

Revisión de Información Geofísica del Archivo de Prospección y Exploración de Aguas Subterráneas de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga C.D.M.B., como aporte al conocimiento hidrogeológico del municipio de Lebrija, Santander.

Daniela Carolina Bohórquez Tarazona

Trabajo de grado de la modalidad práctica empresarial para optar al título de geóloga

Director:

Leonardo Villamizar Cáceres

Geólogo

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

A DIOS principalmente mi motor y quien permitio realizar este sueño.

*A mi madre Martha Tarazona, por su gran esfuerzo durante toda mi carrera, por su bondad y su
amor infinito, por hacerme la mujer que soy.*

A mi familia Leyla, Elsa, Mariana, Felipe por siempre confiar en mi y apoyar mi trabajo.

Agradecimientos

Al profesor Jaiber Leonardo Villamizar Cáceres, quien es director de este proyecto, por su paciencia, apoyo y comprensión en cada aspecto.

A mis amigos Nico, Hernan, Nata, Denis y Dani por su apoyo en los principales momentos de este proyecto, por ser personas incondicional y por gran ayuda, son personas hermosas en mi vida.

A mi pareja Felipe por apoyarme y guiarme incluso no teniendo conocimiento acerca de los temas de la carrera.

A cada persona que me ayudo con sus opiniones u observaciones para mejorar mi proyecto de grado.

Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Localización	16
3. Antecedentes	17
4. Marco Geológico	18
4.1 Estratigrafía.....	19
4.2 Geología Estructural	24
4.2.1 Geología Estructural	25
5. Potencial Hidrogeológico de la Región	26
6. Metodología	27
6.1 Fase 1: Revisión de Registro S.E.Y.C.A.	28

6.2 Fase 2: Digitalización y espacialización de los SEV de los archivos de prospección y exploración.....	28
6.3 Fase 3: Superposición de SEV con Geología.	29
6.4 Fase 4: Elaboración de mapas de isoresistividad sobre la superposición a la geología de la zona.	29
6.5 Fase 6: Evaluación de resultados para control de calidad.....	31
6.6 Fase 7: Elaboración del Informe Final.....	31
7. Resultados	31
7.1 Inventario de los Expedientes de Prospección y Exploración	31
7.2 Evaluación de la interpretación de los resultados de resistividad existentes en la base de datos	33
7.3 Mapa de localización de sondeos electricos verticales	37
7.4 Mapas de Isoresistividad y Litologías Asociadas	38
7.4.1 Poligono de superposición I.....	39
7.4.2 Poligono de Superposición II.....	41
8. Conclusiones	43
Referencias Bibliograficas	45

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Fuentes de Información	28
Tabla 2. Parametros usados en la construcción de la base de datos.	32
Tabla 3. Valores tipicos de resisitividad.	34
Tabla 4. Correlación geoeléctrica en la formación Girón en el municipio de Lebirja.....	35
Tabla 5. Correlación de Litologicas con respuestas de resistividad	36
Tabla 6. Resistividades asociadas a Litologías.	42

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Localización del municipio de Lebrija, Santander, Zona de estudio.	16
Figura 2. Modificado de las planchas 109 y 120 de Ward et al. (1977).	17
Figura 3. Mapa de unidades litoestratigraficas del municipio de Lebrija a escala 1:100.000.	20
Figura 4. Columna generalizada del Grupo Girón realizada en el Río Lebrija con espesores medidos	23
Figura 5. Mapa Geológico del área de estudio	24
Figura 6. Ubicación de la Provincia Hidrogeológica Cordillera Oriental.	26
Figura 7. Diagrama de flujo de la Metodología de cada una de las diferentes fases a trabajar. ...	27
Figura 8. Histograma de lugares específicos y la cantidad de SEV realizados en cada zona.	33
Figura 9. Sondeos geoelectricos realizados en la formación Girón del municipio de Lebrija. Mapa base: SGC 2011.	37
Figura 10. Mapa de superposición litologica para la creacion de mapas de isoresistividad.	38
Figura 11. Corte geologico del area de estudio.....	39
Figura 12. Mapa de resistividades a una profundidad de 30 metros.....	40
Figura 13. Mapa de resistividades a una profundidad de 30 metros.....	41

Lista de Apéndices

(Ver apéndices adjuntos en el CD y pueden visualizarse en la base de datos de la Biblioteca UIS)

Apéndice A. Inventario geofísico.

Apéndice B. Mapa de ubicaciones de SEV

Apéndice C. Superposición de resistividad a geología.

Apéndice D. Transecta uno. Isoresistividad 30M.

Apéndice E. Transecta dos. Isoresistividad 30M.

Apéndice F. Mapa geológico.

Resumen

Título: Revisión de Información Geofísica del Archivo de Prospección y Exploración de Aguas Subterráneas de la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga C.D.M.B., Como Aporte al Conocimiento Hidrogeológico del Municipio de Lebrija, Santander.*

Autor: Daniela Carolina Bohórquez Tarazona**

Palabras Clave: Resistividad, Prospección Geoelectrica, Aguas Subterraneas, Sondeos Electricos Verticales.

Descripción:

Este trabajo se centra en el aprovechamiento de la información presentada por los usuarios de la Corporación autónoma regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga C.D.M.B. en el proceso de solicitud de prospección y exploración de aguas subterráneas que se encuentra archivada en medio impreso en el área de archivo S.E.Y.C.A. de la C.D.M.B., principalmente Sondeos Eléctricos Verticales- SEV usada mediante una practica empresarial y con previa autorización de dicha entidad, este aprovechamiento se realiza a partir de la digitalización de los archivos impresos a un inventario de información de beneficio geológico, la evaluación de los resultados de las respuestas de resistividad presentadas en cada SEV y su importante uso para la generación una ubicación espacial dentro de la Formación Girón en el municipio de Lebrija, Santander, además del desarrollo de mapas de isoresistividad en concentraciones importantes de frecuencia de solicitudes de explotación de pozos subterráneos y finalmente la correlación de la información geofísica con la geología detallada del área de estudio para generar mas confiabilidad de datos tomados por empresas privadas. Cabe resaltar la importancia de dicho trabajo de modalidad practica empresarial como base informativa tanto a futuros proyectos de pregrado realizados en la Corporación autónoma regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga C.D.M.B. como para el aprovechamiento hídrico del municipio de Lebrija que careceré de este mismo y puede generar un gran impacto social.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Leonardo Villamizar Cáceres, Geólogo.

Abstract

Title: Geophysical Information Review of Prospection and Exploration of Groundwater Provided by C.D.M.B. in Order to Contribute to the Groundwater Information of Lebrija, Santander*

Authors: Daniela Carolina Bohórquez Tarazona**

Keywords: Resistivity, Geoelectric Prospection, Groundwater, Vertical Electrical Surveys.

Description:

This work focuses on the use of the information presented by the users of the regional autonomous Corporation for the Defense of the Bucaramanga Plateau C.D.M.B. in the process of requesting prospecting and exploration of groundwater that is filed on print media in the S.E.Y.C.A. of the CDMB, mainly Vertical Electrical Surveys- SEV used by a business practice and with prior authorization of said entity, this use is made from the digitalization of the printed files to an inventory of geological benefit information, the evaluation of the results of the resistivity responses presented in each SEV and its important use for the generation of a spatial location within the Girón Formation in the municipality of Lebrija, Santander, in addition to the development of iso-resistivity maps in important frequency concentrations of well exploitation requests underground and finally the correlation of geophysical information with the detailed geology of the study area to generate more reliability of data taken by private companies. It is important to highlight the importance of this work of business practice as an information base for both future undergraduate projects carried out at the Regional Autonomous Corporation for the Defense of the Bucaramanga Plateau C.D.M.B. As for the water use of the municipality of Lebrija, I will lack it and can generate a great social impact.

* Bachelor thesis

** Faculty of Physico-Chemical Engineering. Geology Department. Director: Leonardo Villamizar Cáceres, Geologist

Introducción

Son escasas las investigaciones realizadas en la Cordillera Oriental de Colombia sobre el comportamiento hidrogeológico de la Formación Girón, dicha formación de importancia en este proyecto se encuentra en el municipio de Lebrija, Santander, siendo esta moldeada por afluentes permanentes e intermitentes pertenecientes a la microcuenca La Angula. Según Colegial, Gómez, y Rojas (2006), la porosidad de la Formación Girón es casi nula (en la Cuenca Experimental de Río Sucio, en el municipio de Tona, Santander) argumentado en su estudio “Cartografía geológica y caracterización estructural de la subcuenca de la quebrada río Sucio, municipio de Tona, Santander, orientados a definir un modelo hidrogeológico conceptual” Aunque por esfuerzos y actividad tectónica la Formación Girón puede llegar a mostrar porosidad secundaria la cual puede presentar capacidad de infiltración, circulación y almacenamiento de aguas subterráneas en el municipio de Lebrija donde se desarrolla este trabajo.

El municipio de Lebrija en el Departamento de Santander, se presentan problemas para el suministro del recurso hídrico potable a la comunidad por causa de la escasez de agua superficial. Es por esto que la Corporación Autónoma Regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga C.D.M.B. como autoridad ambiental en su área de jurisdicción a través de la Subdirección de Evaluación y Control Ambiental S.E.Y.C.A. plantea mediante la realización de este proyecto iniciar con la fase de organización e integración de la información disponible que ayude a mejorar el conocimiento hidrogeológico.

Haciendo Uso de la información geofísica (estudios geoeléctricos) disponible de manera análoga en S.E.Y.C.A, Se creó una base de datos en archivo .cxl, y posteriormente se superpuso

esta información (SEV) a una cartografía geológica detallada con fin de establecer parámetros de correlación litoestratigrafica con las respuestas de Resistividad de subsuelo.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Organizar la información geofísica del archivo de prospección y exploración de aguas subterráneas de la Corporación Autónoma Regional Para La Defensa De La Meseta De Bucaramanga C.D.M.B, como aporte al conocimiento hidrogeológico del municipio de Lebrija, Santander.

1.2 Objetivos Específicos

- Establecer bajo parametros seleccionados la calidad de informacion de resistividad presente en los expedientes de Prospección y Exploración de pozos profundos para la captación de aguas subterráneas en Lebrija, Santander.
- Localizar los puntos de prospección geofísica asociados a la información encontrada en el inventario geofisico, con el fin de identificar las zonas con mayor concentracion de datos.
- Identificar las unidades de isoresistividad de interés hidrogeológico según los datos de resistividad encontrados en el archivo de propección y exploración de la C.D.M.B. para lograr una interpretacion que genere un aporte a proximos estudios.

2. Localización

La zona seleccionada para el presente proyecto se sitúa en el municipio de Lebrija, Santander .
(Ver Figura 1).

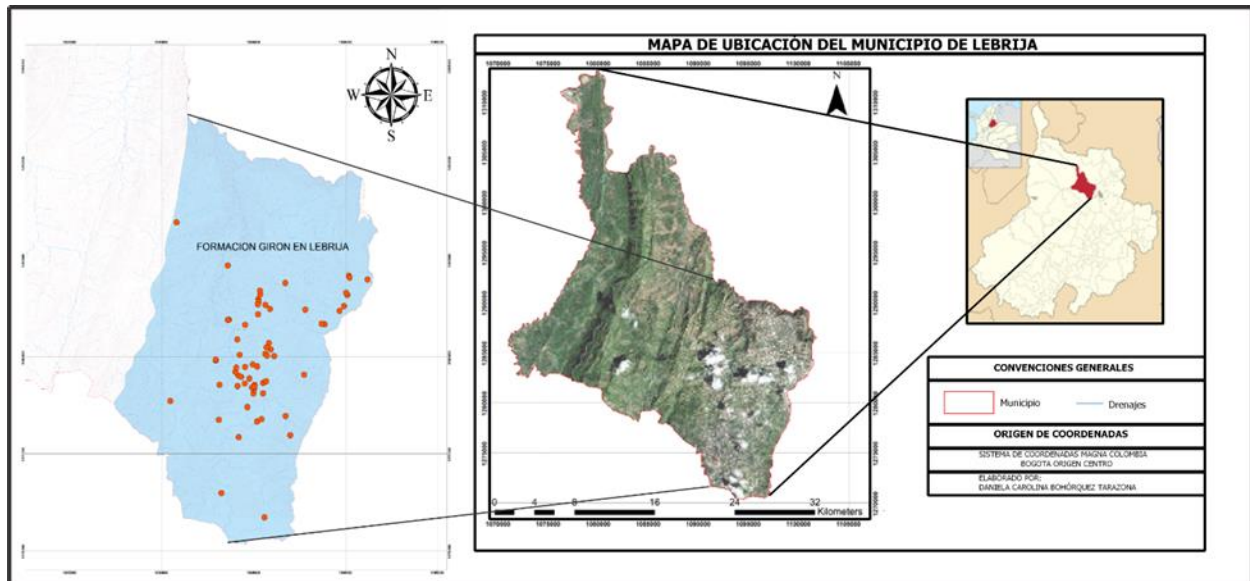


Figura 1. Localización del municipio de Lebrija, Santander, Zona de estudio.

La zona de estudio se encuentra ubicada al occidente de la falla Bucaramanga-Santa Marta y se localiza de acuerdo a la clasificación de cuencas hidrográficas en jurisdicción de la C.D.M.B. en la cuenca Alto Lebrija, subcuenta Lebrija Alto, microcuenca La Angula.

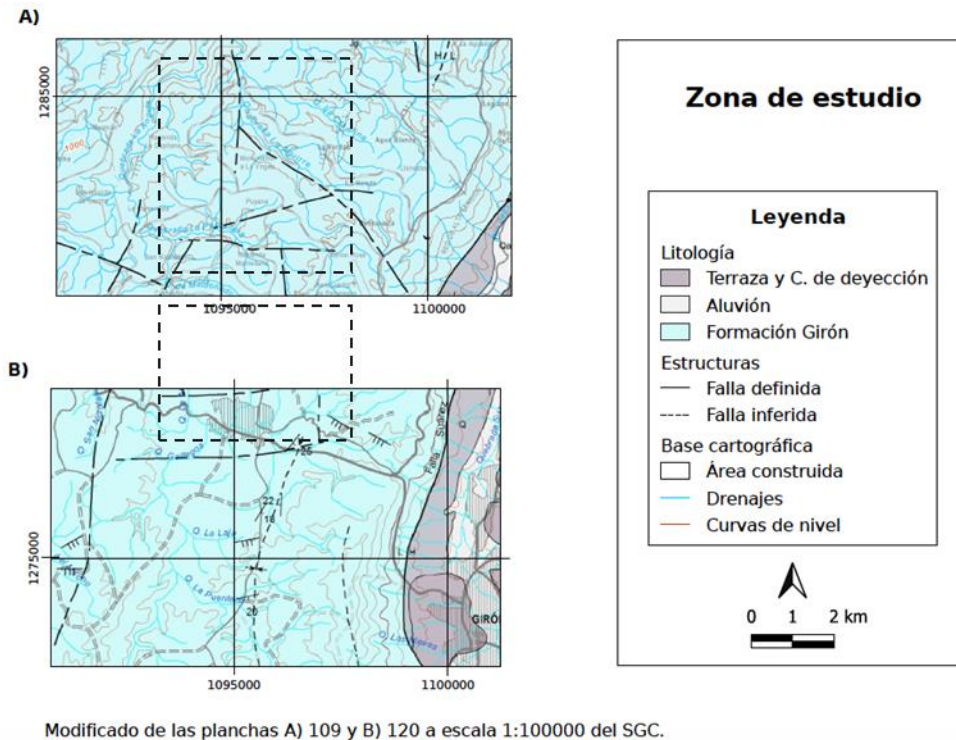


Figura 2. Modificado de las planchas 109 y 120 de Ward et al. (1977).

La zona de estudio se ubica en la plancha geológica del cuadrángulo 109 de Rionegro y 120 de Bucaramanga, ubicada sobre la Formación Girón del Jurásico como se observa en la figura 2.

3. Antecedentes

Actualmente la región de Lebrija cuenta con estudios Hidrogeológicos generales como el Estudio del conocimiento del agua subterránea en la meseta de Bucaramanga. Informe técnico. Desarrollado por Ingeniería de suelos (2002); Estudio geológico geofísico para el área metropolitana de Bucaramanga. Desarrollado por Ingeominas (Bermúdez, y Vásquez, 2004); y el estudio de la Interacción entre los sistemas hidrogeológicos en el macizo de Santander para el

estudio de la recarga e identificación de acuíferos. Un proyecto Colcienciasv desarrollado por el Grupo en predicción y modelamiento hidroclimático; y por último Modelo hidrogeológico básico de Bucaramanga. Desarrollado por Ingeniería de suelos (2002).

Éste proyecto aporta información valiosa que sirva como base de un futuro modelo hidrogeológico conceptual, el cual se efectúa a través de distintos trabajos de grado con modalidad práctica empresarial en la C.D.M.B., en la Subdirección de Evaluación y Control Ambiental (SEYCA) con jurisdicción en el municipio de Lebrija. Tres proyectos de grado para optar por el título de geólogo en la Universidad Indsutria de Santander han sido elaborados con el mismo fin: Guía metodológica para la adquisición de datos geo eléctricos mediante sondeos eléctricos verticales paramétricos sobre la formación Girón en el municipio de Lebrija, Santander, elaborado por Álvarez (2018); Guía metodológica para la resolución de conflictos por el uso de aguas subterráneas y de aguas superficiales a través de herramientas de caracterización geológica, en el caso de estudio de la microcuenca la Angula, municipio de Lebrija departamento de Santander, elaborado por Ayala y Camargo (2018) y Caracterización estructural, como aporte al conocimiento hidrogeológico al Este del municipio de Lebrija, Santander, elaborado por Correa y Fuentes (2019).

4. Marco Geológico

En el municipio de Lebrija Santander afloran unidades sedimentarias de edades desde Triásico al Terciario y depósitos fluvio-lacustres del Holoceno, las cuales fueron depositadas durante eventos transgresivos y regresivos del mar Cretácico (Etayo-serna, 1985), orogenia y procesos

denudacionales (Cooper, Addison, y Alvarez, 1995). Las formaciones en el municipio de Lebrija corresponden a una secuencia sedimentaria meso-cenozoica que descansa discordantemente sobre rocas metamórficas, metasedimentarias y graníticas de edad precámbrica- paleozoica. El área de estudio se encuentra ubicado en el supraterrano de la cordillera oriental (Ingeominas, 1987).

4.1 Estratigrafía

El municipio de Lebrija se encuentra sobre 15 formaciones litológicas de origen sedimentario, secuencia producto de eventos de transgresión y regresión marina, orogenia y procesos denudacionales. Las unidades aflorantes a lo largo del municipio de Lebrija van desde el triásico hasta el terciario exceptuando los recientes depósitos cuaternarios entre los que se incluyen extensos coluviones y planicies aluviales (Alcaldía Municipal de Lebrija, 2003).

Las unidades correspondientes a esta secuencia son: Fm. Bocas, Fm. Jordán, Fm. Girón, Fm. Tambor, Fm. Rosa Blanca, Fm. Tablazo, Fm. Simití, Fm. La Luna, Fm. Umir, Fm. Lisama, Fm. La Paz, Fm. Esmeraldas, Fm. La Mugrosa, Grupo Real, Fm. Colorado, Depósitos Coluviales y Depósitos Aluviales (vease en la figura 3), siendo la formación bocas la más antigua y los depósitos aluviales los más jóvenes o recientes en el área de estudio se encuentran aflorando únicamente rocas que corresponden a la formación Girón.

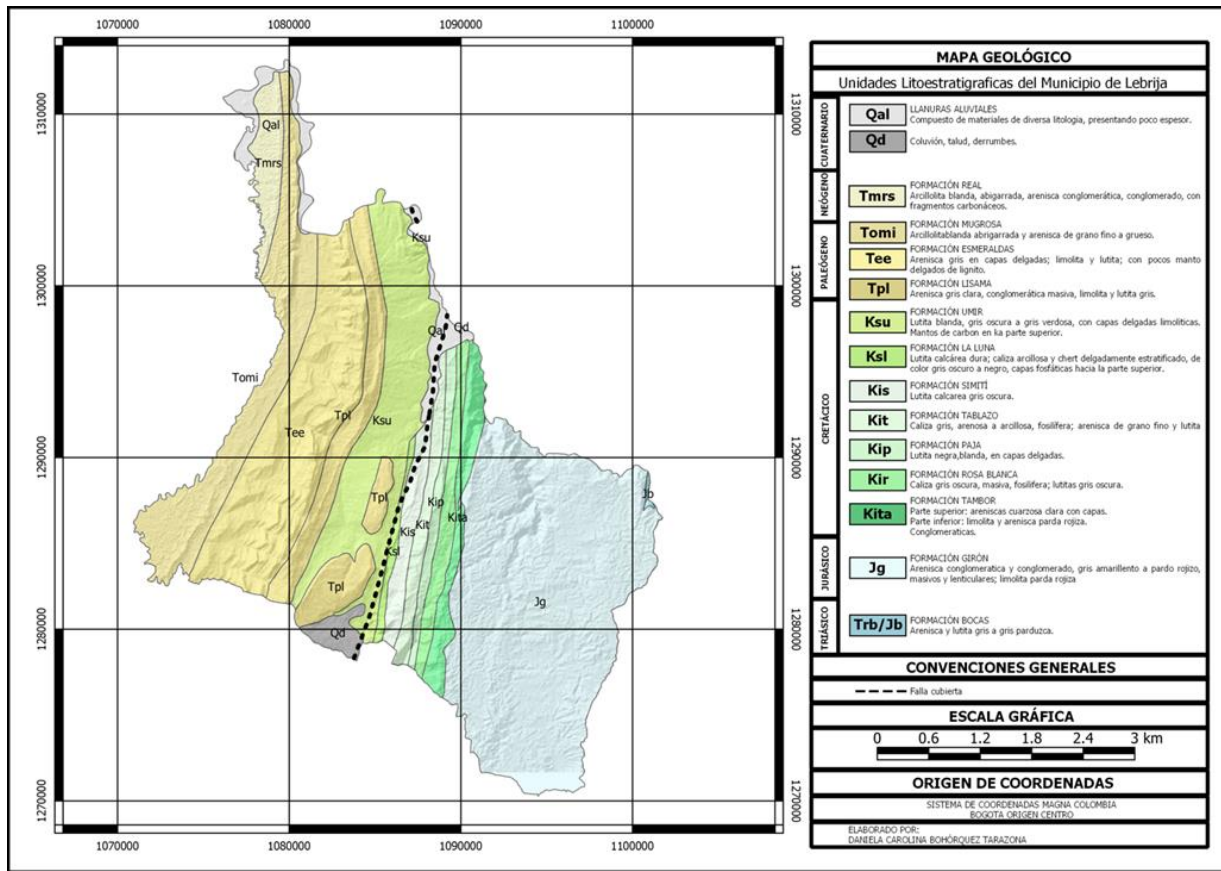


Figura 3. Mapa de unidades litoestratigráficas del municipio de Lebrija a escala 1:100.000. / Modificado de: SGC,2011.

Formación Girón: “Se encuentra suprayaciendo discordantemente a la Formación Jordán e infrayace concordantemente a la Formación Los Santos. En su sección tipo, en la angostura del río Lebrija, consta de tres miembros: uno inferior arenoso (750 m) uno intermedio lodoso (1250 m) y uno superior arenoso (1500 m) para un espesor total de 3500 m. Esta unidad está compuesta por areniscas de grano medio a grueso, ligeramente conglomeráticas de color violáceo, rojo grisáceo a gris verdoso; presenta estratificación cruzada en capas gruesas con interestratificación de limolitas y lodolitas de color rojo violeta a grisáceo y algunos niveles delgados de conglomerados con guijos de cuarzo de hasta 4 cm. Su espesor varía desde unos pocos metros

hasta 4650 m en el Río Lebrija, su ambiente de sedimentación es continental fluvial a lacustre fluvial y se considera de edad jurásico superior” (Royero y Clavijo, 2001).

La sección tipo del Río Lebrija que determina la Formación Girón es redefinida por Cediél (1968) como una secuencia compuesta de areniscas conglomeráticas con intercalaciones de limolitas y arcillolitas rojas, asignándole un espesor de 4650 metros. Este propone agrupar las Formaciones Girón y Los Santos en lo que denominó Grupo Girón. Cediél (1968) realiza subdivisiones litológicas del Grupo Girón en ocho miembros, siendo desde A hasta G la Formación Girón y H la Formación Los Santos, como se describen a continuación de tope a base con su espesor:

- H (190 m): Areniscas de grano fino, bien calibradas, de color naranja claro, intercaladas con areniscas de color rojizo. Las areniscas rojas cambian lateralmente a lutitas o arcillolitas rojas o verduscas. El conjunto presenta estratificación cruzada tabular en bancos que varían entre 20 a 80 cm de espesor. Los red beds se presentan hacia al tope y representan el 30 % del total del conjunto.

- G (1080 m): Arenisca de grano grueso, estratificación cruzada hasta 4 m de espesor, capas conglomeráticas mayor en la parte superior. El tamaño de grano disminuye al tope de la unidad, el espesor de capas decrece hasta 40 a 80 cm, locamente moscovítica. Colores, de base a tope, gris verdoso – gris amarillento – amarillo grisoso.

- F (250 m): Areniscas (70 %) y capas rojas (30 %) interestratificadas de limolita y arcillolita en estratos de hasta 1 m. Colores, las areniscas grises verdosas y conglomeráticas con guijos de cuarzo y capas rojo grisáceo y marrón rojizo, en la base capas gris oscuras.

- E (1040 m): Arenisca de grano medio con capas hasta 70 cm, varían verticalmente a shale y algunas arcillolitas, capas conglomeráticas a la base de la unidad, colores en base y tope,

gris azulado a gris oscuro y gris amarillento en la mitad. Estratificación cruzada desarrollada localmente. Facies caracterizada por estratificación irregular y desarrollo de arenisca fina y shale o arcillolita con material carbonáceo con restos de planta poco preservados.

- D (650 m): Capas Rojas (60 %) de limolita y arenisca y arenisca interestratificada hasta de 1 m, colores en sus capas que van de rojo grisáceo a marrón rojizo oscuro, areniscas gris verdosas, conglomerados con guijos de cuarzo en la parte superior. En la base lentes carbonáceos con resto de plantas.

- C (430 m): Arenisca de grano medio a grueso con estratificación cruzada, con capas de hasta 2,5 m de espesor, numerosas capas conglomeráticas con guijos exclusivos de cuarzo hasta 4 cm de diámetro. Areniscas duras, bien calibradas, color entre gris verdoso y gris oliva claro.

- B (590 m): Arenisca (60 %) grano medio a grueso y capas rojas interestratificadas (40 %) de limolita y arcillolita, arenisca gris azulosa clara con estratificación cruzada hasta de 1 m, algunas diseminadas de conglomerados con guijos de cuarzo variado, cambio lateral de capas rojas a shale gris verdoso – arenisca, varía en color de rojo violeta grisáceo a violeta grisáceo.

- A (610 m): Arenisca de grano grueso, conglomerática, gris semiclara y gris clara en capas gruesas con estratificación cruzada de hasta 2 m, capas delgadas de conglomerado con guijos de cuarzo y caliza, lentes de shale gris azulado hasta de 3 m con un 5 % de la facies.

Osorio (2016) acoge como referencia las descripciones litológicas realizadas por Cediel (1968) y presenta una columna generalizada de la sección tipo del Río Lebrija (Figura 4) con los espesores medidos para cada agrupación litológica.

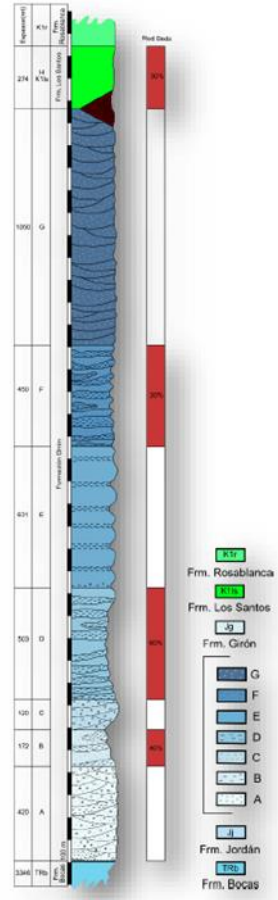


Figura 4. Columna generalizada del Grupo Girón realizada en el Río Lebrija con espesores medidos por Osorio (2016) para los conjuntos litológicos (A-H); Conjuntos H según Clavijo (1985) espesor de la Formación Los Santos. Adaptado de Osorio (2016).

Correa y Fuentes (2019) adoptan las descripciones litológicas de la Formación Girón descritas por Cediél (1698), pero hacen pertinente la aclaración de Cediél (2001) donde menciona que el espesor medido de 4650 m en su trabajo del 1968 podría ser la mitad debido a esto tomaron como referencia los espesores calculados por Osorio (2016) en el Río Lebrija.

Correa y Fuentes (2019) reconocen los miembros E, F y G de la Formación Girón propuestos por Cediél (1698).

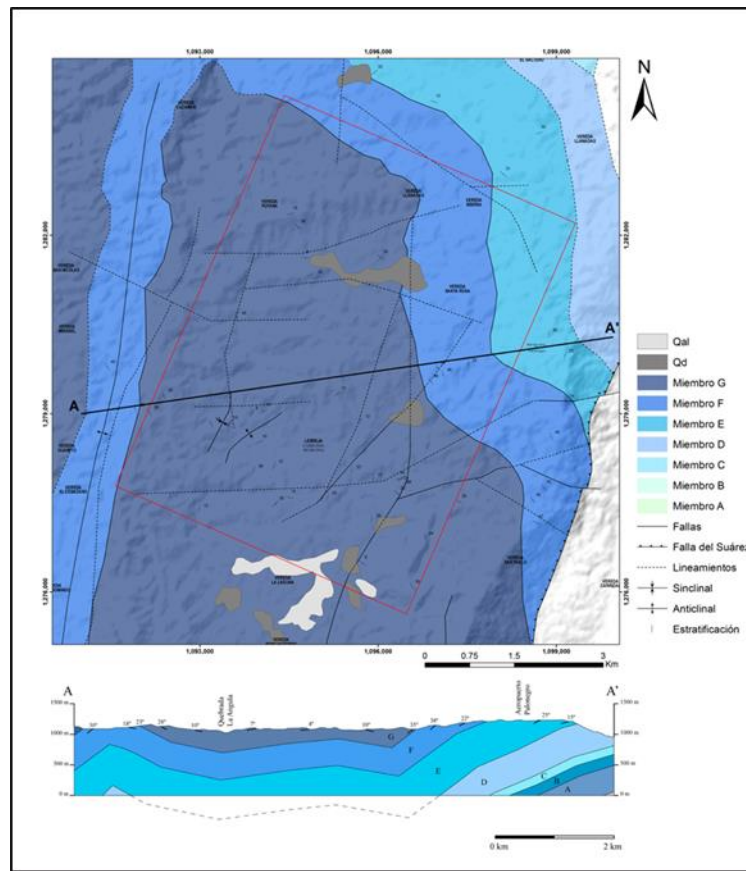


Figura 5. Mapa Geológico del área de estudio tomado de Correa y Fuentes (2019).

4.2 Geología Estructural

Según Cooper, Addison, y Alvarez, (1995) la cuenca del valle medio del Magdalena VMM, es el fruto de eventos tectónicos vinculados con la evolución del margen activo de la parte occidental de Suramérica. Esta cuenca posee datos del Cretácico Tardío y el levantamiento de la cordillera oriental, esto según Gómez (2005). Por lo cual está relacionado a un régimen compresivo en donde se han producido sinclinales y anticlinales.

La zona de estudio se encuentra en el municipio de Lebrija, Santander, donde se encuentran pliegues suaves con orientación NE-SW, dominados principalmente por la Falla del Suárez, con

una tendencia NE-SW al este de la zona de estudio y un sistema de plegamiento regional al oeste. Tres de los grupos principales de lineamientos definidos en el municipio de Lebrija son de gran importancia para la zona de estudio ya que se encuentra en todo el margen oriental del municipio.

4.2.1 Geología Estructural. La Falla Suarez de gran importancia regional se encuentra delimitando la parte Este de la zona de estudio, esta es una falla inversa de ángulo alto con una componente vertical y su trazo tiene una dirección N20°E y N25°E con inclinación al occidente donde sigue el curso de los ríos Suarez y Rio de Oro (Royero y Clavijo, 2001). Por influencia de dicha falla las capas de la Formación Girón se pliegan por arrastre alcanzando posiciones verticales y en algunos casos invertidas (Julivert, 1963).

La zona de estudio se rige por un plegamiento regional que comprende de este a oeste el sinclinal de Naranjo, al anticlinal de Rio Sucio y Finalmente la gran estructura del Sinclinal de nuevo mundo, el cual Otero (2001) define como estructura asimétrica donde su flanco occidental tiene en promedio de 60 grados de inclinación y su flanco oriental entre 30 y 40 grados, debido al extremo fallamiento cercano y paralelo al borde oriental (Ward, 1973).

El sector conocido como la meseta de lebrija, se encuentra ubicado en el cierre de una estructura sinclinal abierta cuyo eje presenta una orientación noreste, la estructura presenta replegamientos dando origen a la formación de anticlinales y sinclinales locales, por medio de fotointerpretación se pudo establecer la presencia de lineamientos paralelos a la Falla de Suarez, la cual se encuentra al este del área de estudio. El eje de la estructura se encuentra denudada, y por su capas debajo angulo genera una geomorfología resultante de colinas diseptadas por un sistema de denajes con vergencia hacia el norte, que hacen parte de la cuenca del río lebrija.

5. Potencial Hidrogeológico de la Región

De acuerdo con la geología de la plancha 109-Rionegro y 120-Bucaramanga (Ingeominas, 2002) y el estudio de Aguas subterráneas en Colombia (Ideam, 2013), el municipio de Lebrija pertenece a un Sistema Acuífero Montano e intramontano (SAM) correspondiente a la provincia hidrogeológica Cordillera Oriental (PM4) y al sistema acuífero Bucaramanga-Piedecuesta (Figura 6).

En este sistema acuífero, el modelo de recarga y flujo ocurre principalmente a partir de lluvias provenientes de zonas montañosas que van entre los 1800 y 2200 msnm y la mezcla de aguas meteóricas que pueden fluir ya sea en cortas distancias alimentando las aguas subterráneas presentes o viajar largas distancias (mayores de 20 km.), recargando también los acuíferos de las zonas aluviales (acuíferos libres o detríticos del Cuaternario). Existe además relación de procesos de remoción en masa con la respuesta de las aguas subterráneas a las épocas de alta precipitación o inviernos prolongados (más de cuatro meses) (Camargo y Atehortúa, 2010).

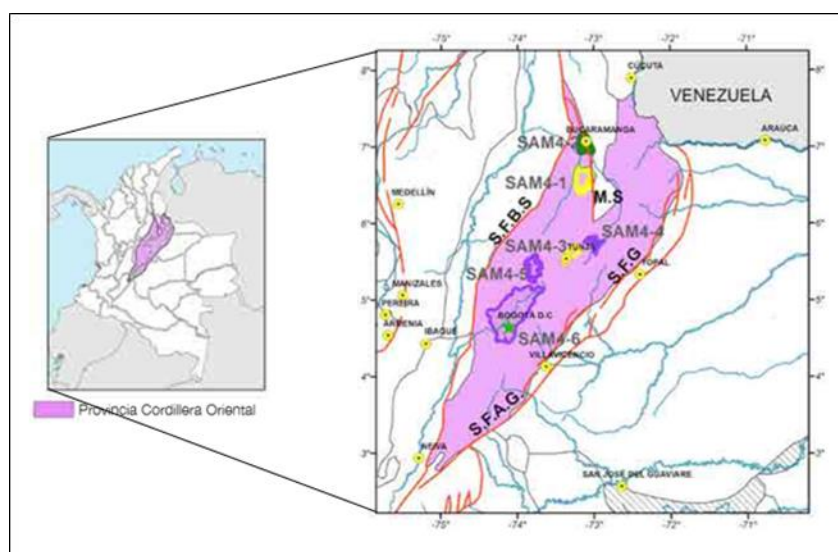


Figura 6. Ubicación de la Provincia Hidrogeológica Cordillera Oriental. Ideam (2013).

La Formación Girón presenta una porosidad baja en niveles de lodolitas y limolitas, porosidades altas en niveles conglomeráticos. los niveles de areniscas presentan alto grado de fracturamiento posiblemente por acción de la falla Suarez generando una porosidad secundaria, por lo cual se podría esperar que la formación Girón en algunos niveles presente un potencial hídrico para la formación de acuíferos.

6. Metodología

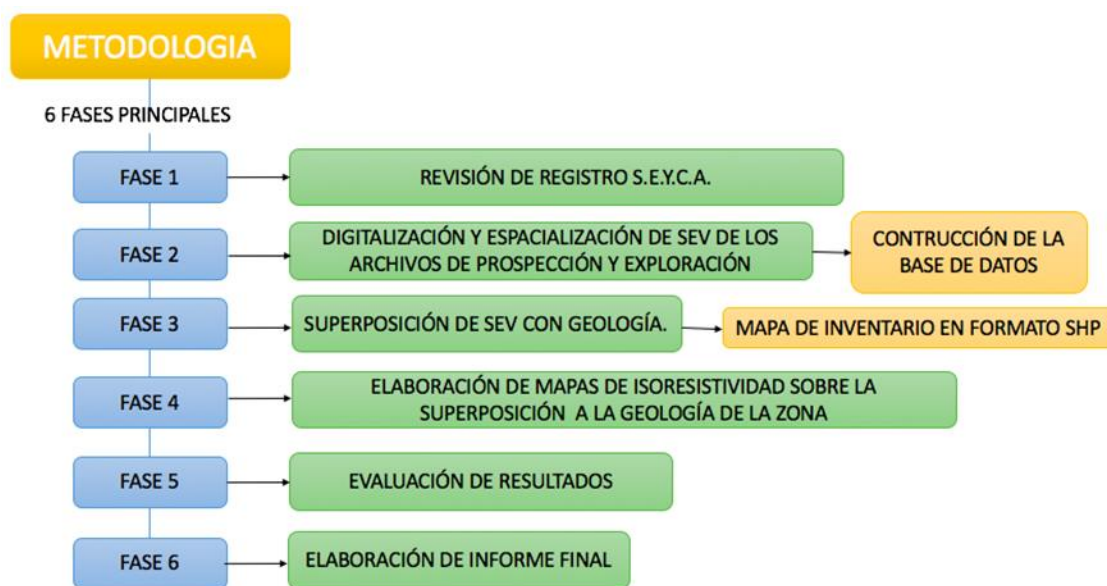


Figura 7. Diagrama de flujo de la Metodología de cada una de las diferentes fases a trabajar.

El desarrollo del presente trabajo de grado se programó para una duración de seis (6) meses como modalidad de práctica empresarial, el cual se llevó a cabo en seis etapas principales, las cuales se describen a continuación en el siguiente mapa conceptual representado en la figura 7.

6.1 Fase 1: Revisión de Registro S.E.Y.C.A.

Se revisó cada expediente de prospección y exploración guardado en el área de la Subdirección de Evaluación y Control Ambiental S.E.Y.C.A., estos expedientes se encuentran en medio físico y presentan la siguiente información: Ubicación del área de solicitud, geología general, unidades litológicas locales (estratigrafía), geología estructural, concepto del estudio geofísico (Sondeos Eléctricos Verticales-sev y Tomografías Eléctricas), datos de resistividad y profundidad, cada expediente se ingresó a un libro en formato .xlsx (apéndice 1). En la tabla 1, se describen las fuentes y el uso asociado a la información colectada.

Tabla 1.

Fuentes de Información

Fuente	Material	Uso
Base de Datos Biblioteca UIS	Tesis de pregrado	Caracterización Geológica
CDMB	Archivos en medio físico de FUN de exploración y prospección.	Evaluación de la información geofísica
SGC	Mapa geológico 1:100.000	Caracterización Geológica

6.2 Fase 2: Digitalización y espacialización de los SEV de los archivos de prospección y exploración.

Con esta información se creó una base de datos donde se registró: sinca (código de registro de cada archivo), nombre de expediente, nombre del predio, nombre de la vereda inmobiliaria, número catastral, estos como datos importantes para la Corporación. Para la investigación del proyecto de grado se tomarán: el tipo de técnica, las coordenadas, profundidad, densidad de sondeos sev,

resistividad, litología y unidad litológica. Cada uno de estos datos fue consignado como atributos y espacializados usando un sistema de información geográfica SIG.

6.3 Fase 3: Superposición de SEV con Geología.

Los sev distribuidos fueron superpuestos a la cartografía detallada elaborada por (Correa y Fuentes, 2019). En esta superposición se establecieron los siguientes criterios previos a la construcción del mapa de resistividad: subunidades geológicas, estructuras geológicas, altura sobre el nivel del mar del sev y se realizó por superposición de capas raster y vectoriales usando herramientas SIG en el software QGIS.

6.4 Fase 4: Elaboración de mapas de isoresistividad sobre la superposición a la geología de la zona.

En el inventario de los expedientes de prospección y exploración se encontraron un total de 59 solicitudes de prospección y exploración, de las cuales se realizaron un total de 80 sev y 4 tomografías eléctricas, para ello toda esta información se pasó a un shape file, con el fin de hacer una compilación del material especificando las principales características y poder trabajar esta información en Qgis.

Este proceso se realizó mediante el software Qgis con diferentes herramientas que este presenta, con la interfaz de este programa y la herramienta de interpolación dentro del menú ráster.

A partir de la información incorporada se desarrollo una selección de datos, observando la cercanía espacial entre estos mismos, esto con el fin de tener un universo de puntos lo

suficientemente cercano para poder aplicar el método de interpolación, también se revisaron las profundidades y los valores de cada sev para determinar cuáles eran las litologías más similares entre cada dato y se tuvo en cuenta las estructuras presentes en la zona. Debido a que los estudios fueron realizados por personas naturales y empresas privadas se realizaron los mapas de isoresistividad a la misma profundidad con el objetivo de preservar la homogeneidad del miembro litológico.

Se superpone el mapa geológico cartografiado por Correa y Fuentes (2019) en la misma zona de trabajo de la Formación Girón en el municipio de Lebrija, Santander con litologías y estructuras reconocidas en campo y descritas en su proyecto “ Caracterización estructural al este de Lebrija, Santander ”.

Posterior al ingreso de los datos, se arreglan los parámetros en el software y se genera el mapa de interpolación teniendo en cuenta el valor de la resistividad y la profundidad a la cual fueron tomados.

Una vez organizada la información se separaron los datos por medio del método IDW en concentraciones de puntos cercanos a la misma profundidad la cual fue realizada a 80 metros, de esta manera se procedió a utilizar el método de distancia inversa ponderada para cada registro.

Apartir de los resultados y pruebas realizadas se procedió a unificar cada uno de los registros obtenidos a la profundidad anteriormente mencionadas, con el fin de ver el comportamiento de la resistividad con una homogeneidad litologica y con estructuras asociadas.

Se identificaron las resistividades correspondientes a la Formación Girón a partir de la interpretación geoelectrica y se realizó un modelo de interpolación teniendo en cuenta la geología de la zona con dos transectas.

6.5 Fase 6: Evaluación de resultados para control de calidad

Se correlacionaron las respuestas de resistividad de los informes técnicos existentes en los archivos S.E.Y.C.A, con diferentes autores para establecer unidades litoestratigráficas asociadas a las respuestas de resistividad registradas.

6.6 Fase 7: Elaboración del Informe Final

En esta etapa se reunió toda la información obtenida en los resultados hallados a lo largo de la práctica, generando productos que permitieran ser usados en posteriores estudios de exploración del subsuelo en el municipio de Lebrija, Santander.

7. Resultados

7.1 Inventario de los Expedientes de Prospección y Exploración

Se construyó un Inventario de Expedientes de Prospección y Exploración de pozos profundos con solicitud de autorización legal, para la captación de aguas subterráneas en Lebrija, Santander, colectados en la revisión de la base de S.E.Y.C.A. y S.U.G.A.R., el cual corresponde al Apéndice A.

La base de datos se estructuró en una secuencia que permite organizar información: Jurídica, Geográfica y Geofísica, los parámetros de búsqueda e ingreso de información son: Sinca,

nombre de expediente, nombre del predio, nombre de la vereda en la cual quedaba el predio, nombre del representante legal, número de matrícula inmobiliaria, numero catastral, el tipo de técnica, las coordenadas, profundidad, número de veces que se realizó el estudio geofísico, resistividad, litología y unidad litológica a la que corresponde.

Tabla 2.

Parametros usados en la construcción de la base de datos.

Formato de ingreso de información	uso de la información
N° de expediente	Revisión jurídica
N° de expediente en el sistema	Revisión jurídica
Numero	Revisión jurídica
N° SINCA	Revisión jurídica
Finca-predios	Ubicación
N° catastral	Revisión jurídica
Matricula inmobiliaria	Revisión jurídica
Propietario	Revisión jurídica
NIT	Revisión jurídica
Cedula	Revisión jurídica
Etapa	Revisión jurídica
Vereda	Ubicación
Tipo de técnica	Análisis Geofísico
Georeferenciacion	Ubicación
N° de capas	Análisis Geofísico
V. Resistividad (ohm-m)	Análisis Geofísico
Litologias	Análisis Geofísico
Unidad geologica	Análisis Geofísico
Sinca C.A. Sistema	Revisión jurídica
C.A.S	Revisión jurídica
Etapa	Revisión jurídica

En la figura 8 se presenta la distribución de información geofísica de los archivos y la regularidad de procesos de exploración en las veredas del municipio de Lebrija, esta distribución permite identificar las veredes con mayor información disponible y al mismo tiempo con mayor aprovechamiento de recurso hídrico subterráneo.

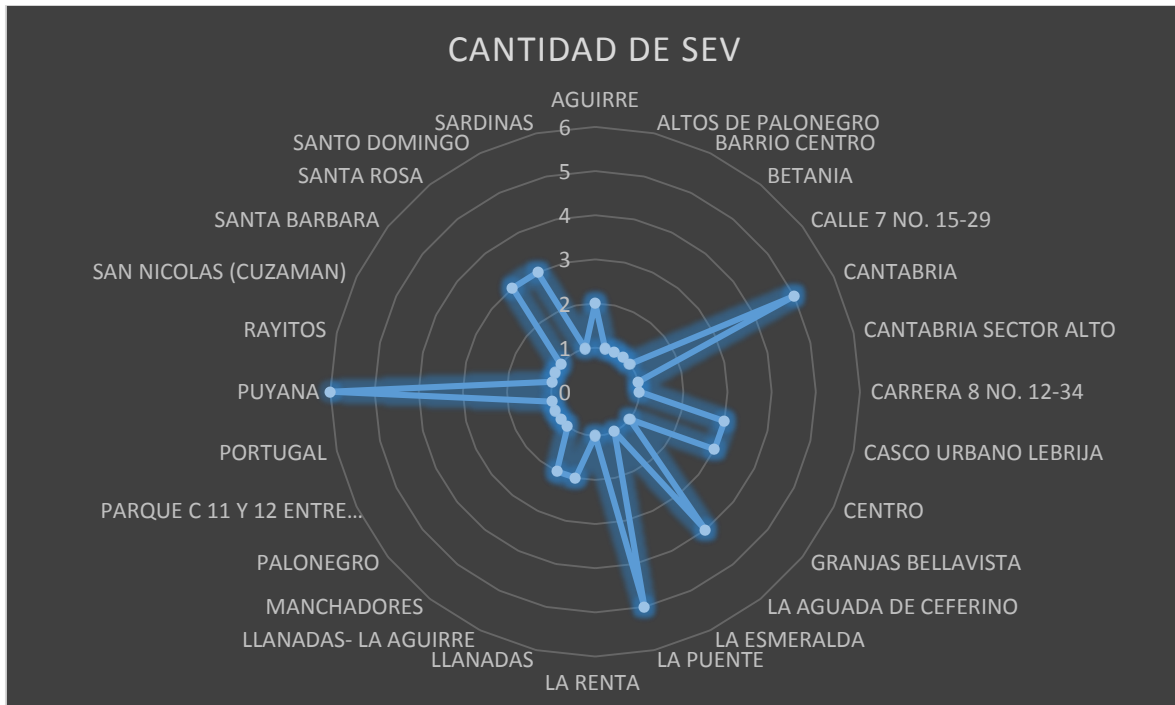


Figura 8. Histograma de lugares específicos y la cantidad de SEV realizados en cada zona.

La mayor concentración de puntos de explotación se presentan en las veredas: Puyana, La puente, y Cantabria, estas veredas presentan mayor demanda hídrica debido a sus actividades agropecuarias y procesos de urbanismo o parcelación de predios.

7.2 Evaluación de la interpretación de los resultados de resistividad existentes en la base de datos

Los estudios de prospección y exploración de pozos subterráneos dirigidos a la entidad ambiental C.D.M.B., son realizados por empresas privadas a personas naturales, es importante aclarar que como protocolo utilizado por las empresas privadas para realizar estudios geoelectrico al momento de la interpretación de los datos obtenidos por el equipo de adquisición, se presentan los resultados

de correlación litoestratigráfica sin relacionar con el método que utilizaron para el patronamiento y sin hacer énfasis en referencias bibliográficas, en los informes técnicos presentados no se identifican las condiciones estructurales (rumbo y buzamiento) de las unidades, ni el arreglo y orientación del tendido usado en la adquisición de la información geofísica.

Los datos de resistividad que muestran litologías de interés presentados en los informes técnicos ante la C.D.M.B., son correlacionados con una tabla estándar de un autor determinado que posea datos de litologías saturadas, esto para lograr una evaluación y observación más profunda.

Tabla 3.

Valores típicos de resistividad.

Resistividad (Ohm-m)	Litología
200-500	Saprolito Parcialmente saturado
40-100	Saprolito saturado
500-2000	Gravas parcialmente Saturadas
300-500	Gravas Saturadas
400-700	Arenas Parcialmente Saturadas
100-200	Arenas Saturadas
100-200	Limos Parcialmente Saturados
20-100	Limos Saturados
5 a 15	Limos Saturados con Agua Salada
20-40	Arcillas Parcialmente Saturadas
5 a 20	Arcillas Saturadas
1 a 10	Arcillas Saturados con Agua Salada

Fuente: Modificado de Hoyos, 2000.

En la tabla 3 se presentan la asociación de los valores de resistividad a materiales o litologías que según la litoestratigrafía de la formación Girón se pueden encontrar en el área de estudio. Según el trabajo realizado por Álvarez (2018), que consistió en tomar SEV en áreas donde se pudiese levantar una columna estratigráfica detallada en la formación Girón en el sector surorinetal del

área de estudio, se pudo establecer las unidades litológicas según las respuestas de resistividad descritas en la tabla 4.

Tabla 4.

Correlación geoeléctrica en la formación Girón en el municipio de Lebirja.

N° de capa	Resistividad	Espesor	Profundidad	Correlacion litologica	Correlacion Hidrogeologica
I	35.3	0.462	0.462	Arcillas de la carretera donde se corrio el SEV	Suelo Arcilloso Humedo
II	814	0.646	1.11	Triturado de diferentes materiales que se le hecha como material de recevo a la via.	Triturado Seco
III	32.2	5.19	6.29	lodolitas rojizas masivas, moteadas de color verde aguamarina (páleosuelos)	Arcillolitas y limolitas con saturacion moderada en agua.
IV	195	25.9	32.2	Paquete potente de areniscas cuarzosas masivas, de grano medio a grueso , con contenido de liticos,color rojiza, mal calibrada y esfericidad media buena cementacion intercaladas de capas de conglomerados de tamaño guijo, mal sorteados, buena redondez y esfericidad media con matriz de arenisca de grano medio	Arenisca conglomeratica con moderada a alta saturacion en agua y moderadamente fracturada.
V	97.5			Paquete de arenisca muy finas a finas intercaladas con limolitas rojizas masivas, moteadas de color verde aguamarina (páleosuelos)	

Fuente: Álvarez (2018).

Teniendo como fundamento las tablas de patronamiento de respuestas de resistividad en sondeos eléctricos verticales-SEV para el área de estudio de Hoyos (2000), y Alvares (2018), se realiza una tabla de correlación (ver tabla 5) que permita ajustar los parámetros de resistividad presentes en la base de datos creadas y establecer las unidades litológicas correlacionables con la cartografía detallada realizada por Correa y Fuentes (2019).

Tabla 4.

Correlación de Litológicas con respuestas de resistividad

Material/Litología	Rango de resistividad ($\Omega \cdot m$)	Hoyos, 2000 ($\Omega \cdot m$)	Alvarez, 2018 ($\Omega \cdot m$)
Depósito coluvial con gravas, en matriz areno-arcillosa. Con humedad.	18-30	300-500	
Suelo arenoso con fragmentos de rocas con humedad.	49	40-60	
Suelo areno-arcilloso con humedad.	90-400	200-500	
Lutitas fracturadas con humedad.	5-200		32,2
Laterita húmeda.	711		35,5
Arenisca de grano grueso con humedad.	66	400-700	195
Arenisca de grano medio a grueso con intercalaciones de limolitas. Con humedad.	80-50	20-200	
Arenisca con intercalaciones de limolitas y arcillolitas, fracturada y meteorizada. Con humedad.	200-900	5-200	
Arenisca con intercalaciones de limolitas y arcillolitas, fracturada y meteorizada. Saturada.	30-60	100-200	

Se correlacionan las resistividades en el presente proyecto con las encontradas sobre la misma formación Girón, también en el municipio de Lebrija, Santander en cercanías al Aeropuerto Internacional Palo negro (Álvarez, 2018), donde son correlacionables litologías similares con factores de humedad (Ver Tabla 4) los cuales se diferencian en los rangos de resistividad.

En la utilización de los criterios de resistividad, se debe tener en cuenta que para la interpretación de los modelos geoeléctricos en términos de la litología y características del agua subterránea, se utilizó la información geológica convencional (Hoyos, 2000). Los registros de los

estudios de pozos subterráneos y los resultados de las resistividades difieren y en su mayoría no entran en los rangos de dicho autor por lo cual es complicado dar con datos puntuales

7.3 Mapa de localización de sondeos electricos verticales

Haciendo uso de la información de la base de datos se elaboro una capa de puntos con atributos (cada elemnto de la tabla 2 corresponde a un atributo), que permite visualizar la información geofísica en el espacio y superponer con el mapa geologico detallado para correlaiconar las respuestas de resitividad con las columnas detalladas de cada unidad presenta en el area de estudio. (ver figura 9)

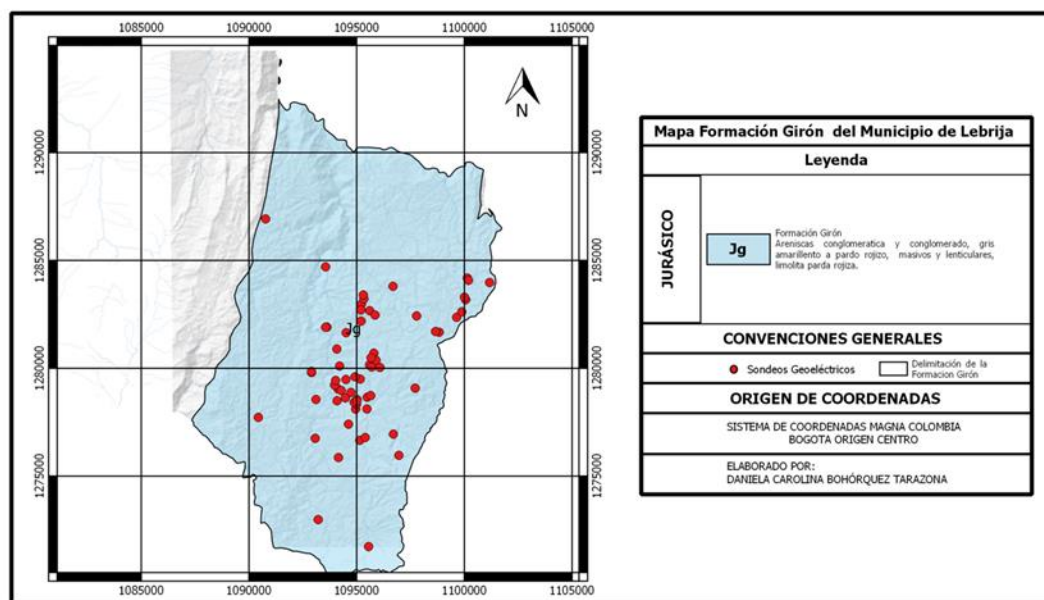


Figura 9. Sondeos geoelectricos realizados en la formación Girón del municipio de Lebrija. Mapa base: SGC 2011.

7.4 Mapas de Isoresistividad y Litologías Asociadas

Para la construcción de los mapas de resistividad se usaron los criterios de densidad de puntos de interés SEV, unidad litológica, y estructura geológica, para definir el horizonte de interés (80m de profundidad) se realizó basados en la profundidad de perforación con mayor registro en la base de datos SEYCA, que según los informes técnicos a esta profundidad promedio se encuentra el acuífero productor de la zona..

Los criterios de unidades geológicas y estructuras usados para la establecer los polígonos de modelado se realizaron con base en el mapa detallado de Correa y Fuentes (2019) en su estudio “Caracterización estructural al este de Lebrija, Santander” (Ver figura 10).

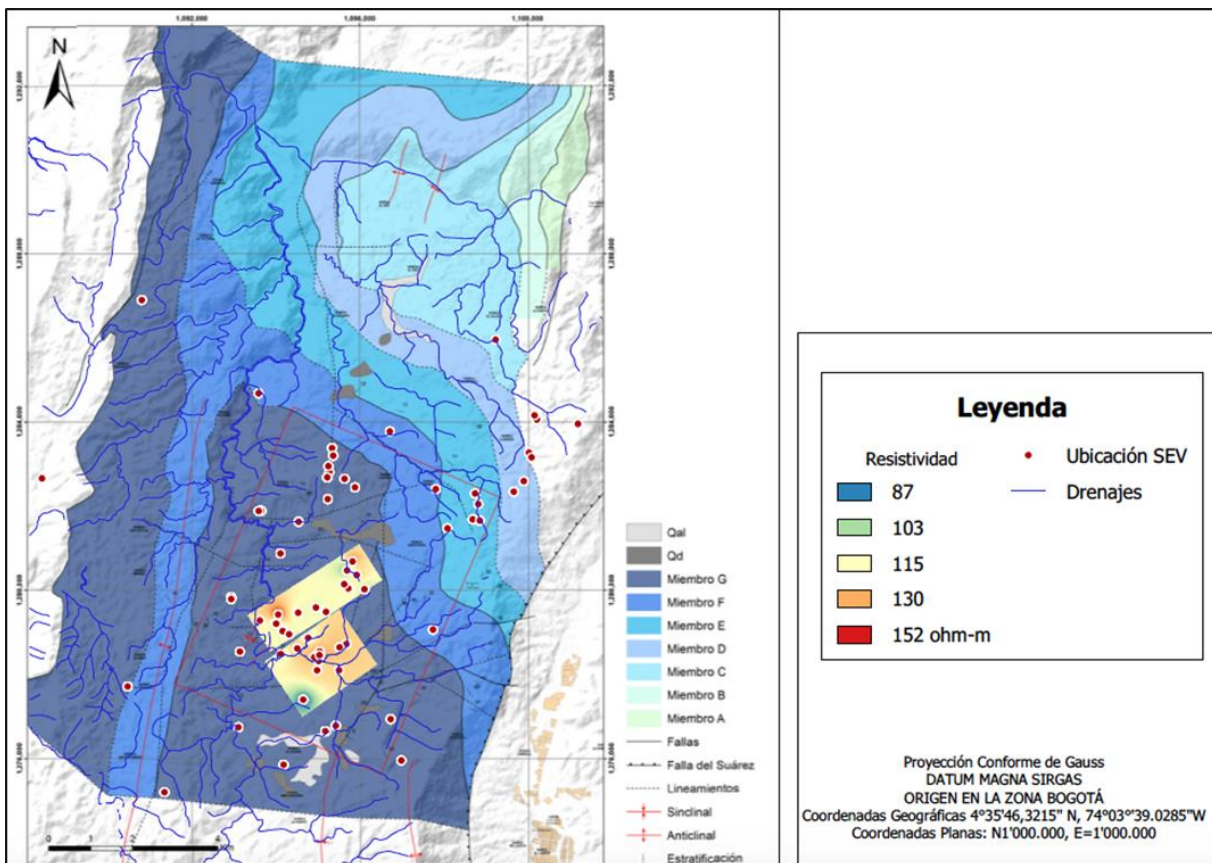


Figura 10. Mapa de superposición litológica para la creación de mapas de isoresistividad.

En el presente trabajo se adoptaron las descripciones litológicas de la Formación Girón explicadas por Correa y Fuentes (2019) en campo como criterios importantes, dando lugar a tomar densidades de puntos que poseían características como lo son la homogeneidad en el miembros litológicos, en dicho parametro se tomaron dos concentraciones en donde es continua la litología (miembro G descrito por Correa y Fuentes, 2019 los cuales se basaron en Cediell, 1698) y la estructura asociada debido a los esfuerzos a los que han sido sometidos los cuerpos rocosos son de carácter local y regional.

El polígono I se encuentra sobre un sinclinal abierto de bajo angulo y los puntos están distribuidos en las inmediaciones al casco urbano del municipio de Lebrija, mientras que el polígono II presenta una orientación Noreste, siguiendo el eje de una estructura anticlinal al oeste del casco urbano. (ver figura 11)

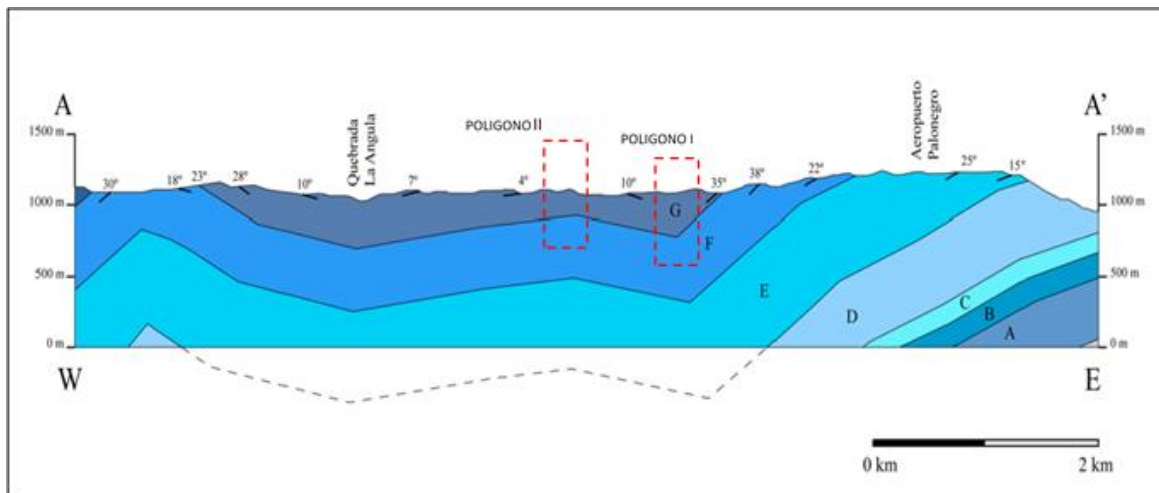


Figura 11. Corte geológico del area de estudio. Modificado de Correa y Fuentes (2019).

7.4.1 Polígono de superposición I. Para el primer tramo se usaron los datos suministrados en el inventario geofísico extrayendo todos los datos de resistividad hasta una profundidad de 80

metros, encontrando que el dato de resistividad más bajo es 87.8 ohm-m y el valor más alto es de 152.5 ohm-m.

A continuación se muestra un mapa donde se ve la variación de las resistividades para la formación Girón en el municipio de Lebrija, donde encontramos diferentes zonas de resistividad que poseen las siguientes variaciones: Zona I, 87.8 – 103.9 ohm-m (celeste a verde claro), Zona II, 120.1– 136.3 ohm-m (amarillo a naranja) y Zona III, 152.5 ohm-m (rojo), lo que se puede examinar en la figura 12.

Las zonas de resistividades mas bajas podrian poseer mayor potencial acuífera y se relacionan a la zona I que presenta asociación de litologías interpretadas como areniscas con capas de limo y arcilla y suelos areno-arcillosos con materia organica como se observa en la tabla 6.

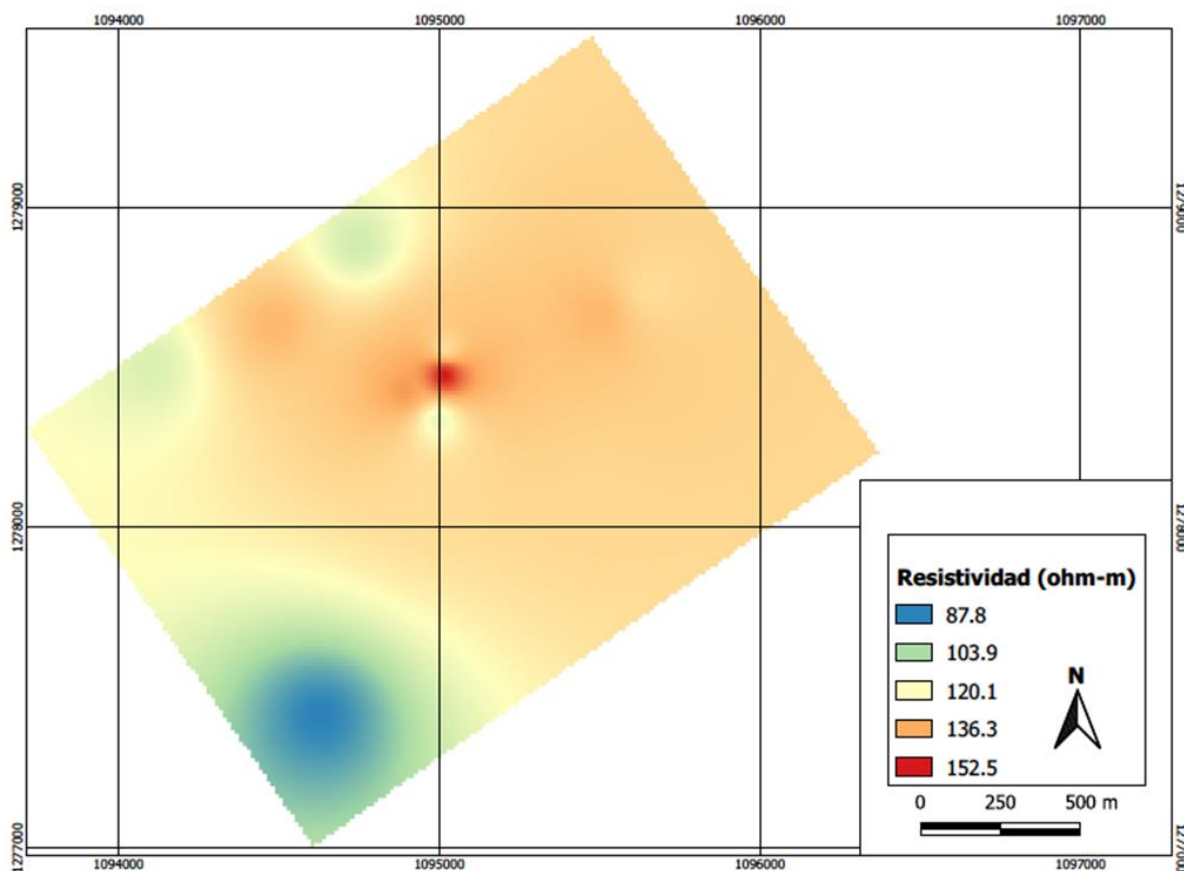


Figura 12. Mapa de resistividades a una profundidad de 30 metros.

7.4.2 Polígono de Superposición II. Para el segundo tramo se usaron los datos suministrados en el inventario geofísico, utilizando todos los datos de resistividad hasta una profundidad de 80 metros, encontrando que el más bajo es 89.7 ohm-m y el valor más alto es de 141.3 ohm-m.

Resistividad obtenida: Zona I, 89.7 – 102.6 ohm-m (celeste a verde claro), Zona II, 115.5 – 128.4 ohm-m (amarillo a naranja) y Zona III, 141.3 ohm-m (rojo), lo que se puede observar en la figura 13.

Este polígono no posee gran potencial de captación acuífera como se analiza en la figura 13, las zonas de resistividad II - III son mas frecuentes y son mediana y altamente resisitivas, la zona geoelectrica I se asocia a litologías interpretadas como limolitas y areniscas fracturadas, arcillolitas y limolitas fracturadas. (Ver tabla 3)

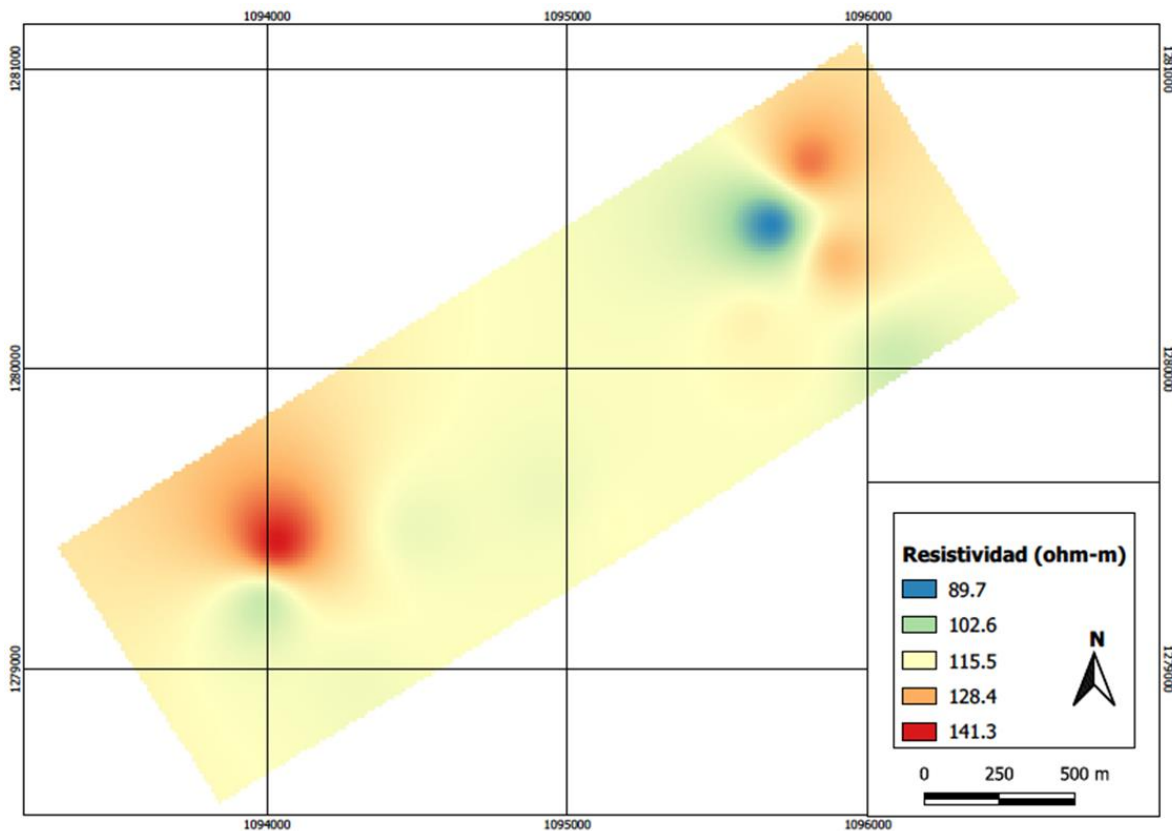


Figura 13. Mapa de resistividades a una profundidad de 30 metros.

A continuación se muestra un fragmento de la información recogida para la profundidad de 30 metros y los valores utilizados para hacer la interpolación (debido a la extensión de los datos solo se utiliza una pequeña parte).

Tabla 5.

Resistividades asociadas a Litologías.

X	Y	Z	Numero_	Field 14	N_C AP	Profundida	V_Re sisti	Litologías
1275 957	1096 966	115 7	3	SEV- 1	1	0.00 0.60	- 421	Suelo areno- arcilloso
1275 957	1096 966	115 7	0	SEV- 1	2	0.60 2.00	- 789	suelo conformado por limolitas y areniscas fracturadas y meteorizadas
1275 957	1096 966	115 7	0	SEV- 1	3	2.00 7.31	- 344	Sedimento compuesto por arcillolita y limolitas meteorizadas
1275 957	1096 966	115 7	0	SEV- 1	4	7.31 13.50	- 466	sedimento compuesto por areniscas, limolitas y arcillolitas fracturadas
1282 969	1095 227	107 5	4	SEV- 1	1	0.00 0.70	- 340	Suelo areno arcilloso con presencia de materia organica. Humedo
1282 969	1095 227	107 5	0	SEV- 1	2	0.70 2.00	- 603	Areniscas de Grano fino intercaladas con arcillolitas fracturadas y meteorizadas
1282 969	1095 227	107 5	0	SEV- 1	3	2.00 7.70	- 1671	Areniscas de grano medio intercaladas con arcillolitas fracturadas
1279 290	1093 591	0	5	SEV- 1	1	0.00 0.60	- 85	Suelo Arenoso, material coluvial -aluvial
1279 290	1093 591	0	0	SEV- 1	2	0.60 1.02	- 49	Arenas gravillas. Ligera humedad
1279 290	1093 591	0	0	SEV- 1	3	1.02 10.01	- 59	Areniscas meteorizadas con intercalacion de limos y arcillas
1279 290	1093 591	0	0	SEV- 1	4	10.01 31.1	- 33	Arenisca con capas de limo y arcilla. Saturacion de humedad
1283 178	1100 070	101 0	6	SEV- 1	1	0.00 0.70	- 1018	Suelo Residual Arenoso
1283 178	1100 070	101 0	0	SEV- 1	2	0.70 2.50	- 2424	Sedimentos meteorizados y fracturados compuesto por areniscas
1283 178	1100 070	101 0	0	SEV- 1	3	2.50 5.60	- 631	Sedimentos meteorizados y fracturados compuesto por limolitas y areniscas
1283 178	1100 070	101 0	0	SEV- 1	4	5.60 18.53	- 330	Basamento sedimentario compuesto por areniscas, limolitas y arcillolitas fracturadas
1282 667	1095 611	109 3	7	SEV- 1	1	0.00 1.80	- 424	Suelo areno arcilloso
1282 667	1095 611	109 3	0	SEV- 1	2	1.80 5.55	- 640	Basamento sedimentario muy fracturado compuesto por areniscas, limolitas y arcillolitas
1282 667	1095 611	109 3	0	SEV- 1	3	5.55 10.27	- 524	Basamento sedimentario muy fracturado compuesto por areniscas, limolitas y arcillolitas

1282 667	1095 611	109 3	0	SEV- 1	4	10.27 - 27.17	429	Basamento sedimentario muy fracturado compuesto por limolitas y arcillolitas
1279 496	1095 170	109 3	8	SEV- 1	1	0,00 - 1,00	2112	Suelo Residual Arenoso
1279 496	1095 170	109 3	0	SEV- 1	2	1.00 - 8.89	1463	Basamento Sedimentario fracturado y meteorizado, compuesto por arenas y limolitas.
1279 496	1095 170	109 3	0	SEV- 1	3	8.89 - 11.40	1260	Basamento Sedimentario fracturado y meteorizado, compuesto por limolitas.
1279 496	1095 170	109 3	0	SEV- 1	4	11.40 - 24.61	1127	Basamento sedimentario fracturado, compuesto por limolitas y arcillolitas

8. Conclusiones

La base de datos de la información geoelectrica adquirida a través de los expedientes de prospección y exploración entregados en los estudios requeridos ante la Corporación Autónoma Regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga C.D.M.B. por los usuarios que adelantan dichos trámites, permite la construcción de un sistema de información geográfica para el municipio de Lebrija, Santander, como apoyo a proximos estudios realizados en la zona de la Formación Girón. Para el horizonte de 80 m que es de mayor explotación de aguas subterráneas en el municipio de Lebrija según informes técnicos archivados en S.E.Y.C.A, se presentan respuestas de resistividad de 80-140 Oh-m, que correlacionados con Hoyos (2000) y Álbarez (2018), corresponden a Areniscas Sauradas y gravas saturadas.

Este mismo horizonte de prospección en superposición de con el mapa geológico detallado de Correa y Fuentes (2019), indica que la prospección geoelectrica se esta realizando sobre el miembro G de la formación Girón, este miembro presenta una litología de areniscas conglomeráticas fracturadas, dispuestas en una estructura sinclinal regional y algunos pliegues locales.

Las respuestas de resistividad de los SEV, ubicados al sector nororiental en los horizontes de 60 -100 m presentan respuestas de resistividad en el rango 80-120 OH-m, y según descripción litológica del Correa y Fuentes (2019), de facies arenolimosas (miembro F). Teniendo en cuenta que este miembro es infrayacente al miembro G de mayor explotación subterránea y la disposición de la estructura regional (sinclinal), esta unidad puede presentar interés al momento de relizar futuros procesos de prospección geoeléctrica en el área de estudio.

Referencias Bibliograficas

- Alcaldía Municipal de Lebrija, (2003). *Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Lebrija*. Lebrija: Gobierno Municipal.
- Alcaldía Municipal de Lebrija, (2015). *Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Lebrija: Documento Resumen*. Lebrija: Gobierno Municipal.
- Bermúdez, O., y Vasquez, L. (2004). *Estudio geológico geofísico para el área metropolitana de Bucaramanga*. Ingeominas.
- Cediel, F. (1968). El Grupo Girón, una molasa Mesozóica de la Cordillera Oriental. *Boletín Geológico*, 16(1-3), pp. 5-96.
- Cediel, F. (2001). El Grupo Girón, una molasa Mesozoica de la Cordillera Oriental de Colombia. *Boletín de Geología*, 23(38), p. 88.
- Colegial, J., Gómez, S., y Rojas, N. (2006). Cartografía geológica y caracterización estructural de la subcuenca de la quebrada río Sucio, municipio de Tona, Santander, orientados a definir un modelo hidrogeológico conceptual. *Revista Boletín de Geología*, 28(2), pp. 49-61.
- Cooper, M., Addison, F., y Alvarez, R. (1995). Basin development and Tectonic History of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and middle Magdalena Valley, Colombia. *AAPG Bull.*, 79(10), pp. 1421-1443.
- Correa, J. y Fuentes, C. (2019). *Caracterización Estructural como aporte al conocimiento Hidrogeológico del municipio de Lebrija Santander*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

- Coward, M. (1992). Inversion Tectonics. Hancock, P. (ed.). Londres: Continental Deformation, pp. 289-304.
- Custodio, E., Llamas, R., y Sahuquillo, A. (2000). Retos de la hidrología subterránea. *Ingeniería del agua*, 7(1), pp. 23-36
- Etayo-Serna, F. (1969). Contornos sucesivos del Mar Cretáceo en Colombia. Bogotá.
- Etayo-Serna, F. (1985). Metodología de trabajo del Proyecto Cretácico. Bogotá: Proyecto Cretácico, pp. 1-13.
- Falgas, E. (2007). *Hydrogeophysics as a Multidisciplinary Tool on Aquifer Appraisal*. España: Universidad de Barcelona.
- Ingeniería de Suelos, (2002). *Modelo hidrogeológico básico de Bucaramanga*.
- Ingeominas, (1987). *Mapa Geológico de Colombia. Escala 1:1'500.000*. Bogotá: Ministerio de Mianan y Energía.
- Julivert, M. (1963). *Nuevos datos sobre la dinámica del ámbito del Macizo de Santander*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Osorio, D. (2016). *Estratigrafía y deformación de la Formación Girón en el Anticlinal de Los Cobardes, sectores de Zapatoca y río Lebrija*. [Tesis de grado]. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología.
- Royero, J., y Clavijo, J. (2001). *Mapa Geológico del Departamento de Santander. Memoria Explicativa*. Ministerio de Minas y Energía, Ingeominas.