (pre y pos registro), generados a partir de niveles piezométricos en aljibes y pozos profundos y el nivel de la lámina de agua de los manantiales. Analizando las curvas de isopiezas se nota que el acuífero de la formación Betulia presenta una dirección del flujo NW a SE cuyo trazado de flujo es paralelo a los cuerpos de agua superficiales.

Figura 20. Mapa de Isopiezas pre sísmica



Nota. Elaboración Propia, 2022

Figura 21. Mapa de Isopiezas pos sísmica



Nota. Elaboración Propia, 2022

5.3 Características Hidráulicas de los Acuíferos

Para determinar la caracterización hidráulica se tomó como base el inventario de puntos de agua subterránea y se seleccionó por sus condiciones (explotación y de adecuación que permitieran realizar las respectivas pruebas), los puntos a los cuales se les realizó prueba de bombeo en las dos etapas un antes y un después, para estimar y comparar los parámetros hidráulicos del acuífero. Para determinar si con la actividad sísmica se afectó, altero o modifico los parámetros hidráulicos.

5.3.1 Pruebas de Bombeo de los puntos de agua subterránea en la Fm Betulia.

En estas pruebas, se bombea el pozo hasta que el abatimiento alcanza su valor máximo midiendo los valores de descenso Vs tiempo de bombeo y luego de suspender el bombeo se miden los niveles durante la recuperación. Es importante anotar que las pruebas en estos pozos se realizaron hasta el abatimiento del pozo (el tiempo de bombeo en promedio fue de 360 minutos). En la Tabla 16, se presentan los datos de campo de las pruebas de bombeo Pre registro realizadas a caudal constante en la Formación Betulia (Q1b) y en la **Tabla 17** los datos de las pruebas Pos registro.

Tabla 16. Datos de campo de las pruebas de bombeo y recuperación (Pre - registro sísmico) en la Fm Betulia.

NOMBRE DEL POZO	PROFUNDIDAD	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		INICIAL (m)	0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	330''	
PB-01 – PRE PZ 02	11.63	11.63	21.9	23.92	25.83	26.89	27.65	28.88	31	33.2	34.35		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	34.35	0'	1'	2'	3'	5'	10'	20'	30'	50'	100'	210'	300'
		34.35	23.48	19.67	17.09	15.72	14.8	13.96	13.795	13.06	12.56	12.18	11.94
PB-02 – PRE PZ 03	17.27	17.27	28.07	28.81	29.55	30.045	30.41	30.61	33.04	34.97	36.69		
	Profundidad final (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
	36.69	0'	1'	2'	3'	5'	10'	20'	30'	50'	100'	210'	360'
		36.69	25.95	25.29	24.66	23.89	22.915	21.905	21.425	20.495	19.36	18.225	17.38
PB-03 – PRE PZ 10	1.89	1.89	4.1	4.46	4.87	5.05	5.14	5.24	5.76	6.21	6.68		
	Profundidad INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											

NOMBRE DEL POZO	PROFUNDIDAD	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		Tiempo de recuperación (en minutos)											
	Profundidad final (m)	0'	1'	2'	3'	5'	10'	20'	30'	50'	100'	210'	240'
	6.68	6.68	5.15	4.35	3.55	3.08	2.83	2.6	2.51	2.35	2.22	2.13	2.11
PB-04 – PRE AL 05	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	330''		
	1.7	1.7	1.8	1.99	2.12	2.28	2.436	2.6	3.47	3.75	4.19		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	4.19	4.19	4.09	4	3.93	3.81	3.6	3.36	3.24	2.98	2.64	2.24	1.91
PB-05 – PRE PZ 12	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	270''		
	18.45	18.45	19.95	20.05	20.135	20.205	20.26	20.285	20.6	20.84	21.15		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	21.15	21.15	19.57	19.31	19.22	19.14	19.05	18.92	18.86	18.765	18.64	18.53	18.45
PB-06 – PRE PZ 13	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	330''		
	25.89	25.89	31.29	33.88	37.79	40.72	42.49	44.49	57.3	58.154	58.25		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	58.25	58.25	51.2	47.65	45.44	41.76	37.26	31.94	30.12	28.05	27.36	26.77	26.36
PB-07 – PRE PZ 15	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	330''		
	6.59	6.59	8.34	8.365	8.43	8.46	8.48	8.51	8.6	8.67	8.76		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	8.76	8.76	7.42	7.3	7.24	7.16	7.06	6.96	6.92	6.84	6.77	6.72	6.67
PB-08 – PRE AL 13	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	330''		
	3.8	3.8	3.85	3.89	3.95	3.99	4.01	4.03	4.08	4.1	4.118		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	4.118	4.118	4.07	4.02	3.99	3.94	3.88	3.845	3.835	3.818	3.809	3.804	3.8
PB-09 – PRE AL 14	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	330''		
	4.28	4.28	4.58	4.6	4.62	4.775	4.98	5.15	5.58	5.595	5.64		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	5.64	6.64	5.52	5.49	5.47	5.46	5.447	5.4	5.38	5.2	4.98	4.8	4.72
PB-10 – PRE PZ 22	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	330''		
	5.3	5.3	5.64	5.654	5.662	5.675	5.685	5.695	5.95	6.06	6.16		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	6.16	6.16	5.66	5.64	5.62	5.58	5.53	5.48	5.46	5.42	5.385	5.36	5.335
PB-11 – PRE AL 23	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
	4.75	4.75	4.79	4.83	4.9	4.97	5	5.06	5.32	5.46	5.75		

NOMBRE DEL POZO	PROFUNDIDAD	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		Tiempo de recuperación (en minutos)											
	Profundidad final (m)	0'	1'	2'	3'	5'	10'	20'	30'	50'	100'	210'	300'
	5.75	5.75	5.73	5.71	5.69	5.655	5.63	5.6	5.51	5.39	5.15	4.93	4.85
PB-12 – PRE AL 24	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	330''		
	13.26	13.46	13.41	13.5	13.63	13.73	13.77	13.8	13.85	13.885	13.93		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	13.93	13.93	13.83	13.78	13.74	13.674	13.584	13.465	13.415	13.335	13.295	13.276	13.271
PB-13 – PRE PZ 31	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	330''		
	4.7	4.7	6.26	6.34	6.38	6.41	6.43	6.45	6.54	6.61	6.7		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	6.7	6.7	4.92	4.88	4.865	4.845	4.82	4.795	4.785	4.765	4.73	4.705	4.7
PB-14 – PRE PZ 101	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	330''		
	15.2	15.2	20.06	20.52	20.855	21.05	21.18	21.295	22.04	22.61	23.32		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	23.32	23.32	18.5	17.83	17.64	17.39	17.1	16.84	16.66	16.38	16.1	15.85	15.8
PB-15 – PRE AL 28	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	360''		
	11.32	11.32	11.37	11.41	11.49	11.545	11.58	11.6	11.75	11.915	12.03		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	12.03	12.03	12	11.97	11.945	11.905	11.839	11.77	11.73	11.65	11.525	11.485	11.42

Nota. Elaboración Propia, 2022

Tabla 17. Datos de campo de las pruebas de bombeo y recuperación (Post registro sísmico)

NOMBRE DEL POZO	PROFUNDIDAD	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)													
		TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)													
	Profundidad final (m)	0'	1'	2'	3'	5'	10'	20'	30'	50'	100'	210'	360'		
PB-01 – PRE PZ 02	11.54	11.54	21.54	23.45	25.78	26.38	26.95	27.59	29.46	30.22	30.93				
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)													
	30.93	30.93	23.55	19.87	17.35	15.85	14.89	14.42	14.25	13.94	13.53	13.08	12.54		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)													
PB-02 – PRE PZ 03	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)													
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	360''				
	15.91	15.91	25.9	27.01	27.88	28.33	28.63	28.97	31.02	33.08	35.65				
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)													
	35.65	35.65	26.33	24.78	24.07	23.23	22.25	21.27	20.69	19.71	18.48	17.66	17.15		
PB-03 – PRE PZ 10	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)													
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	330''				
	1.66	1.66	3.95	4.43	4.77	4.99	5.13	5.22	5.74	6.18	6.62				
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)													
		0'	1'	2'	3'	5'	10'	20'	30'	50'	100'	210'	300'		

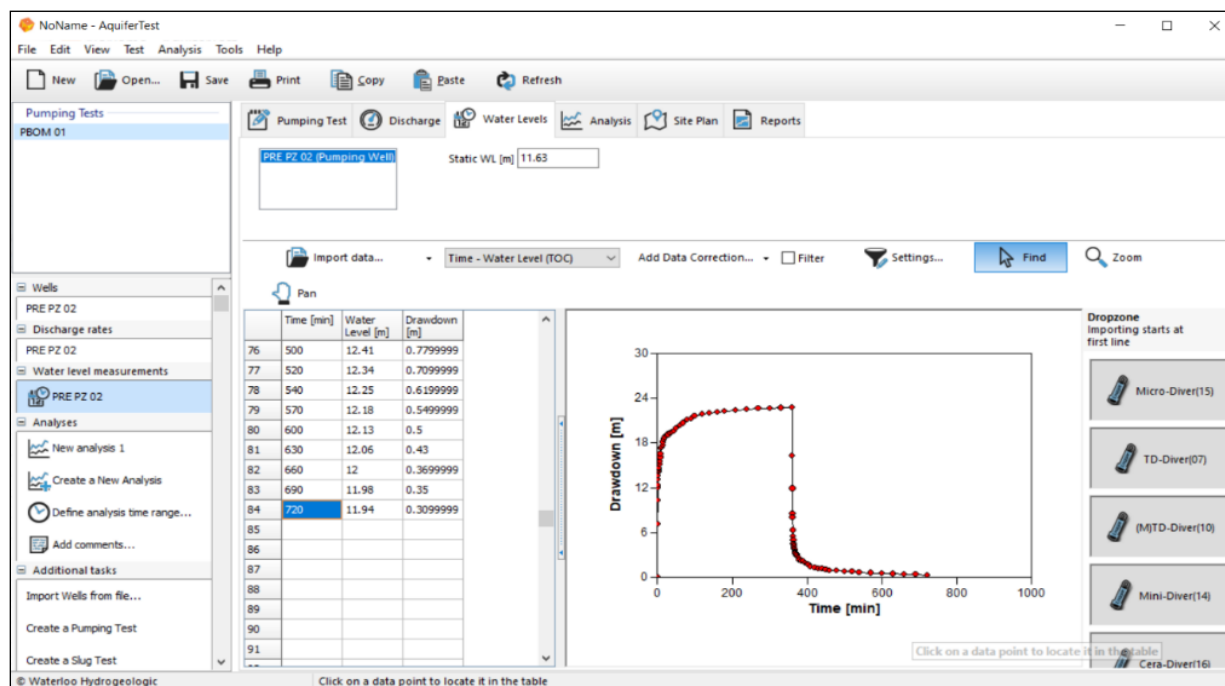
NOMBRE DEL POZO	PROFUNDIDAD	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		6.62	6.62	5.21	4.65	4.18	3.82	3.08	2.64	2.52	2.36	2.21	2.12
PB-04 – PRE AL 05	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	3'	4'	5'	6'	8'	10'	40'	100'	330'
	1.6	1.6	1.75	1.86	2.00	2.21	2.326	2.46	3.87	4.02	4.23		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	0'	1'	2'	3'	5'	10'	20'	30'	50'	100'	210'	300'	
	4.23	4.23	4.12	4.03	3.94	3.81	3.6	3.36	3.24	2.99	2.8	2.46	2.18
PB-05 – PRE PZ 12	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	270'		
	18.45	18.45	19.95	20.05	20.135	20.205	20.26	20.285	20.6	20.84	21.15		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	0'	1'	2'	3'	5'	10'	20'	30'	50'	100'	210'	360'	
	21.15	21.15	19.57	19.31	19.22	19.15	19.05	18.92	18.86	18.765	18.64	18.53	18.45
PB-06 – PRE PZ 13	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	330'		
	23.63	23.63	28.94	30.67	32.55	33.19	34.25	35.16	44.11	50.15	54.74		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	0'	1'	2'	3'	5'	10'	20'	30'	50'	100'	210'	360'	
	54.74	54.74	46.58	44.15	42.45	40.72	37.85	32.35	30.77	27.96	26.38	25.53	25.24
PB-07 – PRE PZ 15	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	330'		
	6.35	6.35	6.98	7.12	7.32	7.47	7.58	7.68	8.01	8.15	8.25		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	0'	1'	2'	3'	5'	10'	20'	30'	50'	100'	210'	360'	
	8.25	8.25	7.49	7.34	7.28	7.16	7.01	6.86	6.78	6.67	6.57	6.46	6.39
PB-08 – PRE AL 13	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	270'		
	3.5	3.5	3.56	3.6	3.66	3.70	3.72	3.74	3.83	3.90	3.97		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	0'	1'	2'	3'	5'	10'	20'	30'	50'	100'	120'	160'	
	3.97	3.97	3.92	3.87	3.83	3.75	3.64	3.55	3.52	3.503	3.5	3.5	
PB-09 – PRE AL 14	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	330'		
	4.58	4.58	4.61	4.63	4.69	4.74	4.805	4.86	5.495	5.8	6.04		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	0'	1'	2'	3'	5'	10'	20'	30'	50'	100'	210'	360'	
	6.04	6.04	5.92	5.82	5.74	5.61	5.47	5.32	5.26	5.16	5.01	4.85	4.72
PB-10 – PRE PZ 22	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	330'		
	4.88	4.88	5.26	5.32	5.44	5.51	5.57	5.61	5.84	6.01	6.09		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	0'	1'	2'	3'	5'	10'	20'	30'	50'	100'	210'	360'	
	6.09	6.09	5.66	5.62	5.58	5.5	5.37	5.27	5.21	5.13	5.06	5.01	4.96
PB-11 – PRE AL 23	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	330'		
	4.52	4.52	4.58	4.63	4.67	4.78	4.84	4.88	5.18	5.37	5.52		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	0'	1'	2'	3'	5'	10'	20'	30'	50'	100'	210'	360'	
	5.52	5.52	5.44	5.38	5.32	5.23	5.11	4.97	4.93	4.85	4.75	4.63	4.58
PB-12 – PRE AL 24	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	330'		
	13.85	13.85	13.95	14	14.11	14.19	14.25	14.29	14.41	14.48	14.57		
	Profundidad final (m)	Tiempo de recuperación (en minutos)											
	0'	1'	2'	3'	5'	10'	20'	30'	50'	100'	210'	360'	
	14.57	14.57	14.51	14.47	14.43	14.39	14.33	14.28	14.24	14.2	14.14	14.09	14.04
PB-13 – PRE PZ 31	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)											
		0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	330'		
	4.72	4.72	6.2	6.31	6.35	6.38	6.4	6.42	6.51	6.58	6.67		

NOMBRE DEL POZO	PROFUNDIDAD	TIEMPO DE BOMBEO (en minutos)												
		Tiempo de recuperación (en minutos)												
	Profundidad final (m)	0'	1'	2'	3'	5'	10'	20'	30'	50'	100'	210'	360'	
	6.67	6.67	5.12	5.03	4.99	4.95	4.9	4.85	4.83	4.79	4.76	4.735	4.722	
	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	300'			
PB-14 – PRE PZ 101	14.39	14.39	19.37	19.76	20.22	20.44	20.59	20.75	21.34	21.92	22.87			
	Profundidad final (m)	0'	1'	2'	3'	5'	10'	20'	30'	50'	100'	210'	270'	
	22.87	22.87	17.13	16.71	16.54	16.31	15.94	15.64	15.47	15.25	14.98	14.77	14.74	
	PROFUNDIDAD INICIAL (m)	0'	1'	2'	4'	6'	8'	10'	40'	100'	330'			
PB-15 – PRE AL 28	11.72	11.72	11.78	11.83	11.91	11.98	12.03	12.06	12.19	12.26	12.36			
	Profundidad final (m)	0'	1'	2'	3'	5'	10'	20'	30'	50'	100'	210'	360'	
	12.36	12.36	12.32	12.28	12.24	12.18	12.09	12.04	11.98	11.94	11.89	11.84	11.79	

Nota. Elaboración Propia, 2022

Debido a que las metodologías de interpretación son aplicables para pozos, se utilizó el método de Pumping Test de Waterloo. La curva de abatimiento contra tiempo y el resultado de la interpretación de una prueba se muestra en la Figura 22.

Figura 22. Curva de tiempo / abatimiento para el pozo PRE PZ-02



Nota. Elaboración Propia, 2022

En el Anexo 3 – Prueba de bombeo se presentan las curvas de tiempo y abatimiento para cada uno de los pozos donde se realizaron las pruebas de bombeo para cada una de las etapas pre y pos registro sísmico.

En las Tabla 18 y Tabla 19 se presenta el resumen de los parámetros hidráulicos y resultados de las pruebas de bombeo para cada una de las etapas (pre y pos registro sísmico). En el Anexo 3 – Prueba de bombeo, los datos de campo de las pruebas de bombeo.

De acuerdo con los resultados obtenidos, para los depósitos cuaternarios y la Formación Betulia son catalogados como de productividad baja, la transmisividad media, lo cual al correlacionar con su gran espesor se catalogan como de potencialidad acuífera alta para esta zona hidrogeológica.

Tabla 18. Resumen de parámetros hidráulicos obtenidos de las pruebas de bombeo (Pre - registro sísmico)

PARÁMETROS	MÉTODO DE INTERPRETACIÓN	PRE PZ-02	PRE PZ-03	PRE PZ-10	PRE AL-05	PRE PZ-12	PRE PZ-13	PRE PZ-15	PRE AL-13	PRE AL-14	PRE PZ-22	PRE AL-23	PRE AL-24	PRE PZ-31	PRE PZ-101	PRE AL-28	
Nivel Estático - NE (m)	Pumping Test de Waterloo	11.63	17.27	1.89	1.7	18.45	25.89	6.59	3.8	4.28	5.30	4.75	13.26	4.7	15.2	11.32	
Nivel Dinámico - ND (m)		34.35	36.69	6.68	4.19	21.15	58.25	8.76	4.118	5.64	6.16	5.75	13.93	6.7	23.32	12.03	
Abatimiento - s (m)		22.72	19.42	4.79	2.49	2.7	32.36	2.17	0.318	1.36	0.86	1	0.67	2	8.12	0.71	
Caudal de la prueba de bombeo (l/s)		6	18	2.2	2.1	2.1	6	2.2	1.9	2.1	1.85	1.9	2.1	2.1	2.5	1.8	
Tiempo de bombeo (min)		360	360	330	330	270	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	360
Capacidad específica - Ce (l/s/m)		0.265	0.93	0.46	0.85	0.78	0.19	1.03	5.95	1.55	2.15	1.9	3.14	1.05	0.26	2.54	
Transmisividad - T (m ² /día)		Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Bajo	Media	Alta	Media	Alta	Media	Alta	Media	Baja	Alta	
Coefficiente de almacenamiento de acuífero (s)		2.61	8.93	3.51	4.76	17.7	1.45	15.9	8.64	10.1	4.46	6.64	2.24	18.9	5.25	6.64	
Conductividad Hidráulica (K) (cm/hora)		3.84x10 ⁻⁶	1.93x10 ⁻²	5.56x10 ⁻²	1.29x10 ⁻⁴	4.41x10 ⁻²	7.20x10 ⁻⁶	4.5x10 ⁻⁵	1.01x10 ⁻⁴	1.01x10 ⁻¹	3.99x10 ⁻⁴	1.01x10 ⁻²	1.01x10 ⁻²	1.8x10 ⁻⁷	9.91x10 ⁻²	1.01x10 ⁻²	
Tipo de acuífero		2.17	5.41	3.59	2.89	5.98	0.69	21.74	42.92	7.46	8.01	7.51	39.06	20.75	3.01	9.03	
	Confinado	Libre	Libre	Confinado	Libre	Confinado	Confinado	Semi confinado	Libre	Semi confinado	Libre	Libre	Confinado	Libre	Libre		

Nota. Elaboración Propia, 2022

Tabla 19. Resumen de parámetros hidráulicos obtenidos de las pruebas de bombeo (Post registro sísmico)

PARÁMETROS	MÉTODO DE INTERPRETACIÓN	PRE PZ-02	PRE PZ-03	PRE PZ-10	PRE AL-05	PRE PZ-12	PRE PZ-13	PRE PZ-15	PRE AL-13	PRE AL-14	PRE PZ-22	PRE AL-23	PRE AL-24	PRE PZ-31	PRE PZ-101	PRE AL-28	
Nivel Estático - NE (m)	Pumping Test de Waterloo	11.54	15.91	1.66	1.60	18.45	23.63	6.35	3.50	4.58	4.88	4.52	13.85	4.72	14.39	11.72	
Nivel Dinámico – ND (m)		30.93	35.65	6.62	4.23	21.15	54.74	8.25	3.97	6.04	6.09	5.52	14.57	6.67	22.87	12.36	
Abatimiento – s (m)		19.39	19.74	4.96	2.63	2.70	31.11	1.90	0.47	1.46	1.21	1	0.72	1.95	8.48	0.64	
Caudal de la prueba de bombeo (l/s)		5.80	17.10	2.10	1.90	2.00	5.50	2.10	1.85	2.20	2.00	2.10	2.20	2.20	2.20	2.60	2.00
Tiempo de bombeo (min)		360	360	330	330	270	330	330	270	330	330	330	330	330	330	300	330
Capacidad específica -Ce (l/s/m)		0.29	0.98	0.44	0.92	0.83	0.23	1.14	5.87	1.48	2.23	1.85	3.23	1.12	0.29	2.65	
		Baja	Baja	Baja	Baja	Baja	Bajo	Media	Alta	Media	Alta	Media	Alta	Media	Baja	Alta	
Transmisividad - T (m ² /día)		7.18	22.5	7.7	4.76	211	7.59	173	8.64	10.1	173	6.64	2.24	260	77	2.28	
Coefficiente de almacenamiento de acuífero (s)		1.73x10-6	7.69x10-7	3.02x10-7	1.29x10-4	5.16x10-6	2.56x10-3	4.44x10-5	1.01x10-4	1.01x10-1	5.76x10-3	1.01x10-2	1.01x10-2	1.01x10-7	2.25x10-7	2.25x10-7	
Conductividad Hidráulica (K)		2.25	5.37	3.63	2.93	5.87	0.73	21.48	42.75	7.68	8.16	7.35	39.15	20.42	2.98	8.89	
Tipo de acuífero		Confinado	Libre	Libre	Confinado	Libre	Confinado	Confinado	Semi confinado	Libre	Semi confinado	Libre	Libre	Confinado	Libre	Libre	

Nota. Elaboración Propia, 2022

5.4 Caracterización Hidrogeoquímicas

5.4.1 Monitoreo de aguas subterráneas

Con la información obtenida en campo y el análisis fisicoquímico y microbiológico de las muestras, se establece la comparación con los límites máximos permisibles en la normatividad ambiental vigente, con el fin de conocer el estado actual del recurso hídrico subterráneo en el área de estudio.

Los límites de comparación que se usaron corresponden a los establecidos por el Decreto 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, para consumo humano y doméstico, uso agrícola y pecuario; así como los criterios establecidos en la Resolución 2115 de 2007 teniendo en cuenta que la mayoría de los pozos, aljibes o manantiales son la fuente de agua de consumo, sin ningún tipo de tratamiento, de las personas que habitan el lugar.

En el Anexo 4 se relacionan los Resultados fisicoquímicos y bacteriológicos de aguas subterráneas (Pre – Registro sísmico) y los (Post – Registro sísmico).

5.4.2 Análisis de resultados aguas subterráneas

La composición química natural de las aguas subterráneas es el resultado de varios procesos como evaporación/concentración de las sales atmosféricas del agua lluvia e interacción del agua con los minerales del suelo que van incorporando sales solubles presentes en el suelo como cloruros, nitratos y sulfatos de metales alcalinos y alcalinotérreos; esta composición puede verse modificada por causas naturales, como el clima, la temperatura, el tipo de terreno a través del cual se desplaza el agua subterránea, el tiempo de residencia del agua en el acuífero, y el aporte de gases reactivos, principalmente O₂ y CO₂ (produce la solubilización de carbonatos); y por factores antrópicos que puede afectar la composición química del agua que se infiltra y la de la

zona de recarga, lo cual modifica la temperatura, e introduce solutos (sales, nitratos, etc.) y sustancias diversas (hidrocarburos, plaguicidas, disolventes halogenados, etc.), en el terreno y en el agua, que puede suponer una degradación importante de las características naturales.

Además, hay que sumar procesos modificadores como son la precipitación química, el intercambio iónico (principalmente catiónico) y las reacciones de reducción-oxidación. Estos procesos pueden ser intensos cuando el agua se ve desplazada por otra de composición química diferente o cuando el terreno contiene materia orgánica.

En general, para los iones más abundantes, presentes a concentraciones entre algunas unidades y algunas centenas de ppm, se observa la siguiente ordenación para cationes: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{K}^{+}$; los aniones se presentan en el siguiente orden: $\text{HCO}_3^{-} > \text{Cl}^{-} > \text{SO}_4^{2-}$.

El análisis fisicoquímico fue realizado por el laboratorio CHIMICAL LABORATORY SAS en la fase pre-registro y por el laboratorio AMBIELAB SAS en la fase post-registro, donde se incluyeron los parámetros de pH, conductividad eléctrica, aniones y cationes (Na^{+} , K^{+} , Mg^{++} , Ca^{++} , Fe^{++} , $\text{SO}_4^{=}$, Cl^{-} , NO_3^{-} , $\text{CO}_3^{=}$, HCO_3^{-}).

Los datos procesados de la información obtenida por los laboratorios referidos nos permiten determinar las características químicas de las aguas subterráneas. A continuación, se presentarán mediante diagramas hidroquímicos el carácter de un agua o determinar las posibles mezclas de agua subterránea.

En la Tabla 20 y la Tabla 21 se presentan los valores de los porcentajes de los iones mayores obtenidos Pre - registro sísmico y Post - registro sísmico, para cada uno de los puntos de interés hidrogeológico donde se llevaron a cabo el monitoreo fisicoquímico.

Tabla 20. Porcentaje de los iones mayores considerados para los puntos muestreados en la primera campaña y clasificación del tipo de facie (Pre - registro sísmico)

IONES	PRE NA-09	PRE NA-01	PRE PZ-23	PRE PZ-03	PRE PZ-31	PRE PZ-27	PRE-AL01	PRE AL-08	PRE-AL100	PRE AL-14
Ca ²⁺	72.08	41.24	37.64	19.23	27.99	14.24	42.53	40.45	31.81	42.76
Mg ²⁺	3.43	9.02	5.97	4.61	7.60	4.23	4.63	11.71	6.43	10.47
Na ⁺	21.82	41.37	52.31	74.37	63.81	80.73	49.10	42.55	58.30	42.76
K ⁺	2.66	8.38	4.08	1.80	0.60	0.80	3.74	5.29	3.47	4.01
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
HCO ₃ ⁻	0.96	4.01	0.76	0.45	0.13	0.14	2.55	1.11	0.89	2.01
CO ₃ ⁻	78.63	27.88	76.33	79.64	48.90	47.37	18.80	29.15	76.20	40.78
Cl ⁻	10.52	33.71	14.35	15.51	22.73	16.49	56.13	59.42	15.30	38.23
SO ₄ ⁻	8.36	29.04	6.77	3.60	27.98	35.78	18.50	8.28	6.29	15.33
NO ₃ ⁻	1.53	5.36	1.79	0.79	0.26	0.22	4.03	2.03	1.32	3.65
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Nota. Elaboración Propia, 2022

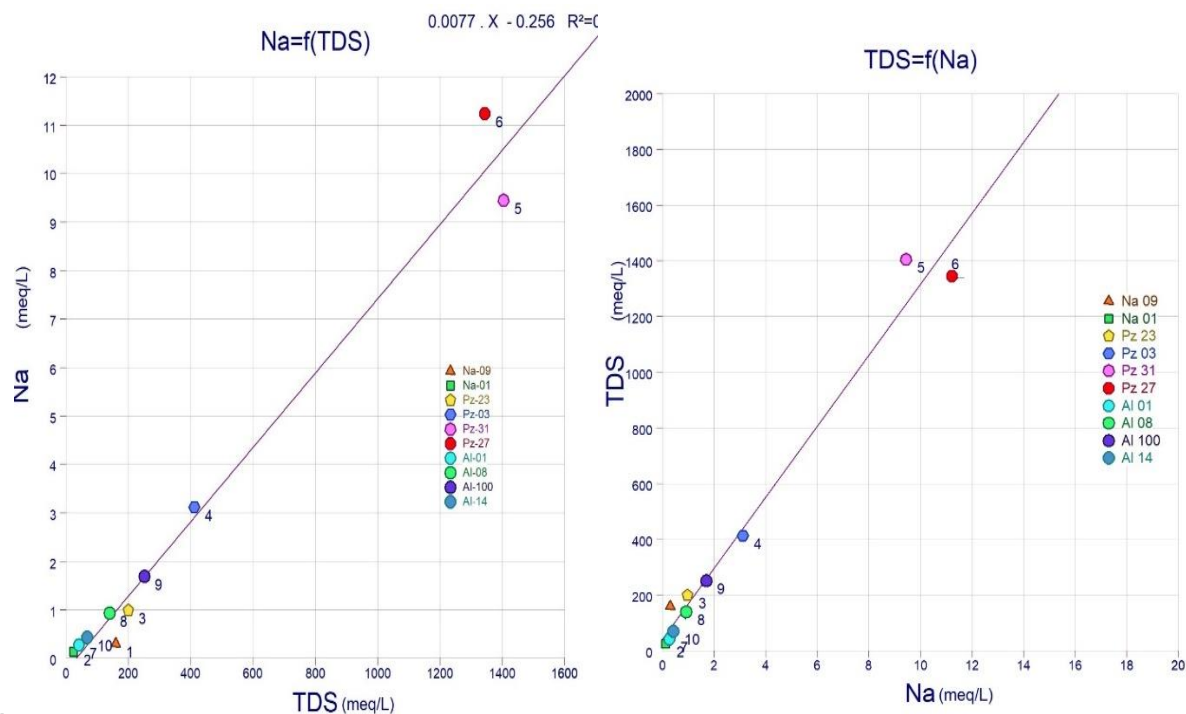
Tabla 21. Porcentaje de los iones mayores considerados para los puntos muestreados en la segunda campaña y clasificación del tipo de facie (Post - registro sísmico)

IONES	PRE NA-09	PRE NA-01	PRE PZ-23	PRE PZ-03	PRE PZ-31	PRE PZ-27	PRE-AL01	PRE AL-08	PRE-AL100	PRE AL-14
Ca ²⁺	72.08	40.13	37.94	18.89	27.37	14.02	46.10	40.30	32.18	42.03
Mg ²⁺	3.45	6.32	6.60	4.19	6.66	3.64	3.99	11.43	5.60	9.21
Na ⁺	22.14	47.24	51.75	75.35	65.51	81.70	47.52	43.04	59.24	45.33
K ⁺	2.33	6.32	3.72	1.57	0.45	0.65	2.39	5.23	2.98	3.44
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
HCO ₃ ⁻	0.67	2.49	0.55	0.28	0.07	0.07	1.63	0.66	0.47	1.31
CO ₃ ⁻	80.31	29.99	79.89	81.00	50.46	50.82	18.20	27.92	77.37	41.91
Cl ⁻	10.06	34.31	12.17	15.00	21.65	15.47	58.38	62.60	15.01	39.29
SO ₄ ⁻	7.62	28.24	6.28	3.17	27.68	33.49	18.53	7.50	6.22	14.88
NO ₃ ⁻	1.34	4.97	1.11	0.56	0.14	0.15	3.26	1.32	0.94	2.62
TOTAL	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Nota. Elaboración Propia, 2022

En la Figura 23 se muestra la línea de tendencia de la presencia de aniones y cationes en las muestras de agua subterránea del área del programa sísmico 3D.

Figura 23. Línea de tendencia de los aniones y cationes de la primera y segunda campaña de muestreo en campo



Fuente: Elaboración propia, 2022

(Jalali, 2009) , indica que para aguas subterráneas donde la composición química es controlada por intercambio catiónico, el valor de la pendiente de la recta a la que se alinean los puntos tiende a ser igual a 1. De esta forma, se puede concluir que existe un decaimiento de la relación $Ca^{+2}+Mg^{+2}$, en función de un aumento progresivo de la concentración de Na^{+} , asociado a procesos de intercambio iónico entre el medio poroso y el agua de los acuíferos.

5.4.2.1 Diagrama de Piper

En las Figura 24- Figura 25, se muestran los resultados obtenidos respecto al diagrama Piper para las dos campañas de campo (pre y pos registro sísmico). Las muestras de agua

subterránea, PRE NA-01, PRE NA-09, PRE PZ-23 y PRE AL-14, se ubican en zona 5, las cuales tienen dureza por carbonatos, son aguas alcalino térreos. La muestra de agua subterránea PRE PZ-03, se presenta en la zona 8, la cual tiene dureza por carbonatos, el agua tiene bajo contenido de sólidos disueltos (Peso total de componentes minerales disueltos en una muestra de agua por unidad de volumen o peso) (agua dulce). Las muestras de agua subterránea, PRE AL-01, PRE AL-08, PRE PZ-31, PRE PZ-23 y PRE AL-100, se ubican en zona 9, lo que permite inferir que están en una zona de mezcla.

Figura 24. Diagrama Piper para los análisis de laboratorio de la primera campaña de muestreo en campo

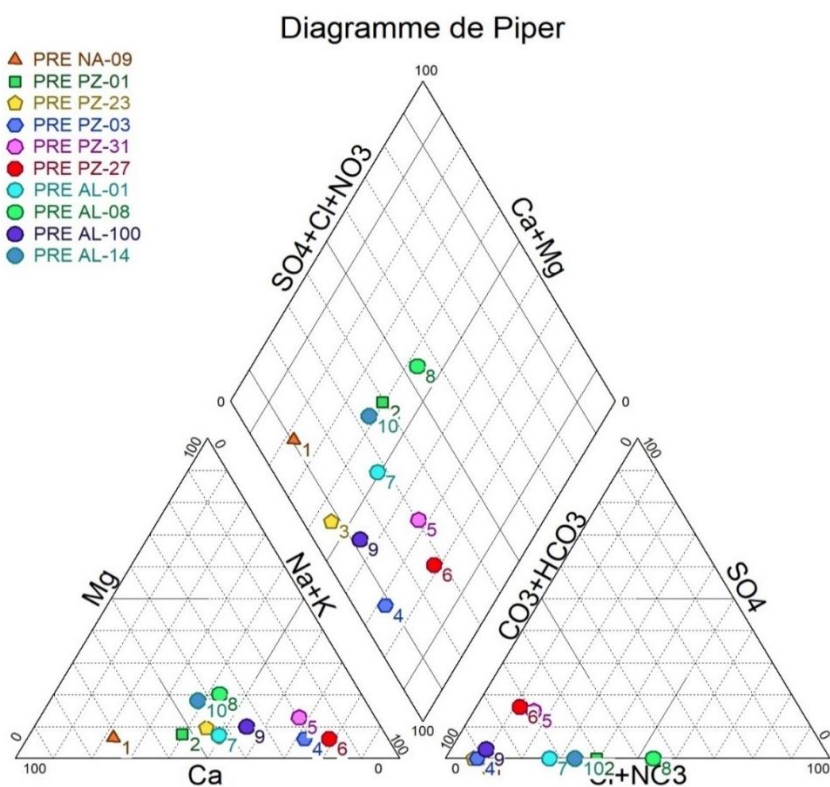
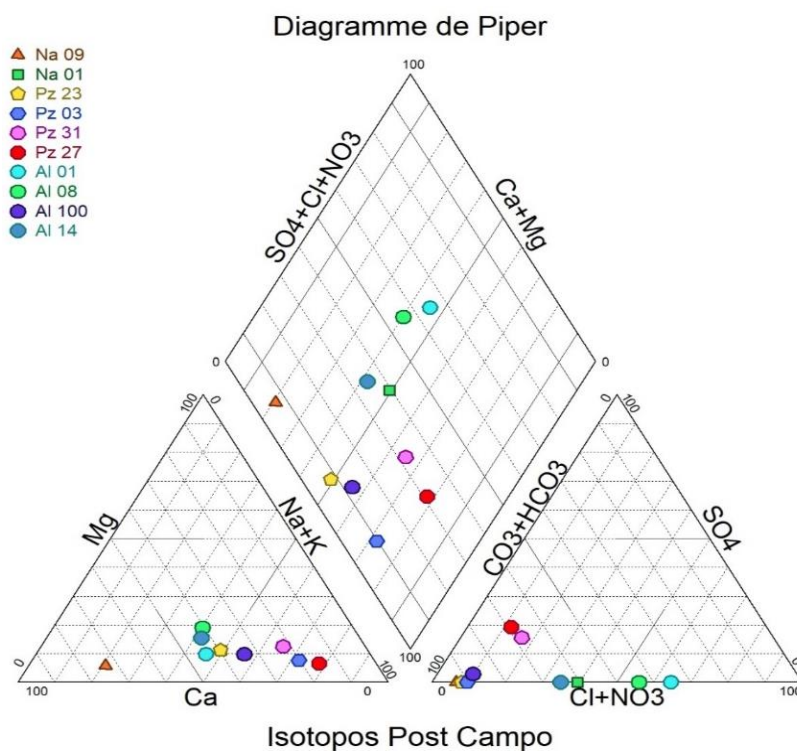


Figura 25. Diagrama Piper para la segunda campaña de muestreo fisicoquímico

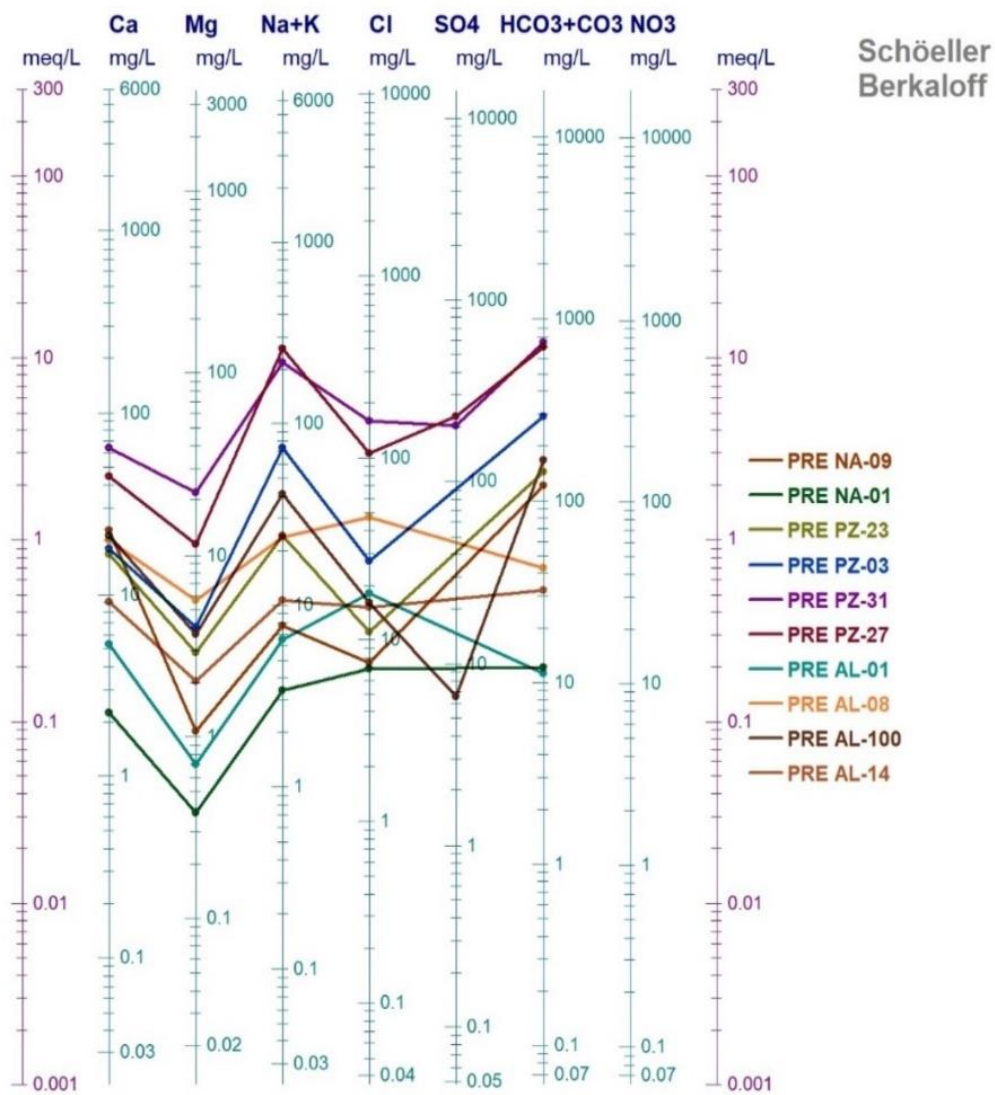


Nota. Elaboración Propia, 2022

5.4.2.2 Diagrama de Schöeller

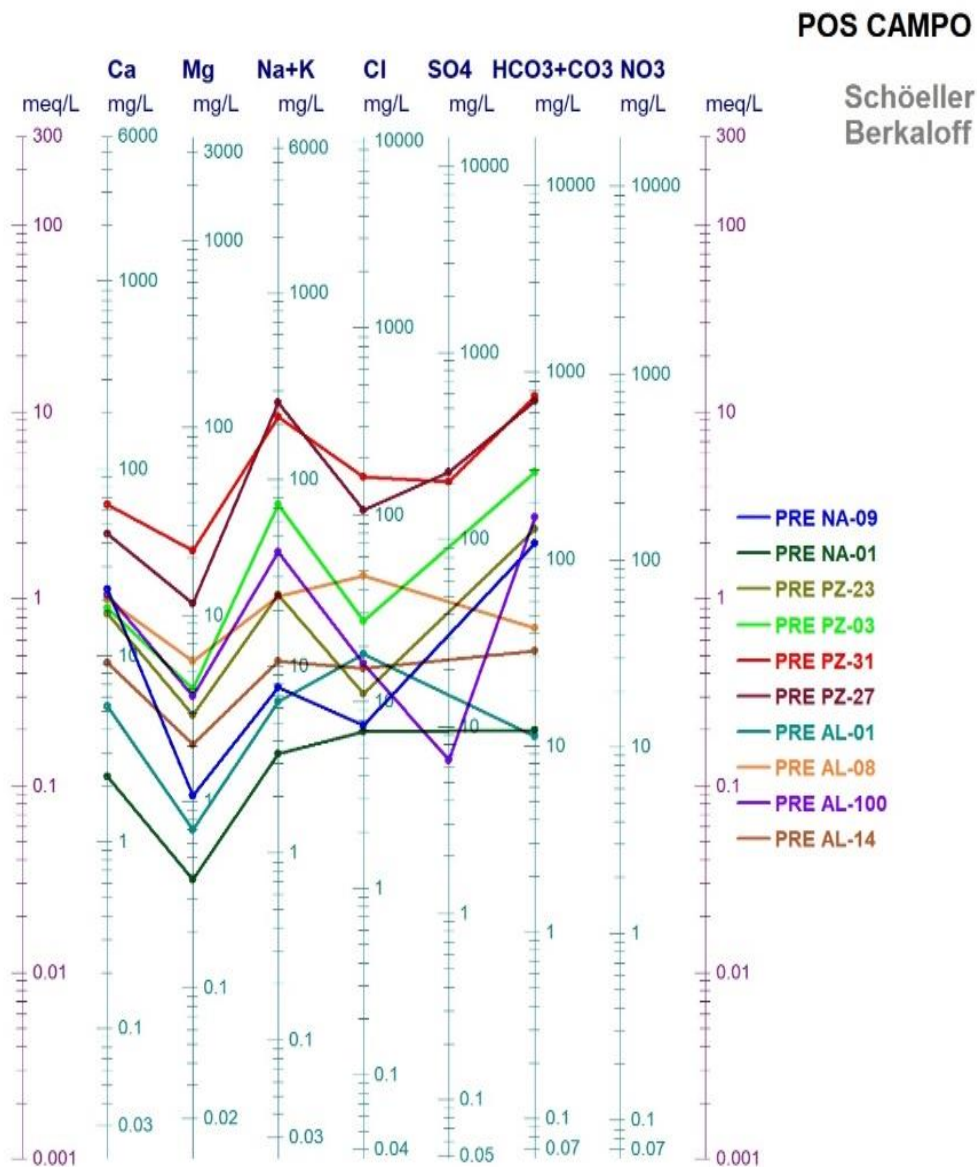
Es importante hacer referencia que en las campañas pre y pos registros sísmicos, las variaciones en los parámetros analizados que caracteriza el tipo de agua, fueron mínimos dando como resultado unas graficas muy parecidas. En la interpretación del diagrama de Schöeller se representan aguas diluidas (PRE PZ-03, PRE PZ-23, PRE PZ-27, PRE PZ-31, PRE NA-09 y PRE AL-100), con características de aguas subterráneas de mezcla y muestras de aguas subterráneas jóvenes (PRE NA-01, PRE AL-01, PRE AL-08 y PRE AL-08). En la Figura 26 y en la Figura 27, se muestra la interpretación del diagrama de Schöeller para las dos campañas.

Figura 26. Interpretación del diagrama Schoeller para los tipos de agua subterránea caracterizados la primera y segunda campaña.



Nota. Elaboración Propia, 2022

Figura 27. Interpretación del diagrama Schöeller para los tipos de agua subterránea caracterizados la segunda campaña



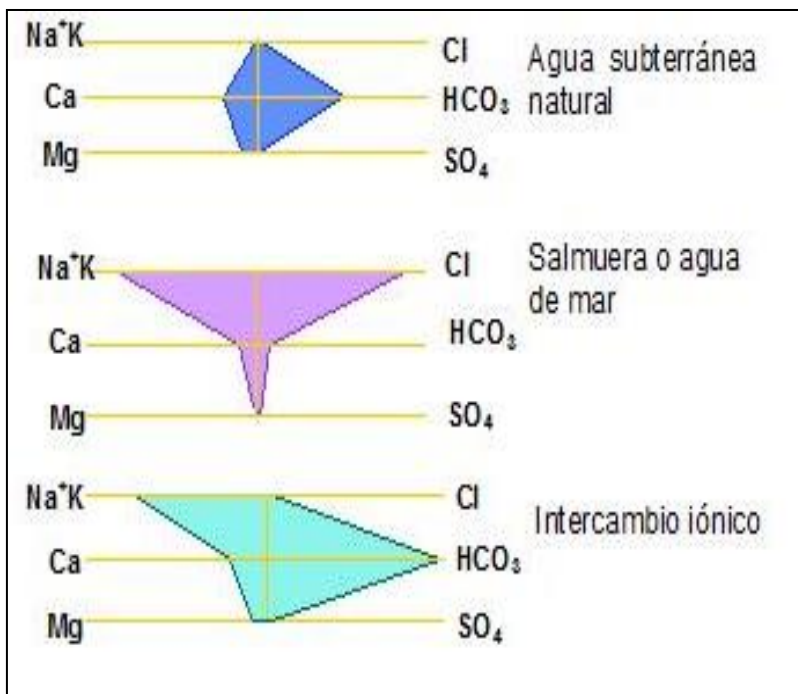
Nota. Elaboración Propia, 2022

5.4.2.3 Diagramas Stiff

En la Figura 28, se muestra las interpretaciones generales del diagrama de Stiff que caracteriza varios tipos de agua, donde se puede visualizar los diferentes tipos de agua (cada

una con una configuración particular) y, al mismo tiempo, da una idea del grado de mineralización (ancho de la gráfica).

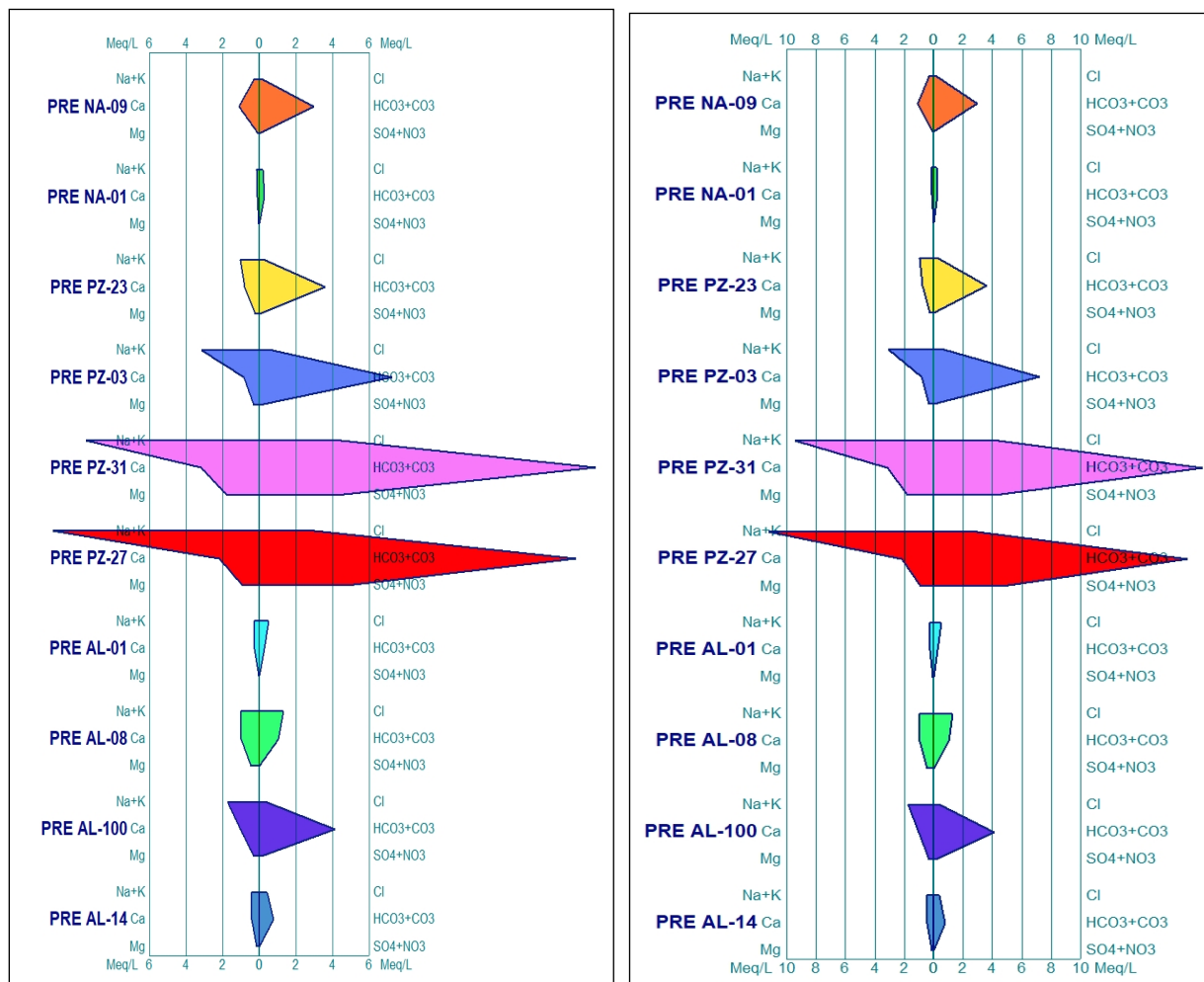
Figura 28. Interpretación del diagrama Stiff para algunos tipos de agua



Nota. <https://aguaysig.com/los-diagramas-mas-usados-para-la-interpretacion-de-analisis-hidroquimicos/>

Los diagramas Stiff obtenidos en cada punto muestreado en la primera y segunda campaña, se pueden observar en la Figura 29. A nivel general el comportamiento en las dos campañas es muy similar en los puntos de agua subterránea muestreada; los puntos PRE NA-01, PRE AL-01, PRE AL-08 y PRE AL-08 tienen agua natural con poca ionización, donde se infiere un bajo tránsito con recarga local; los puntos PRE PZ-23, PRE NA-09 y PRE AL-100 tienen comportamiento típico de agua subterránea natural, con una ionización baja y posiblemente un tiempo de residencia bajo con un grado de ionización bajo a intermedio; para el caso de los puntos PRE PZ-03, PRE PZ-27 y PRE PZ-31 se aprecia una ionización media y la salinización del agua, posiblemente un tiempo de residencia medio.

Figura 29. Diagramas Stiff obtenidos para la primera y segunda campaña de muestreo geoquímico



Nota. Elaboración Propia, 2022

5.4.2.4 Diagramas de Gibbs

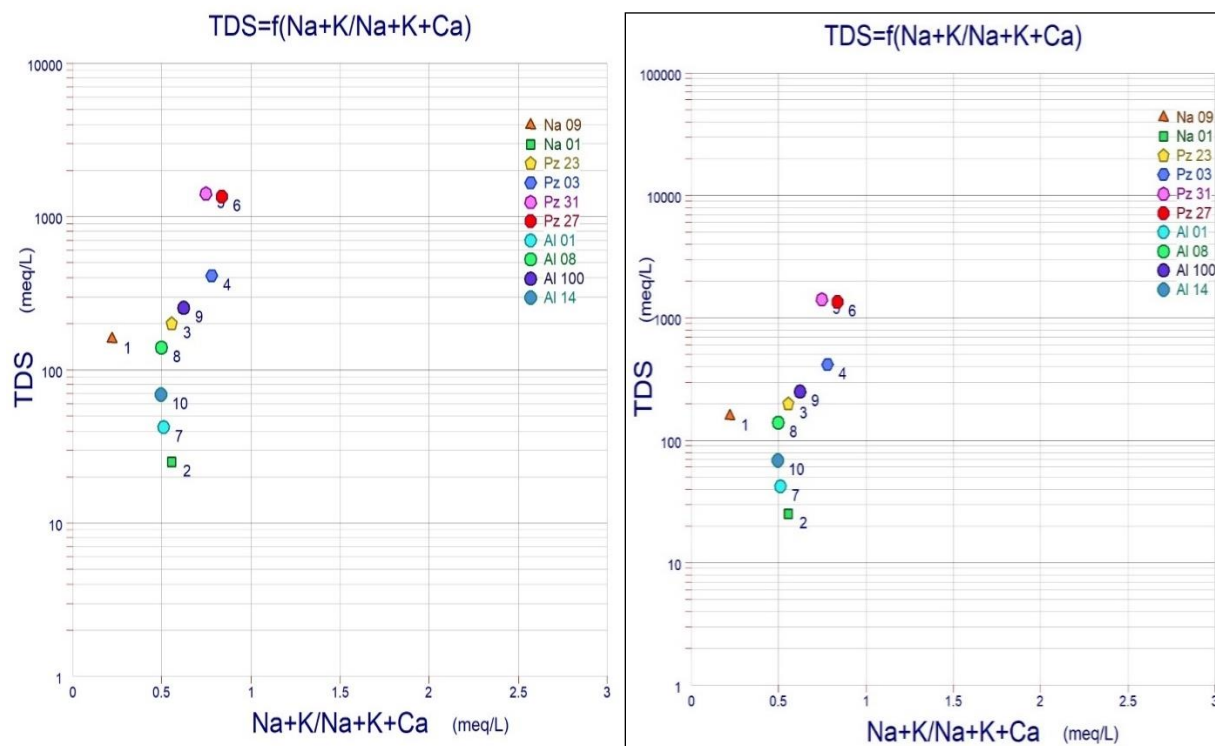
En el diagrama de Gibbs se grafica la concentración de sólidos disueltos totales (eje y) en función de la relación:

$$\frac{Na^+ + K^+}{Na^+ + K^+ + Ca^{+2}} \quad 0 \quad \frac{Cl^-}{Cl^- + HCO_3^-}$$

Se caracteriza por poseer tres zonas asociadas a los procesos de evaporación, interacción agua-roca y precipitación atmosférica.

Según el diagrama de Gibbs, las aguas subterráneas del área de programa sísmico se caracterizan por presentar aguas naturales con poca ionización, como se aprecia en los puntos PRE NA-01, PRE AL-01, PRE AL-08 y PRE AL-08; aguas subterráneas con una dilución baja y posiblemente un tiempo de residencia bajo con un grado de ionización bajo a intermedio presente en los puntos PRE PZ-23, PRE NA-09 y PRE AL-100; aguas subterráneas con un grado de ionización media y salinización del agua, posiblemente un tiempo de residencia medio presente en los puntos PRE PZ-03, PRE PZ-27 y PRE PZ-31 (Figura 30).

Figura 30. Diagramas de Gibbs para dispersión de aniones y cationes obtenidos para la primera y segunda campaña de muestreo geoquímico.



Nota. Elaboración Propia, 2022

5.4.2.5 Calidad de aguas:

- **Temperatura y pH.** En los puntos de medición subterránea de los pozos, aljibes y manantiales de muestreo, se conserva un perfil de temperatura, que varía entre punto y punto; con un rango de 23.2 a 32.4°C, dentro de la norma para consumo doméstico.
- Los resultados de pH presentaron valores neutros a un poco ácidos dentro del rango de 6.2 a 7.8, por el tipo de aguas que los alimentan, cumplen con la normatividad ambiental vigente para todos los usos según el Decreto 1076/2016 y para consumo directo que admite un mínimo de 6.5, a excepción del agua tomada en el manantial PRE NA 01 (6.4) y los aljibes PRE AL 08 Y PRE AL 14, con valores de 6.3 y 6.2.
- **Oxígeno Disuelto y Saturación de Oxígeno.** En los pozos, aljibes y manantiales se muestran niveles de hipoxia, con OD de 0.9 a 3.1 mg O₂/l, aunque estos valores son característicos de aguas subterráneas ya que no tienen intercambio gaseoso con el aire y los que presentaron mejores niveles es porque son con más frecuencia utilizados y removidas sus aguas.
- **Conductividad.** Los valores de conductividad de las aguas subterráneas naturales varían considerablemente, relacionado con el contenido iónico total del agua; valores normales en aguas dulces oscilan entre 100 y 2000 µS/cm.
- Para estas aguas subterráneas, el pozo PRE PZ-27 mostró el valor de conductividad más alto, 1270 µS/cm, resultado relacionado con un mayor contenido iónico y fue donde se observó que el agua sedimenta rápidamente con un color rojizo y se aprecia que la tubería en poco tiempo acumula en sus paredes óxidos; mientras que los otros pozos presentan valores más bajos entre 120 y 1210 µS/cm. Estos resultados cumplen con la norma para consumo directo del agua.
- **Coliformes y Huevos de Helminto.** De acuerdo con los análisis de laboratorio, se encontraron valores de coliformes totales, fecales y E. Coli que confirma la contaminación fecal de las aguas y que pueden causar enfermedades si se consumen sin hacer tratamiento, según lo establece la R2115/2007, art. 11, ninguna muestra de agua para consumo humano debe contener E. Coli. Los pozos, aljibes y manantiales muestran contenido de coliformes totales altos con valores de 748000 a 8664000 NMP/100 ml de

coliformes totales y valores de coliformes termotolerantes (fecales) de <1 a 1295 NMP/100 ml, que les da un riesgo medio a alto. La cantidad de coliformes totales se encuentran por encima de los límites máximos permisibles establecidos en el D1076/2015 para los diferentes usos y que requieren tratamiento previo, para consumo directo no cumplen (R2115/2007), la cual no admite la presencia de ninguno de estos microorganismos, por lo que tienen un riesgo alto.

- **Grasas, Aceites e Hidrocarburos.** Se encontraron grasas y aceites en los pozos, aljibes y manantiales muestreados con valores < 0.9 mg/l, por lo que se presenta contaminación importante por grasas y aceites.
- **Sólidos Totales y Suspendidos Totales.** Se reportó una concentración de sólidos suspendidos totales en los pozos, aljibes y manantiales muestreados con valores de < 10 mg/l, lo cual indica que los aportes de origen natural debido al arrastre por precipitación son importantes, al igual que la presencia de materia orgánica en el agua por erosión del suelo. Es de resaltar que el D1076/2015, no tiene especificado un límite máximo permisible de sólidos en el agua para ningún uso, pero que para valores por encima de 340 mg/l son calificados con muy alta contaminación por sólidos suspendidos, además que afecta la potabilidad del agua.
- **Compuestos de Nitrógeno.** Para las aguas subterráneas se detectaron nitratos en los pozos profundos muestreados, en un rango muy bajo de <1 a 1.02 mg NO₃/l; valores que cumplen las normas establecidas tanto en el D1076/2016 para consumo humano con tratamiento convencional o desinfección, como por la R2115/2007 para consumo directo. Los demás compuestos, es decir, nitritos, amonio y nitrógeno total no fueron detectados.
- **Acidez, Alcalinidad y Bicarbonatos.** Los resultados obtenidos para los puntos de monitoreo registran valores de bicarbonatos menores al límite de detección de 6 mg NaCO₃/l y menores a 20 mg/l que las hace muy sensible a la contaminación. Todos cumplen con el valor máximo establecido por la R2115/2007 para consumo del agua directo.
- **Sílice.** El valor más elevado de sílice se presenta en el pozo PRE PZ 23 con un valor de 17.1 mg/l, seguido del pozo PRE PZ 27 con 16.5 mg/l, relacionado con la alcalinidad. Para este parámetro no se tiene norma.

- **Fósforo Total y Fosfatos.** Se reportó concentraciones de fósforo total detectables en los pozos, aljibes y manantiales muestreados hasta 0.25 mg P/l, lo cual indica que existe un proceso importante de eutrofización y de descomposición de materia orgánica. Respecto a los fosfatos, en los pozos se detectaron valores hasta de 0.099 mg PO₄/l que está por encima de la norma establecida para agua de consumo directo en la R2115/2007 y que pueden provenir de actividades domésticas. Para los compuestos de fósforo no se tienen establecidos límites máximos permisibles en aguas crudas (D1076/2016).
- **Cloruros.** Los valores de cloruros para los pozos de muestreo están entre 12.8 y 13.8 mg Cl/l para los puntos de agua PRE NA-09, PRE NA-01, PRE PZ-31, PRE PZ-27, PRE AL-08 y PRE AL-100, mientras que para los puntos PRE PZ-23, PRE PZ-03, PRE AL-01 y PRE AL-14, está por debajo del límite de detección de 9,9 mg Cl/l; todos los niveles cumplen la normatividad vigente y son característicos de agua dulce.
- **Sodio y Potasio.** Los valores de potasio para las aguas subterráneas estuvieron un rango de 0.523 a 0.914 mg K/l; mientras que el sodio se encuentra en un rango más alto con valores de 2.90 y 7.65 mg Na/l. Las concentraciones encontradas de estos dos elementos son características de aguas subterráneas.
- **Magnesio y calcio.** Las fuentes de agua subterránea evaluadas tienen contenidos de calcio y magnesio característicos de las aguas superficiales que las alimentan, de 0.17 a 2.01 mg Ca/l y 0.12 a 1.4 mg Mg/l. Estos valores son característicos de aguas blandas, además están por debajo de la norma para consumo directo.
- **Dureza Total.** Se tiene durezas que varían de <5 a 272 mg CaCO₃/l que clasifica el agua como dura correspondiente a altas concentraciones de calcio y magnesio. La R2115/2007 establece un límite máximo permisible para este parámetro de 300 mg/l que se cumple en los puntos de agua muestreados.
- **Sulfatos.** En las aguas subterráneas de los pozos, los sulfatos estuvieron por debajo de 5 mg SO₄/l, estos valores son muy inferiores al límite máximo permisible por la normatividad vigente para consumo humano.

Para concretar la caracterización Hidrogeoquímica del proyecto, se seleccionaron de los puntos de agua subterránea inventariada 10 muestras de agua, de las cuales se les realizó

análisis de los parámetros físico - químicos y bacteriológicos para las dos etapas un antes y un después de la prospección sísmica 3D, para clasificar estas aguas a partir de las concentraciones de los iones y cationes (facies hidrogeoquímicas) y para determinar la calidad del agua; dado que la población del área del proyecto se abastece de agua subterránea para consumo humano y para las actividades agrícolas y ganaderas. De la caracterización se presentan variaciones mínimas respecto a la calidad del agua lo cual indica que la prospección sísmica no afecto dichos parámetros.

5.5 Caracterización Hidrogeológica Conceptual

La caracterización hidrogeológica conceptual integra las condiciones y características principales de las unidades hidrogeológicas que afloran en el área de estudio. La función principal es mostrar una interpretación aproximada del flujo del agua subterránea, de acuerdo con las características litológicas de los materiales, como: textura, porosidad y permeabilidad, las variaciones en topografía, la red de drenaje, el grado de pendientes del terreno y el potencial hidrogeológico de la zona.

De acuerdo con las características de las unidades hidrogeológicas presentes en el área de estudio, se ha interpretado que el potencial hidrogeológico de estas unidades es alto a moderado, para los acuíferos (A-1 y A-2) correspondientes a los depósitos cuaternarios aluviales (Q2al) y la Formación Betulia (Q1B) respectivamente, que presentan niveles acuíferos multicapa en profundidad.

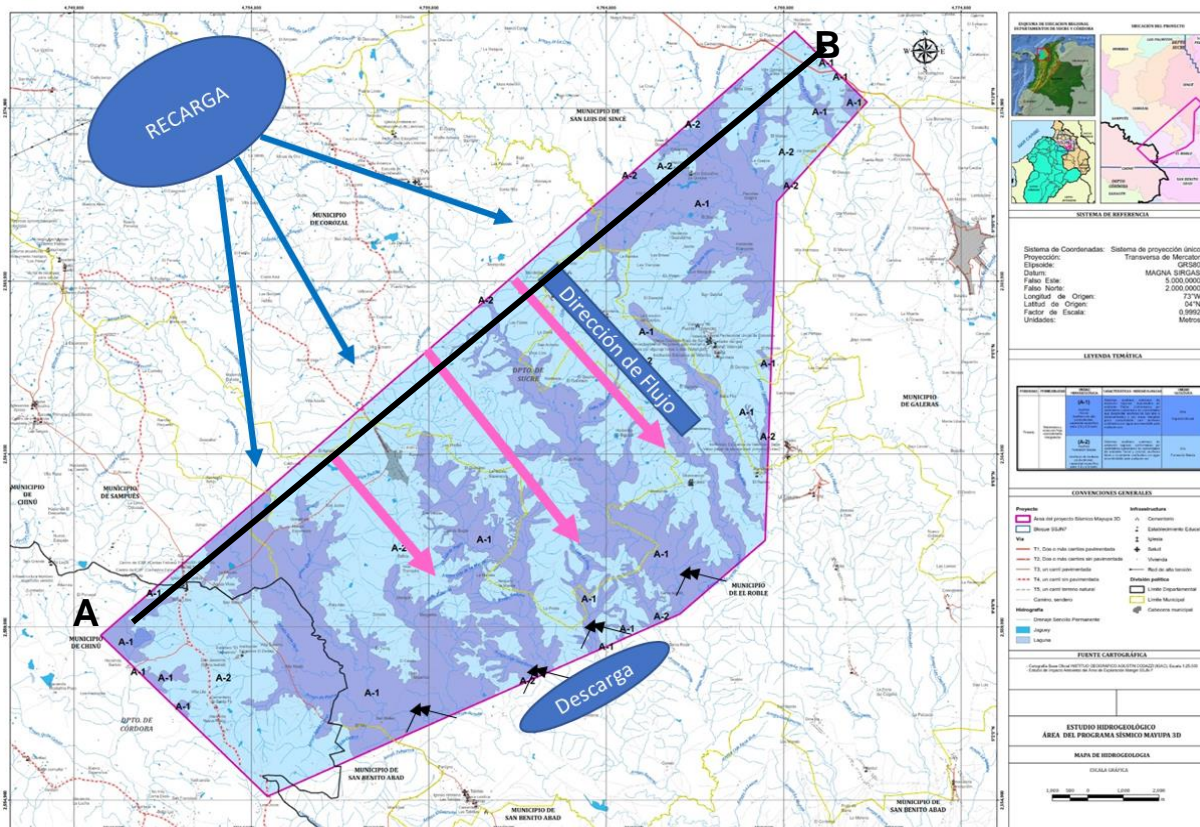
En la Tabla 22, se resumen los diferentes sistemas y unidades acuíferos presentes en el área de estudio, en la Figura 31, el Mapa Hidrogeológico y en la Figura 32, un perfil hidrogeológico.

Tabla 22. Sistemas acuíferos presentes en la zona del programa sísmico

POROSIDAD	PERMEABILIDAD	UNIDAD HIDROGEOLÓGICA	CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS	UNIDAD GEOLÓGICA
A. Sedimentos y rocas con flujo intergranular				
Primaria	Sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular	(A-1) Acuífero Aluvial de alta productividad, capacidad específica entre 2.0 y 5.0 l/s/m.	Sistemas acuíferos continuos de extensión regional, depositados en ambiente fluvial, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados que desarrollan acuíferos de tipo libre a semiconfinados con agua recomendable para cualquier uso.	Q2a Depósito Aluvial
		(A-2) Acuífero Formación Betulia. de mediana productividad, capacidad específica entre 1.0 y 2.0 l/s/m.	Sistemas acuíferos continuos de extensión regional, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente fluvial y coluvial, acuíferos libres y localmente confinados con agua recomendable para cualquier uso.	Q1b Formación Betulia

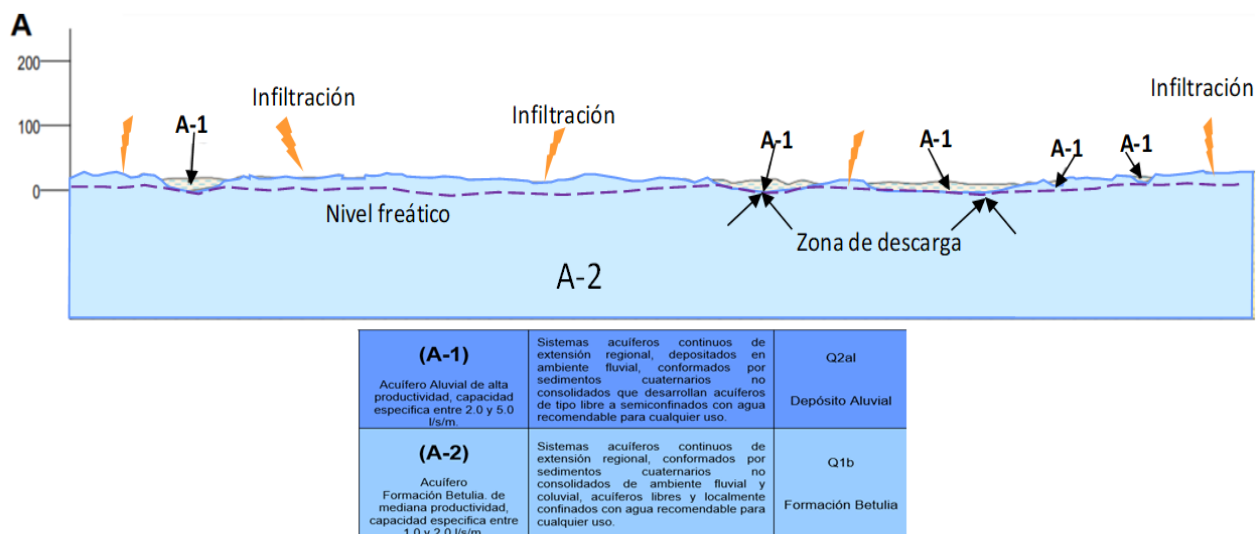
Nota. Elaboración Propia, 2022

Figura 31. Mapa Hidrogeológico



Nota. Elaboración Propia, 2022

Figura 32. Perfil Hidrogeológico



Nota. Elaboración Propia, 2022

El flujo regional se origina en las partes altas y planicies de las laderas y planicies, donde el agua se infiltra a través de los sistemas tectónicos regionales del área, allí se localiza la zona de mayor potencial hidráulico fluyendo de manera vertical a través de las capas hasta alcanzar los niveles acuíferos más profundos, desde donde se moviliza lateralmente siguiendo las estructuras principales y la topografía general de la región.

El flujo local del agua subterránea para el área de estudio presenta una dirección con el flujo regional Noroeste hacia el Sureste (NW-SE), manteniendo la dirección de los drenajes principales.

Las unidades que almacenan agua subterránea en el área se presentan en forma discontinua, para niveles rocosos y depósitos cuaternarios, también se presentan niveles acuíferos en forma plano-paralela su horizontal en acuíferos multicapa de la Formación Betulia; son acuíferos cubiertos semiconfinados, que pueden estar limitados en dirección vertical por capas impermeables de composición arcillosa. La descarga de los acuíferos libres se realiza a través de la red hidrográfica del área mediante una descarga lineal en el borde de laderas y valles.

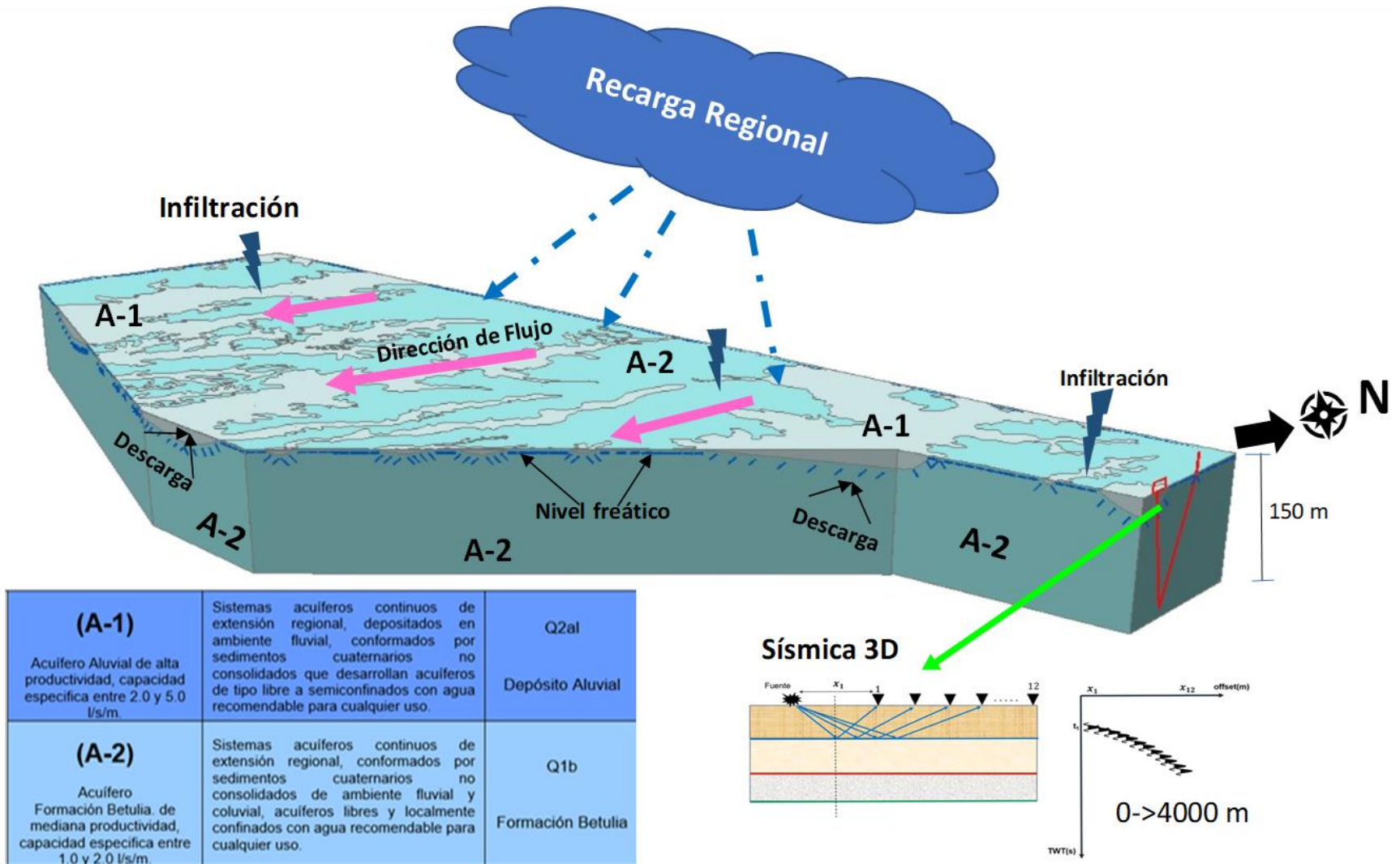
En el Área de Proyecto Sísmico 3D, se presentan dos acuíferos principales; el primer sistema acuífero lo conforman los depósitos cuaternarios aluviales (A-1) y niveles litológicos de la Formación Betulia- Miembro (A-2), conformando una unidad hidrogeológica de tipo libre a semi confinada de extensión local, la dirección de flujo predominante es Noroeste Sureste (NW-SE).

Caracterización hidrogeológica conceptual.

Dado que la geología del área del proyecto se simplifica a dos unidades cuaternarias representadas por sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente fluvial (Q2a1) y al depósito de la Fm Betulia (Q1b) compuestos por litoarenitas conglomeráticas, poco litificadas y lodolitas arenosas varicoloreados, con estructuras lenticulares correspondientes a depósitos de canal, y conglomerados arenosos polimignitos, que varían de gránulos a guijos de forma subangulosa a redondeados, litología que constituye una unidad hidrogeológica de muy buen potencial.

Así mismo una vez determinados los modelos de las caracterizaciones geológica, hidrológica, hidráulica e hidrogeoquímica, se integran para conformar el modelo de la caracterización hidrogeológica conceptual **Figura 33**, de donde se observa que la prospección sísmica no produce cambios significativos que alteren las condiciones iniciales o naturales del acuífero de la Fm Betulia (Q1b) intervenido por el desarrollo de esta actividad; dado que tanto las pruebas de bombeo como la caracterización hidrogeoquímica dieron muy similares en las dos campañas es decir que las variaciones fueron mínimas. Sin embargo, no se considera como una conclusión definitiva dado que para determinar si hay una alteración o afectación en particular, es necesario hacer seguimiento a cada proyecto sísmico que se desarrolle en el país y luego realizar una clasificación donde se tenga en cuenta las condiciones geológicas, tectónicas hidrológicas, climáticas, en un trascurso de tiempo para llegar a obtener un acercamiento más real de lo que pueda acontecer por la prospección sísmica en el país.

Figura 33. Modelo Hidrogeológico Conceptual



6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

La caracterización hidrogeológica conceptual de este estudio y desarrollada de acuerdo con la metodología propuesta como base de análisis en la definición de posibles afectaciones/impactos asociados a la actividad sísmica, conforma una herramienta fundamental para dar respuesta a las posibles incidencias del desarrollo de la prospección sísmica en la región y en el país donde se aplique este método de prospección del subsuelo.

Dentro del marco de las conclusiones es importante resaltar que los resultados del análisis de la información con la cual se desarrolla la caracterización hidrogeológica se enmarcan en el periodo de tiempo de análisis comparativo en un escenario pre y pos-actividad sísmica 3D, sumado a que la primera campaña se realizó en una época de verano mientras que la campaña pos registro fue después de una temporada de lluvia.

La validez en este estudio solo está analizado para un ambiente geológico en particular (depósitos cuaternarios de gran profundidad) y a los materiales que lo conforman (arenas, gravas y arcillas) además es importante notar que en el área evaluada a nivel local no presenta actividad tectónica o estructural que pueda incidir o interactuar con la prospección sísmica por lo que no es homologable a otros escenarios que difieran en el ambiente y litologías presentes.

- **Caracterización geológica y Geofísica**

Mediante la caracterización Geológica, y la prospección geofísica (SEV y tomografías) se identificaron las unidades geológicas, litológicas y estructuras geológicas, del área del proyecto sísmico donde afloran dos unidades cuaternarias el depósito aluvial (Q2a1) y la Formación Betulia (Q1b), además se determinaron las variaciones litológicas verticales del subsuelo identificando 6 zonas de resistividad cuyos espesores varían de 1 a 40 m, correspondientes a depósito aluvial

o niveles litológicos de la Formación Betulia. información que plasmo en un plano geológico, con sus respectivos perfiles y columnas estratigráficas.

Así mismo se determinó la geometría de la Fm Betulia compuestos niveles de arena gravas, limo arenas y arcillas con geometría plani-paralela continua, con contactos gradacionales entre las arenitas y los conglomerados, determinándose como una unidad hidrogeológica.

- **Caracterización hidrológica**

Del inventario de puntos de agua subterránea realizado en la primera campaña de campo se identificaron y georreferenciaron los puntos de agua subterránea (aljibes, pozos y manantiales) presentes en el área de influencia del programa sísmico y mediante la caracterizaron los niveles de agua subterránea se generaron dos mapas de isopiezas, de donde se determino la dirección del flujo de agua el cual es NW al SE.

Según el análisis de los mapas de isopiezas, el resultado para cada una de las campañas realizadas (pre y pos registro), denota que el acuífero de la formación Betulia presenta una dirección del flujo NW a SE cuyo trazado de flujo es paralelo a los drenajes de mayor caudal de la zona. Así mismo se interpreta que la zona de recarga se ubica en el sector noroeste (NW) y la dirección de flujo se dirige hacia el sureste (SE), determinando el comportamiento del agua subterránea en el área del proyecto sísmico.

- **Caracterización Hidráulica**

Mediante la ejecución e interpretación de las 15 pruebas de bombeo a caudal constante y recuperación, realizadas en dos campañas (pre y pos registro sísmico) se terminaron las caracterización hidráulica de las rocas almacenadoras de agua subterránea y la dinámica de la red de flujo.

Las características geohidráulicas (conductividad hidráulica, capacidad específica, transmisividad) de los puntos de agua subterránea para las dos campañas (Pre y Pos registro sísmico) obtenidas en las pruebas de bombeo fueron muy similares. Posiblemente a la geometría del acuífero de la Fm Betulia dado que los espesores de la Formación Betulia y a su composición litológica son uniformes y amplios lo cual da una potencialidad acuífera alta para esta zona hidrogeológica.

En este sentido podemos interpretar que las ondas de desplazamiento generados por los registros sísmicos no causan desplazamiento verticales ni horizontales susceptibles en las unidades hidrogeológicas, que alteren el comportamiento hidráulico del acuífero, concluyendo que si la conductividad hidráulica presenta valores similares en las pruebas de bombeo nos indica de la velocidad de desplazamiento de los fluidos es constante y directamente proporcional a la textura de la litología de las unidades intervenidas en la prospección sísmica.

Por otra parte, se evidencia en las pruebas de bombeo, que en la etapa de recuperación fue más lenta que durante el bombeo, típico de acuíferos semiconfinados o libres, cuando el drenaje diferido no ha cesado.

- **Caracterización Hidrogeoquímica**

A partir de la toma y análisis de los parámetros físico químico de muestras de agua subterránea en puntos de interés, definidos durante el inventario de puntos de agua subterránea (aljibes, pozos y manantiales) se realizó la caracterizar los acuíferos presentes en esta área de estudio.

Los análisis hidrogeoquímicos determinan que en general, se trata de aguas subterráneas con tiempos cortos y medios de residencia, lo que indica que la recarga está localizada cerca al sitio de muestreo.

Las condiciones hidrogeoquímicas del agua muestreada fueron muy similares antes y después de la adquisición del programa sísmico 3D, del análisis se evidencian cambios bajos en el contenido de iones principalmente cloruros (Cl⁻), originado probablemente por la variación en régimen de lluvias, donde se presenta lavado de los iones en la parte superior del suelo.

Se presenta variación en los niveles de agua debido al nivel de precipitación que se presenta durante cada campaña realizada. La primera campaña se ejecutó en época de verano y la segunda se realizó después de una época de fuertes precipitaciones.

- Caracterización Hidrogeológica

La Caracterización Hidrogeológica Conceptual, se realizó integrando las características geológicas estimando su origen, condiciones naturales de flujo, sistema de infiltración en las unidades hidrogeológicas aflorantes, identificando las zonas de recarga, la dirección preferencial del flujo y de esta manera se determinó si existió una afectación en el recurso.

Los acuíferos clasificados como (A-1) y (A-2) asociado a las unidades geológica Cuaternario aluvial (Q2al) y a la Fm Betulia (Q1b) presente en la zona de la prospección sísmica, presenta características de acuíferos libres y confinados, de acuerdo con los resultados de las pruebas de bombeo y las condiciones hidrogeológicas identificadas, presenta valores de coeficiente de almacenamiento y conductividad hidráulica que corresponden al rendimiento específico (típico de acuíferos libres y confinados).

- Calidad de agua subterráneas

Respecto a la alteración de la calidad del agua, en los análisis fisicoquímicos tomados antes y después de la actividad sísmica y según la reglamentación vigente (Decreto 1076 de 2015) del Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, la calidad del agua subterránea en el área de ejecución del programa sísmico 3D, se clasifica como agua apta para uso agrícola y apta para

consumo humano y uso doméstico realizando un tratamiento convencional, muestran que estos no se alteran y su estándar son muy similares en las dos campañas de registro sísmico. Por lo tanto, se concluye que existe contaminación de los acuíferos asociada a la detonación de cargas explosivas y por ende afectación de la calidad del recurso hídrico subterráneo.

6.2 Recomendaciones

Es necesario notar que para determinar si la prospección sísmica puede generar afectaciones o alteraciones en los acuíferos se deben hacer estudios hidrogeológicos para cada caso en particular, teniendo en cuenta varias condiciones como: La caracterización física (geología, geomorfología hidrología etc.), la temporalidad un antes y un después del registro sísmico y sobre todo el desarrollo de la actividad de manera responsable teniendo en cuenta el medio ambiente.

Para lograr o llegar a una conclusión respecto a la incidencia de la prospección sísmica mediante el uso de herramientas geofísicas es importante continuar con los monitoreos para tener una base de datos confiable y constante en el tiempo que se pueda validar por la autoridad ambiental.

7. BIBLIOGRAFIA

Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*.

Clavijo Torres, J., & Barrera Olmos, R. (2001). *Geología de las Planchas 44 y 52, Sincelejo y Sahagún. Escala 1:100.000. Memoria Explicativa*. INGEOMINAS.

Cormacarena, & UT, S. A. (2016). *CAPITULO 7 HIDROGEOLOGÍA POMCA RÍO MEDIO Y BAJO ARIARI*.

Custodio, E., & Llamas, M. (1983). Hidrología Subterránea Tomo 1. In *News.Ge*.

Fattorelli, S., & Fernandez, P. (2011). Diseño Hidrológico. In *Wasa-Gn* (Vol. 29, Issue 4).

Guzmán, G., Clavijo, J., & Barrera, R. (1994). Geología Bloque Santero, secciones estratigráficas. In *INGEOMINAS Informe inédito* (p. 135).

Guzmán Ospitia, G., Gómez Londoño, E., & Serrano Suárez, B. E. (2004). *Geología de los Cinturones del Sinú, San Jacinto y Borde Occidental del Valle Inferior del Magdalena Caribe Colombiano. Escala 1: 300.000*.

Ingeominas, & Geotec Ltda. (2003). Geología de los Cinturones Sinú - San Jacinto-Planchas 50 Puerto Escondido, 51 Lórica, 59 Mulatos, 60 Canalete, 61 Montería, 69 Necoclí, 70 San Pedro de Urabá, 71 Planeta Rica, 79 Turbo, 80 Tierralta. In *Ingeominas*.

Jalali, M. (2009). *Caracterización geoquímica de aguas subterráneas en un área agrícola de Razan, Hamadan, Iran*.

Marín, J. P., Bermúdez, H. D., Aguilera, R., Jaramillo, J. M., Rodríguez, J. V., Ruiz, E. C., & Cerón, M. R. (2010). *EVALUACIÓN GEOLÓGICA Y PROSPECTIVIDAD SECTOR SINÚ - URABÁ*.

32, 145–153.

Ochoa, A., & SGC, S. G. C. (2017). *Geología de la Plancha 53 – Magangué a Escala 1: 100.000 Departamentos de Bolívar y Sucre*. INGEOMINAS.

Schmidt, R. (n.d.). *Caracterización Hidrogeológica de la Microcuenca San Esteban en Cantón el Volcan, San Miguel; para determinar su explotación con fines de consumo. Capítulo II. Marco Teórico: Vol. II* (pp. 11–46).

8. ANEXOS

Anexo 1. Registros Geofísicos

- *Sondeos eléctricos Verticales*
- *Tomografías*
- *Mapas de Isoresistividad*

Anexo 2. Inventario de puntos de agua

Anexo 3. Pruebas de bombeo

- *Pruebas de bombeo Pre registro*
- *Pruebas de bombeo Pos registro sísmico*
- *Registro Fotográfico Pruebas de Bombeo*
- *Registro Fotográfico Toma de muestra Análisis Físicoquímico de Aguas Subterráneas*

Anexo 4. Resultados físicoquímicos de aguas subterráneas pre y pos Registro sísmico

Anexo 5. Cartografía