

Cartografía geológica y análisis estructural de la zona del Manantial Cañaverales, sur de La
Guajira: aporte para un modelo hidrogeológico conceptual

Nidia Amparo Archila Medina

Héctor Andrés Ocampos Chaparro

Trabajo de grado: modalidad investigación

Director

Juan Diego Colegial Gutiérrez

Geólogo PhD.

Codirector

Romario Andrés Daza Garzón

Ingeniero civil-

Estudiante de maestría en ingeniería civil

Universidad industrial de Santander

Facultad de ingenierías fisicoquímicas

Escuela de geología

Bucaramanga

2020

DEDICATORIA

A Octaviana (q.e.p.d.), Briseida y Claudia, las mujeres que me enseñan la vida.

A mi tío Fermín y madrina Olga, por su ejemplo de vida y apoyo incondicional

A mis tíos Mery y Campo Elías por su apoyo para avanzar

A mis tías: cuidadoras y narradoras de historias

A Juan y Andrés por la ternura y las sonrisas.

A Tania, Magda, Dina, Norah Alexandra, Belén, Kate, Polichinela, Cinthya, Sandra, y Felipe; por la amistad, la empatía y la apertura.

Al agua por ser metáfora de vida.

A ^^, por los colores y por la luz y por la sombra.

Gracias

*“El río me arrebató y soy ese río.
De una materia deleznable fui hecho, de misterioso tiempo.
Acaso el manantial está en mí?”*

Jorge Luis Borges

*“Me gustan los mapas porque mienten.
Porque no dejan paso a la cruda verdad.
Porque magnánimos y con humor bonachón
me despliegan en la mesa un mundo / no de este mundo”.*

Wisława Szymborska

Nidia Amparo Archila Medina

Dedicatoria

“Si algo caracteriza a nuestra naturaleza es su indocilidad y su exuberancia, y si algo nos obliga a una relación respetuosa con ella, es su doble condición de generosidad y amenaza, siendo región del exceso haciéndose perceptible por igual en la abundancia y en la fragilidad”

William Ospina

Este trabajo está más que dedicado a todos aquellos que fueron parte imprescindible en su realización, empezando por mi madre FIDELINA CHAPARRO y mis hermanos SERGIO Y DANIEL EDUARDO, ya que sin ellos no tendría el valor ni el empuje para llevar a cabo ninguna de mis metas.

A mis amigos y ahora colegas CARLOS TAVERA, JOHAN CÁCERES, JONATHAN RIVERA, JORGE GAMBOA, NICOLÁS BECERRA, BRAYAN QUINTERO Y DIEGO TORO quienes estuvieron presentes y disponibles con sus acertados consejos y habilidades cuando más los necesité.

A MAYRA ISABEL VARGAS, mujer sabia que nos acompañamos en cuerpo y corazón, quien con amorosa paciencia y sin igual ternura fue motor incansable en la realización de este libro aportando conocimiento valioso sobre todo en geofísica e hidrogeología.

A doña LUZMI, su familia y los amigos de Cañaverales guardianes de la riqueza natural que acompaña al MANANTIAL CAÑAVERALES por abrirnos sus puertas y brindarnos su cálida hospitalidad e incansable apoyo en las campañas de campo, sobre todo a don EDUARDO GAMEZ, romántico empedernido que con sus cantos vallenatos de amor a las mujeres y la naturaleza hizo de las expediciones un viaje mágico y menos agotador.

Y a todos aquellos quienes desde sus universos islas han sabido transportar al mío la confianza, camaradería, apoyo y el ocio necesario para pensar y repensar la información que nos bombardea a diario, transformándola en conocimiento seguido de acciones que puedan aportar desarrollo de manera efectiva al prójimo.

HÉCTOR ANDRÉS OCAMPOS CHAPARRO

AGRADECIMIENTOS

A los profesores Juan Diego Colegial Gutiérrez y Sully Gómez por la dirección y orientación de este proyecto.

Al Grupo de investigación en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental (GPH), de la escuela de Ingeniería Civil-UIS, por el apoyo económico de los viáticos para las salidas de campo.

A Carlos Tavera por sus aportes en Geomorfología.

A Johan Cáceres, Eduardo Gámez y Elí Gámez por su acompañamiento en campo.

A la profesora Ana Milena Cardozo por sus sugerencias en Petrografía.

Al profesor Francisco Velandia por sus recomendaciones en Geología Estructural.

A las profesoras Rocío del Pilar Bernal Olaya y Mayra Isabel Vargas, por sus aportes en Geoeléctrica.

A Luis Eduardo Garrido Palencia por toda su colaboración en el laboratorio de muestras.

A Cesar Enrique Llerena Betancour por su colaboración en la escuela.

A la comunidad que trabaja como vigías del Manantial cañaverales, por la protección de la reserva y en especial a la señora Luz Mila Pinto Cortes, familia y amigos por su hospitalidad y su abanderado compromiso de cuidado y protección del agua.

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| Introducción..... | 21 |
| Planteamiento del problema..... | 22 |
| 1.Objetivos..... | 24 |
| 1.1 General..... | 24 |
| 1.2 Específicos..... | 24 |
| 2. Localización..... | 25 |
| 3. Metodología..... | 26 |
| 4. Marco teórico..... | 30 |
| 4.1 Modelo hidrogeológico conceptual..... | 30 |
| 4.2 Generalidades de la porosidad secundaria..... | 31 |
| 4.3 Prospección Geofísica- Generalidades..... | 33 |
| 4.3.1 Resistividad “ρ”..... | 33 |
| 4.3.2 Factores que controlan la resistividad de las rocas..... | 39 |
| 4.4 Marco geológico regional..... | 42 |
| 4.4.1 Unidades litológicas..... | 42 |
| 4.5 Geología estructural..... | 47 |
| 5.2.1 Pliegues..... | 48 |
| 5.2.2 Fallas..... | 48 |
| 5. Resultados..... | 50 |

| | |
|--|-----|
| 5.1 Unidades geológicas aflorantes..... | 50 |
| 5.1.1 Formación La Quinta (Jrq)..... | 51 |
| 5.1.2 Grupo Cogollo (Kic)..... | 54 |
| 5.1.3 Formación La Luna (Ksl)..... | 62 |
| 5.1.4 Sedimentos del Eoceno..... | 68 |
| 5.1.5 Depósitos cuaternarios..... | 70 |
| 5.2 Geomorfología..... | 71 |
| 5.2.1 Unidades morfogenéticas..... | 74 |
| 5.3 Análisis estructural..... | 80 |
| 5.3.1 Lineamientos..... | 81 |
| 5.3.2 Fallas..... | 81 |
| 5.3.3 Pliegues..... | 85 |
| 5.3.4 Diaclasas..... | 85 |
| 5.4 Geoeléctrica..... | 89 |
| 5.1.1 Sondeos eléctricos cuadrados azimutales..... | 90 |
| 5.1.2 Tomografías de Resistividad Eléctrica TRE..... | 93 |
| 6. Conclusiones..... | 101 |
| Bibliografía..... | 103 |

Lista de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Relación del largo del centro del arreglo cuadrado a los electrodos VS profundidad de adquisición. | 28 |
| Tabla 2 Ventajas y desventajas del arreglo Wenner | 36 |
| Tabla 3 Valores de resistividad para diferentes tipos de materiales | 39 |
| Tabla 4 Valores de resistividad para diferentes aguas naturales..... | 41 |
| Tabla 5 Clasificación de las porosidades efectivas de las rocas aflorantes. | 71 |
| Tabla 6 Geoformas presentes en el área de estudio asociadas a su ambiente y área que presentan en la zona. | 74 |
| Tabla 7 Características principales de las diaclasas..... | 87 |

Lista de Figuras

Figura 1: Ubicación de la zona de trabajo al N de Colombia, departamento de la Guajira, Manantial Cañaverales Modificado de Google Maps..... 25

Figura 2: Esquema del flujo metodológico del trabajo de investigación..... 26

Figura 3: Rotación del arreglo cuadrado con las direcciones de flujo de la corriente según el tipo de arreglo electródico. ***..... 28

Figura 4: Relación entre la separación de los electrodos y la profundidad de penetración, a) Separación pequeña de electrodos, corriente confinada en ρ_1 ; b) Separación grande de electrodos, corriente confinada en ρ_1 y ρ_2 . Fuente: Adaptado de De la Torre. (2010) (p. 27) 34

Figura 5: Dependencia de ρ_a del carácter del corte geoelectrico, a) Subsuelo homogéneo; b) Subsuelo heterogéneo que incluye un cuerpo conductor; c) Subsuelo heterogéneo que incluye un cuerpo resistivo. Fuente: Lakubovskii & Liajov. (1980). 35

Figura 6: Dispositivo Wenner. Fuente: Auge. (2008). 35

Figura 7: Disposición de los electrodos en campo para un arreglo azimutal cuadrado (Tomado de Kirsch, 2009). 36

Figura 8: Comparación de los resultados de resistividad azimutal con el diagrama de rosetas, Taylor (1988) 37

Figura 9: Representación esquemática de la adquisición de la primera medición en el nivel “n=1” y “n=3” utilizando el dispositivo Wenner para una tomografía de resistividad eléctrica 2D” Fuente: Martínez (2006). 38

Figura 10: Rangos de resistividad de rocas, minerales, fluidos y sedimentos. Palacky. (1987) . 40

Figura 11: Textura de una roca, a) isotrópica; b) Anisótropa. Fuente: Lakubovskii & Liajov. (1980). Exploración eléctrica..... 41

| | |
|--|----|
| Figura 12: Mapa geológico regional de la zona de trabajo, tomado y modificado de INGEOMINAS 2010. | 42 |
| Figura 13: Mapa geológico aledaño al manantial Cañaverales de la zona de trabajo. Elaborado por autores..... | 51 |
| Figura 14: Columna estratigráfica generalizada de la zona de trabajo. Elaborado por autores. . | 52 |
| Figura 15: Aglomerados rojizos hacia la base de la Formación La Quinta. | 53 |
| Figura 16: a) Muestra de mano aglomerados riolíticos. (B)..... | 53 |
| Figura 17: a) muestra de mano RQ1: Arcosa rojiza muy fina..... | 54 |
| Figura 18: Columna detallada para el grupo Cogollo a escala 1:500, en cercanías al anticlinal La Esmeralda..... | 56 |
| Figura 19: Afloramiento del grupo Cogollo caracterizado por intercalación de capas delgadas de arenisca lodosa calcárea con bloques de caliza fosilífera. | 57 |
| Figura 20: Afloramiento de areniscas de grano fino a medio con grietas de desecación asociadas al miembro superior del Grupo Cogollo..... | 57 |
| Figura 21: a) Afloramiento de calizas arenosas fosilíferas del Grupo Cogollo..... | 58 |
| Figura 22: Afloramiento de areniscas calcáreas fosilíferas del Grupo Cogollo..... | 58 |
| Figura 23: a) muestra de mano Arenisca de grano fino..... | 59 |
| Figura 24: a) Arenisca con cemento calcáreo vista en nicoles cruzados 10x..... | 59 |
| Figura 25: a) Wackestone. 7: Gasterópodo turríteriforme con pared de calcita espar (sección longitudinal), 8. Cámaras de micrita del Gasterópodo turríteriforme, 9: venilla de calcita espar. | 59 |
| Figura 26: a) Marga con foraminíferos (Rotalido) (Zerfass & Andrade, 2006), vista en nicoles paralelos 20x..... | 60 |

| | |
|---|----|
| Figura 27: FroAc: Fragmento óseo de fosfato, Fosfato autigénico, Con Cemento espar y silíceo. 5x ppl | 60 |
| Figura 28: a) Arenisca calcárea con vista en nicoles paralelos 5x. ornamentación de bivalvo ostreido..... | 60 |
| Figura 29: a) Sección delgada de arenisca con fragmentos líticos (diópsido y otros) del grupo Cogollo en nicoles paralelos 10x | 61 |
| Figura 30: a) muestra de mano (NH-8) calizas de textura Grainstone de ostreidos | 62 |
| Figura 31 (a)Fotografía muestra de mano (NH-5) areniscas de grano fino a medio. | 62 |
| Figura 32: Afloramiento de la Formación La Luna, con concreciones, capas de chert y capas de fosfatos..... | 63 |
| Figura 33: a) Sección delgada de shale calcáreo con laminación planoparalela de fosfatos con foraminíferos plantónicos de la formación La Luna vista en nicoles paralelos. 5X..... | 64 |
| Figura 34: a) Chert ferroso con foraminíferos, Formación La Luna vista en nicoles cruzados. 10X..... | 64 |
| Figura 35: Fotografía muestra de mano (NH-16) de Facies L1: limolitas shale | 65 |
| Figura 36 a) muestra de mano (NH-9A) Chert con venas de CaCO ₃ | 65 |
| Figura 37: a) Fotografía muestra de mano (NH-7) Roca carbonatada de textura Mudstone con fosfatos | 66 |
| Figura 38: a) microfotografía sección delgada (M6-NH-2) Calizas Bituminosas de textura Wackestone con Turritelas con fracturamiento relleno de carbonato y desplazamiento sinestral. | 67 |
| Figura 39: a) muestra de mano (NH-11) Calizas Bituminosas de textura Mudstone con venas de CaCO ₃ | 67 |

| | |
|---|----|
| Figura 40: Concreciones sobre la quebrada El Cequioncito..... | 68 |
| Figura 41: Concreciones carbonatadas meteorizadas con centros conglomeráticos de restos fosilíferos de esponjas, corales, gasterópodos, y restos de conchas | 69 |
| Figura 42: a) Concreción vista en nicoles cruzados. 10X, los minerales carbonatados se están alterando a arcillas | 69 |
| Figura 43: Afloramiento de Facies D1: Depósitos de terrazas aluviales. | 70 |
| Figura 44: Mapa de unidades geomorfológicas en la zona de estudio. Autores | 73 |
| Figura 45: Diagrama circular donde se muestran el porcentaje de cada ambiente de formación según la cantidad de geoformas en el área de trabajo..... | 74 |
| Figura 46: Área de influencia de las geoformas de tipo denudacional..... | 76 |
| Figura 47: Área de influencia de las geoformas de tipo fluvial..... | 77 |
| Figura 48 Área de influencia de las geoformas de tipo estructural | 78 |
| Figura 49: Área de influencia de Geoformas volcánicas. | 79 |
| Figura 50: Área de influencia de las geoformas de tipo Antropogénicas..... | 79 |
| Figura 51: Mapa geológico estructural de la zona de trabajo, en cercanías al manantial Cañaverales con las líneas que representan la ubicación de los cortes geológicos A-A', B-B', C-C', D-D'. | 80 |
| Figura 52: Mapa regional de lineamientos..... | 81 |
| Figura 53: Corte geológico A-A' indicando el cabalgamiento de las unidades cretácicas y jurásicas definiendo bloques estructurales delimitados por fallas. * | 83 |
| Figura 54: Corte geológico B-B' indicando el cabalgamiento de las unidades cretácicas y jurásicas, definiendo el sinclinal La Esmeralda que es donde se encuentra el manantial Cañaverales. * | 83 |

| | |
|--|----|
| Figura 55: Corte geológico C-C' ubicado al sur de la falla Capuchino, donde se muestra un plegamiento no se observa tan marcado como en el corte B-B'* | 84 |
| Figura 56: Corte geológico D-D', subparalelo a la Falla Cerrejón con dirección norte - sur, donde se observa la estructura tipo graben entre las fallas Capuchino y Marimondas. Las unidades geológicas se muestran con buzamientos aparentes. Autores. | 84 |
| Figura 57: Mapa estructural de la zona de trabajo, con diagramas roseta para diez bloques estructurales. | 88 |
| Figura 58: Ubicación de los puntos de adquisición geofísica. | 89 |
| Figura 59: Comparación del diagrama polar de los datos de resistividades aparentes para 50 m. Vs los diagramas rosetas de los bloques estructurales cercanos. | 90 |
| Figura 60: Comparación del diagrama polar obtenido con los datos de resistividades aparentes para 80 m vs los diagramas de rosetas de los bloques estructurales más cercanos. | 91 |
| Figura 61: Comparación del diagrama polar con los datos de resistividades aparentes para 100 m vs los diagramas roseta de los bloques estructurales cercanos. | 91 |
| Figura 62: Comparación del diagrama polar con los datos de resistividades aparentes para 50m vs los diagramas rosetas de los bloques estructurales más cercanos. | 92 |
| Figura 63: Comparación del diagrama polar de los datos de resistividades aparentes para 80 m vs los diagramas rosetas para los bloques estructurales más cercanos. | 92 |
| Figura 64: Resultado de la inversión de la tomografía de resistividad eléctrica (TRE) A-A' para el punto 1 en cercanías al Manantial Cañaverales con dirección NNE-SSW, dispuesta de forma paralela a la falla Cerrejón, vista con el software Flashres-Universal. | 94 |

Figura 65: TRE A-A' con arreglo tipo Wenner observada con la versión demo del software Res2DInvx32 donde solo trabaja los datos de inversión con 28 electrodos de los 64 que se usaron..... 94

Figura 66: TRE A-A' obtenido con la versión demo de ZondRes2D 95

Figura 67: TRE B-B' perpendicular a A-A' dispuesta en dirección NWW-SEE..... 95

Figura 68: TRE B-B' observada con la versión demo de Res2DInvx32..... 96

Figura 69: TRE B-B' obtenido con la versión demo de ZondRes2D 96

Figura 70: TRE C-C' en el punto 2, paralelo al eje del anticlinal La Esmeralda con FlashRes-Universal..... 97

Figura 71: TRE C-C' observada con la versión demo del software Res2DInvx32..... 98

Figura 72: TRE C-C' obtenido con la versión demo de ZondRes2D 98

Figura 73: TRE D-D' para el punto 2, perpendicular a la dirección de la TRE C-C' 99

Figura 74: TRE D-D' obtenido con la versión demo de Res2DInvx32..... 99

Figura 75: TRE D-D' obtenido con la versión demo del software ZondRes2D..... 99

Figura 76: Interpretación de las tomografías de resistividad de acuerdo con la litología presente y valores de resistividades comunes. 100

Lista de Apéndices

(Ver Apéndices adjuntos en el CD y puede visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)

Apéndice A. Mapas

Mapa geológico tomado de INGEOMINAS 2010 aledaño al Manantial Cañaverales.

Mapa de lineamientos aledaños al Manantial Cañaverales sur de La Guajira.

Mapa geomorfológico aledaño al Manantial Cañaverales sur de La Guajira.

Mapa de la geología estructural aledaño al Manantial Cañaverales sur de La Guajira.

Mapa geológico aledaño al Manantial Cañaverales sur de La Guajira.

Mapa geológico con la ubicación de los puntos de geoelectrica.

Apéndice B. Columna estratigráfica regional

Apéndice C. Datos de diaclasamiento en diez bloques estructurales

Apéndice D. Gráficas polares generadas con los datos de resistividad aparente y resistencia vs el azimut de rumbo de la dirección de la corriente, del arreglo cuadrado de sondeos eléctricos azimutales para el punto 1

Apéndice E. Gráficas polares generadas con los datos de resistividad aparente y resistencia vs el azimut de rumbo de la dirección de la corriente del arreglo cuadrado de sondeos eléctricos azimutales para el punto 3.

Apéndice F. Datos de Inversión de las Tomografías

Apéndice G. Descripción en mano de las muestras de roca

Apéndice H. Descripción de las secciones delgadas.

Apéndice I. Fotografías de las unidades geomorfológicas principales.

Resumen

TÍTULO:

Cartografía geológica y análisis estructural de la zona del Manantial Cañaverales, sur de La Guajira: aporte para un modelo hidrogeológico conceptual. *

AUTHORS:

NIDIA AMPARO ARCHILA MEDINA**

HÉCTOR ANDRÉS OCAMPOS CHAPARRO**

PALABRAS CLAVES

Hidrogeología, Sondeos eléctricos azimutales, Fracturas, Lineamientos, Diagramas de roseta, Diagramas polares, Secciones delgadas, Tomografía, DEM, La Luna, Glauconita, Karst.

DESCRIPCIÓN

Se realizó la cartografía geológica a escala 1:15.000 en las cercanías al Manantial Cañaverales, entre los corregimientos de Cañaverales, Conejo y Corraleja, donde afloran unidades carbonatadas cretácicas marinas y de plataforma en contacto fallado con unidades jurásicas continentales volcano sedimentarias con una geología estructural compleja donde se presentan fallamientos de cabalgamiento y de rumbo con componente normal principalmente. Esta cartografía es la contribución geológica para un modelo hidrogeológico conceptual útil para el ordenamiento y planificación de la cuenca hidrogeológica ubicada en el piedemonte nororiental de la Serranía del Perijá.

Para ello se definió la geología estructural describiendo las características de las diaclasas, los lineamientos, los plegamientos, las fallas y la dirección preferencial del fracturamiento a profundidad, apoyados con imágenes satelitales, geoeléctricas, diagramas roseta y polares, para establecer una dirección preferencial de flujo y acumulación del agua en el acuífero. Para la caracterización geomorfológica se usó un Modelo Digital de Elevación-DEM del satélite *Alos Palsar* y se corroboraron las geoformas descritas con datos de campo.

La petrografía de la zona se describió en dos campañas de campo donde se obtuvieron y describieron muestras representativas de roca a nivel macroscópico de las diferentes formaciones rocosas aflorantes, de las que se eligieron 9 de ellas para caracterizar su contenido mineral y fosilífero a nivel microscópico en sección delgada para definir ambientes de formación. Además, se realizaron dos pares de tomografías con el método Wenner, asociando las resistividades obtenidas con niveles de saturación de agua.

*Proyecto de grado, Modalidad de investigación.

**Autores. Facultad De Ingenierías Físicoquímicas, Escuela De Geología. Director Juan Diego Colegial G.

Abstract

TITLE:

Geological mapping and structural analysis around the Cañaverales spring, La Guajira south: a conceptual hydrogeological model contribution. *

AUTHORS:

NIDIA AMPARO ARCHILA MEDINA **

HÉCTOR ANDRÉS OCAMPOS CHAPARRO **

KEYWORDS

Hydrogeology, Azimuthal square array, Fractures, Guidelines, Rose diagrams, Polar diagrams, Thin sections, Tomography, DEM, La Luna, Glauconite, Karst.

DESCRIPTION

The geological cartography with 1:15,000 scale was carried out around of Cañaverales spring, between the Cañaverales, Conejo and Corraleja towns, where marine and from platform units Cretaceous carbonated in failed contact with continental Jurassic volcanoclastic units. They units have thrust and strike-slip failures with a normal component mainly. This cartography is the geological contribution to a conceptual hydrogeological model useful for planning how to use the hydrogeological basin located in the Serranía del Perijá northeastern foothills.

For this, the structural geology was defined describing the diaclasses characteristics, lineaments, folds, faults and the underground fracturing preferential direction, supported by satellite, geoelectric, rose and polar diagrams, to establish a preferential water flow direction and accumulation inside the aquifer. For the geomorphological characterization we used Alos Palsar Digital Elevation Model "DEM" and the geofoms described were corroborated in the field work.

The petrography was described in two field campaigns where we obtained and described representative rock samples at the macroscopic level of the different outcropping rock formations, of which 9 of them were chosen to characterize their mineral and fossiliferous content at the microscopic level with thin section, to define training environments. In addition, we can obtain two pairs of tomographys with the Wenner array, associating the resistivities obtained with water saturation levels.

* Degree project, Research modality.

** Authors. Faculty of Physical-Chemical Engineering, Director: Juan Diego Colegial Gutiérrez, Geology School.

Introducción

Los estudios realizados sobre los sistemas acuíferos muestran que alrededor del 51% de los pozos construidos en Colombia están sin información. (IDEAM, 2019). El estudio nacional del agua 2019 muestra que para el sistema de acuífero Ranchería al sur de La Guajira hay una demanda de agua calculada de 2,87 Millones de m³/año y sus reservas no presentan aún información registrada, y donde el agua captada tiene diferentes usos como el doméstico, pecuario, actividades hoteleras y hospitalarias, agrícola e industrial. (IDEAM, 2019)

También las poblaciones de los corregimientos de Cañaverales, Conejo y Corralejas hacen parte de la zona de influencia de diferentes prospectos de explotación de recursos minero-energéticos, que presentarían una demanda considerable del recurso hídrico.

Por lo anterior, se hace necesario desarrollar el conocimiento sobre los sistemas acuíferos a nivel local, en términos de la dinámica del ciclo hidrológico sobre su componente subterránea para contribuir al desarrollo de un modelo hidrogeológico conceptual que sirva como soporte académico-científico en la administración y gestión del recurso por parte de las autoridades competentes. Dentro de lo que involucra un modelo hidrogeológico conceptual se tiene que son varios modelos los que lo componen: de geología básica, hidrología, propiedades hidráulicas de los reservorios, caracterización hidrogeoquímica e isotópica del agua. De acuerdo con lo anterior debe tenerse pleno conocimiento de la geología de la zona haciendo uso de métodos directos como el levantamiento de columnas estratigráficas, geología de campo, entre otros además del apoyo de métodos indirectos como la geofísica, que para la delimitación de zonas saturadas de agua resulta muy útil el uso de la geoelectrónica; para lo cual, este trabajo describirá los aspectos geológicos necesarios para la elaboración de un modelo geológico base para la zona.

Planteamiento del problema

De acuerdo con la UNESCO, “las aguas subterráneas son un componente significativo del ciclo hidrológico, siendo los acuíferos una unidad hidrológica de vital importancia. En el planeta, las aguas subterráneas representan el 98% del agua dulce líquida, siendo el sostén de varias funciones y servicios ecológicos. Además, son una fuente segura de agua para beber en regiones áridas y semiáridas, así como en pequeñas islas” (UNESCO, s.f.)

El manejo inapropiado de las aguas subterráneas ha hecho que estas sean sensibles a la contaminación y sobreexplotación, por lo tanto, se hace necesario “conocer su ocurrencia, distribución y principales características hidráulicas, hidrológicas e hidrogeoquímicas para una gestión adecuada y sostenible del recurso. El almacenamiento y flujo del agua en el subsuelo están determinados por las condiciones geológicas del suelo y subsuelo además de las características físicas, químicas, hidrológicas y climáticas que intervienen en la dinámica de recarga, tránsito y descarga de los sistemas acuíferos presentes en las diferentes regiones (IDEAM, 2014). La precipitación y el agua superficial se infiltran habitualmente en las capas rocosas, recargando así un acuífero de agua subterránea, el cual se llena o se descarga de acuerdo a las fluctuaciones climáticas, de vegetación y geológicas en la región donde esta ocurra. De acuerdo a la UNESCO, “en las áreas húmedas con suelos porosos, por ejemplo, alrededor del 25% de la lluvia anual puede recargar el sistema de agua subterránea, por el contrario, las regiones desérticas rara vez experimentan una recarga del agua subterránea; los acuíferos de estas áreas contienen a menudo aguas subterráneas fósiles que se acumulan bajo condiciones climáticas completamente diferentes” (UNESCO, 2018).

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2014), la utilización del agua subterránea alrededor del mundo ha jugado un papel importante en el devenir de las ciudades y sus habitantes, siendo los usos más representativos; el doméstico, agrícola, pecuario y de servicios. Indica que grandes ciudades como México, Calcuta, Shanghái, Buenos Aires, Dhaka, Manila, Pekín, Paris, Londres alrededor del mundo son las que utilizan este recurso para estos fines.

En Colombia los Sistemas Acuíferos son estratégicos, debido a que abastecen poblaciones con poca disponibilidad de recurso hídrico principalmente en La Guajira y Sucre. La explotación de los acuíferos someros en La Guajira está asociada a depósitos recientes y ocasionalmente a sedimentos y rocas conglomeráticas y arenáceas del Paleógeno-Neógeno, donde la principal recarga de estos sistemas es la Falla de Oca al sur del departamento (IDEAM, 2013).

De acuerdo con lo anterior, se propone, la elaboración de un Modelo Geológico Básico como aporte a un Modelo Hidrogeológico Conceptual para lo cual se plantea el siguiente interrogante ¿Qué características geológicas con relación a la geomorfología, estratigrafía, geología estructural y petrografía resultan favorables para el almacenamiento y circulación del agua subterránea en la zona del Manantial Cañaverales, Sur de La Guajira?

1. Objetivos

1.1 General

Caracterizar geológicamente los parámetros litológicos, geomorfológicos, estructurales y geoelectrónicos que favorecen el flujo y acumulación de agua subterránea en inmediaciones al Manantial de Cañaverales al sur de la Guajira.

1.2 Específicos

Realizar la cartografía geológica de la zona de estudio a escala 1:15.000 teniendo en cuenta la composición mineralógica, características texturales y microestructurales de las formaciones y miembros aflorantes y representarlas en el levantamiento de una columna estratigráfica a escala 1:500.

Determinar las zonas de saturación de agua subterránea mediante las variaciones verticales de resistividad del subsuelo aplicando Tomografía Eléctrica de Resistividad TRE en zonas cercanas a los manantiales y las direcciones preferenciales de flujo mediante el estudio del fracturamiento de las rocas con Sondeos Eléctricos Azimutales Cuadrados.

Analizar las características y distribución de las diaclasas y fracturas para estimar las direcciones preferenciales del flujo favorecidas por la porosidad secundaria y permeabilidad.

2. Localización

La zona de estudio se ubica al piedemonte occidental de la Serranía de Perijá, en inmediaciones del manantial de Cañaverales entre los corregimientos de Corralejas, Cañaverales y Conejo de los municipios de San Juan del Cesar y Fonseca, en el departamento de la Guajira, dentro de las coordenadas X=1139093 Y=1685874; X=1144312 Y=1681979; X=1132267 Y=1678789; X=1136900 Y=1674232, Magna Sirgas con origen Bogotá y las Plancha 21 Fonseca, 22 Los Remedios, 27 Valledupar y 28 Villanueva (GRP Ltda., 2010) (Ver **Figura 1**)

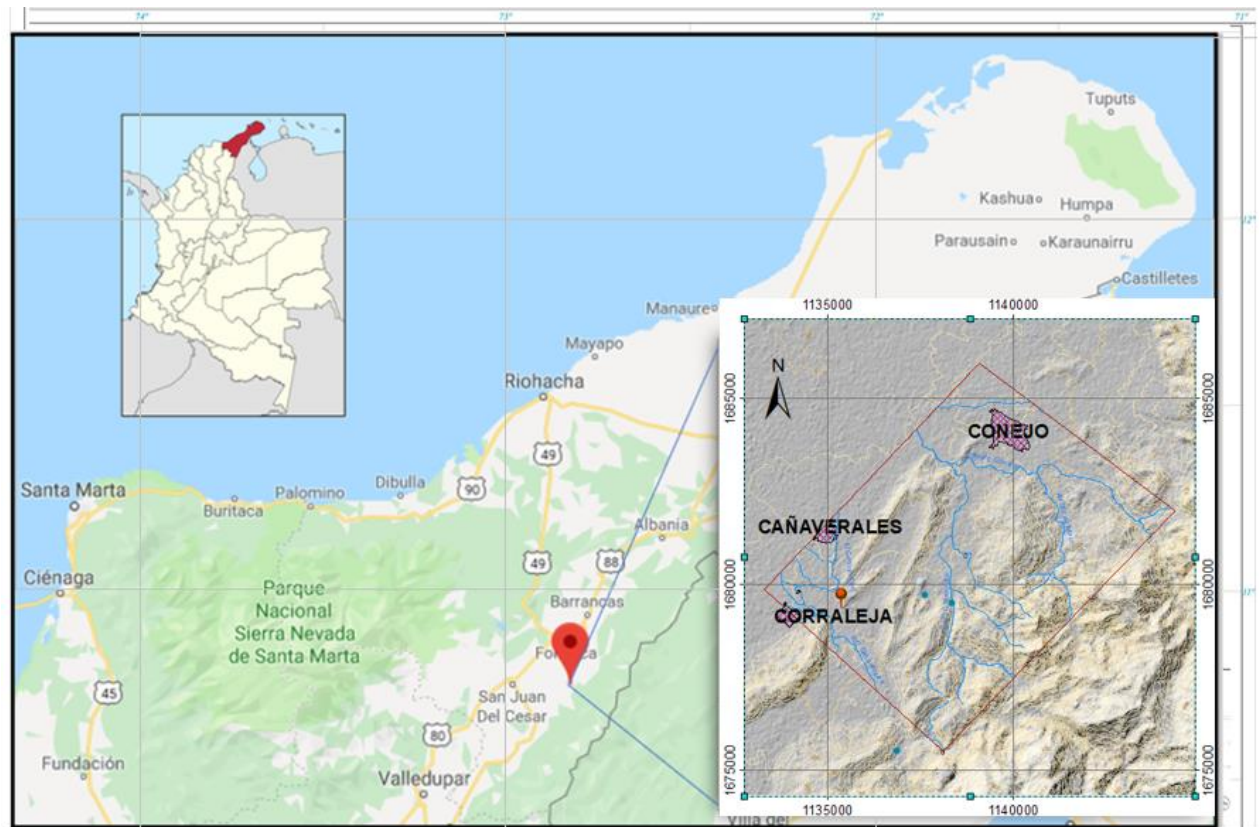


Figura 1. Ubicación de la zona de trabajo al N de Colombia, departamento de la Guajira, Manantial Cañaverales Modificado de Google Maps.

3. Metodología

El presente trabajo de investigación se desarrolló en distintas etapas como se puede identificar en la *Figura 2*.

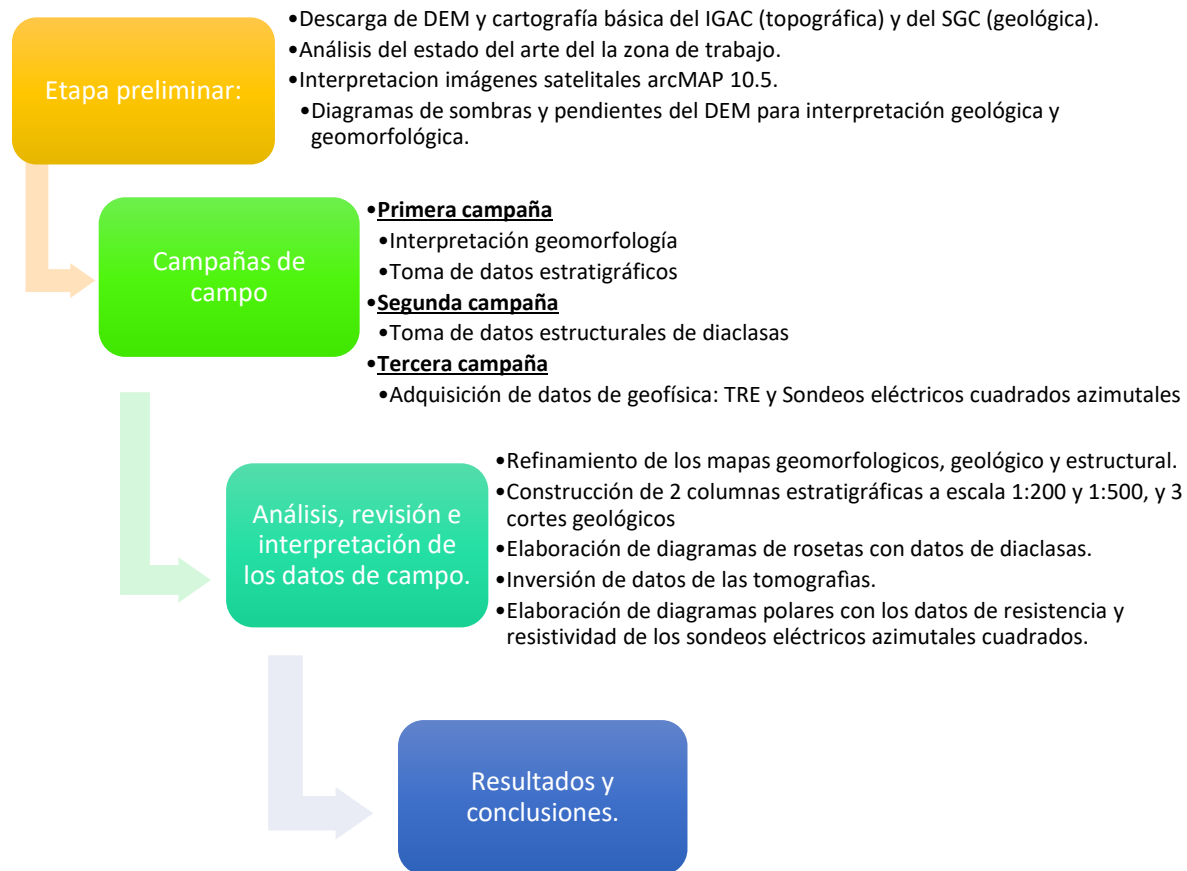


Figura 2. Esquema del flujo metodológico del trabajo de investigación

La etapa preliminar, consistió en una revisión exhaustiva del estado del arte de la geología regional en la zona de estudio teniendo en cuenta documentación obtenida del Servicio Geológico Colombiano-SGC, Agencia Nacional de Hidrocarburos -ANH, CORPOGUAJIRA, bases de datos de la Universidad Industrial de Santander, IDEAM, entre otros. Inmediato a esta búsqueda se realizó la descarga de imágenes satelitales gratuitas para visualizar e interpretar en el software ArcMap 10.5 un DEM del satélite japonés ALOS PALSAR con resolución espacial de 12,5 m del cual se obtuvieron los mapas de sombras y pendientes útiles para formular los mapas de insumo

base a escala semidetallada siguiendo la guía metodológica para la zonificación por movimientos en masa escala 1:25.000 del (Dirección de Geoamenazas SGC, 2017), para determinar aspectos relacionados con la geomorfología, cuerpos de agua, lineamientos y cambios litológicos evidentes en la zona.

Posterior a la etapa preliminar se llevaron a cabo 3 campañas de campo en las cuales los mapas sirvieron de guía para la verificación de litologías, ubicación de manantiales y demás cuerpos de agua, toma de datos de diaclasas según (González de Vallejo, 2002), ubicación de la distribución espacial de las geformas y su descripción según los parámetros del (Servicio Geológico Colombiano, 2015) para mapas 1:25.000, se tomaron 30 muestras de roca de las que se escogieron las 9 más representativas a las que se les realizó secciones delgadas.

Se adquirieron datos de resistividades en dos puntos con interés hidrogeológico con dos pares de Tomografías de Resistividad Eléctrica con el arreglo tipo Wenner y ZZ, una tomografía perpendicular a la otra usando 64 electrodos a una distancia de 3 y 4 m entre electrodos y siguiendo las instrucciones del manual de usuario del equipo flashres-UNIVERSAL64/96 (ZZ Resistivity Imaging Pty Ltd).

También se adquirieron datos con los Sondeos Eléctricos azimutales cuadrados con el Terrameter SAS 1000, teniendo en cuenta las metodologías propuestas por (Busby, 2000), (HABBERJAM & WATKINS, 1967) y (Udosen & George, 2018). Se toma al norte (0°) como eje inicial de la dirección de corriente para uno de los lados del cuadrado que forman dos electrodos A-B que son los que inyectan la corriente, a través de la roca generando un campo eléctrico que genera una diferencia de potencial y es leído a través de dos electrodos de potencial M-N y que llega al equipo Terrameter SAS 1000, dando información de resistencia (R), resistividad aparente (Ωm), voltaje (V), corriente (I) y desviación estándar. Se escogió como eje de referencia el Norte

como dirección inicial de la corriente para los electrodos C1-C2 (A-B), que fueron rotando sobre su eje 0°, 30°, 45°, 60°, 90°. Como muestra la *Figura 3*, hasta dar la rotación completa de 360°, cuyos valores de resistividad y resistencia se grafican con los valores de rumbo generando los diagramas polares.

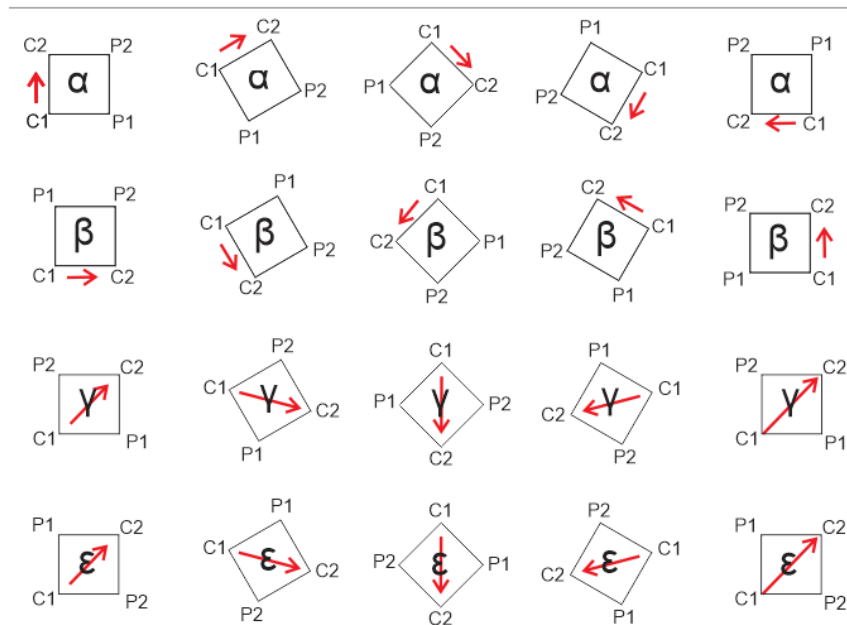


Figura 3. Rotación del arreglo cuadrado con las direcciones de flujo de la corriente según el tipo de arreglo eléctrico. Nota.

De acuerdo con Udossen (2018) la profundidad de exploración para el arreglo cuadrado puede ser de 1 o de 0,451 veces la longitud del lado del cuadrado, es decir que para los puntos de adquisición las profundidades posibles según los datos de la **Tabla 1** son las columnas de Lado cuadrado (m) y Profundidad (m):

Tabla 1

Relación del largo del centro del arreglo cuadrado a los electrodos VS profundidad de adquisición.

| Centro del arreglo al electrodo (m) | Lado cuadrado (m) | Profundidad (m) |
|-------------------------------------|-------------------|-----------------|
| 50 | ≈ 71 | ≈ 32 |
| 80 | ≈ 113 | ≈ 51 |
| 100 | ≈ 141 | ≈ 63 |

Nota: Los arreglos propuestos por Udossen son alfa, beta y gamma (α , β , y γ); el arreglo épsilon (ϵ) se realizó para tener un control de los valores y direcciones de las resistividades en todas las posibles combinaciones electródicas, y el resultado de sus diagramas polares se puede consultar en los Apéndices D y E, se aclara que sus resultados no se tomaron en cuenta para la interpretación estructural de la zona.

Se emplearon: Stereonet para generar los diagramas de rosetas del diaclasamiento y Grapher para generar los diagramas polares de resistividad aparente, las imágenes de las Tomografías se analizaron con el software de inversión FlashRes2D-Universal, y se visualizaron con Surfer 13, además se corroboraron con los softwares en versión demo Res2DINV y ZondRes2D.

Para los datos de campo obtenidos, se digitalizaron 2 columnas estratigráficas en el software Strater 5, 4 cortes geológicos con herramientas de diagramación y los mapas geológico, estructural y geomorfológico con ArcMap 10.5, y se visualizaron con Surfer 13, y los datos de resistividades aparentes y resistencias dados por el Terrameter en los sondeos azimutales se graficaron en diagramas polares con Grapher 12.

Basados en el diagrama de sombras MDOW logrado con el DEM Alos Palsar y siguiendo la metodología propuesta por (Radaideh, Grasemann, Melichar, & Mosar, 2016) se obtuvieron los lineamientos generados con el software PCI Geomatics 2016 estos se exportaron como formato shape para visualizarlos en ArcMap, donde se establecieron puntos de inicio y final para cada línea. La capa lograda se exporto como formato DXF al software Rockworks 16, donde se generaron los diagramas roseta, luego se subieron los datos de nuevo a ArcMap dando como resultado el mapa regional de lineamientos. Finalmente se refinaron los mapas preliminares con la información obtenida en campo obteniendo la cartografía geológica del área de trabajo cuyas características estructurales y litológicas están enfocadas a la vocación hidrogeológica.

4. Marco teórico

Se menciona a continuación los conceptos asociados con las propiedades físicas de la roca y la relación existente entre el modelo geológico básico que incluye las unidades litológicas y su estructura, con el modelo hidrogeológico conceptual.

4.1 Modelo hidrogeológico conceptual

De acuerdo con el IDEAM, 2014 para la construcción de un modelo hidrogeológico conceptual se necesita del conocimiento de un modelo geológico básico (que de acuerdo con los alcances del presente trabajo sólo nos centraremos en este), uno hidrogeológico, uno hidráulico, uno hidrogeoquímico e isotópico. Cada uno de ellos requiere el conocimiento detallado de la composición y funcionamiento del sistema al cual corresponden. Para el modelo geológico se requiere conocimiento de la geometría y tipo de roca que puede explorarse por métodos directos como la observación en campo de afloramientos, levantamiento de columnas estratigráficas, secciones geológicas, análisis de rocas en secciones delgadas y de perforaciones, y métodos indirectos como la geofísica a través de la geoelectrica a través de sondeos eléctricos y tomografías de resistividad eléctrica, así como la interpretación de imágenes satelitales. Dentro de este modelo geológico también es importante la delimitación de unidades hidrogeológicas y sistemas de acuíferos de acuerdo con la clasificación del IDEAM. De manera similar el modelo hidrológico involucra un inventario de puntos de agua, el conocimiento del balance hidrológico, delimitación de flujos y conocimiento de los recursos y las reservas de agua. El modelo hidráulico involucra la cuantificación del conocimiento de las características de los acuíferos como la permeabilidad, el

coeficiente de almacenamiento, caudal, capacidad específica y transmisividad. El modelo hidrogeoquímico e isotópico requiere del conocimiento de las facies hidrogeoquímicas, procesos hidrogeoquímico, y cuáles son las características isotópicas.

4.2 Generalidades de la porosidad secundaria

De acuerdo con (Gómez Isidro, 2000) el flujo de agua dentro de una roca ocurre a través la interconexión de los poros, que se pueden caracterizar como porosidad primaria cuando los poros se forman a medida que se forma la roca, o secundaria, luego de que la roca está formada, ocurre un evento que la fractura, generando nuevos espacios vacíos en ella. Se tiene que las rocas son medios heterogéneos donde el estudio del flujo de agua en ellas está enfocado en estimar sus propiedades macroscópicas de transporte a través de las porosidades, aplicando ecuaciones de flujo para finalmente predecir su comportamiento.

El flujo en rocas fracturadas es de vital importancia en el estudio de las aguas subterráneas, ya que pueden llegar a formar acuíferos de gran capacidad y convertir su fluido en un recurso hídrico importante. En otros casos, el flujo se puede presentar en cantidades limitadas, dejando ver solamente hilos de agua con poco caudal en túneles y manantiales que no se tomarían como recurso hídrico explotable, pero sí podría generar serios problemas de estabilidad de taludes, indeseables filtraciones en presas, túneles, depósitos de desechos, entre otros (Gomez Isidro, 2000).

El grado de heterogeneidad y la forma en la que funciona el flujo de agua cambia con el tipo de roca y su estilo de porosidad. Se le denomina medio fracturado a las rocas que poseen discontinuidades o planos de falla interconectados entre sí, por donde puede fluir y filtrarse un fluido.

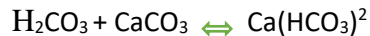
La necesidad de estudiar el flujo en formaciones geológicas, lleva a considerar la existencia de las familias de diaclasamiento generadas por diferentes direcciones en los campos regionales de esfuerzos, tomando importancia variables geométricas como el espaciado entre fracturas, su continuidad, abertura, rugosidad, relleno e indudablemente, la orientación de dichas familias cuya interpretación se logra con la proyección estereográfica (Diagrama de Schmidt), estas variables son descritas por (González de Vallejo, 2002).

El fluido viaja a través rutas preferenciales, por medio de fracturas que sirven de canales tortuosos que se interceptan unos con otros, este puede viajar a través de grupos de canales (clústeres) o solamente en pocos canales (Gomez Isidro, 2000).

Dentro de la porosidad secundaria puede ser generada también por disolución. En este caso la circulación del fluido está acompañado por una serie de fenómenos fisicoquímicos propios del tipo de roca presente generalmente carbonatada. La solubilidad de estas se logra gracias a que el agua posee una determinada acidez (entre más bajo su pH, más alto su poder disolvente) proporcionada, en la mayoría de los casos, por el CO₂ que pueda tener disuelto y que haya adquirido a nivel atmosférico, generando ácido carbónico según la siguiente reacción química:



A su vez el ácido carbónico actúa sobre la caliza, transformándola en bicarbonato de calcio:



Siendo este último soluble en el agua, enriqueciendo el acuífero en iones Ca⁺² y CO₃⁻² y haciéndolo más conductivo (Llopis Lladó, 1970).

4.3 Prospección Geofísica- Generalidades

Los métodos geoelectricos consisten en interpretar los distintos materiales del subsuelo a partir de las variaciones de la propiedad física de resistividad al paso de la corriente eléctrica (Estrada Lorenzo, 1996) (Estrada, 2012).

La aplicación de estos métodos exige el conocimiento de las propiedades electromagnéticas de las rocas y de los minerales que las constituyen. Siguiendo el trabajo de (Alonso Díaz, 2001) estas propiedades se expresan fundamentalmente por medio de tres magnitudes o propiedades físicas que son las siguientes, y que para efectos de la presente investigación sólo se tendrá en cuenta la última de ellas:

- Permeabilidad magnética “ μ ”
- Permitividad o constante dieléctrica “ ϵ ”
- Resistividad eléctrica “ ρ ” o su inversa la conductividad “ σ ”

4.3.1 Resistividad “ ρ ”. Corresponde a la propiedad física del material para oponerse al flujo de la corriente eléctrica y se define según (Alonso Díaz, 2001) al considerar un prisma de longitud “L” y sección “A” por el cual circula una corriente continua – dirección, sentido e intensidad constantes – de intensidad “I”. Se tiene que el material presenta mayor resistencia al paso de la corriente cuando es largo y cuando es más delgado, que cuando es corto y ancho, y la constante de proporcionalidad ρ es la denominada resistividad. El flujo de la corriente eléctrica se explica mediante la Ley de Ohm la cual establece que la caída de potencial “ ΔV ” entre dos puntos por los que circula una corriente eléctrica de intensidad “I”, es proporcional a ésta y a la resistencia “R” que ofrece el medio al flujo de la corriente. (Auge, 2008).

Si, “A” está dada en metros, “L” en metros y “R” en ohmios, la unidad de la resistividad será de ohmios-metros (Ωm); también suele expresarse en “ Ωcm ”: $1 \Omega\text{m} = 100 \Omega\text{cm}$. El recíproco de la resistividad es la conductividad “ σ ” medida en siemens por metro (Telford, Geldart, & Sheriff, 1990).

En la **Figura 4** se ilustra la relación entre la distancia de separación de los electrodos y la profundidad de penetración; a mayor separación de los electrodos, mayor profundidad de adquisición.

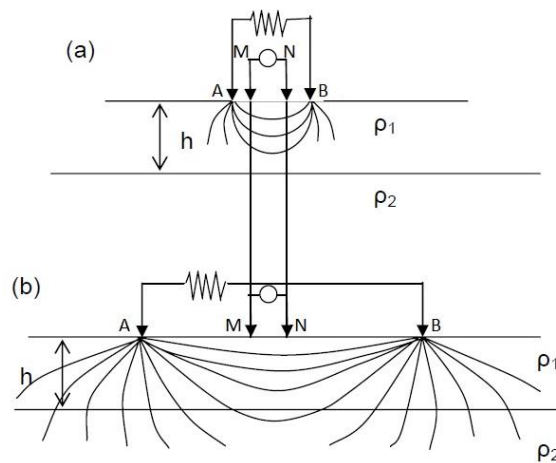


Figura 4. Relación entre la separación de los electrodos y la profundidad de penetración, a) Separación pequeña de electrodos, corriente confinada en ρ_1 ; b) Separación grande de electrodos, corriente confinada en ρ_1 y ρ_2 . Adaptado de De la Torre. (2010) (p. 27)

De acuerdo con (Loke, 2012) en campo sólo se obtienen medidas de resistividades aparentes, que para obtener los valores de medidas reales es necesario realizar mediante software la inversión de los datos aparentes. Lo anterior debido a que el subsuelo es un material heterogéneo y anisotrópico, y así la resistividad depende de la estructura del corte geoelectrico (ver **Figura 5**), de la distribución relativa de los electrodos en el dispositivo y de la situación de éste en la superficie del terreno (Lakubovskii & Liajov, 1980).

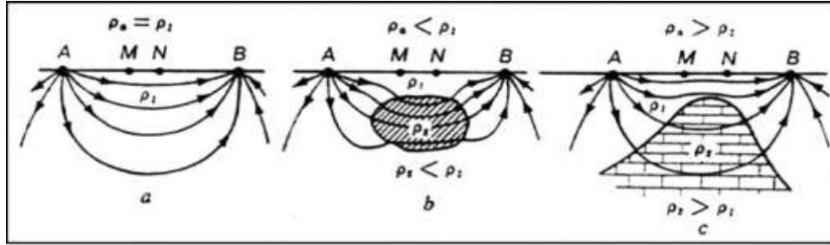


Figura 5. Dependencia de ρ_a del carácter del corte geoelectrico, a) Subsuelo homogéneo; b) Subsuelo heterogéneo que incluye un cuerpo conductor; c) Subsuelo heterogéneo que incluye un cuerpo resistivo. Fuente: Lakubovskii & Liajov. (1980).

Las rocas corresponden a un medio heterogéneo donde la conductividad se debe generalmente a los fluidos que se encuentran dentro de la porosidad primaria o secundaria que conducen iones presentes en estos (Chelotti, Acosta, & Foster, 2009).

Tipos de arreglos de los electrodos:

Generalmente los arreglos suelen estar compuestos por cuatro electrodos y existen varios tipos de arreglos, entre los que se destacan dos grandes grupos: los lineales y los no lineales, donde la elección del arreglo dependerá del objetivo del estudio, y del tiempo disponible. Los más importantes son:

Dispositivo colineal

En este tipo de arreglo los electrodos se disponen de manera colineal con separaciones de los electrodos que varían entre los de corriente y los de potencial. La **Figura 6** muestra el tipo de arreglo Wenner, el cual es uno de los más usados; se trata de una configuración simétrica tipo AMNB, en donde los electrodos se disponen equidistantes.

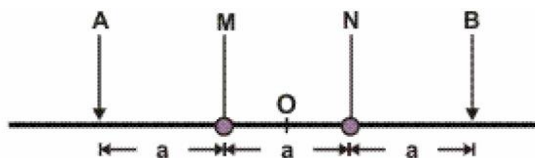


Figura 6. Dispositivo Wenner. Fuente: Auge. (2008).

En la **Tabla 2** se exponen las ventajas y desventajas del método.

Tabla 2

Ventajas y desventajas del arreglo Wenner

| Ventaja | Desventaja |
|--|---|
| Debido a la separación equidistante entre los electrodos, se requieren voltímetros menos sensibles. | Se deben mover los cuatro electrodos en todas las lecturas. |
| Indica las variaciones de resistividad en profundidad, permitiendo identificar la profundidad de posibles zonas saturadas. | Presenta poca variación a las anisotropías de resistividad |

Dispositivos no lineales: Cuadrado azimutal

Son un método ampliamente utilizado (Habberjam, 1967; Taylor 1988; Busby, 2000, Udossen, 2018; Watson 1999, Kirsch 2009, entre otros) empleados para mostrar la anisotropía del subsuelo, como es el caso de las zonas fracturadas y consisten en tomar medidas de resistividad aparente con cuatro electrodos dispuestos de manera cuadrada cada vez que se expande el arreglo de manera progresiva, y cada vez que se va rotando sobre un punto en diferentes ángulos (ver **Figura 7**).

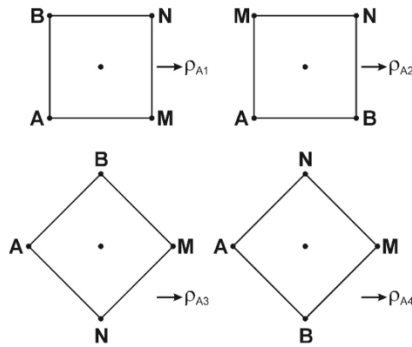


Figura 7. Disposición de los electrodos en campo para un arreglo azimutal cuadrado (Tomado de Kirsch, 2009).

Con este método también es posible identificar porosidad secundaria (fracturas y conductos por disolución), teniendo en cuenta valores de conductividad del agua subterránea, los valores máximos y mínimos de la resistividad aparente, y los valores de resistividad aparentes medidos en las diferentes direcciones (Kirsch 2009).

De acuerdo con (HABBERJAM & WATKINS, 1967), (Taylor & Flemming, 1988), (Udosen & George, 2018), los sondeos azimutales cuadrados permiten identificar la dirección preferencial

de fracturamiento de las rocas, al graficar las resistividades aparentes en un diagrama polar el cual genera una elipse, donde el eje menor corresponderá a la dirección con mejor conectividad de las fracturas (ver **Figura 8**).

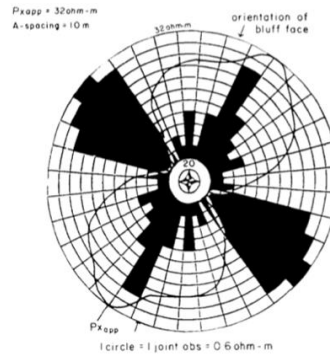


Figura 8. Comparación de los resultados de resistividad azimutal con el diagrama de rosetas, Taylor (1988)

De acuerdo con (Loke, 2012) para determinar la profundidad de investigación de los dispositivos geoelectrónicos se han definido distintos procedimientos matemáticos que valoran el grado en el cual un cambio de resistividad de una sección del subsuelo provoca una variación en el potencial medido de los electrodos de la línea geoelectrónica (Loke, 2012)

Tomografía eléctrica 2D

La Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D TRE, exhibe la variación de la resistividad real en dos dimensiones (vertical y horizontal) del subsuelo, generalmente usa 96 electrodos, los cuales están conectados a un cable multinúcleo y un microcomputador portátil que se encuentra conectado a una unidad de conmutación. Se toman datos a diferentes profundidades y con diferentes posiciones laterales, para ello, se cambia la posición de los electrodos y la separación denominada “a”, en donde se van variando las distancias entre los pares de electrodos emisor-receptor por múltiplos de un valor denominado “n”, de tal forma que el resultado final será una pseudosección de resistividad aparente a varios niveles “n” en profundidad; estos datos posteriormente son tratados por medio de algoritmos matemáticos de inversión, con el fin de encontrar un modelo de

la resistividad verdadera del subsuelo y con ello realizar una interpretación (Carrasco, 2011; Gómez, 2014).

Adquisición – Arreglo Wenner

Los electrodos van con una distancia de separación “a”; cada electrodo posee una dirección numérica única, que le permite ser identificado por el ordenador. Se muestra en la *Figura 9* el procedimiento para el arreglo tipo Wenner donde para cada nivel de exploración los electrodos se separan distancias de a, 2a 3a y sucesivamente hasta llegar al final de los electrodos o al último nivel.

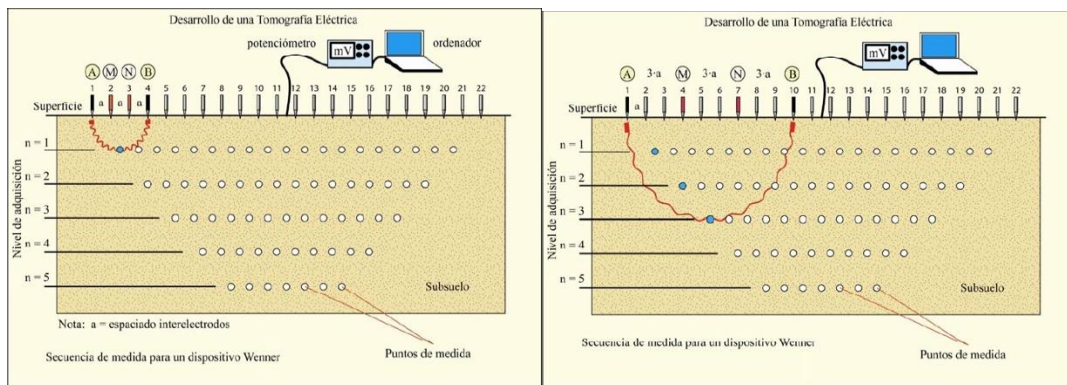


Figura 9: Representación esquemática de la adquisición de la primera medición en el nivel “n=1” y “n=3” utilizando el dispositivo Wenner para una tomografía de resistividad eléctrica 2D” Fuente: Martínez (2006).

Los perfiles de tomografía eléctrica aún no invertidos se representan bajo pseudosecciones (secciones con curvas de isorresistividad que reflejan cualitativamente la variación espacial (2D) de la resistividad aparente) que muestran una imagen aproximada de la distribución de las resistividades reales del subsuelo a partir de la inversión de los valores de resistividades aparentes sin embargo de acuerdo con (Martínez, 2006) las pseudosecciones obtenidas mediante los tres dispositivos electródicos más usados (Wenner, Wenner – Schlumberger y Dipolo – Dipolo), muestran que la resistividad aparente difiere bruscamente de un dispositivo a otro.

4.3.2 Factores que controlan la resistividad de las rocas. Son diversos y algunos influyen más drásticamente que otros, los más importantes son: la matriz mineral (composición), las propiedades eléctricas de los líquidos que rellenan los poros, la humedad de la roca, la porosidad (volumen, configuración y fluidos), la textura de la roca y su distribución poral, la presión, la temperatura, la anisotropía y los procesos en la zona de contacto líquido-sólido:

Matriz: De acuerdo con la composición química de los minerales que constituyen la matriz de la roca se puede generalizar que las rocas presentan un amplio rango de resistividades como se puede ver **Tabla 3**).

Tabla 3

Valores de resistividad para diferentes tipos de materiales

| | |
|--------------------------|------------------------------|
| Silicatos | $10^6 - 10^{15} \Omega m$ |
| Malos Conductores | $10^0 - 10^5 \Omega m$ |
| Menas Minerales | $10^{-5} - 10^{-1} \Omega m$ |
| Metales Nativos | $10^{-6} - 10^{-5} \Omega m$ |

Fuente: Adaptado de Chelotti, Acosta y Foster. (2009).

Para las rocas sedimentarias la resistividad aumenta conforme aumenta el tipo de grano, de esta manera en orden creciente de resistividad encontramos los sedimentos de arcillas, arenas y gravas; esta condición está asociada a la presencia de cargas eléctricas en los minerales de arcilla y a la baja permeabilidad de las arcillas que incrementan la presencia de sales minerales en estas (ver **Figura 10**).

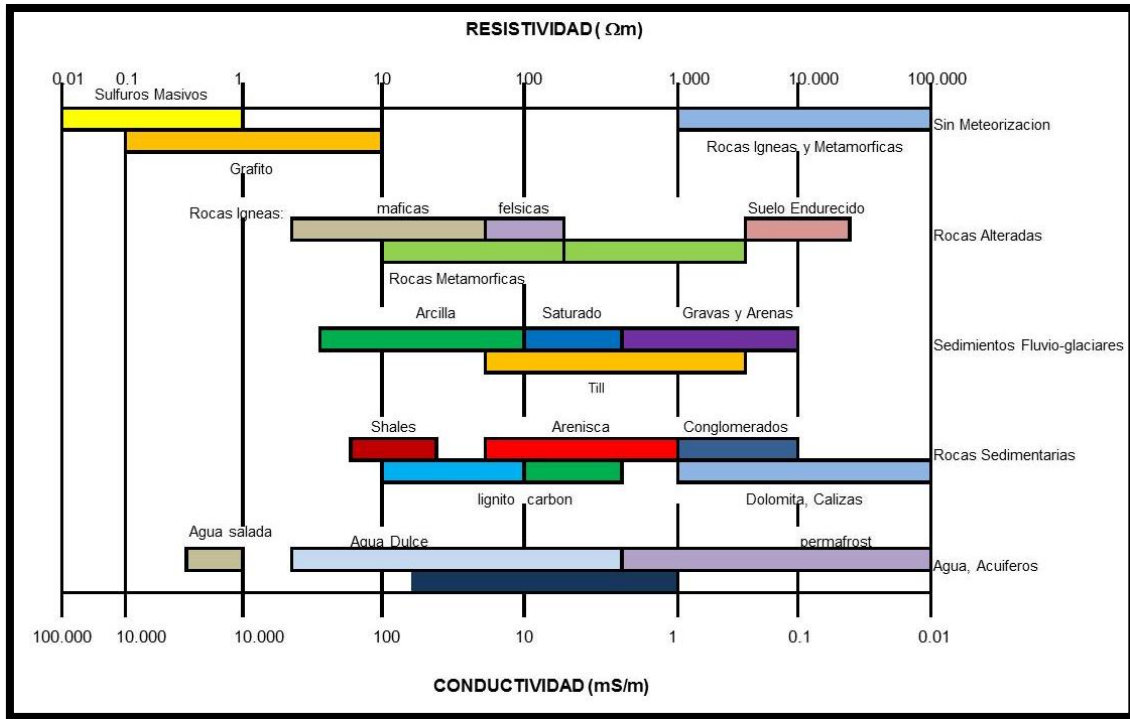


Figura 10. Rangos de resistividad de rocas, minerales, fluidos y sedimentos. Palacky. (1987)

Generalmente las rocas sedimentarias (en orden creciente de tamaños de grano: shales, areniscas, conglomerado y calizas fracturadas) son las de más baja resistividad, debido en gran parte a su elevada porosidad; sin embargo, existen rocas sedimentarias de altas resistividades como los sedimentos hidroquímicos compactos de baja porosidad (Yeso y Anhidrita). Las rocas ígneas tienden a presentar los valores más altos de resistividad, debido a su composición mineralógica y su escasa porosidad; zonas de baja resistividad en rocas cristalinas o compactas, indican zonas de fracturamiento de alta permeabilidad.

Fluidos inter e intra granulares

Las aguas que se encuentran en la naturaleza presentan conductividad apreciable, pues siempre tienen disuelta alguna sal la cual favorece la conductividad de la corriente. La cantidad y clase de estas sales depende de la naturaleza de las rocas con que las aguas hayan entrado en contacto en su marcha por la superficie del terreno o subterránea.

A continuación, se presenta la **Tabla 4** que comprende los márgenes de variación de la resistividad de las aguas naturales.

Tabla 4

Valores de resistividad para diferentes aguas naturales.

| | |
|--|---|
| Agua de lagos y arroyos de alta montaña | 10³ a 3.10³ Ωm |
| Aguas dulces superficiales | 10 a 10 ² Ωm |
| Aguas salobres superficiales | 2 a 10 Ωm |
| Aguas subterráneas | 1 a 20 Ωm |
| Aguas marinas | 0.2 Ωm |
| Agua de los lagos salados | 0.1 a 1 Ωm |
| Agua de impregnación de roca | 0.03 a 10 Ωm |

Fuente: Adaptado de Alonso. (2001).

Humedad y Saturación

La resistividad de la roca disminuye con el incremento de la humedad de la roca, y su valor mínimo se presenta cuando la roca se encuentra saturada de agua con iones disueltos.

Anisotropía

La resistividad de muchos minerales y la de las rocas que éstos constituyen, varían según la dirección de medida que se toma, es decir según su anisotropía (ver

Figura 11) (Alonso, 2001). Estos valores se deben tener en cuenta a la hora de realizar medidas de resistividad con los sondeos eléctricos azimutales descritos anteriormente debido a que pueden cuantificar los valores de resistividades en direcciones perpendiculares entre si (Udossen, 2018).

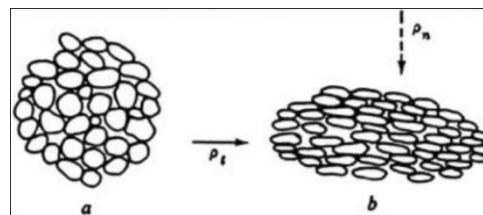


Figura 11. Textura de una roca, a) isotrópica; b) Anisótropa. Fuente: Lakubovskii & Liajov. (1980).

4.4 Marco geológico regional

4.4.1 Unidades litológicas. En la zona de estudio se presentan las siguientes formaciones las cuales se describen de base a techo y son mostradas en la **Figura 12**:

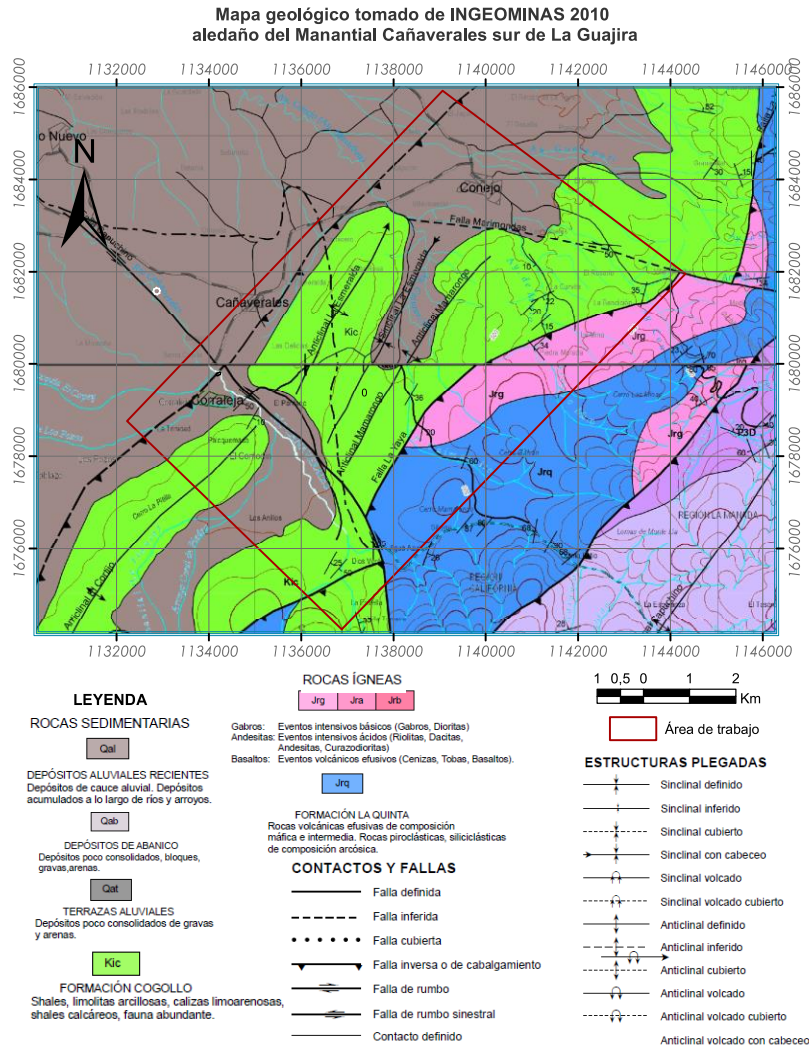


Figura 12. Mapa geológico regional de la zona de trabajo, tomado y modificado de INGEOMINAS 2010.

4.4.1.1 Formación La Quinta. Siguiendo el trabajo de INGEOMINAS (2010) se pueden dividir en dos segmentos:

Segmento A: base constituida por una alternancia de rocas volcánicas efusivas de composición máfica e intermedia, rocas piroclásticas y capas muy gruesas y masivas de aglomerados de clastos

volcánicos y de arenitas gruesas. En algunas localidades se encuentra intruidas por cuerpos hipoabisales porfiríticos de composición gabroica.

Segmento B: constituye el tope de la formación y se encuentra constituida por una secuencia de rocas clásticas rojizas de composición arcosa con alternancias de rocas volcánicas efusivas de composición acida. Se encuentran areniscas muy finas y limolitas arcosas, arcosas líticas y líticas feldespáticas, en capas tabulares medias a muy gruesas, texturalmente granos subangulares a subredondeados, desde tamaño arcilla hasta arena, predominando limo.

Debido a la ausencia de niveles guía que no es posible determinar el espesor con precisión sin embargo se estima entre los 2000 m y los 2600 m. Se correlaciona con la formación Girón en el Valle Medio del Magdalena, considerándose como una prolongación de esta en la Serranía del Perijá. Según el contenido fosilífero se considera de edad jurásica, depositada en un ambiente distensivo de graben, con presencia de fallas normales, reactivadas e invertidas durante eventos compresivos que pudieron dar origen a la Serranía de Perijá.

4.4.1.2 Grupo Cogollo. Según INGEOMINAS (2010) se constituye de calizas grainstone y packstone esparíticas en paquetes muy espesos con abundantes fragmentos de conchas de bivalvos, ostreidos, corales, equinodermos, foraminíferos y briozoos. Este autor identifica dos secciones y las define así:

Sección basal: discordante con la Formación La Quinta constituida por calizas en capas gruesas con delgadas alternancias de margas lutitas y arcillolitas, y hacia la base de esta secuencia se encuentran algunos niveles de areniscas calcáreas de grano fino esporádicamente glauconíticas. Las calizas presentan color gris claro a gris pardo, densas, oscuras y bituminosas, con contenido fosilífero variable: conchas de bivalvos reemplazados y recristalizados por calcita y por

foraminíferos, las margas se presentan de color blanco, poco resistentes, las lutitas y las limolitas gris pardo a gris claro, ligeramente laminadas y con presencia de pirita.

Sección superior: asociada con la formación Aguas Blancas, constituido principalmente por calizas de color negro microcristalinas, fosilíferas y bituminosas, se presentan capas de calizas alternadas con lutitas negras ligeramente calcáreas con sulfuros diseminados.

El espesor para esta formación es variable entre los 200 y 700 m, se asigna una edad de aptiano inferior. El ambiente de sedimentación para la secuencia inferior se asocia a plataforma interior a media en mar tropical abierto con abundancia en carbonato de calcio y abundancia de materia orgánica. Para el superior sugiere una depositación química a partir de carbonatos y pequeños bioclastos, en facies de plataforma media a exterior en un mar tropical transgresivo.

4.4.1.3 Formación La Luna (k2l). Siguiendo el trabajo de INGEOMINAS (2010) se trata de las rocas calcáreas que afloran en La Guajira y se encuentra constituida principalmente por calizas petrolíferas con foraminíferos, chert negros y hacia el tope una delgada capa de conglomerado. Para el Valle Medio del Magdalena, Rangel (2000) describe tres miembros divididos de base a tope con las siguientes características:

Miembro Salada: consta de 102.2 m de Wackestone foraminíferos intercalados con shales calcáreos y chert. Su litología está agrupada en cuatro litofacies sedimentarias.

- Wackestone pobremente laminado: Esta litofacies se compone principalmente de Wackestone foraminíferos planctónicos con algunas vértebras y huesos de peces, así como trazas de pirita.
- Wackestones lodosos laminados y shale calcáreo: esta litofacies tiene capas delgadas de Wackestone foraminíferos y shales calcáreos con laminación planoparalela y pequeños nódulos.

- Shales fosfáticos calcáreos y lutitas laminadas: consiste en lutitas calcáreas, ligeramente fosfáticas y finamente laminadas, con abundantes foraminíferos.
- Caliza cristalina: esta litofacies consta de dos capas de 40 cm de caliza cristalina verde grisáceo con trazas de materia orgánica.

Miembro Pujamana: consta principalmente de shales calcáreos fosfáticos con abundantes foraminíferos, lodolitas calcáreas fosfáticas, chert y bentonitas, además de nódulos calcáreos hasta de 1 m de diámetro, además de presentar una cantidad de pirita mayor que el miembro Salada. Se identifican tres litofacies:

- Shales calcáreos fosfáticos y lutitas laminadas: Consiste en shales y lutitas calcáreas finamente laminadas y ligeramente fosfáticas, con abundantes foraminíferos y restos de peces.
- Bentonitas: esta litofacies está compuesta por arcillas (esmectita-illita) amarillas grisáceas, verde grisáceas y gris anaranjadas. Normalmente aparece como capas tabulares menores a 35 cm.
- Wackestones lodosos laminados y shales calcáreos: Consiste en shales calcáreos y delgadas capas de Wackestone foraminíferos de color gris oscuro.

Miembro Galembo: esta sección consiste en una serie de packestones fosfóricos, Wackestone y packestones fosfáticos, chert y shales calcáreos fosfáticos. Las capas son tabulares con rangos de capa entre 5 a 30 cm con concreciones de 2 m de diámetro presentes hacia la base de este miembro. Se identifican tres litofacies:

- Shales calcáreos fosfáticos u lutitas laminadas: consiste en shales calcáreos ligeramente fosfáticos y finamente laminados con abundantes foraminíferos.

- Packestones fosfóricos: son packestones fosfóricos con abundantes foraminíferos, pellets, restos esqueléticos de peces y oolitos. Su laminación es ondular, lenticular y en algunas locaciones se pueden observar laminación flaser.
- Packestones y Wackestone fosfáticos: esta litofacies fue observada en la parte superior del miembro Galembó y consiste principalmente en packestones ligeramente fosfáticos con laminación lenticular y ondulada, además contiene fragmentos esqueléticos de peces, pellets, oolitos y fósiles plantónicos. (Rangel. 2000)

El espesor de esta formación es variable y puede ir desde 40 m hasta 265m en toda la Guajira y el ambiente de depósito corresponde a un ambiente de sedimentación en un mar tropical de circulación restringida, y cercano a una plataforma exterior que permitió la acumulación de lodos calcáreos y materia orgánica (INGEOMINAS 2010).

4.4.1.4 Formación Cerrejón. Sus afloramientos solamente se encuentran en el valle del río Ranchería, desde Fonseca hacia el norte, más allá de la Falla Oca. El espesor de la Formación Cerrejón es variable de 1.320 a 1.500 sin embargo INGEOMINAS (2010) reporta que esta formación tiene un espesor de tan solo 400 m para la cuenca de Cerrejón.

Compuesta de areniscas de grano fino y shales, shales limosos, shales arenosos, mantos de carbón y delgadas capas de calizas en la parte media de la unidad. Los primeros 640 m de la secuencia están constituidos por areniscas micáceas de color amarillo, gris y blanco, con abundantes partes carbonosas y micáceas de colores grises oscuros, y shales carbonáceos, shales limosos, shales arenosos y mantos de carbón. Sulfuros son localmente abundantes en la parte inferior y media de la formación, e incluye calcopirita, pirita y marcasita. La parte superior es rojiza, excepto cerca de las capas de carbón. La arenisca típica es de grano muy fino, bien estratificada y laminada, y presenta alternancias de shales arcillosos y limosos de tonos

amarillentos, rojizos, grises y verdosos. La parte más superior tiene 110 m, está compuesta principalmente por shales arcillosos de color rojo oscuro con algunas capas de colores grises y verdes. Los siguientes 350 m consisten en alternancias de areniscas de grano fino y shales de colores rojos y amarillos.

INGEOMINAS, (2010) indica que la formación corresponde a una facies deltaica, subacuática cuya edad se encuentra entre el Eoceno inferior para la parte baja, suprayaciendo eoceno medio, y se correlaciona con la Formación Los Cuervos de la región del Catatumbo, y se correlaciona palinológicamente con la Formación del Catatumbo.

4.5 Geología estructural

De acuerdo con INGEOMINAS (2010) la serranía de Perijá se ha venido elevando desde el Mioceno tardío al reciente, durante la Orogenia Andina. La compresión, por la convergencia de las placas Caribe, Nazca y Suramericana, ha producido fallamientos inversos de muy bajo ángulo como la Falla Cerrejón que es la principal falla de este tipo en territorio guajiro debido a que es la que presenta mayor longitud y marca la diferencia -entre las unidades del terciario al W con las del cretácico al E. En el pie occidental de la serranía se exponen formaciones volcanosedimentarias del Jurásico como La Quinta que constituyen las rocas del basamento en cambio en la cuenca de los ríos Ranchería y Cesar, las secuencias de la cobertura mesozoica y paleógena están plegadas contra el bloque de la Sierra Nevada de Santa Marta como se describe para las estructuras de esa zona las cuales son mostradas en la **Figura 12**:

5.2.1 Pliegues. De acuerdo con (INGEOMINAS, 2010) los anticlinales tienen ejes paralelos a subparalelos a los grandes cabalgamientos del piedemonte de la parte NW de la Serranía del Perijá, además son ligeramente asimétricos, alargados con vergencia occidental y con un claro arreglo en relevo.

Los sinclinales se encuentran ocupados en su núcleo por sedimentitas del Cretáceo Superior y del Paleógeno – Neógeno. En general presentan una tendencia entre N15°E y N35°E; los más representativos son los sistemas sinclinal - anticlinal, Mamarongo – Esmeralda. (INGEOMINAS, 2010).

5.2.2 Fallas. Se presentan fallas en tres tendencias descritas de la siguiente manera:

Fallas de dirección N35°E

En el flanco E de la Sierra de Perijá, los rasgos estructurales más importantes, están delimitados por fallas de dirección aproximada N30°E (Ortiz, 1977, en Ujueta & Llinás, 1990). Las estructuras más importantes que siguen esta dirección son las fallas de cabalgamiento Cerrejón y La Yaya (Ujueta & Llinás, 1990).

Falla Cerrejón: Se desprende al norte desde la Falla Oca y continúa al sur en el departamento del Cesar con dirección NE. Es una falla de cabalgamiento de bajo ángulo, con buzamiento de 15° ± 10° hacia el SE y un desplazamiento mínimo de 1,7 ± 0,6 km en la vertical y 7,8 ± 2 km en la horizontal. Además de un desplazamiento inverso, con un desplazamiento horizontal mínimo medido de 1.7 km y vertical de unos 8 km (Kellogg, 1981 en INGEOMINAS, 2010). A lo largo del trazo de la falla se presentan numerosas zonas de brecha, compuestas por clastos angulosos de calizas dentro de una matriz calcárea. Kellogg (1981) postula que durante la Orogenia Andina en el Plioceno (3 Ma) la parte norte de Perijá fue levantada 4,5 km y cabalgada más de 16 km hacia

el NW sobre la Falla Cerrejón. El acortamiento WNW-ESE es indicado por la orientación de estilolitos y los pliegues.

Falla La Yaya: Falla regional de tipo inverso, de ángulo alto y buzamiento al E, estructura con rumbo SSW – NNE de dirección aproximada $N25^{\circ}E$ que se extiende desde el arroyo Pondores al sur, donde su traza se acerca a la traza de la Falla Cerrejón, hasta el arroyo Surimena al norte, donde ha sido cortada por la Falla Surimena. La cinemática de esta falla genera anticlinales de rampa por la propagación de la estructura desde el basamento Cámbrico–Ordovícico a las sedimentitas Paleozoicas del Permo-Carbonífero (INGEOMINAS, 2010). Esta falla levanta de sur a norte, sedimentitas del Devónico Carbonífero sobre sedimentitas del Grupo Girón. Su desplazamiento vertical no se conoce. Hacia el sur del arroyo Masteban, la Falla Yaya podría corresponder con la Falla Las Minas (Ujueta & Llinás, 1990).

Fallas de dirección estructural E-W

A nivel regional, la dirección E-W es una dirección importante representada principalmente por las fallas Oca y Cuisa en la península de La Guajira. Cerca de la falla La Oca este sistema corta y desplaza en la serranía de Perijá al sistema $N35^{\circ}E$, que corresponde al sistema regional (INGEOMINAS, 2010). Regionalmente se presenta la siguiente:

Falla Marimonda: se muestra como una falla de rumbo sinestral según (GRP Ltda., 2010). Fue descrita como una falla de tipo normal, donde el bloque sur se levanta y está constituido por sedimentitas del Devónico Carbonífero, mientras el bloque norte hundido corresponde al Grupo Girón. Como rasgos sobresalientes de la traza de falla, ésta el control del arroyo Marimonda en una extensión de 6 km en dirección aproximada E-W y en el extremo oriental el desplazamiento de la cresta de la serranía de Perijá hacia el oriente.

Dirección estructural NW -SE

Este sistema de fallas tiene una dirección comprendida entre N30°W y N50°W, constituye un conjunto más reciente de fallas que el sistema de dirección NE, que se considera en este trabajo como el sistema regional de las cordilleras. Ujueta & Llinás (1990) describen como las fallas más representativas de este sistema en el flanco occidental de la serranía de Perijá: la Falla Masteban, la Falla Capuchino, la Falla El Molino y la Falla Villanueva.

Falla Capuchino: falla de rumbo sinistral según (GRP Ltda., 2010). Se extiende aproximadamente por 12 km desde el cerro Monte de Cristo al este, hasta cerca del corregimiento de Cañaverales en el occidente, corresponde a una falla normal con el bloque NE levantado, y pone en contacto rocas devónico-carboníferas con rocas mesozoicas. Esta falla, junto con las fallas Las Minas y Monte Lía de dirección NE y la Falla Marimonda de dirección E-W, delimitan y son las responsables de levantar un bloque de dirección NE compuesto por las rocas más antiguas que afloran en la región (Ujueta & Llinás, 1990). La Falla Capuchino corta de este a oeste la Falla Las Minas y desplaza la Falla Cerrejón; en el sureste, controla buena parte del curso del río Capuchino y en el noroeste, el arroyo Cañaverales. De acuerdo con INGEOMINAS (2001) no se tiene registro de actividad en el Cuaternario de las fallas descritas para la zona de trabajo.

5. Resultados

5.1 Unidades geológicas aflorantes

Se presentan las unidades geológicas en el mapa de la **Figura 13** y su descripción geológica en la columna generalizada de la zona de trabajo mostrada en la **Figura 14** que se realizó con un detalle

mayor al predispuesto en los objetivos, cuyas unidades son descritas de base a techo a continuación:

5.1.1 Formación La Quinta (Jrq). Esta unidad representa las rocas más antiguas aflorantes en la zona correspondientes hacia la base con aglomerados tobaceos de composición lítica (Q1), y al tope arcosa rojiza de textura rojiza (Q2). (ver **Figura 15**)

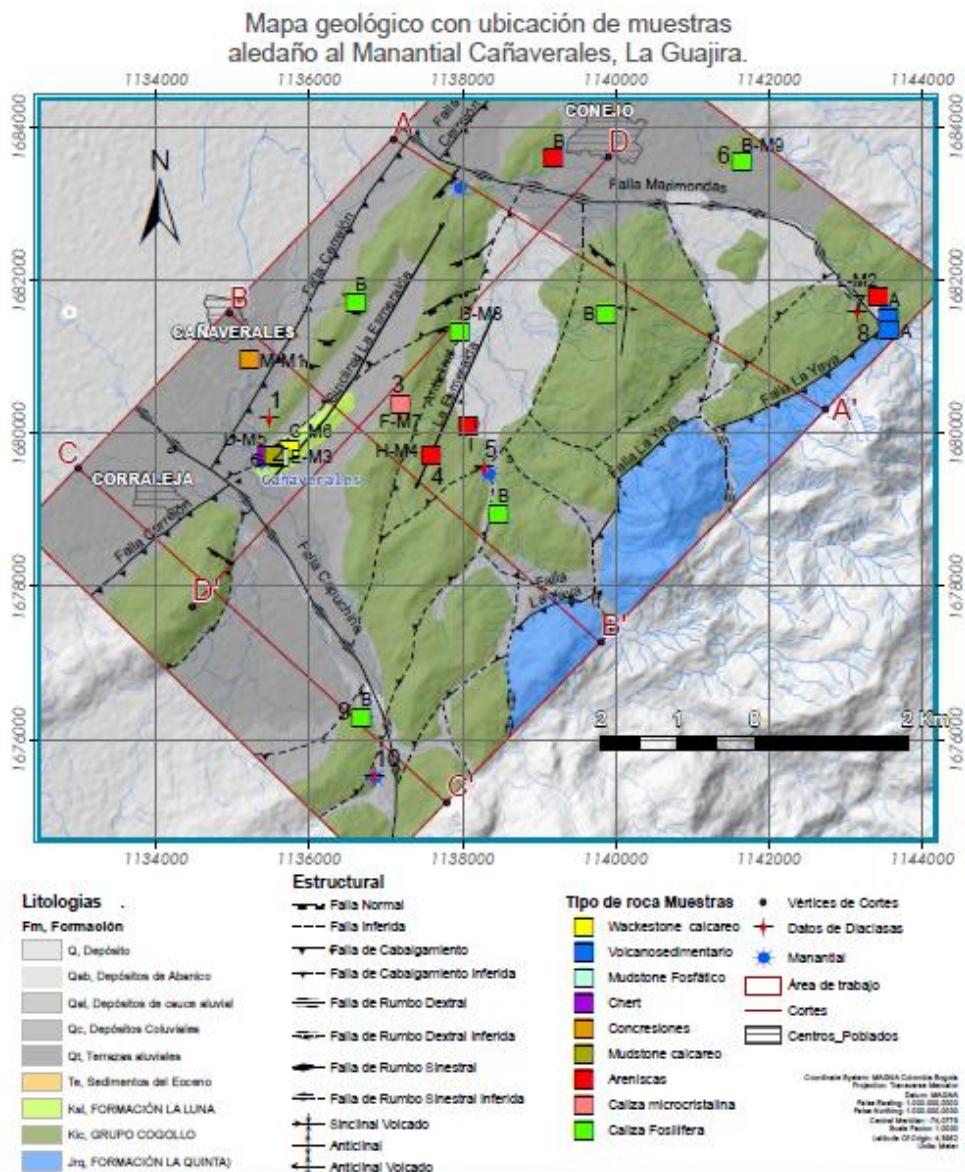


Figura 13. Mapa geológico aledaño al manantial Cañaverales de la zona de trabajo.

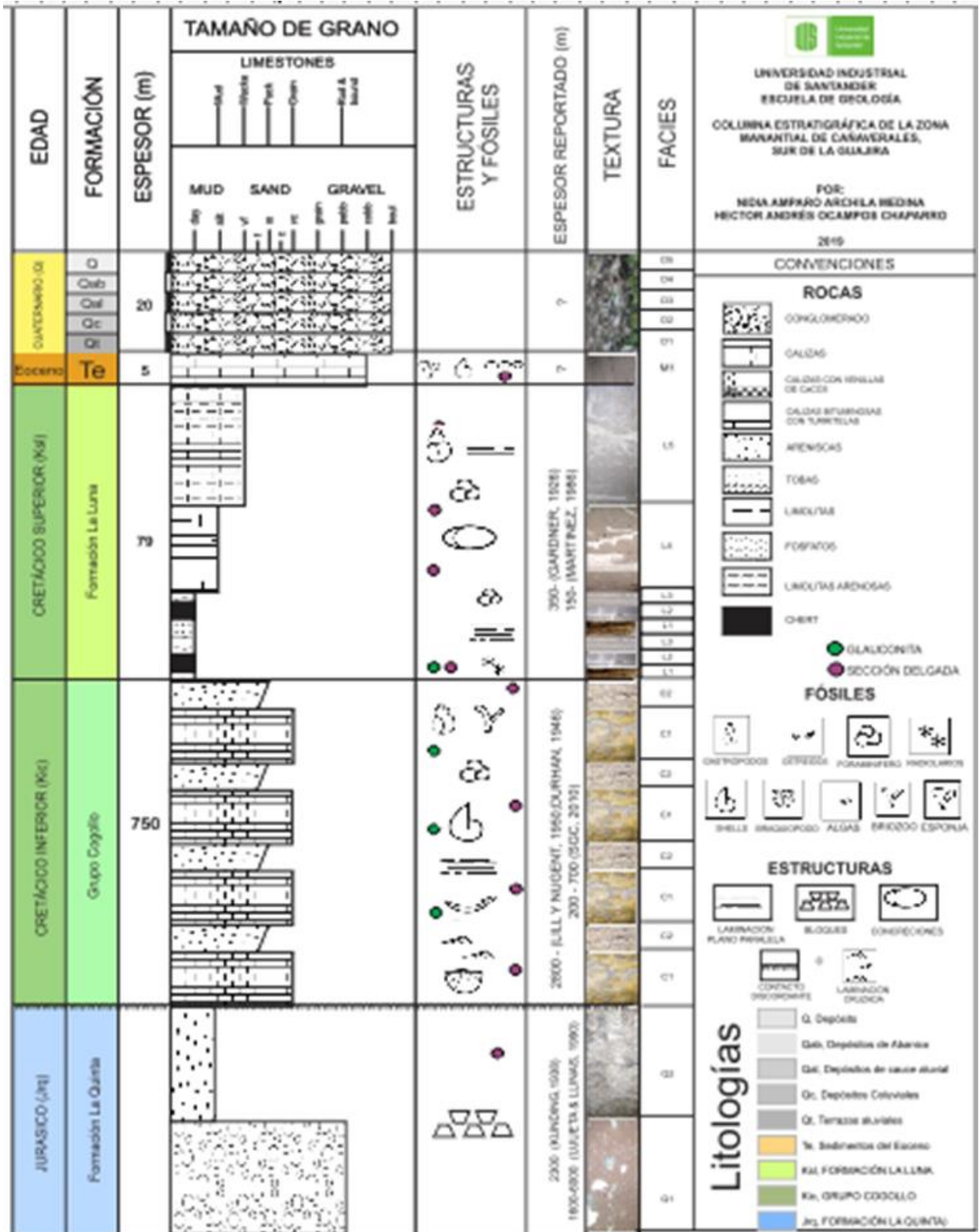


Figura 14. Columna estratigráfica generalizada de la zona de trabajo.



Figura 15. Aglomerados rojizos hacia la base de la Formación La Quinta.

Se asocian las siguientes litofacies a esta formación las cuales son descritas a continuación:

Facies Q1: Aglomerados riolíticos

Facies dispuesta por aglomerados riolíticos, están compuestos por cuarzo (90%), feldespato y fragmento de roca (FR %10) los cuales corresponden a material de volcánico asociado a cuarzoes bipiramidales (ver **Figura 16**). No se ve el contacto entre facies Q1 y Q2.

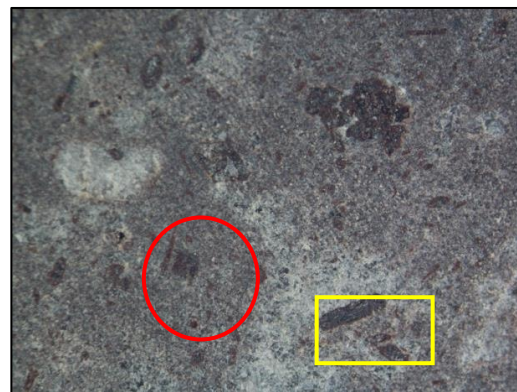
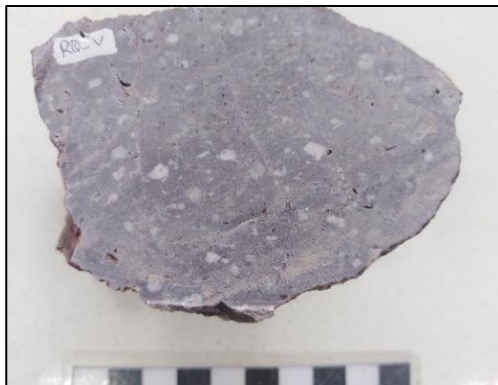


Figura 16. a) Muestra de mano aglomerados riolíticos. (B)

b) Muestra de mano aglomerados riolíticos, cuarzo bipiramidal (círculo rojo), cristal de piroxeno-Px (cuadrado amarillo)

Facies Q2: Limolitas ligeramente arenosas

Facies constituida por limolitas sin laminación interna evidente. Se encuentra constituida por partículas de tamaño limo 85% (limo soportada), granos de arena muy fina 10%, fragmentos de bivalvos-ostreidos (trazas) <1% y presenta porosidad del 3% (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). No se evidencia contacto entre facies Q2 y Q3.

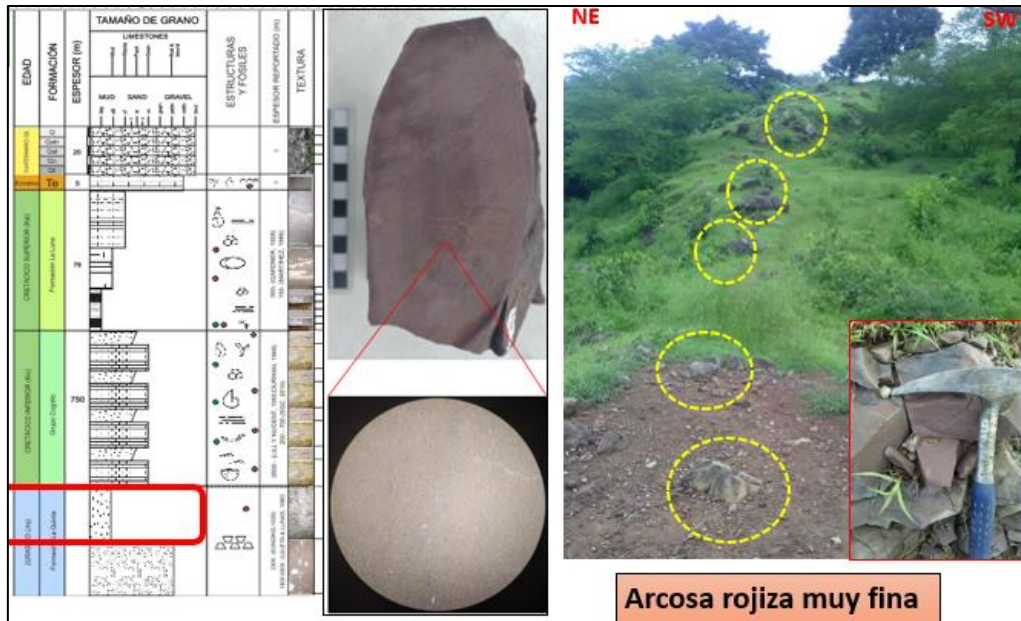


Figura 17. Muestra de mano RQ1: Arcosa rojiza muy fina.

5.1.2 Grupo Cogollo (Kic). El espesor estimado de esta formación en la zona de trabajo es de aproximadamente 800 m y limita al occidente con la Falla Cerrejón que pone en contacto a la Grupo Cogollo con sedimentos del Eoceno de la Formación Cerrejón, y al oriente limita con la Falla La Yaya que la conecta con la Formación Triásica-Jurásica de La Quinta. El grupo Cogollo se describe en la columna estratigráfica a escala 1:500 de la primera secuencia de 70 m que se repite a lo largo de la formación superior del grupo en la **Figura 18**, columna tomada sobre los afloramientos de estratos casi verticalizados observados a lo largo del eje del anticlinal La Esmeralda (ver **Figura 19**), constituido de base a techo por alternancias de nódulos de caliza con

conchas pequeñas, calizas fosilíferas, arenas lodosas, arenas de grano fino a medio (ver *Figura 20*), calizas con conchas grandes, calizas arenosas con concreciones de aproximadamente 20 cm y margas fosilíferas (ver *Figura 21* y **Figura 22**). Se presentan estructuras sedimentarias en las arenas y arenisca calcárea con laminación plano-paralela en la parte inferior y en artesa hacia el medio. La fauna fosilífera encontrada en esta formación abarca *foraminíferos plantónicos*, *exogyras*, *trigonía*, aunque los restos de estas últimas se pueden confundir fácilmente.

Mineralógicamente se encuentra dominado por minerales carbonatados, que debido a ausencia de tintes especiales para la tinción de carbonatos, no se pueden diferenciar la calcita de la dolomita o de otros posibles minerales de la caliza; con respecto a los minerales terrígenos, hay dominio de cuarzo y feldespatos potásicos tipo ortosa, las plagioclasas no se pudieron diferenciar, pero sí hay abundancia en minerales arcillosos de alteración tipo sericita y caolinita, además de muscovita en una menor proporción y óxidos ferrosos vistos como opacos en las secciones delgadas (ver **Figura 24 a Figura 29**)

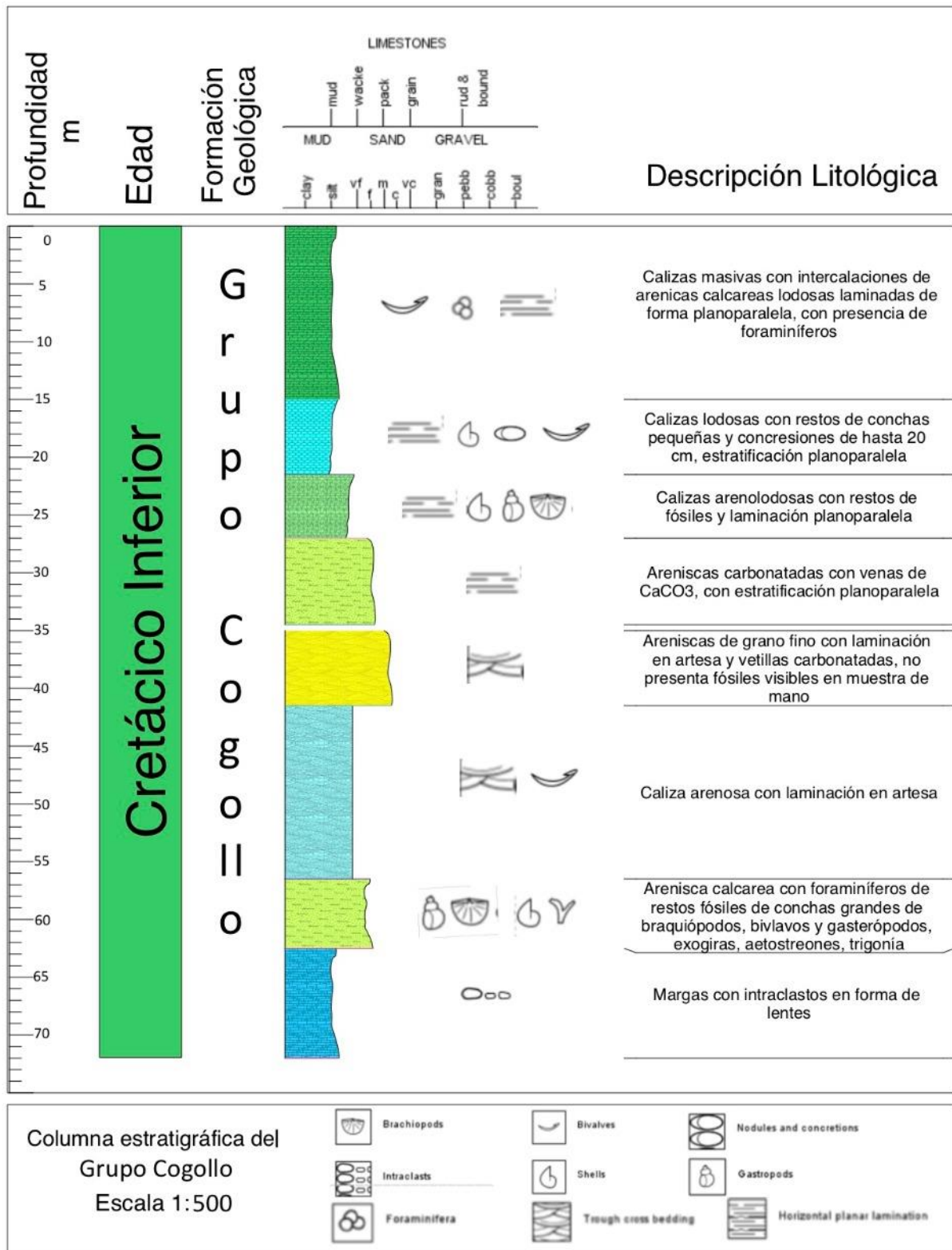


Figura 18. Columna detallada para el grupo Cogollo a escala 1:500, en cercanías al anticlinal La Esmeralda.

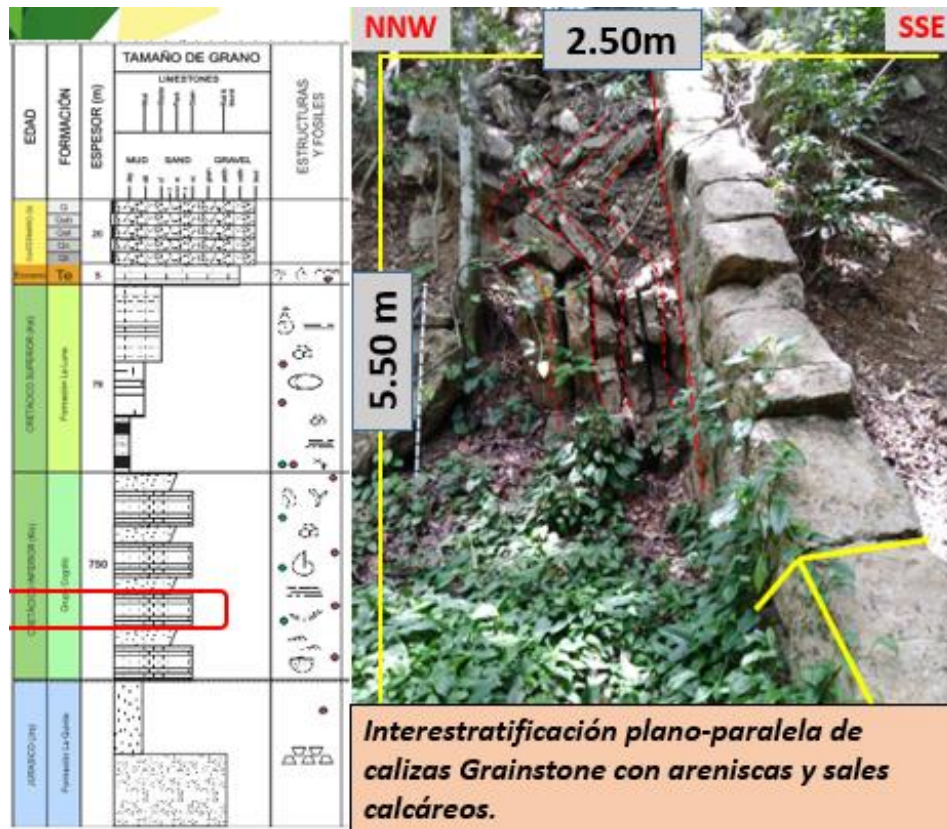


Figura 19. Afloramiento del grupo Cogollo caracterizado por intercalación de capas delgadas de arenisca lodosa calcárea con bloques de caliza fosilífera.



Figura 20. Afloramiento de areniscas de grano fino a medio con grietas de desecación asociadas al miembro superior del Grupo Cogollo

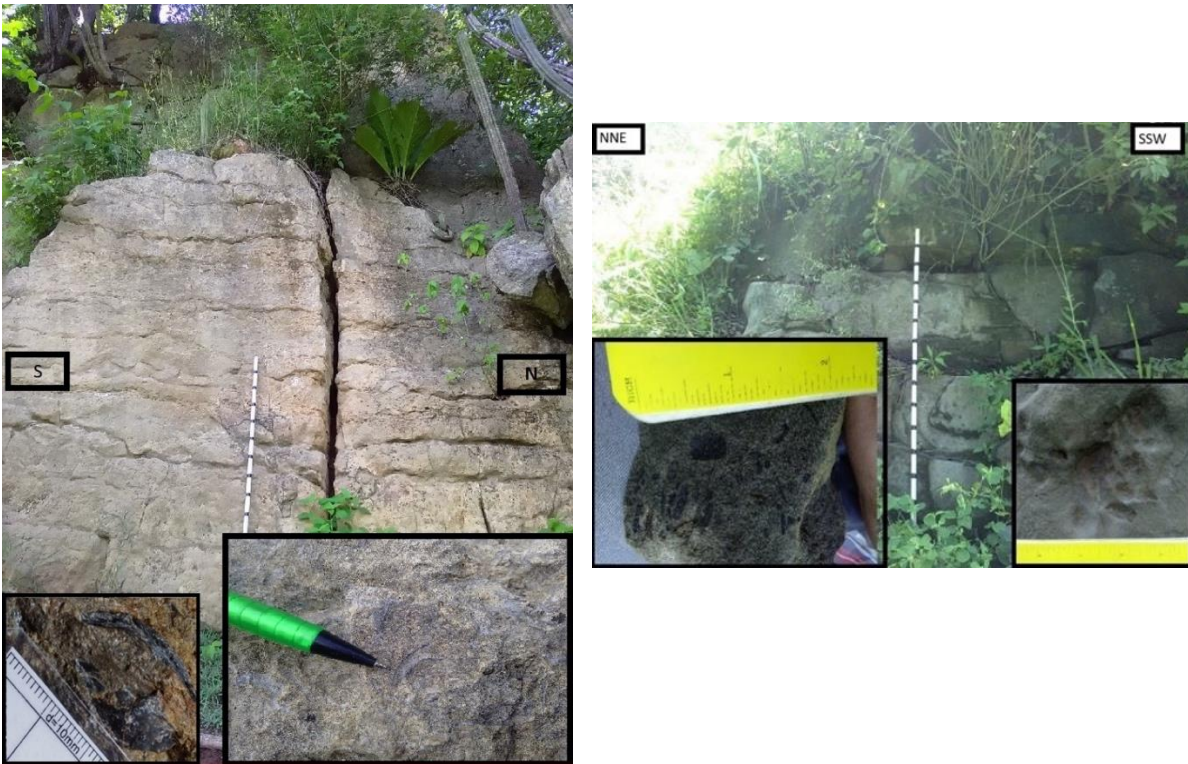


Figura 21. a) Afloramiento de calizas arenosas fosilíferas del Grupo Cogollo

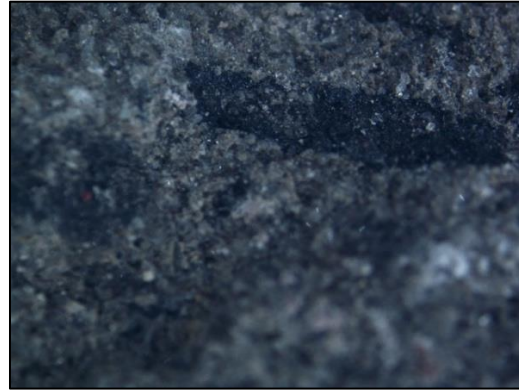
b) Afloramiento de areniscas del grupo Cogollos con rastros de huellas hacia la base.



Figura 22. Afloramiento de areniscas calcáreas fosilíferas del Grupo Cogollo



Figura 23. a) muestra de mano Arenisca de grano fino.



b) Microfotografía muestra de muestra de mano Toba volcánica de Lapilli y Cenizas, fenocristal de piroxeno.

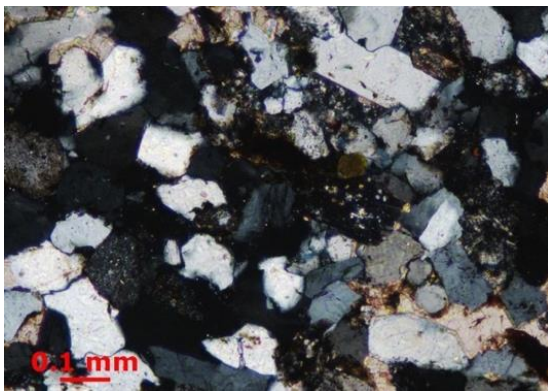
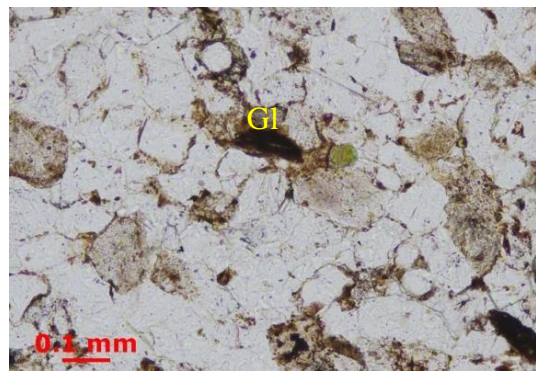


Figura 24. a) Arenisca con cemento calcáreo vista en nicoles cruzados 10x



b) Arenisca con cemento calcáreo vista en nicoles paralelos, se puede observar un cristal de glauconita Gl con un aumento de 10x

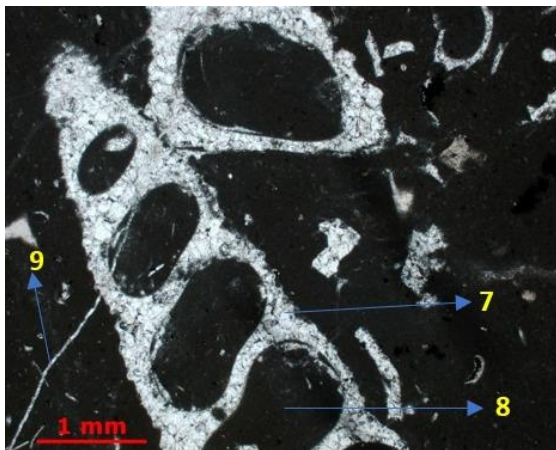
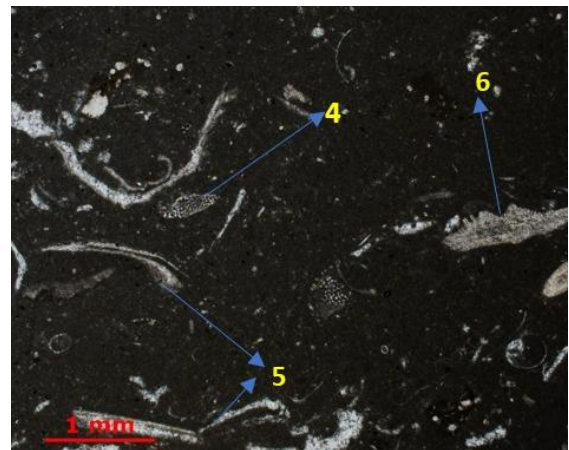


Figura 25. a) Wackestone. 7: Gasterópodo turritiforme con pared de calcita espar (sección longitudinal), 8. Cámaras de micrita del Gasterópodo turritiforme, 9: venilla de calcita espar.



b) Wackestone. 4: Briozoos, 5: Fragmentos de conchas de bivalvos (ostreidos) desarticuladas y fragmentadas, 6: Bioclastos indiferenciados.

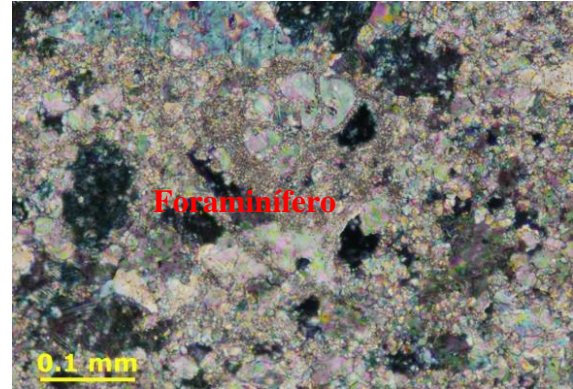
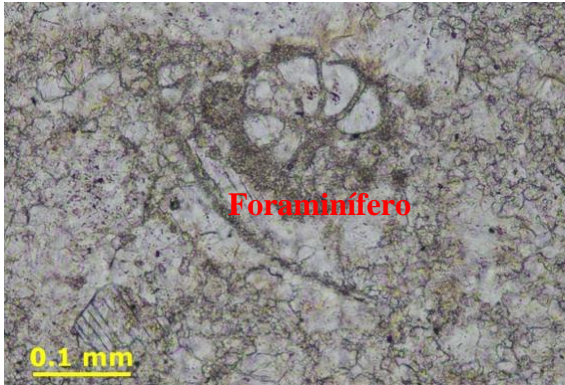


Figura 26. a) Marga con foraminíferos (Rotalido) (Zerfass & Andrade, 2006), vista en nicoles paralelos 20x

b) Marga con foraminíferos, esparita, vista en nicoles cruzados 20x. camaras rellenas de esparita

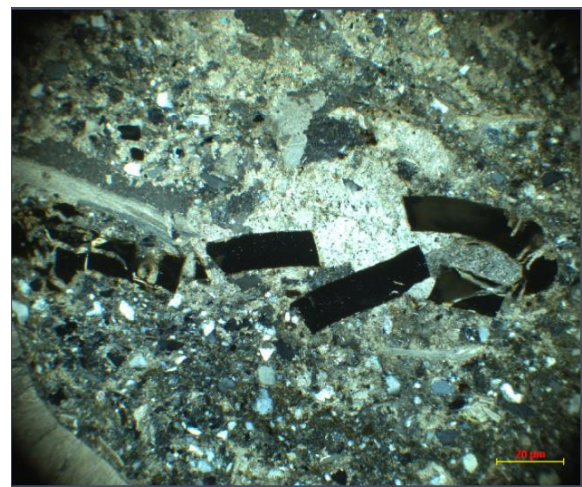


Figura 27. FroAc: Fragmento óseo de fosfato, Fosfato autigénico, Con Cemento espar y silíceo. 5x ppl

b) sección de fragmentos óseos, 5x en cruzados.

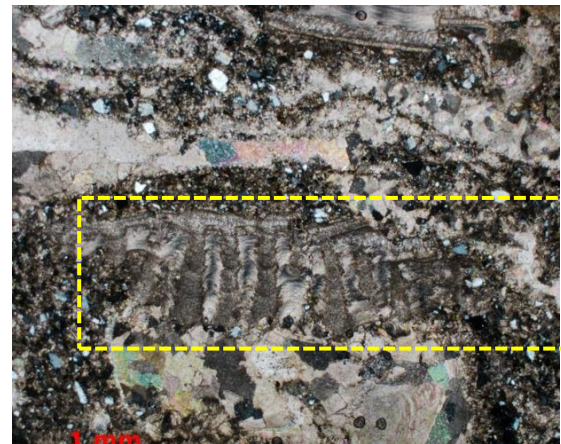


Figura 28. a) Arenisca calcárea con vista en nicoles paralelos 5x. ornamentación de bivalvo ostreido.

b) Arenisca calcárea vista en nicoles cruzados 5X

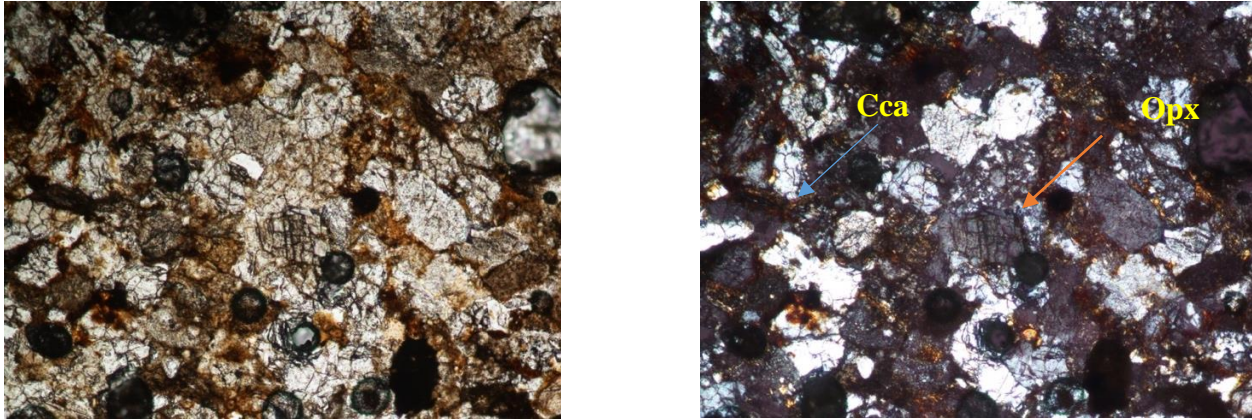


Figura 29. a) Sección delgada de arenisca con fragmentos líticos (diópsido y otros) del grupo Cogollo en nicoles paralelos 10x b) Sección delgada de arenisca del Grupo Cogollo en nicoles cruzados 10x. Cca: Cemento calcáreo. Opx: Ortopiroxeno

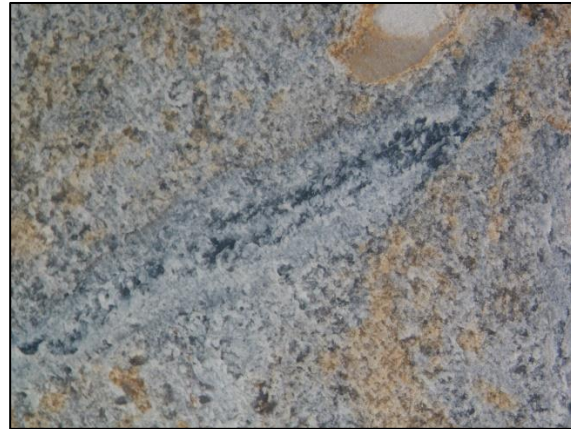
Se asocian las siguientes litofacies y son descritas a continuación:

Facies C1: Calizas de textura Grainstone de ostreidos

Roca sedimentaria calcárea, reacciona con HCl (10%), color naranja pálido (10YR 8/2) con marcado moteado color ocre correspondiente a procesos de oxidación. Los alquímicos corresponden a oolitos, pelets, valvas en su gran mayoría fragmentados; no presentan orientación preferencial. Densamente empaquetada y pobremente calibrada. Predominante cementación de calcita espar. Conchas de color gris medio (N5), correspondientes a bivalvos ostreidos, destacándose tres tamaños así: Conchas desarticuladas: grandes (16mmx2mm), medianas (10mmx1mm), pequeñas (5mmx0.3mm) Conchas articuladas: grandes (30mmx32mm), medianas (16mmx9mm), pequeñas (16mmx1mm) (Ver **Figura 30**).



Figura 30. a) muestra de mano (NH-8) calizas de textura Grainstone de ostreidos



b) Microfotografía muestra de muestra de mano (NH-8) Calizas de textura Grainstone de ostreidos.

Facies C2: Areniscas de grano fino a medio

Roca sedimentaria terrígena, de grano muy fino, altamente meteorizada, de color anaranjado muy pálido (10YR 8/2); bien calibrada (0.35-0.5); compuesta predominantemente de cuarzo (80%) con granos esféricos subangulares a subredondeados y, calcita espar (20%). Granos con contacto longitudinal. Porosidad primaria de 6.5%, trazas de glauconita o clorita (μ), <1%. Laminación plano-paralela (ver **Figura 31**). La poca presencia de arcillas, calibrado y redondez indican un estado maduro de la roca, correspondiente a un ambiente de energía moderado a alto.



Figura 31. (a) Fotografía muestra de mano (NH-5) areniscas de grano fino a medio.



b) Microfotografía muestra de muestra de mano (NH-5) Areniscas de grano fino a medio bien calibrada.

5.1.3 Formación La Luna (Ksl). Constituida por una secuencia de calizas masivas calizas lodosas con laminación plano paralela, calizas con concreciones de 40 a 100 cm ambas expelen un

olor bituminoso al ser golpeadas con el martillo, capas delgadas de chert rico en hierro con foraminíferos, cuyo carbonato fue por reemplazamiento parcial por sílice y capas de fosfatos de aproximadamente 30 cm de espesor con abundantes foraminíferos plantónicos tipo Globotruncana, Gümbelina y Globigerina (ver **Figura 32**). Mineralógicamente está dominada por minerales de precipitación tanto carbonatados como silíceos en el Chert, y los minerales de su alteración como el talco, la caolinita y la sericita (ver **Figura 33** y **Figura 34**).

El espesor de esta formación en la zona de trabajo es de 80m aproximadamente y se encuentra en contacto neto con la Grupo Cogollo aflorando en el núcleo del Sinclinal La Esmeralda, donde se encuentra el Manantial Cañaverales.

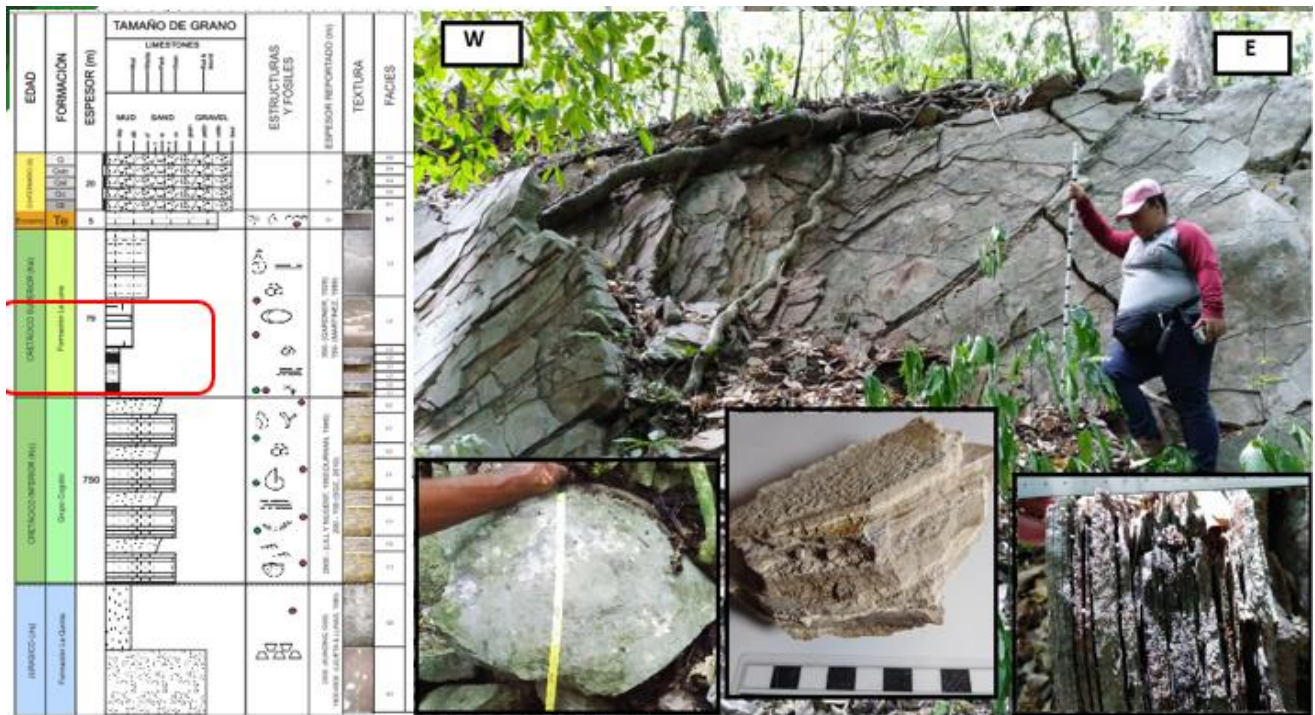


Figura 32. Afloramiento de la Formación La Luna, con concreciones, capas de chert y capas de fosfatos.

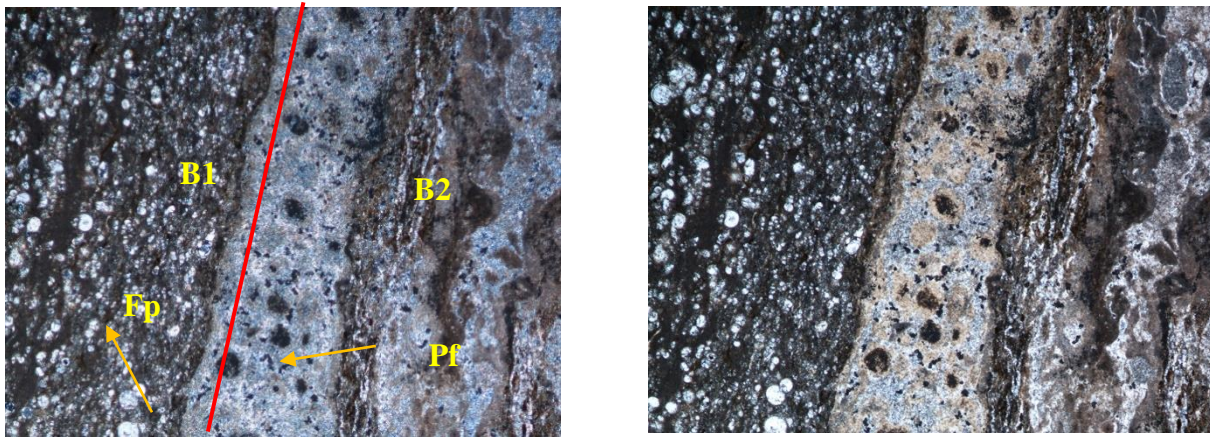


Figura 33. a) Sección delgada de shale calcáreo con laminación planoparalela de fosfatos con foraminíferos plantónicos de la formación La Luna vista en nicoles paralelos. 5X b) En nicoles cruzados 5X

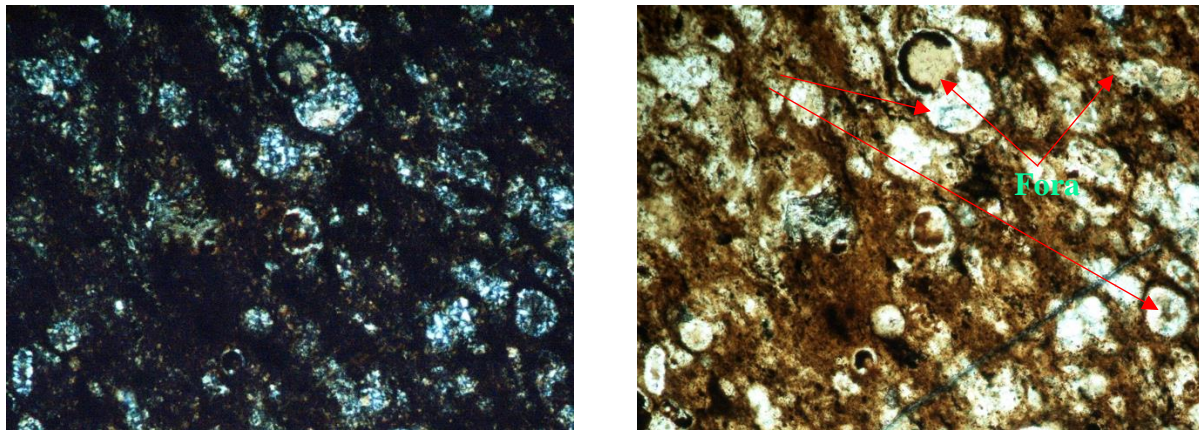


Figura 34. a) Chert ferroso con foraminíferos, Formación La Luna vista en nicoles cruzados. 10X b) Chert ferroso con: Foraminíferos planctónicos. (Zerfass & Andrade, 2006) Formación La Luna vista en nicoles paralelos. 10X

Se asocian las siguientes litofacies y son descritas a continuación hacia la base:

Facies L1: limolitas shale

Roca sedimentaria terrígena, macizas, de grano limo. Altamente meteorizada, de color anaranjado muy pálido (10YR 8/2); matriz lodosa, limo-soportada, y claramente fisiles (ver **Figura 35**).



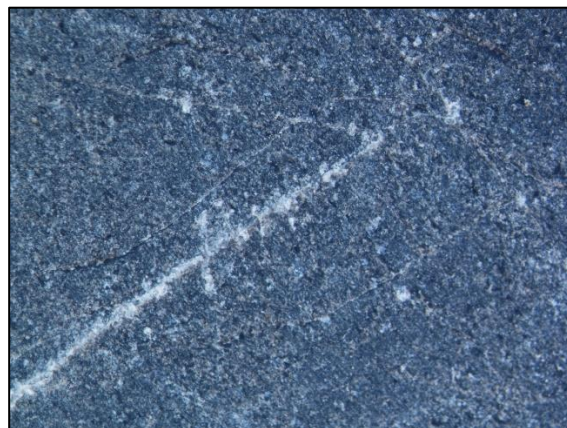
Figura 35. Fotografía muestra de mano (NH-16) de Facies L1: limolite shale

Facies L2: Chert con venas de CaCO₃

Capa delgada de chert ferroso con abundantes foraminíferos, roca de fractura concoidea, color negro (N1) con venillas en disposición aleatoria rellenas de calcita espar (**Figura 36**).



Figura 36. a) muestra de mano (NH-9A) Chert con venas de CaCO₃.



b) Microfotografía muestra de mano (NH-9A) Chert con venas de CaCO₃.

Facies L3: Roca carbonatada de textura Mudstone con fosfatos

Roca sedimentaria fosfática, reacciona con HCl (10%), altamente meteorizada. Laminación plano-paralela. Las láminas gruesas y capas muy finas a finas de disposición intercaladas de colores gris medio (N5) y blanco (N9) varían de espesor entre 1mm a 7mm (ver **Figura 37**). Presenta porosidad por disolución (3%). Se observan de manera paralela, sectores de calcita de color amarillo mostaza. Lodosoportada, con material fosfático (<10%) de tamaño 1 a 2 mm

presentes tanto en franjas blancas como grisáceas para lo cual se realizó la prueba con aplicación de ácido nítrico lo cual da como resultado tinción amarillenta.



Figura 37. a) Fotografía muestra de mano (NH-7) Roca carbonatada de textura Mudstone con fosfatos



b) Microfotografía muestra de mano (NH-7) Roca carbonatada de textura Mudstone con fosfatos, disolución.

Hacia el techo

Facies L4: Calizas Bituminosas de textura Wackestone con Turritelas

Roca sedimentaria carbonatada representada por facies de calizas, granosoportada, compacta, de color gris oscuro, fractura angular y mal calibrada; significativa presencia de material autigénico como pelets y fósiles completos y fragmentados. Las Turritelas completas se diferencian por dos tamaños principales: 2.5x0.8cm y 1.0x0.3cm en vista de sección, 0.8 a 0.1 de diámetro en vistas de plata. No se observa orientación preferencial de los fósiles. El porcentaje de aproximadamente 45% de material fosilífero. Presenta alto contenido de fracturas rellenas de CaCO_3 y ocasionalmente granos en proceso de oxidación. Expele olor a bitumen al realizar partición de roca (ver **Figura 38**).

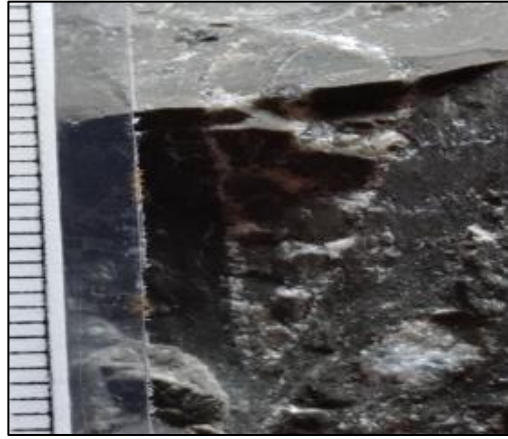
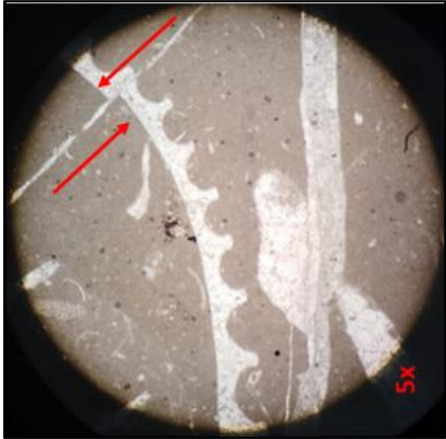


Figura 38. a) microfotografía sección delgada (M6-NH-2) Calizas Bituminosas de textura Wackestone con Turritelas con fracturamiento relleno de carbonato y desplazamiento sinistral.

b) Fotografía muestra de mano (NH-2) Calizas Bituminosas de textura Wackestone con Turritelas (Vista de perfil de Turritela)

Facies L5: Calizas Bituminosas de textura Mudstone con venas de CaCO_3

Roca sedimentaria calcárea, reacciona con HCl (10%) maciza, color gris medio (N5) compuesta principalmente de lodo calcáreo microcristalino y en menor proporción cristales de calcita espar. Alta profusión de venas con precipitación y disolución de CaCO_3 y de espesores que varían entre 0.2mm y 3mm (ver Figura 39). Expele olor a bitumen al quiebre.



Figura 39. a) muestra de mano (NH-11) Calizas Bituminosas de textura Mudstone con venas de CaCO_3 .

b) Microfotografía muestra de mano (NH-11) Calizas Bituminosas de textura Mudstone con venas de CaCO_3 (Franja roja con vena de CaCO_3).

5.1.4 Sedimentos del Eoceno. En la quebrada El Cequioncito al occidente de la Falla Cerrejón y llegando al casco urbano del corregimiento de Cañaverales afloran concreciones correlacionables con estromatolitos compuestos por restos fosilíferos de esponjas, corales, gasterópodos, y restos de conchas por dentro embebidos en el centro de las capas esferoidales carbonatadas de unos cuantos milímetros de espesor, con porosidad fenestral y fragmentos líticos como circones (ver **Figura 40**).

Se asocia a la parte inferior de la Formación Cerrejón, donde el INGEOMINAS (2002) describe capas de areniscas de grano fino con zonas calcáreas de alta dureza, donde posiblemente la corriente de la quebrada fue desplazando los sedimentos terrígenos, dejando expuestas las concreciones (ver *Figura 41*).



Figura 40. Concreciones sobre la quebrada El Cequioncito



Figura 41. Concreciones carbonatadas meteorizadas con centros conglomeráticos de restos fosilíferos de esponjas, corales, gasterópodos, y restos de conchas

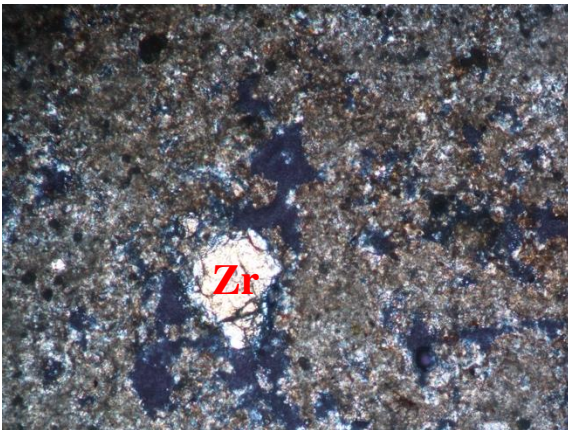
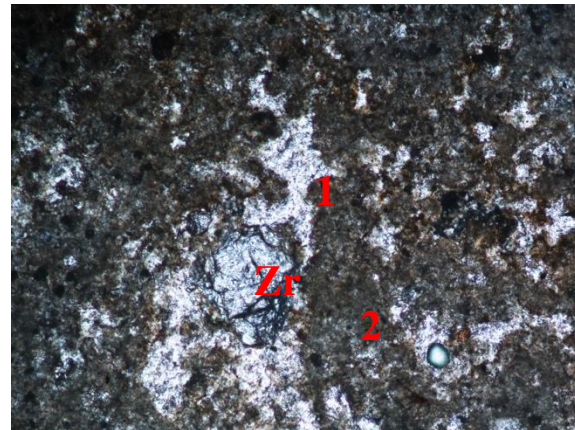


Figura 42. a) Concreción vista en nicoles cruzados. 10X, los minerales carbonatados se están alterando a arcillas



b) Concreción vista en nicoles paralelos. 10X. Zr: Zircón, 1: Porosidad fenestral, 2: Micrita microesparita

De acuerdo con lo encontrado en campo, la litología presente se asocia a una única facies denominada **Facies Ce1: Concreciones concéntricas de textura Mudstone, Estromatolitos,** Facies compuesta por concreciones concéntricas, que reaccionan al HCl (10%). Lodosoportada, de textura Mudstone. Presenta evidente porosidad por disolución (>20%). Los estromatolitos varían en tamaño de diámetro entre 10 a 50 cm aproximadamente (ver Figura 41).

5.1.5 Depósitos cuaternarios. Se encuentran diversos tipos de sedimentos sin compactar, distribuidos en toda la zona de trabajo como depósitos de abanico, depósitos de cauce aluvial, depósitos coluviales y terrazas aluviales con vocación agrícola.

De acuerdo con lo encontrado en campo, la litología presente se asocia a una única facies denominada **Facies de los depósitos cuaternarios (Q)**

Compuestas por rocas sedimentarias de tamaño de grano que gradan desde gránulos a cantos. La composición es de diversas formaciones de rocas sedimentarias terrígenas y calcáreas y rocas volcánicas sedimentarias (ver **Figura 43**).



Figura 43. Afloramiento de Facies D1: Depósitos de terrazas aluviales.

La relación entre la porosidad efectiva y las litologías aflorantes acá descritas se puede observar la Tabla 5.

Tabla 5

Clasificación de las porosidades efectivas de las rocas aflorantes.

| UNIDAD LITO ESTRATIGRAFICA | FACIES | POROSIDAD PRIMARIA * | POROSIDAD SECUNDARIA* |
|-------------------------------|--|-------------------------|--------------------------|
| Formación La Quinta | Q1: Toba aglomerática de composición lítica** | Media | - |
| | Q2: arcosa rojiza de textura muy fina | Media | - |
| Grupo Cogollo | C3: Arenisca muy fina a fina de composición lítica feldespática con glauconita | Media | Alta |
| | C1: Calizas de textura Grainstone calcáreo densamente empaquetada de cochas de bivalvos ostreidos fragmentadas, articuladas y desarticuladas con fracción de cuarzo | Baja | Muy alta |
| | C2: Cuarzo arenita fina a muy fina con glauconita | Media | Muy alta |
| Formación La Luna | L1: Lodolita shale calcárea | Muy baja | Alta |
| | L2: Chert (Silexita de radiolarios) con venillas ortogonales de CaCO ₃ | Muy baja | Muy Alta |
| | L3: Caliza bandeada de textura Mudstone calcáreo con bandas empaquetadas de foraminíferos con zonas microesparíticas de peloides fosfáticos | Muy baja | Muy Alta |
| | L4: Caliza Bituminosa de textura Wackestone calcáreo fracturada con gasterópodos turriferiforme y conchas de bivalvos ostreidos desarticulada y fragmentadas | Muy baja | Muy Alta |
| | L5: Caliza de textura Wackestone calcáreo bituminosa con venas oblicuas y ortogonales de CaCO ₃ | Muy baja | Muy Alta |
| Formación Cerrejón | Ce1: Caliza de textura Mudstone esferoidal con bandas concéntricas y porosidad fenestral*** | Alta | Muy Alta |
| Depósitos Cuaternarios | Qta: Depósitos de terrazas aluviales | Alta | - |

*Porosidad para rocas sedimentarias según Sanders (1998)

** Porosidad para volcanosedimentarias según Custodio (1978)

*** Porosidad fenestral según Choquette y Pray (1970)

5.2 Geomorfología

La geomorfología de la zona de estudio fue lograda a partir de la interpretación del modelo digital del terreno, calculando diagramas de sombras y pendientes que sirvieron para caracterizar las diferentes unidades morfológicas en superficie que describen los factores topográficos y

geométricos que integran el entorno geológico, y que son de gran ayuda para la caracterización de la zona. Según (Carvajal, et.; al 2004) clasifican los diferentes procesos naturales como endógenos y exógenos causantes del modelado del paisaje que favorecen las condiciones para establecer la dinámica del ciclo hidrológico en ciertas áreas. De acuerdo con (IGAC, 2005) la morfogénesis influye en la infiltración de las aguas superficiales, debido a que esta puede determinar las condiciones de drenaje, pendientes, dimensiones de las geoformas, características de los suelos, acumulación de sedimentos de diversos tamaños, entre otros factores, e incluso se involucra en la delimitación de cuencas hidrográficas. Por ejemplo, los drenajes (zonas de recarga y descarga locales) se encuentran controlados estructuralmente en su mayoría por las zonas de debilidad marcadas por el fracturamiento generado por los esfuerzos tectónicos.

Debido a que las unidades morfogenéticas que mayor predominan en la zona son las del tipo estructural (ver *Figura 44*), se establece una prueba de que la zona se encuentra fuertemente influenciada por actividad tectónica, principalmente en el sector delimitado por las fallas La Yaya, Marimondas, Capuchino y Cerrejón, cuyos planos de falla corresponden a un control estructural para los acuíferos presentes en la zona de trabajo como se verá en el capítulo del análisis estructural.

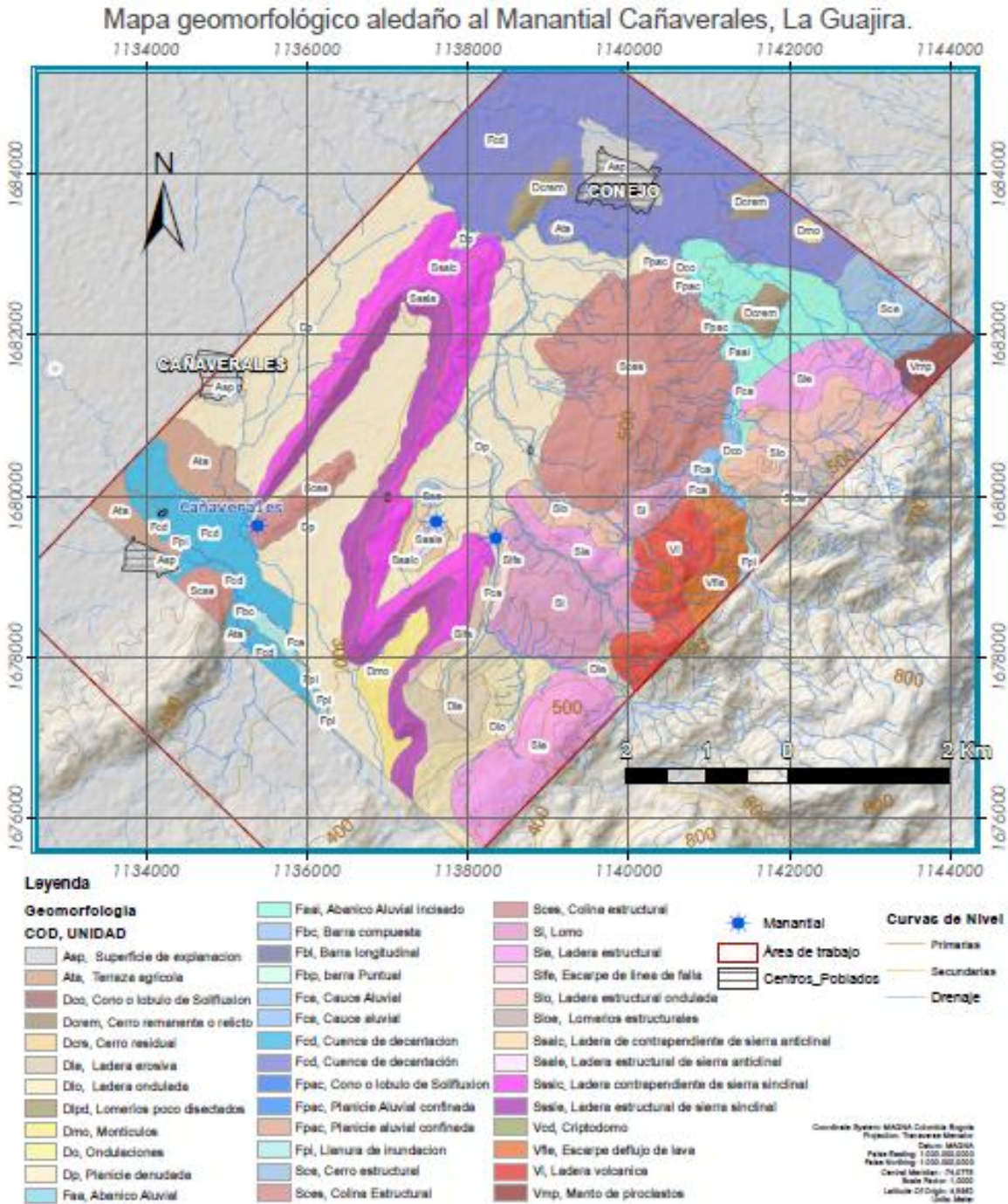


Figura 44. Mapa de unidades geomorfológicas en la zona de estudio. Autores

5.2.1 Unidades morfofenéticas. Para el área de trabajo 150 km² a escala 1:25000 se clasificaron 5 tipos de ambientes: denudacional, fluvial, estructural, volcánico y antropogénico; 33 geoformas y 65 unidades morfofenéticas (ver *Figura 44* y *Figura 45*). Las áreas para cada una de las geoformas se muestran en la **Tabla 6**

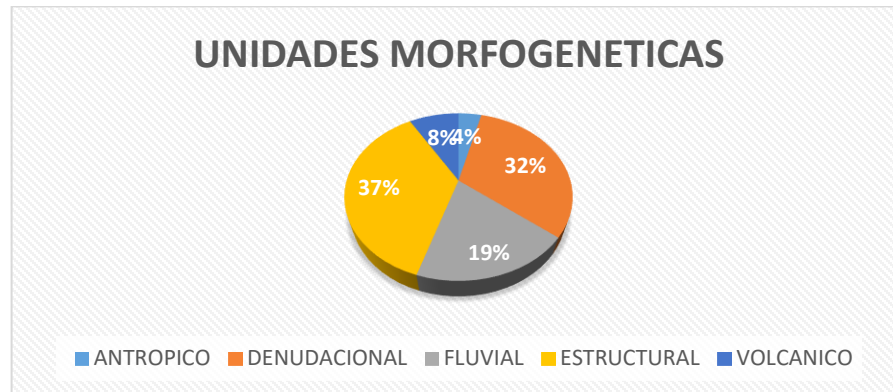


Figura 45. Diagrama circular donde se muestran el porcentaje de cada ambiente de formación según la cantidad de geoformas en el área de trabajo

Tabla 6

Geoformas presentes en el área de estudio asociadas a su ambiente y área que presentan en la zona.

| COD | UNIDAD | AREA (Ha) |
|-------|---------------------------|------------|
| Asp | Superficie de explanación | 104.469444 |
| Ata | Terraza agrícola | 115.883314 |
| Dcrem | Cerro remanente o relicto | 27.2057766 |
| Dcrs | Cerro residual | 34.2374158 |
| Dle | Ladera erosiva | 106.504621 |
| Dlo | Ladera ondulada | 121.344563 |
| Dlpd | Lomeríos poco disectados | 495.984019 |
| Dmo | Montículos | 90.6627112 |
| Do | Ondulaciones | 155.688254 |
| Dp | Planicie denudada | 761.652565 |
| Faa | Abanico Aluvial | 38.2369386 |
| Faai | Abanico Aluvial incisado | 203.230374 |
| Fbc | Barra compuesta | 0.69159535 |
| Fbl | Barra longitudinal | 1.60005097 |
| Fbp | Barra Puntual | 0.49876997 |

| | | |
|--------------|--|------------|
| Fca | Cauce activo | 45.9178006 |
| Fcd | Cuenca de decantación | 751.301525 |
| Fpac | Planicie aluvial confinada | 9.77123601 |
| Fpi | Llanura de inundación | 34.4669231 |
| Sce | Cerro estructural | 113.786905 |
| Sces | Colina estructural | 613.276982 |
| Sl | Lomo | 202.86894 |
| Sle | Ladera estructural | 166.119967 |
| Slfe | Escarpe de línea de falla | 34.9749342 |
| Slo | Ladera estructural ondulada | 201.62888 |
| Sloe | Lomeríos estructurales | 85.5040959 |
| Ssalc | Ladera de contrapendiente de sierra anticlinal | 268.443365 |
| Ssale | Ladera estructural de sierra anticlinal | 344.272149 |
| Ssslc | Ladera contrapendiente de sierra sinclinal | 11.3782945 |
| Sssle | Ladera estructural de sierra sinclinal | 23.67167 |
| Vfle | Escarpe deflujo de lava | 131.542577 |
| VI | Ladera volcánica | 303.630438 |

5.2.1.1 Denudacional. Se encuentran controladas principalmente por procesos exógenos como lluvia y viento que dan paso a la erosión transporte y sedimentación que dan forma al relieve, dependiendo del grado de meteorización que esta presenta generando así laderas y depósitos, entre otras. Dichas geoformas abarcan aproximadamente un área del 32% del área total, correspondiente a 179.27 Ha. La geoforma denudacional con mayor área de influencia es la planicie denudada. A continuación, en la **Figura 46** se muestra un histograma donde se agrupan las geoformas de tipo denudacional en función del área. Se identificaron 13 geoformas asociadas a 8 unidades geomorfológicas.

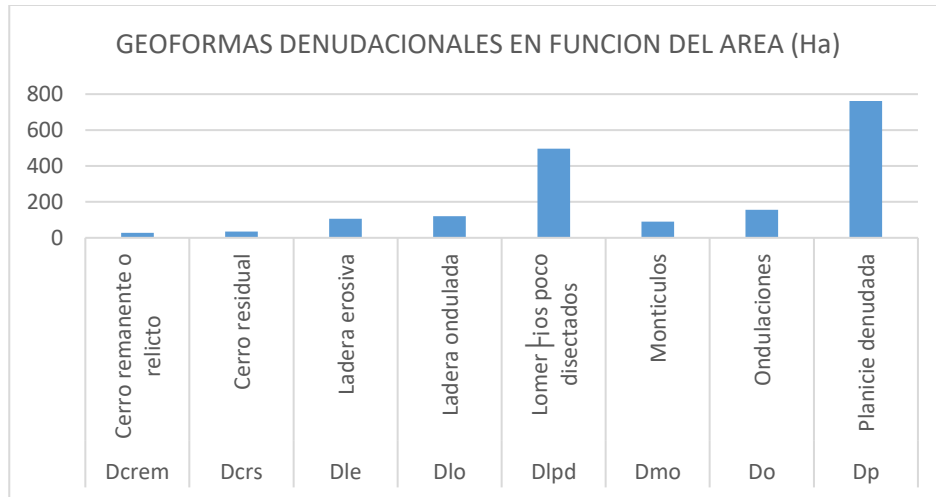


Figura 46. Área de influencia de las geoformas de tipo denudacional

5.2.1.2 Fluvial. Las geoformas de tipo fluvial están controladas principalmente por corrientes de agua que ayudan al proceso de meteorización y favorecen la erosión transporte y sedimentación, siendo las zonas aledañas a los ríos las más afectadas. Dichas geoformas abarcan aproximadamente un área del 19% del área total, correspondiente a 185 Ha siendo la geoforma fluvial con mayor área de influencia la cuenca de decantación. La **Figura 47** muestra un histograma donde se agrupan las geoformas de tipo fluvial en función del área. Se identificaron 22 geoformas asociadas a 9 unidades geomorfológicas.

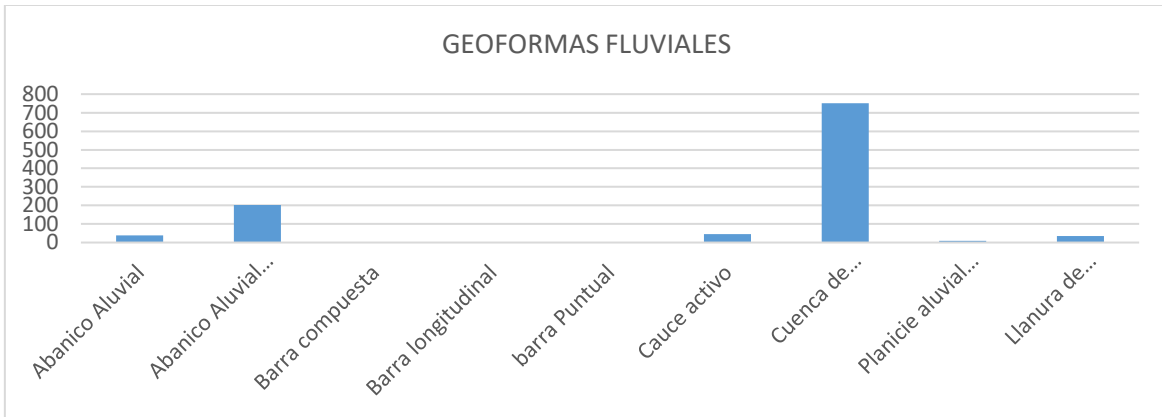


Figura 47. Área de influencia de las geformas de tipo fluvial

5.2.1.3 Estructural. Las geformas de tipo estructural están regidas principalmente por los movimientos internos de la tierra, es el resultado de los diferentes tipos de esfuerzos ya sean compresivos o extensivos dando así lugar a los fallamientos y plegamientos.

Dichas geformas abarcan aproximadamente un área del 37% del área total, correspondiente a 265,3 Ha. Las geformas estructurales con mayor área de influencia son las colinas estructurales (Sces) y la ladera estructural de sierra anticlinal (Ssale). A continuación, en la **Figura 48** se muestra un histograma donde se agrupan las geformas de tipo estructural en función del área. Se identificaron 17 geformas asociadas a 11 unidades geomorfológicas.

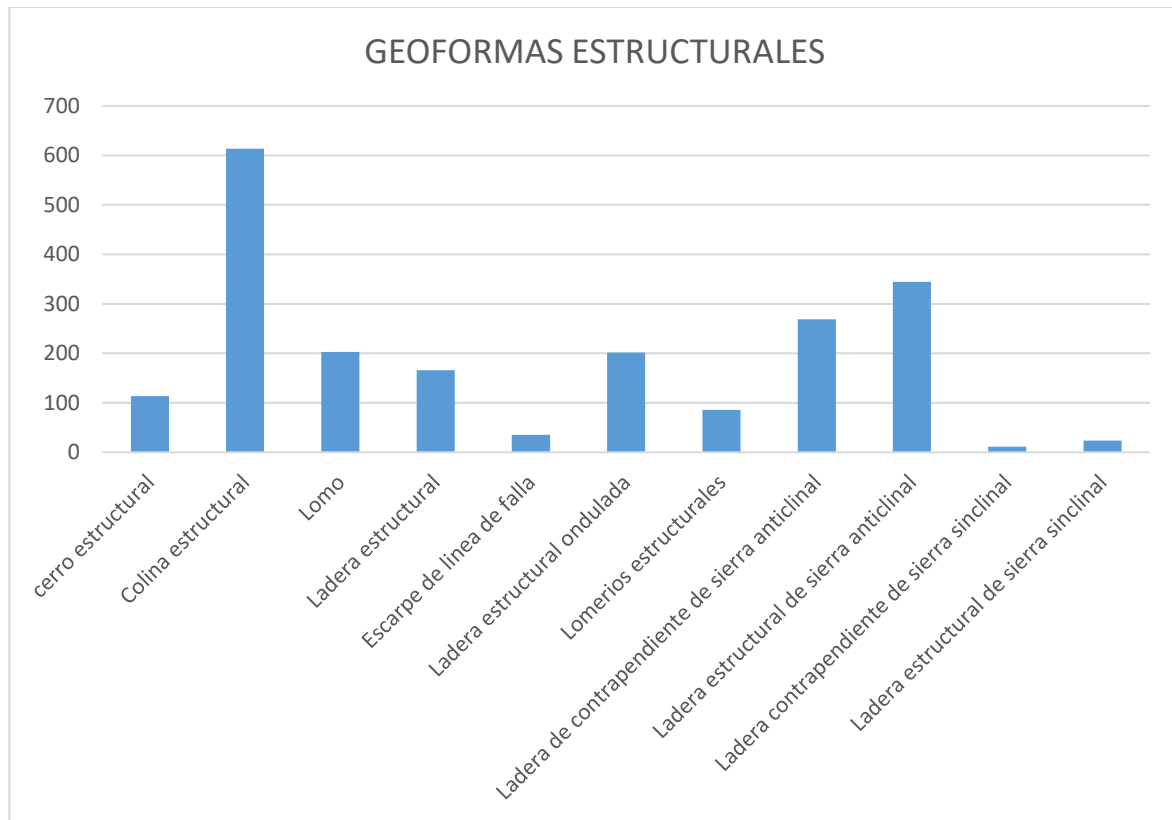


Figura 48. Área de influencia de las geoformas de tipo estructural

5.2.1.4 Volcánico. Esta descripción incluye las geoformas que se originan por procesos relacionados con la actividad volcánica producto de la dinámica interna de la tierra, asociados principalmente a erupciones explosivas y/o efusivas, acumulación de productos y remoción de estos, así como a la intrusión sub-magmática en los niveles superiores de la corteza. Este ambiente presenta el 8 % y se cartografían un total de 5 unidades morfogénéticas de tipo volcánico asociadas a 2 geoformas, donde se describen cada una de ellas como los son Escarpe de flujo de lava, laderas volcánicas tal y como se muestra en la **Figura 49**

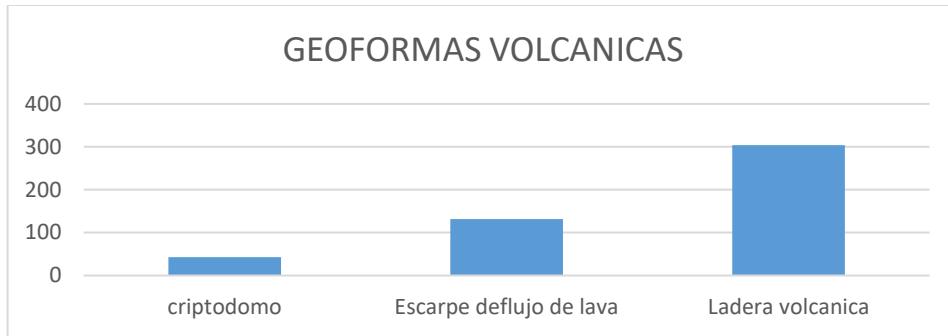


Figura 49. Área de influencia de Geoformas volcánicas.

5.2.1.5 Antropogénico. Las geoformas de tipo antropogenico estan dictadas por la accion del hombre para la adecuacion de vivienda o de zonas donde se puedan desarrollar actividades agricolas y agropecuarias. En el area de estudio se encontraron tan solo dos geoformas de tipo antropogenico con un area total de 22 Ha correspondiente al 4 % del area total, la geoforma con mayor area de influencia de tipo antropogenico son las terrazas agricolas (Ata). Se encontraron 7 unidades geomorfologicas asociadas a 2 geoformas de este tipo.

A continuación en la *Figura 50* se muestran el area de influencia de dichas geoformas

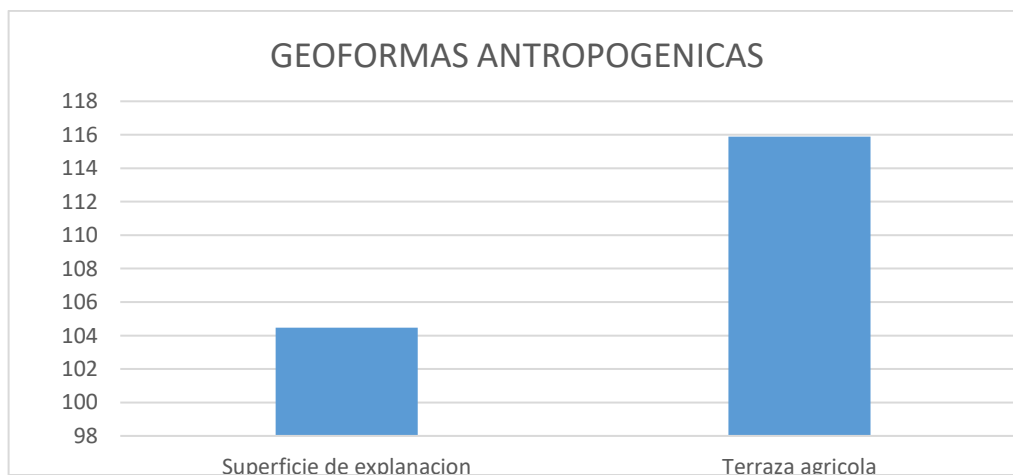


Figura 50. Área de influencia de las geoformas de tipo Antropogénicas

Las fotografías de las unidades geomorfologicas predominantes se pueden consultar en el Apéndice I.

5.3 Análisis estructural

Se hace este análisis para definir e identificar las diferentes zonas de fragilidad y deformación del terreno por donde puede llegar a fluir, recargar y descargar el agua con potencial hidrogeológico de la zona, enfatizando en las direcciones preferenciales del fracturamiento. Se presenta una descripción de la geología estructural encontrada en la zona representada en la **Figura 51**.

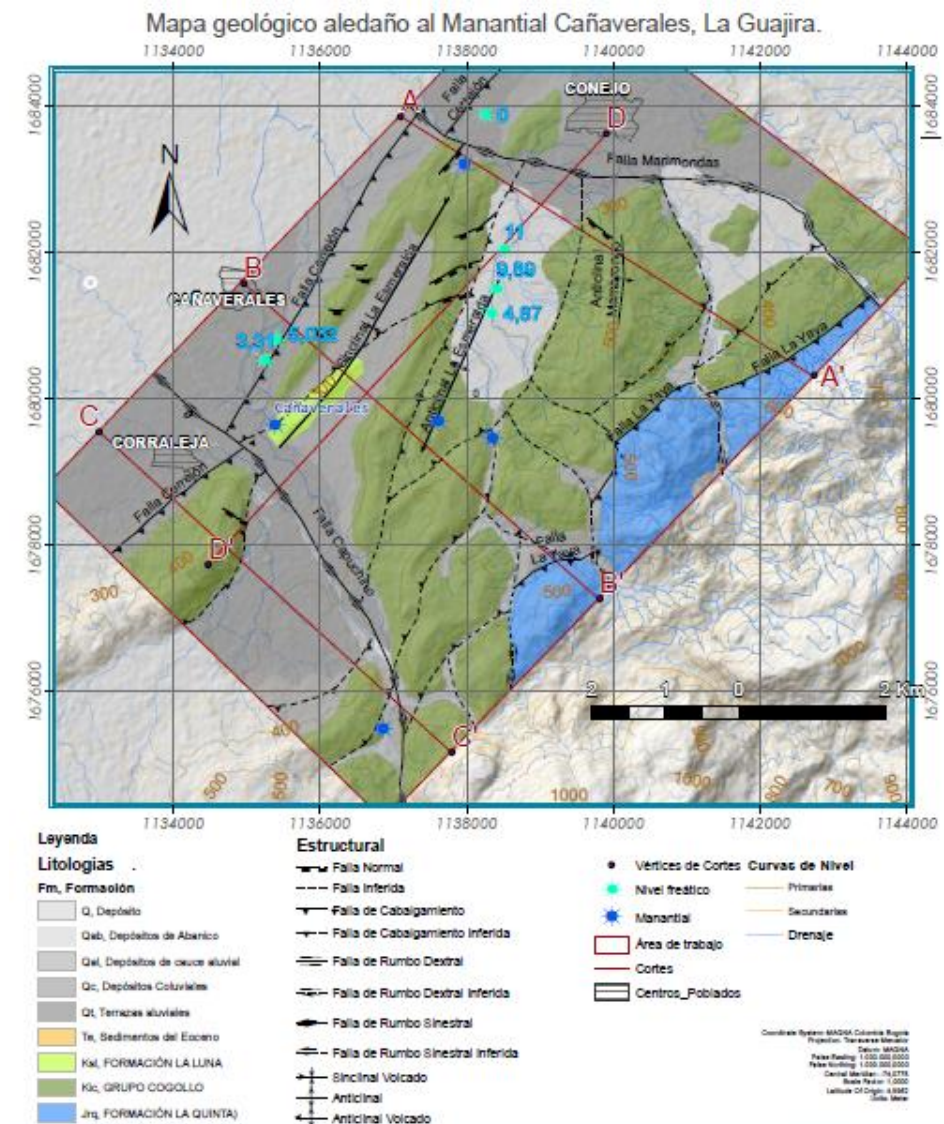


Figura 51. Mapa geológico estructural de la zona de trabajo, en cercanías al manantial Cañaverales con las líneas que representan la ubicación de los cortes geológicos A-A', B-B', C-C', D-D'.

5.3.1 Lineamientos. Teniendo como información base el modelo digital del terreno y siguiendo la metodología propuesta se obtuvieron las direcciones preferenciales de los lineamientos, graficados local y regionalmente en los diagramas de roseta, mostrando una dirección preferencial SW-NE con acimut N 45° y a nivel local también se muestra la misma dirección SW-NE. Además, una cantidad importante de datos muestran una dirección preferencial casi perpendicular a la tendencia general con acimut N 320° como se puede observar en la **Figura 52**.

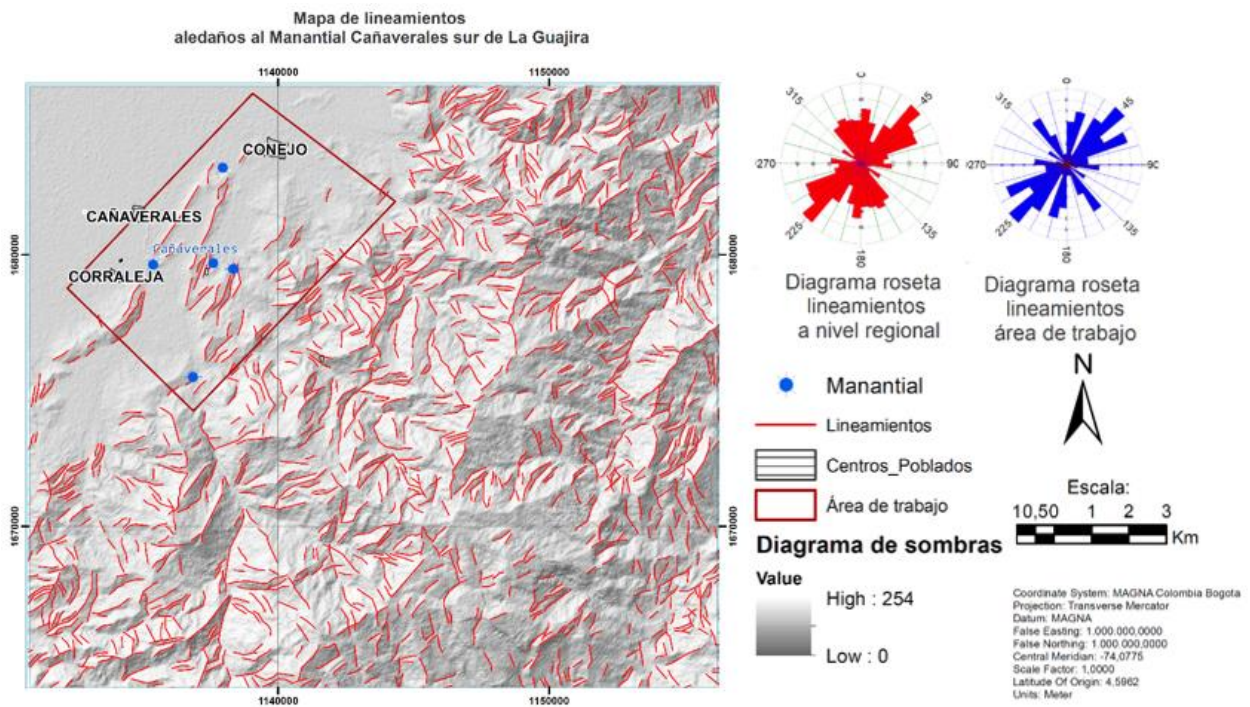


Figura 52. Mapa regional de lineamientos

5.3.2 Fallas. La zona de estudio presenta una geología estructural compleja, marcada por variados estímulos tectónicos que han plegado, fracturado, levantado y desplazado las diferentes formaciones rocosas presentes. El bloque central donde puede observarse el manantial Cañaverales y los diferentes plegamientos, están delimitados completamente por fallas: en los extremos W-E encontramos las fallas de cabalgamiento Cerrejón y La Yaya, mientras que en los extremos N-S vemos las fallas de rumbo con componente normal Marimondas y Capuchino respectivamente. A

este bloque delimitado por estas cuatro fallas se le puede llamar caballo o Horse (Niemeyer Rubilar, 1999), además la deformación de las unidades cretácicas sobre la roca basal presenta una tectónica thin-skinned (piel delgada) que a su vez crea sistemas estructurales de escamas delgadas como abanicos imbricados (Rojas & Radic, 2002) con la falla Cerrejón como se pueden observar en los cortes geológicos de la *Figura 53*, *Figura 54*, y *Figura 55*,

Las fallas Capuchino (de rumbo sinistral con componente normal) y Marimondas (de rumbo dextral con componente normal) ambas cubiertas por sedimentos cuaternarios y que se extienden por el Arrollo Conejo y el Río Cañaverales respectivamente, generan en el Horse un desplazamiento al W y un hundimiento tipo graben como se puede observar en el corte de la *Figura 56*.

Las fallas inversas inferidas locales están dispuestas entre sí de forma subparalela con un sentido SSW-NNE obedeciendo la dirección de los lineamientos anteriormente expuestos y las dos fallas de cabalgamiento principales: la Falla Cerrejón, ubicada al extremo oeste de la zona de trabajo oculta por depósitos cuaternarios, bordea el flanco occidental del Sinclinal La Esmeralda y conecta al Grupo Cogollo al oriente, con la formación Cerrejón al occidente; además se encuentra cortada y desplazada lateral y verticalmente por las fallas Marimondas y Capuchino (ver mapa de la *Figura 51* y corte de la *Figura 56*).

También está la Falla de cabalgamiento La Yaya que se ubica al extremo oriental de la zona de estudio, y conecta litologías jurásicas de la Formación La Quinta al este que cabalgan sobre unidades cretácicas carbonatadas fosilíferas al oeste, además esta desarticulada por diferentes fallas de rumbo oblicuas, que la dividen transversalmente como se puede observar en el mapa de la *Figura 51*.

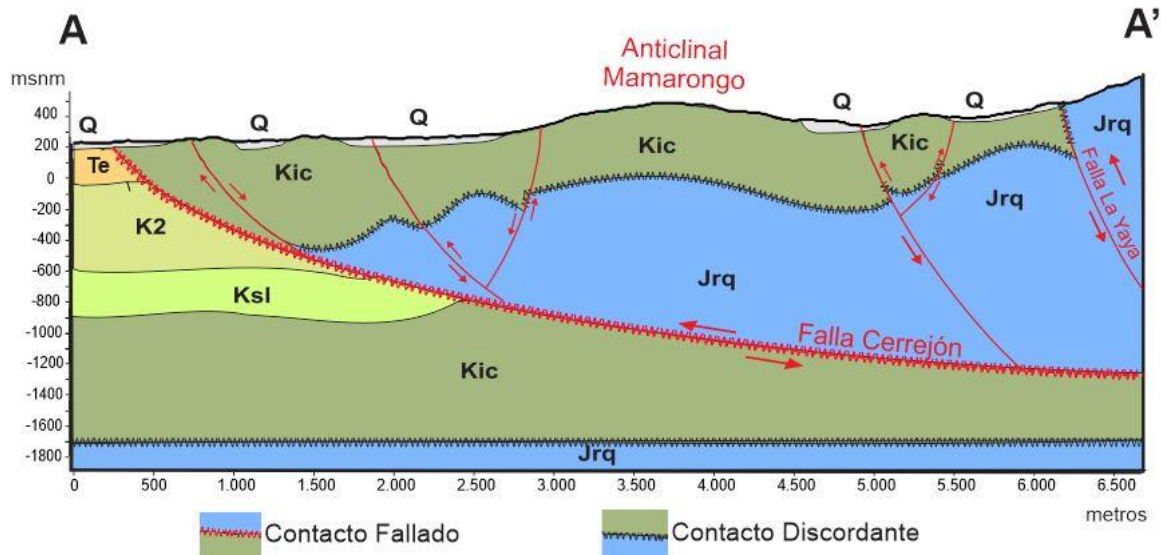


Figura 53. Corte geológico A-A' indicando el cabalgamiento de las unidades cretácicas y jurásicas definiendo bloques estructurales delimitados por fallas. *

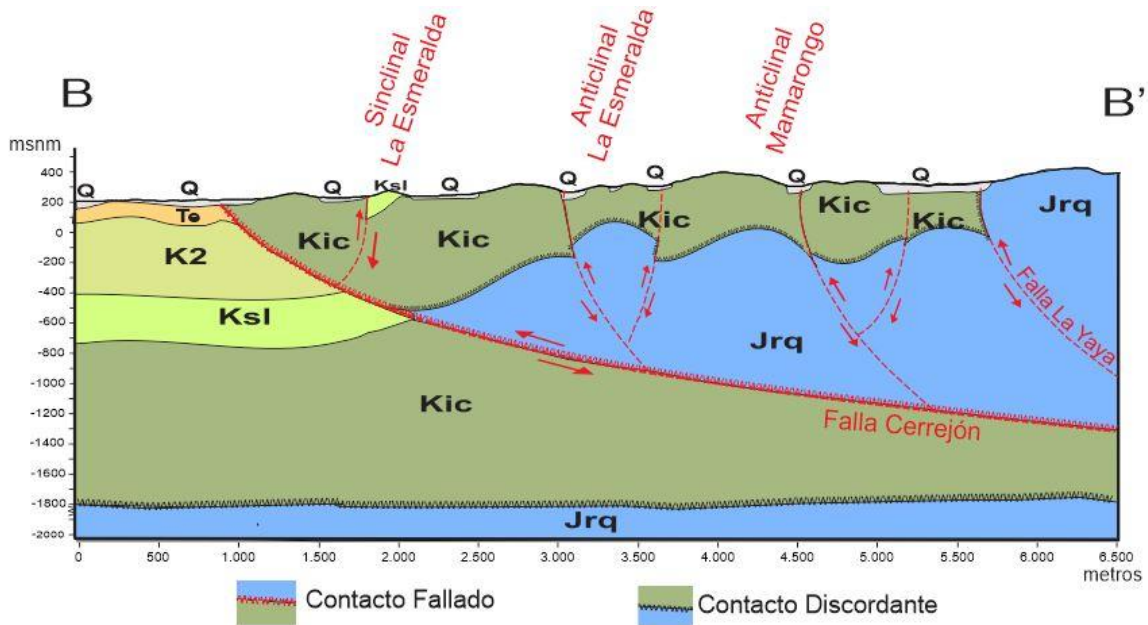


Figura 54. Corte geológico B-B' indicando el cabalgamiento de las unidades cretácicas y jurásicas, definiendo el sinclinal La Esmeralda que es donde se encuentra el manantial Cañaverales. *

* Para los cortes geológicos, Los buzamientos de las capas son aparentes.

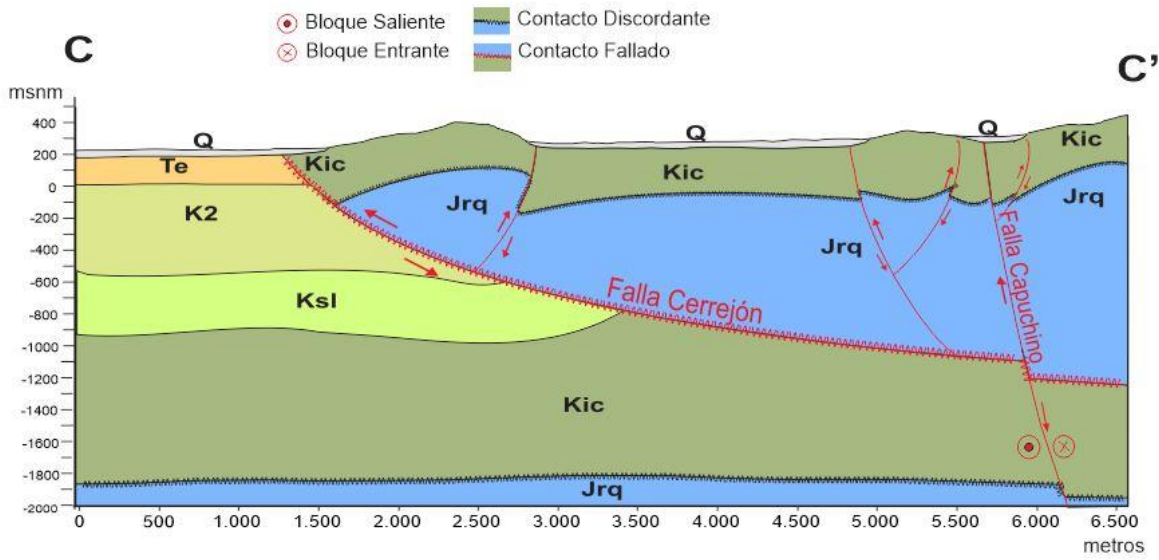


Figura 55. Corte geológico C-C' ubicado al sur de la falla Capuchino, donde se muestra un plegamiento no se observa tan marcado como en el corte B-B'*

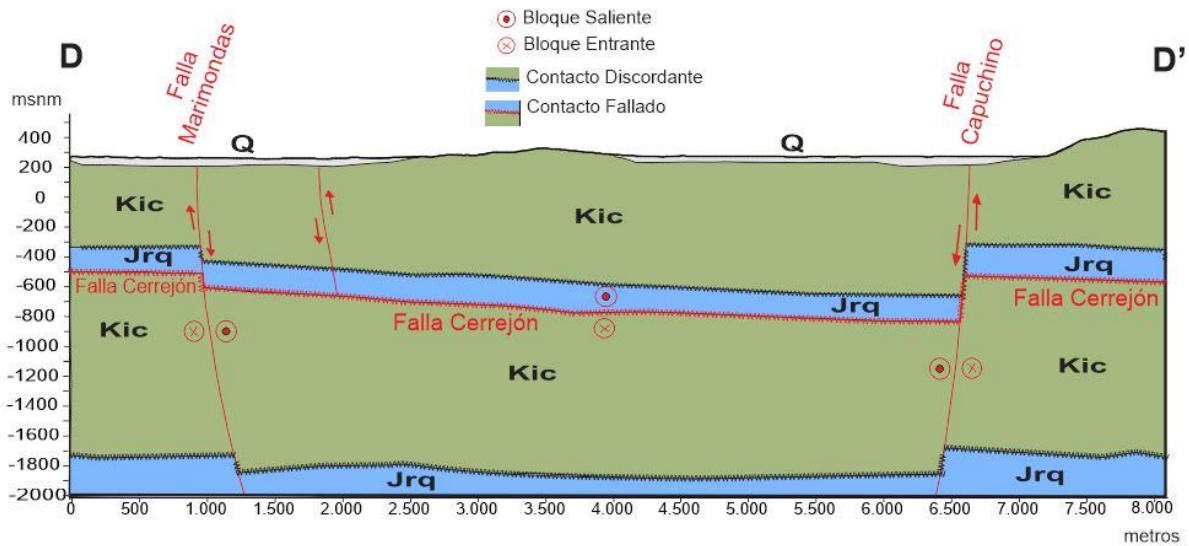


Figura 56. Corte geológico D-D', subparalelo a la Falla Cerrejón con dirección norte - sur, donde se observa la estructura tipo graben entre las fallas Capuchino y Marimondas. Las unidades geológicas se muestran con buzamientos aparentes. Autores.

El fallamiento normal visto en la zona obedece a fallas tensionales ocurridas de forma perpendicular y oblicuas al fallamiento inverso y a los ejes de los plegamientos de La Esmeralda y Mamarongo, con dirección preferencial de SWW-NEE y W-E generando zonas de brecha (ver Figura 51).

5.3.3 Pliegues. El plegamiento que ha sufrido la zona se caracteriza por su complejidad (ver *Figura 51*), empezando de occidente a oriente con el Sinclinal La Esmeralda, (que en trabajos de anteriores el SGC (2010) y otros, marcan como si fuese un anticlinal) con una longitud aproximada de 5 Km con 2 Km de ancho cuyo núcleo está ocupado por la Formación La Luna, delimitado al N por la Falla Marimondas, al S con la Falla Capuchino, al W con la Falla Cerrejón y al E con el Anticlinal La Esmeralda y depósitos cuaternarios; su eje principal tiene una orientación SSW-NNE, que a medida que nos acercamos al norte muestra una inclinación con respecto a la horizontal que sugiere un cabeceo del pliegue, además se caracteriza por presentar buzamientos suaves en el flanco W y más pronunciados en el E, que le dan la característica de volcamiento hacia el oriente. Su eje principal se encuentra destruido, convertido en depósito y una parte de su flanco lateral oriental se fracturó y desplazó hacia el NW donde actualmente se encuentra el resumidero del Manantial Cañaverales.

Seguido encontramos el Anticlinal La Esmeralda (que en trabajos de anteriores el GRP 2010 y otros, marcan como si fuese un sinclinal), cuya estructura al sur presenta también una geomorfología de cabeceo sobre su eje principal cuya longitud ronda los 2 Km y aproximadamente 1 Km de ancho, mientras que al norte se erosionó formando un depósito cuaternario. Seguido encontramos el Anticlinal Mamarongo que limita al oriente con la parte aflorante del Anticlinal La Esmeralda, y que se caracteriza igual que el Sinclinal inicial por presentar cabeceo hacia el norte de la estructura, y que está siendo afectado por algún fallamiento de rumbo dextral que divide al anticlinal en dos bloques desplazando la parte norte hacia el oriente.

5.3.4 Diaclasas. Para el levantamiento de datos de diaclasas se tomaron en cuenta las características de las fracturas descritas en el libro Ingeniería Geológica (González de Vallejo,

2002), enfatizando en los datos de trend y plunge, espaciado entre diaclasas (en cm), tipo de continuidad, rugosidad, tamaño de abertura, tipo de relleno, tipo de filtración y número de diaclasas por metro. En total se tomaron 730 datos de trend y plunge en 10 estaciones cuyas características principales se resumen en la **Tabla 7**, los datos de azimuth fueron analizados con el software Stereonet 10.2.0 generando los respectivos diagramas de rosetas para cada estación, caracterizando 10 de los diversos bloques estructurales (mostrados en la **Figura 57**) presentes en la zona y que según las características de sus fracturas y sus rumbos podrían favorecer el flujo de las aguas subterráneas que llegan al Manantial Cañaverales.

En general el diaclasamiento de la zona agrupado dentro del bloque general delimitado por las fallas Cerrejón, la Yaya, Marimondas y Capuchino, presenta una dirección preferencial de rumbo SE-NW, perpendicular a la dirección del fallamiento inverso y de los lineamientos regionales, y los diagramas roseta de las diaclasas en general son coherentes a su vez con el diagrama roseta de los lineamientos locales de la *Figura 52* que están dentro del área de trabajo.

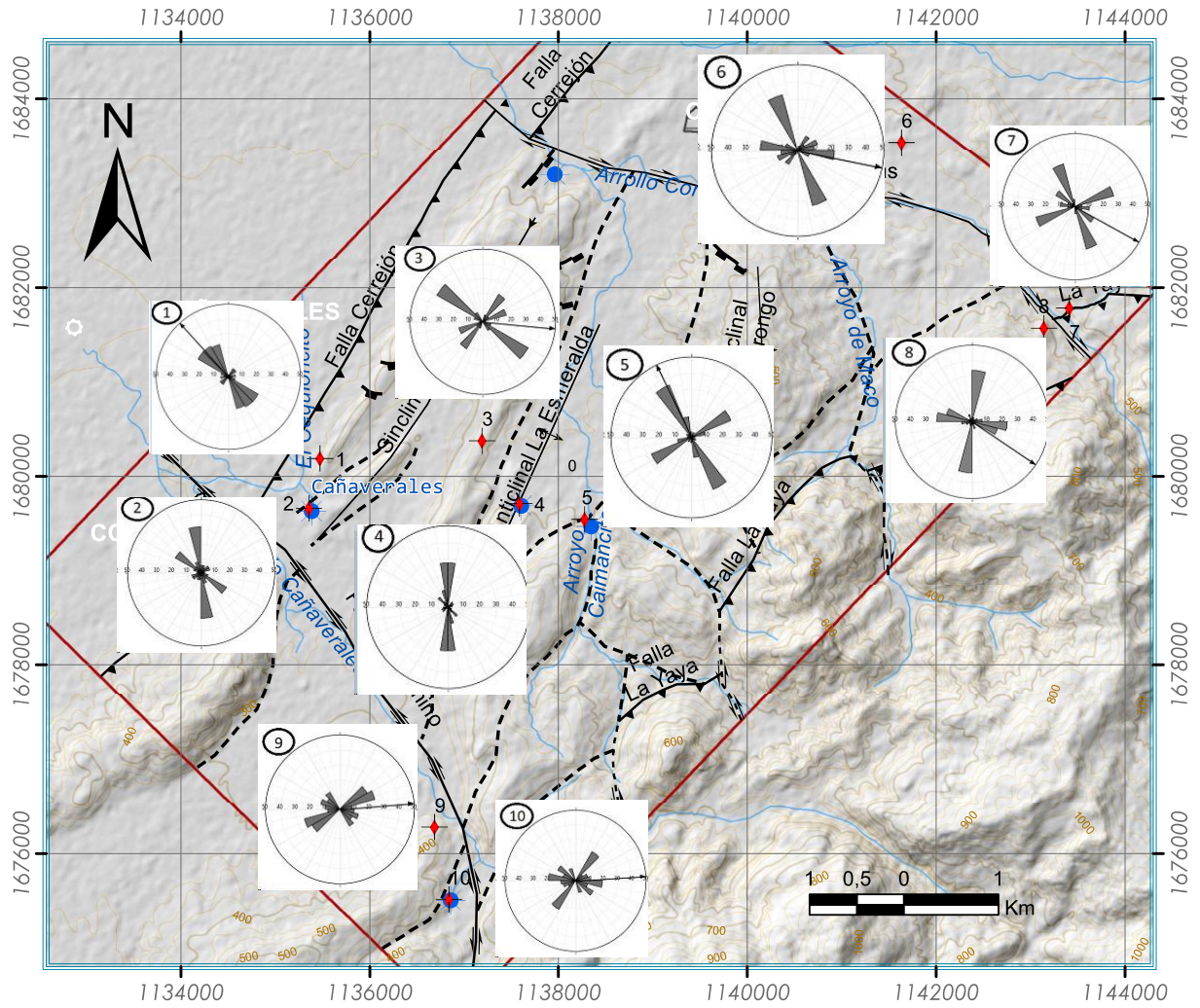
Las fracturas están rellenas mayoritariamente de materia orgánica y carbonato de calcio con una rugosidad en general ondulosa, un espaciado de 2 cm hasta 120 cm, una continuidad en su mayoría baja con una filtración de tipo VI y V y una densidad de 2 a 7 diaclasas por metro según las características para las fracturas de roca descritas por González de Vallejo (2002), y son favorables para el flujo y acumulación de agua de un acuífero fracturado.

Tabla 7

Características principales de las diaclasas

| | # Datos por familia de diaclasas | Espaciado (cm) | Continuidad | Rugosidad | Abertura (mm) | Relleno | Filtración | # diaclasas por m |
|----------|----------------------------------|----------------|-------------|-------------------|---------------|------------------|------------|-------------------|
| Delta 1 | 40 | 2 | media | plana/lisa | 2 | precipitado | II-IV | 20 |
| | 39 | 50 | baja | plana | 1 | materia Orgánica | III | 2 |
| Delta 2 | 20 | 40 | media | ondulosa/lisa | 10 | precip y mat org | VI | 4 |
| | 25 | 25 | baja | ondulosa/lisa | 5 | precip y mat org | V | 3 |
| | 13 | 35 | baja | plana/pulida | 20 | precip y mat org | IV | 5 |
| | 22 | 60 | muy baja | ondulosa/lisa | 20 | precip y mat org | V | 5 |
| Delta 3 | 62 | 30 | muy baja | escalonada/rugosa | 5 | mat org | V | 6 |
| | 21 | 20 | baja | escalonada/rugosa | 15 | mat org | V | 4 |
| Delta 4 | 52 | 20 | muy baja | ondulosa/lisa | 10 | mat org | IV | 7 |
| | 26 | 40 | Baja | ondulosa | 2 | precip y mat org | IV | 7 |
| Delta 5 | 20 | 50 | muy alta | escalonada/lisa | 20 | sin relleno | VI | 4 |
| | 50 | 40 | muy baja | ondulosa/rugosa | 10 | poca mat org | VI | 3 |
| | 24 | 30 | baja | ondulosa/lisa | 3 | mat org | IV | 7 |
| Delta 6 | 8 | 60 | baja | ondulosa/rugosa | 60 | mat org | IV | 3 |
| | 9 | 50 | media | ondulosa/rugosa | 51 | mat org | V | 2 |
| | 25 | 50 | muy baja | plana/lisa | 5 | poca mat org | VI | 2 |
| Delta 7 | 18 | 60 | baja | ondulosa/lisa | 3 | precipitado | II | 2 |
| | 10 | 100 | muy baja | escalonada/plana | 8 | mat org | V | 2 |
| | 12 | 45 | baja | plana/lisa | 4 | sin relleno | IV | 3 |
| Delta 8 | 31 | 30 | alta | ondulosa/rugosa | 10 | precip y mat org | II | 4 |
| | 42 | 40 | alta | plana/lisa | 15 | precip y mat org | VI | 3 |
| | 32 | 60 | media | ondulosa/rugosa | 10 | precip y mat org | V | 2 |
| Delta 9 | 12 | 80 | media | ondulosa/rugosa | 20 | mat org | VI | 2 |
| | 28 | 30 | muy alta | ondulosa/rugosa | 15 | mat org | V | 3 |
| | 21 | 100 | baja | ondulosa/rugosa | 4 | precip y mat org | III | 3 |
| Delta 10 | 30 | 120 | alta | plana/rugosa | 15 | mat org | VI | 2 |
| | 12 | 80 | media | plana/rugosa | 30 | mat org | V | 2 |
| | 15 | 100 | muy baja | plana/rugosa | 15 | mat org | V | 2 |
| | 11 | 30 | muy baja | plana/rugosa | 10 | mat org | V | 3 |

Mapa con la geología estructural y los diagramas de rosetas de los datos de diaclasas tomadas aledaño al Manantial Cañaverales sur de La Guajira



LEYENDA

Estructural

- Fallo Normal
- - - Fallo Inferida
- ▼ Fallo de Cabalgamiento
- ≡ Fallo de Rumbo Dextral
- ≡ Fallo de Rumbo Dextral Inferida
- ≡ Fallo de Rumbo Sinistral
- ≡ Fallo de Rumbo Sinistral Inferida
- ⊕ Sinclinal Volcado
- ⊖ Anticlinal
- ⊕ Anticlinal Volcado

- ▭ Centros_Poblados
- Curvas de Nivel
- Primarias
- Secundarias
- Manantial
- Ríos y Quebradas

- ◆ Datos de Diaclasas
- ▭ Área de trabajo
- ⊗ Diagrama de Roseta

Coordinate System: MAGNA Colombia Bogota
 Projection: Transverse Mercator
 Datum: MAGNA
 False Easting: 1,000,000,000
 False Northing: 1,000,000,000
 Central Meridian: -74,0775
 Scale Factor: 1,0000
 Latitude Of Origin: 4,5962
 Units: Meter

Figura 57. Mapa estructural de la zona de trabajo, con diagramas roseta para diez bloques estructurales.

5.4 Geoeléctrica

Las adquisiciones geoeléctricas se llevaron a cabo al NW del manantial Cañaverales (punto 1) y en cercanía al anticlinal La Esmeralda (punto 2). Se realizaron Sondeos Eléctricos azimutales cuadrados para una distancia en diagonal del centro del arreglo al electrodo de 50m, 80m y 100m y rotaciones de 0°, 30°, 45° y 60°, además de cuatro Tomografías de Resistividad Eléctrica coincidentes con las diagonales de los cuadrados (ver **Figura 58**).

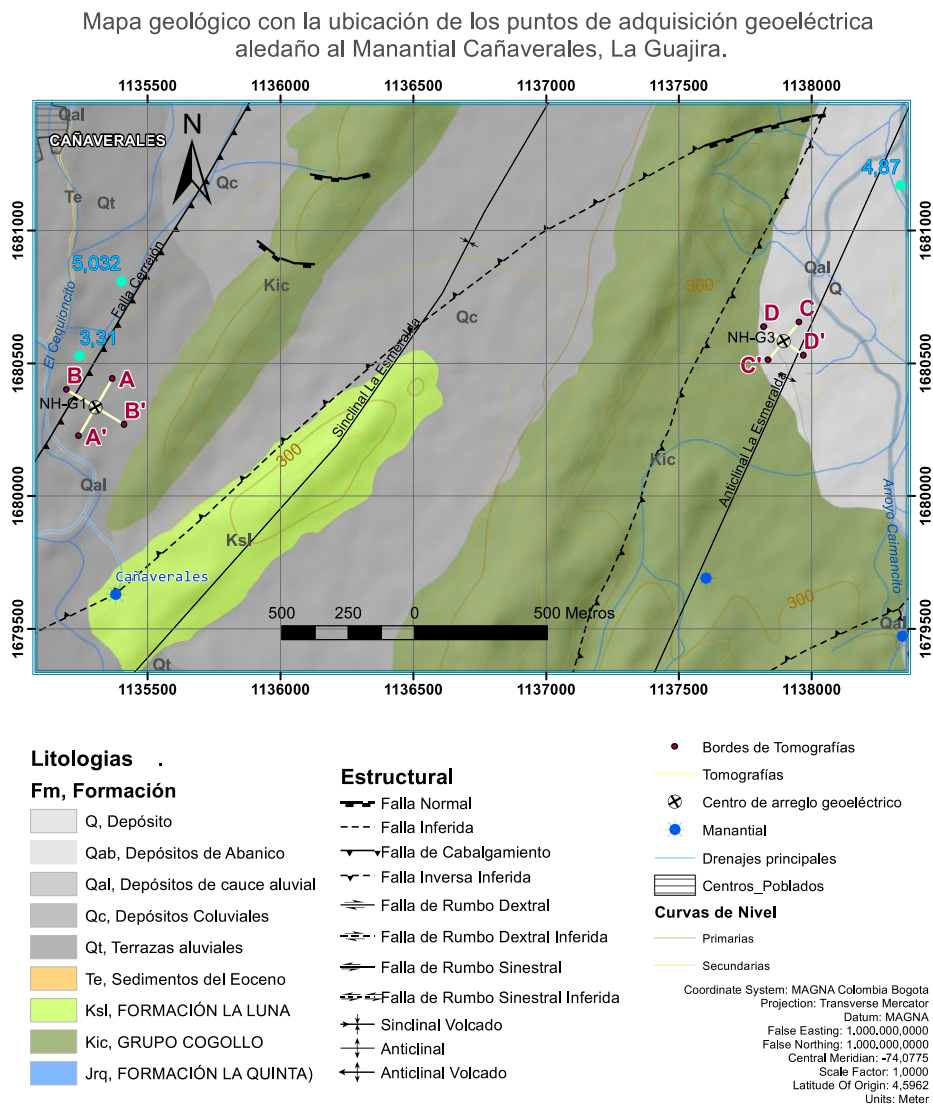


Figura 58. Ubicación de los puntos de adquisición geofísica.

5.1.1 Sondeos eléctricos cuadrados azimutales. Con estos sondeos se caracterizó la dirección preferencial de fracturamiento por la roca en un área determinada, obteniendo un valor promedio de las resistividades aparentes y resistencias para cada toma con el equipo Terrameter SAS1000 utilizando cuatro electrodos, dos de corriente C1 (A), C2 (B) y dos de potencial P1 (M), P2 (N).

En concordancia con Habberjam (1967) los resultados de los valores de las resistividades aparentes mostrados en los diagramas polares de los **Apéndice D y E**, relacionan el eje menor de la elipse con la dirección preferencial de fracturamiento y es similar a diferentes profundidades, la cual es coherente con el bloque estructural del diagrama de rosetas 1 para el punto 1 de adquisición ubicada al W del manantial, al sobreponer los diagramas polares de los arreglos alfa, beta y gamma (α , β y γ) podemos ver que presentan las mismas direcciones preferenciales *Figura 59 a Figura 61*.

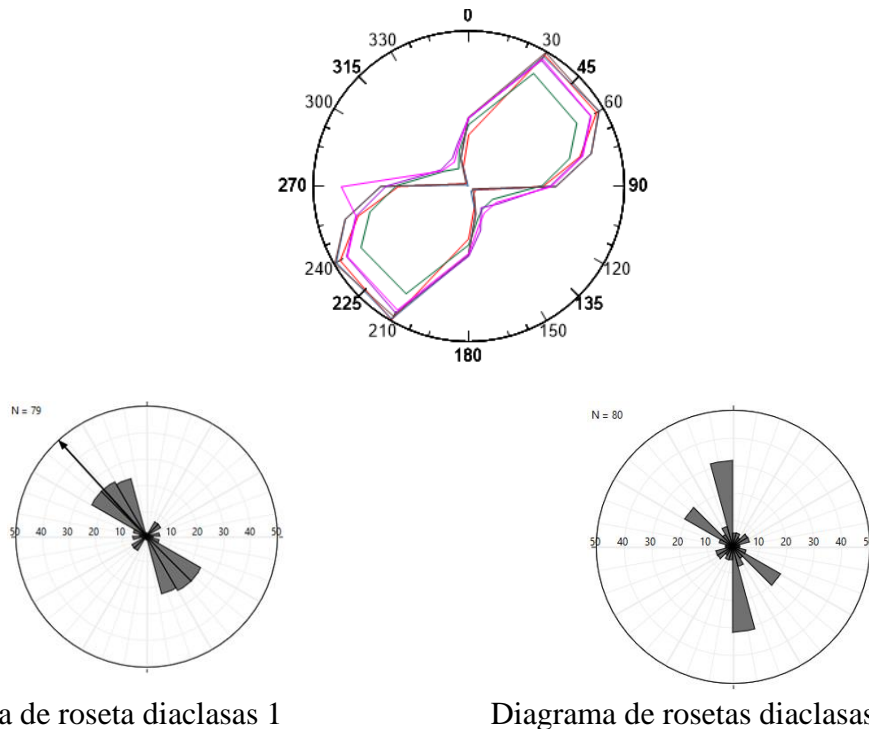


Figura 59. Comparación del diagrama polar de los datos de resistividades aparentes para 50 m. Vs los diagramas rosetas de los bloques estructurales cercanos.

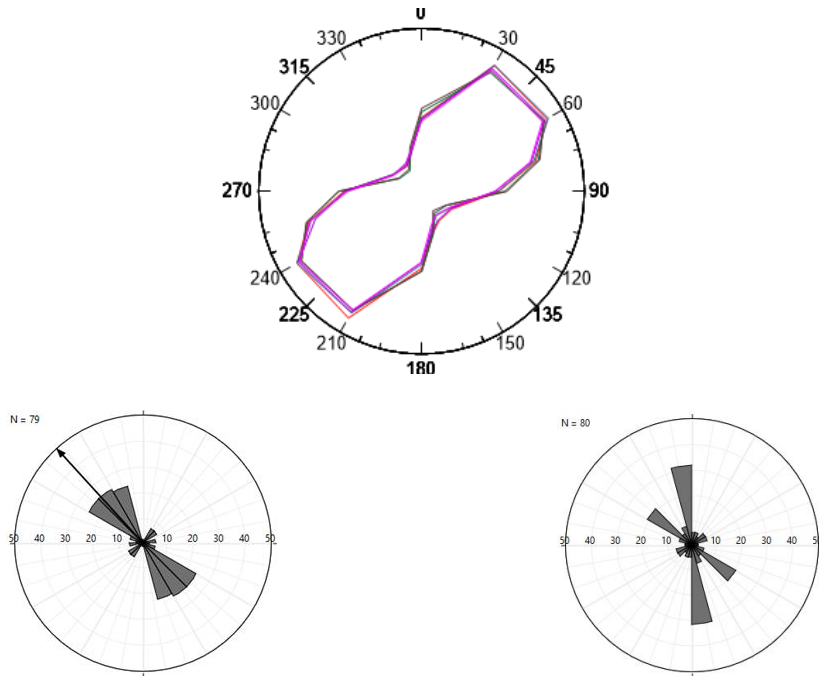


Diagrama de rosetas diaclasas 1

Diagrama de rosetas diaclasas 2

Figura 60. Comparación del diagrama polar obtenido con los datos de resistividades aparentes para 80 m vs los diagramas de rosetas de los bloques estructurales más cercanos.

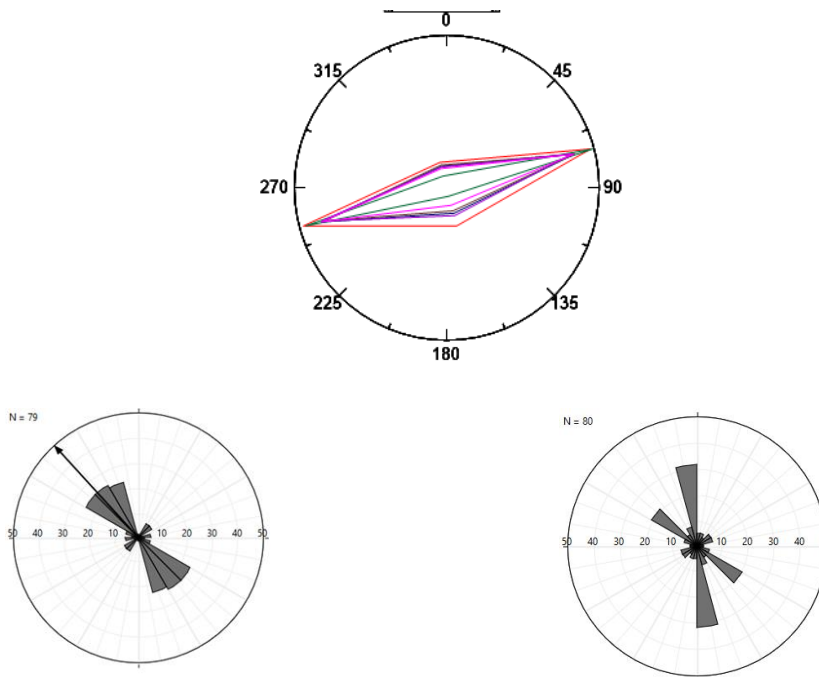


Diagrama de rosetas diaclasas 1

Diagrama de rosetas diaclasas 2

Figura 61. Comparación del diagrama polar con los datos de resistividades aparentes para 100 m vs los diagramas roseta de los bloques estructurales cercanos.

Para el punto 2 de adquisición cerca al eje del anticlinal La Esmeralda se obtuvieron las gráficas mostradas en la *Figura 62* y *Figura 63* los cuales indican que el fracturamiento asociado a las gráficas de resistividad se encuentra concordante con el diagrama rosetas 5 en comparación con las rosetas 3 y 4 de los bloques aledaños.

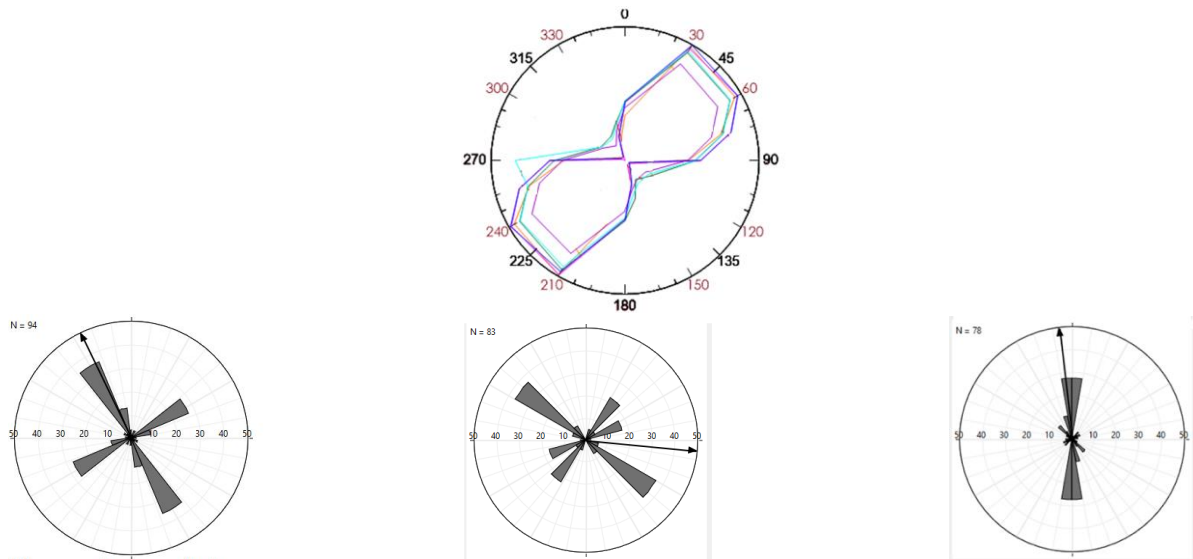


Diagrama de rosetas diaclasas 5 Diagrama de rosetas diaclasas 3 Diagrama de rosetas diaclasas 4

Figura 62. Comparación del diagrama polar con los datos de resistividades aparentes para 50m vs los diagramas rosetas de los bloques estructurales más cercanos.

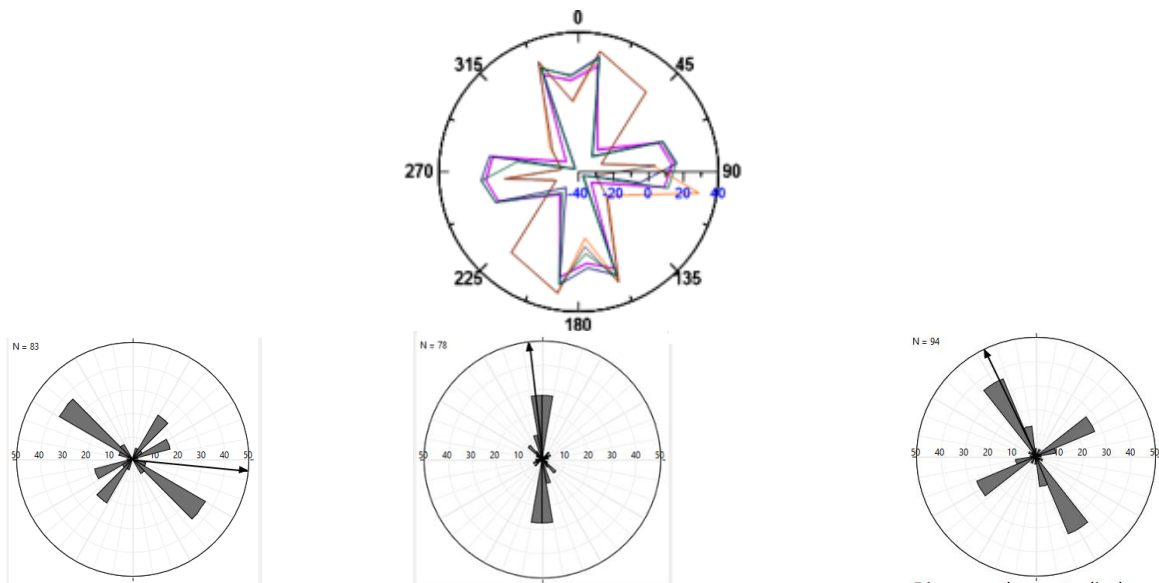


Diagrama de rosetas diaclasas 3 Diagrama de rosetas diaclasas 4 Diagrama de rosetas diaclasas 5

Figura 63. Comparación del diagrama polar de los datos de resistividades aparentes para 80 m vs los diagramas rosetas para los bloques estructurales más cercanos.

5.1.2 Tomografías de Resistividad Eléctrica TRE. Las inversiones obtenidas de las Tomografías de Resistividad Eléctrica TRE indicadas en la **Figura 58** se hicieron con tres diferentes softwares: flashres-Universal (versión full, propio del ZZ Universal96 System que es el software que usa el tomógrafo para leer los datos de resistividad obtenidos), Res2DInvx32 (versión demo que solo trabaja con 28 de los 64 electrodos de posición para hacer las inversiones) y el ZondRes2D (versión demo que solo trabaja con 300 datos adquiridos de los más de 1000 que se lograron con el método Wenner), estas inversiones se hicieron siguiendo la metodología propuesta por el manual de usuario para flashres-UNIVERSAL64/96 (ZZ Resistivity Imaging Pty Ltd) para la interpretación de los datos con Flashres-Universal y con Res2DInvx32, y para la interpretación con el software ruso ZondRes2D se utilizó la metodología del manual ZONDRES2D (Zond Geophysical Software, 2016) donde los resultados se muestran a continuación:

Para el punto 1 se identifican las tomografías A-A' y B-B' dispuestas perpendicularmente entre sí, donde la tomografía A-A' está tomada en dirección W-E y el resultado de la inversión de los datos con los distintos softwares se ven representados en la *Figura 64, Figura 65 y Figura 66*) donde los valores de resistividades más bajos (entre 0 y 100 Ωm) se pueden asociar a zonas de altas saturaciones de aguas subterráneas, debido al alto grado de fracturamiento y disolución de las rocas carbonatadas que se encuentran en cercanías al manantial Cañaverales y cuyas aguas se encuentran enriquecidas con iones de bicarbonato, Ca^{+2} y el CO_3^{-2} , entre otros provenientes de la disolución de su roca, los cuales favorecen la conductividad del agua, ya que pueden transportar mayor cantidad de cargas eléctricas en su estructura molecular. Contrastando, En la Tomografía B-B' hacia el occidente se encuentran los valores de resistividad más altos (hasta 500 Ωm) asociados a rocas poco saturadas de agua correspondientes a las concreciones y algunas capas de

shale de la formación Cerrejón que se encuentra parcialmente impermeabilizada en la zona de contacto con la Grupo Cogollo por La Falla Cerrejón (ver **Figura 76**).

Las tomografías A-A', B-B' y C-C' se realizaron con el arreglo tipo Wenner, mientras que la D-D' se hizo con el arreglo ZZ del equipo ya que la disponibilidad de tiempo era reducida

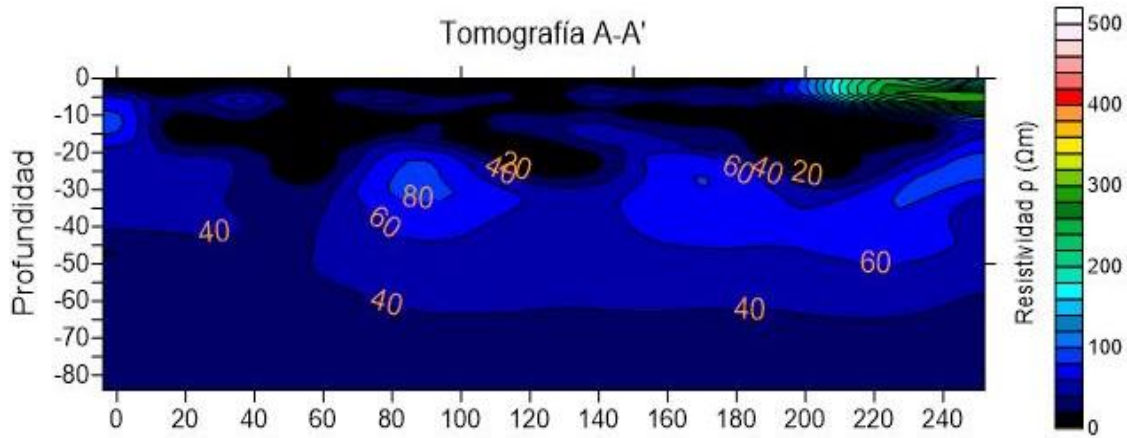


Figura 64. Resultado de la inversión de la tomografía de resistividad eléctrica (TRE) A-A' para el punto 1 en cercanías al Manantial Cañaverales con dirección NNE-SSW, dispuesta de forma paralela a la falla Cerrejón, vista con el software Flashres-Universal.

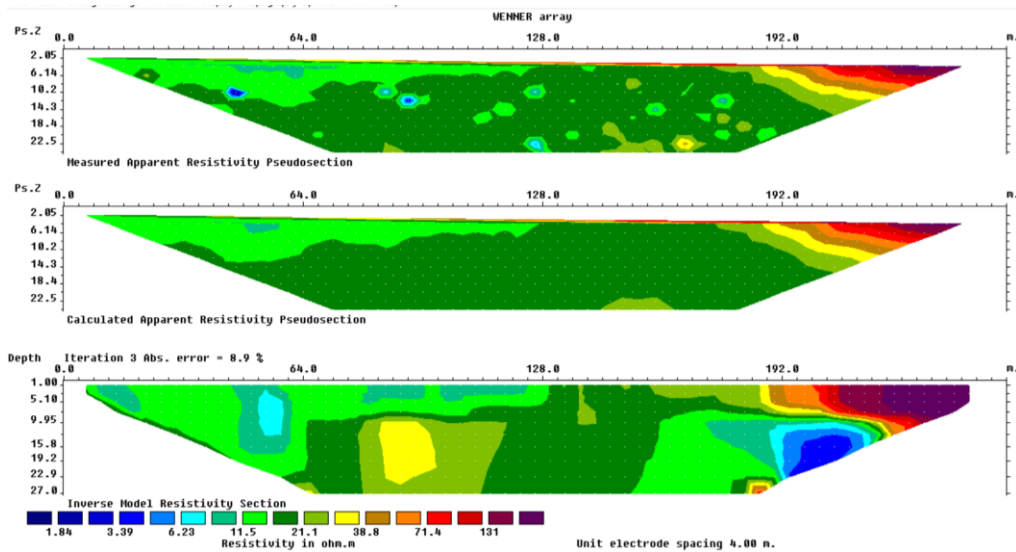


Figura 65. TRE A-A' con arreglo tipo Wenner observada con la versión demo del software Res2DInvx32 donde solo trabaja los datos de inversión con 28 electrodos de los 64 que se usaron.

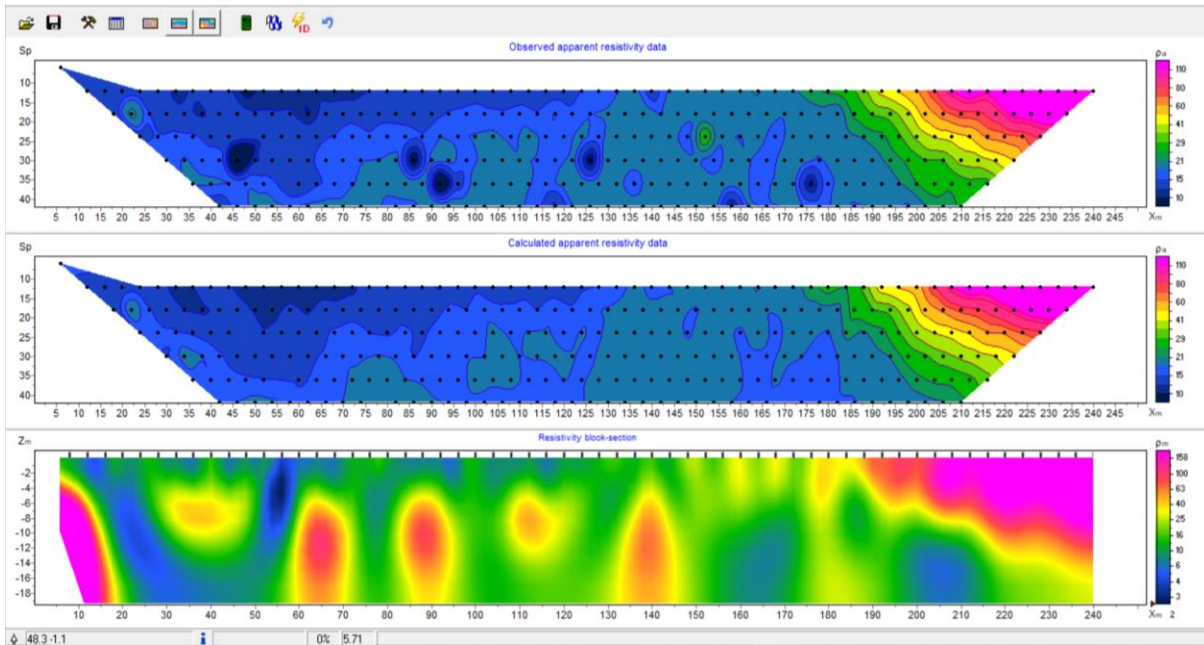


Figura 66. TRE A-A' obtenido con la versión demo de ZondRes2D

La tomografía A-A' fue tomada sobre un depósito cuaternario con un espesor que va de los 5 a los 10 m, el nivel freático se encuentra a los 3,3 m y la roca del acuífero presente es de caliza fosilífera altamente fracturada que permite el flujo y acumulación de agua subterránea, a la vez que se encuentra altamente saturada, mostrando resistividades de hasta 80 Ωm en casi todo el perfil, exceptuando la parte superior derecha, que muestra un aumento de la resistividad causado posiblemente por una raíz cercana a los últimos electrodos.

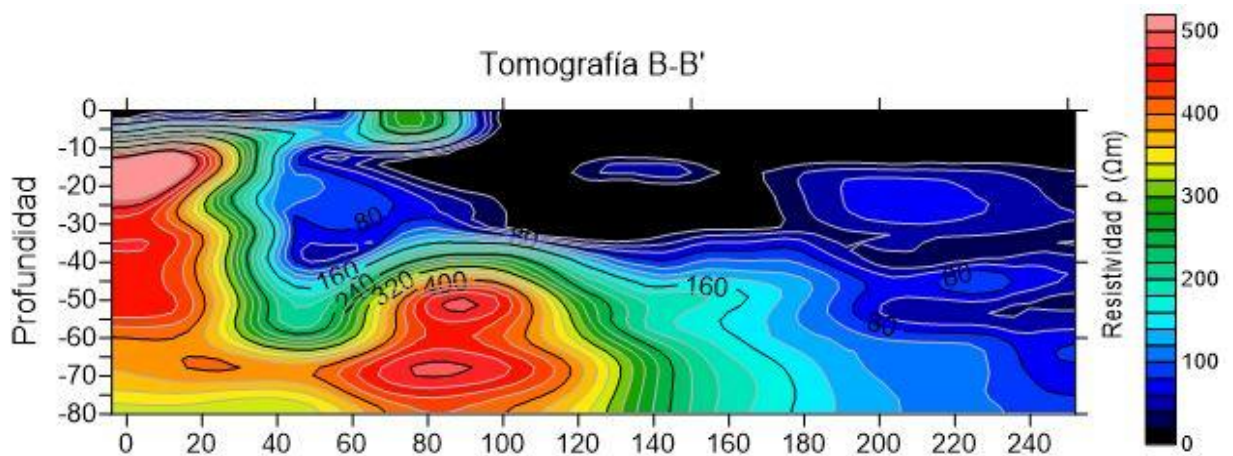


Figura 67. TRE B-B' perpendicular a A-A' dispuesta en dirección NWW-SEE

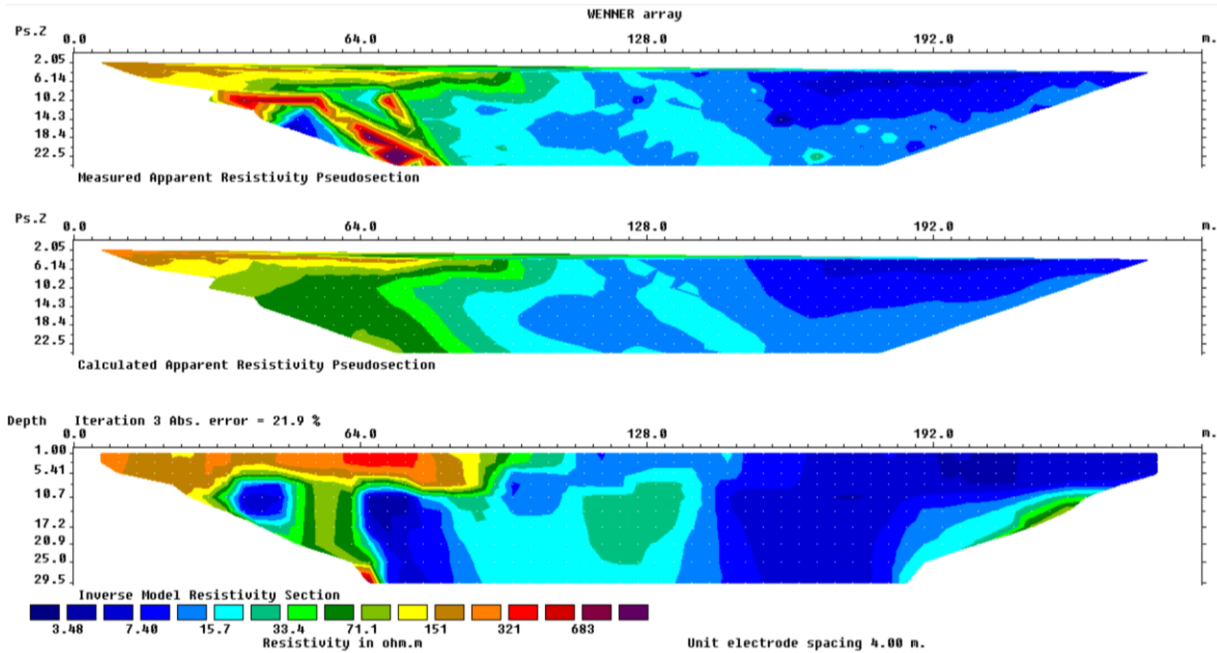


Figura 68. TRE B-B' observada con la versión demo de Res2DInvx32

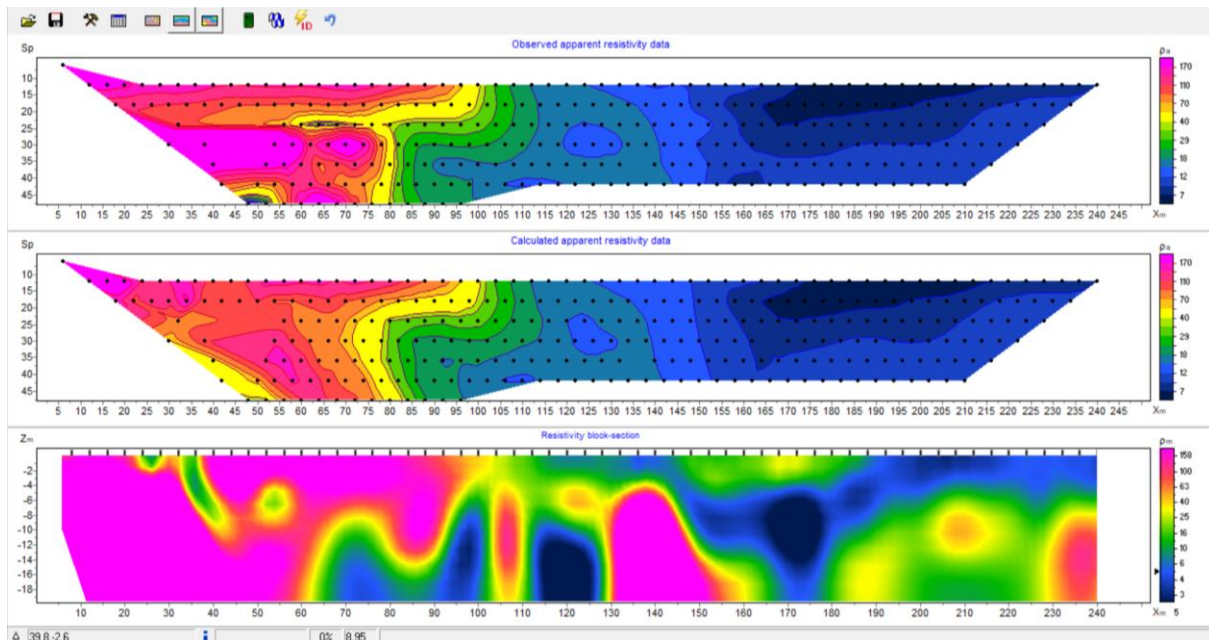


Figura 69. TRE B-B' obtenido con la versión demo de ZondRes2D

La tomografía B-B muestra un cambio de resistividades abrupto de E a W, donde se observa al E una mayor cantidad de saturación de agua en la roca, reflejada en las bajas resistividades eléctricas (hasta 100 Ohm*m) contrario al lado W donde sus resistividades

ascienden hasta los 500 Ohm*m, significando posiblemente una impermeabilización parcial de la roca del lado W, debido al componente compresivo de la Falla Cerrejón.

Para el punto 2, en cercanías al anticlinal La Esmeralda se tomaron las tomografías C-C' (ver *Figura 70*) que va paralelo al eje del anticlinal y D-D' (ver *Figura 73*) perpendicular al eje del mismo anticlinal, donde se asocian litologías con excelente porosidad primaria y secundaria con alta permeabilidad y completamente saturadas, donde el espesor del depósito cuaternario no supera los 10 m y sus resistividades de 15 a 30 Ω m se pueden confundir con el de una capa calcárea fosilífera altamente fracturada y saturada del Grupo Cogollo, mientras que las resistividades más bajas de hasta 10 Ω m se asocian a capas lenticulares arenosas con excelente porosidad y permeabilidad. Además, en la Tomografía D-D' se puede visualizar una forma anticlinoria, demarcada por las capas de arenas y calizas. (ver *Figura 76*).

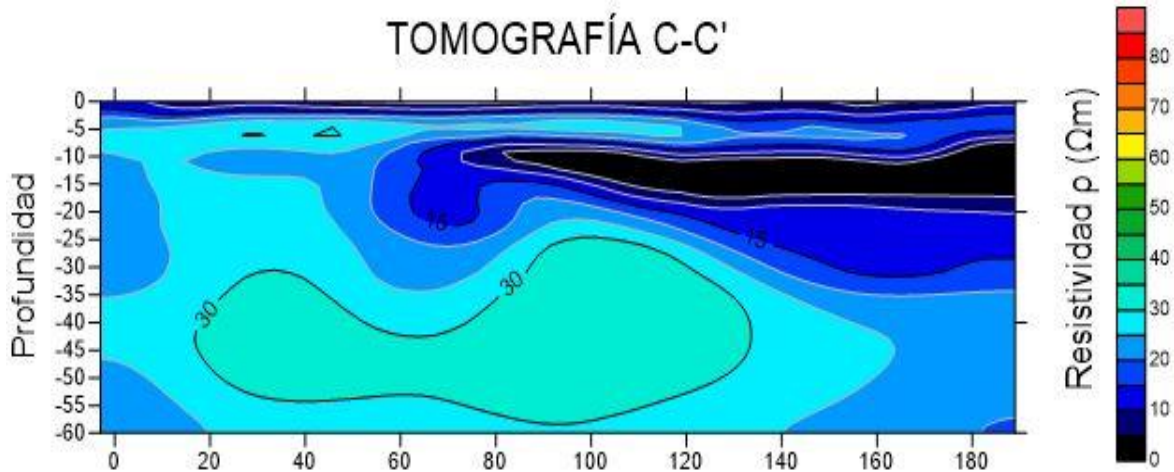


Figura 70. TRE C-C' en el punto 2, paralelo al eje del anticlinal La Esmeralda con FlashRes-Universal

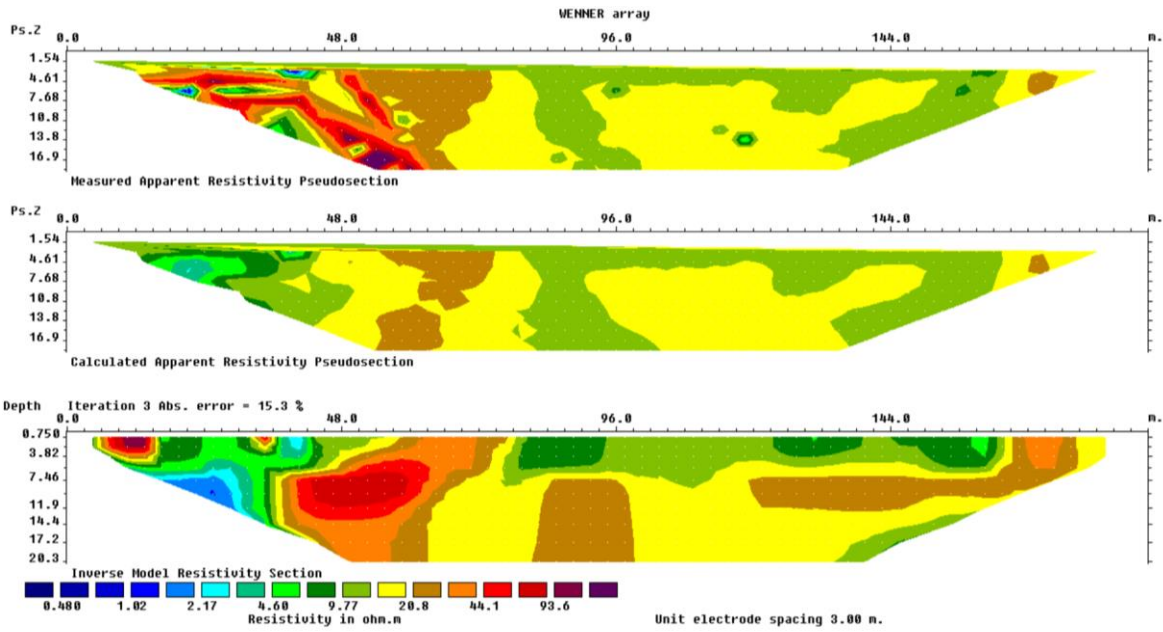


Figura 71. TRE C-C' observada con la versión demo del software Res2DInvx32

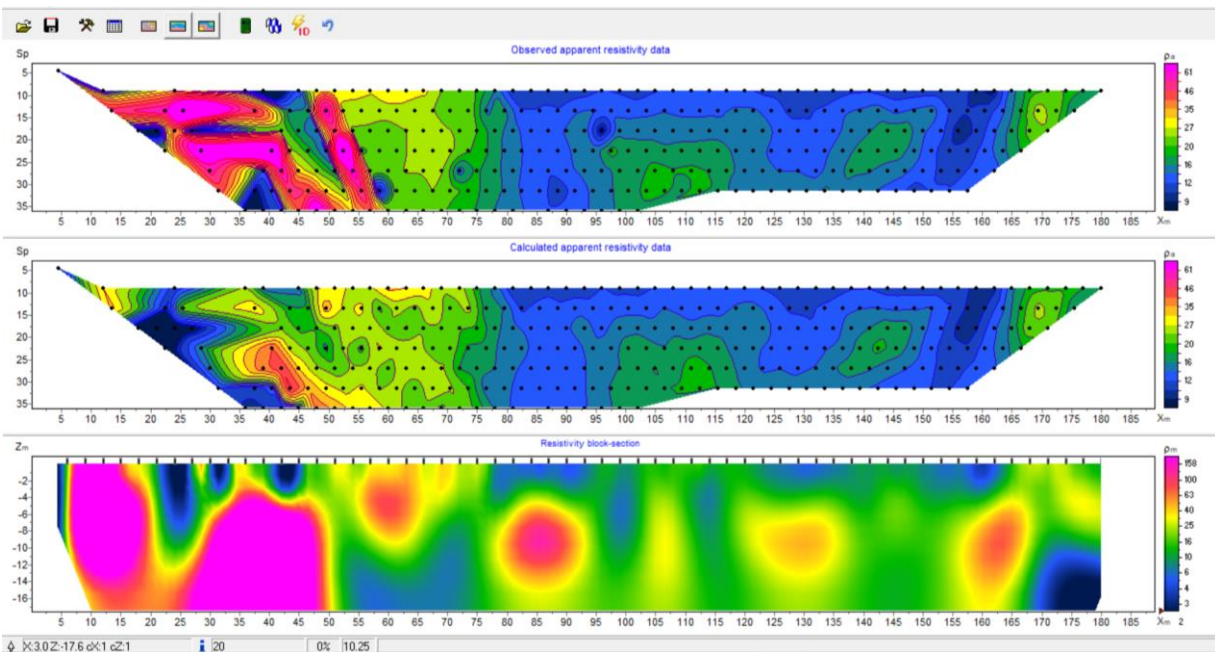


Figura 72. TRE C-C' obtenido con la versión demo de ZondRes2D

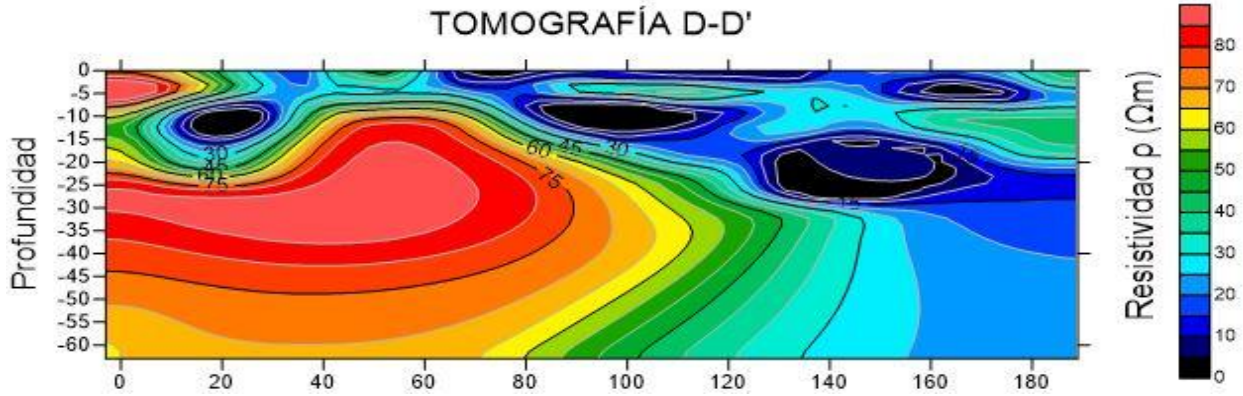


Figura 73. TRE D-D' para el punto 2, perpendicular a la dirección de la TRE C-C'.

La tomografía D-D' (Figura 74) fue tomada realizando un arreglo tipo ZZ, propio del tomógrafo con el que se hizo la adquisición, se pudo notar que al intentar hacer la inversión con los softwares Res2DInv y ZondRes2D, los resultados no son concluyentes, mostrando fragmentos pequeños de información que sirven muy poco para la interpretación de las litologías presentes, aunque se puede relacionar un poco con los valores bajos de resistividades mostrados.

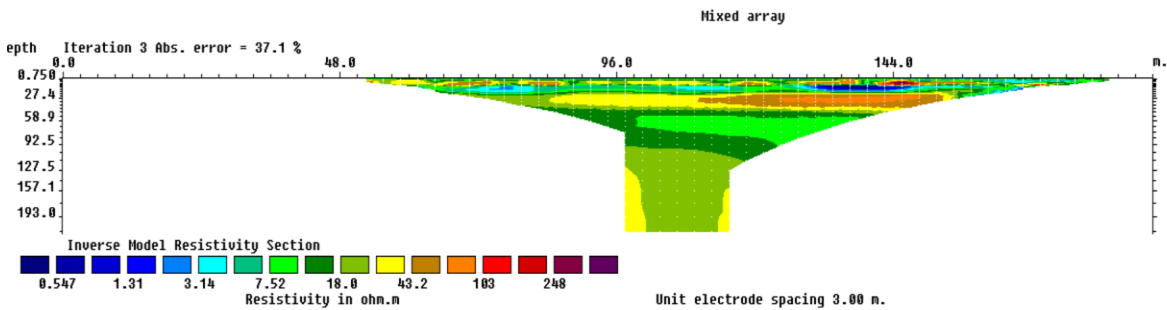


Figura 74. TRE D-D' obtenido con la versión demo de Res2DInvx32

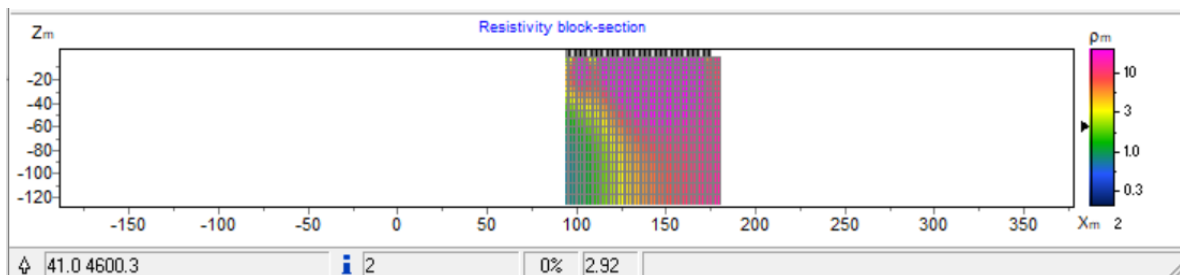


Figura 75. TRE D-D' obtenido con la versión demo del software ZondRes2D

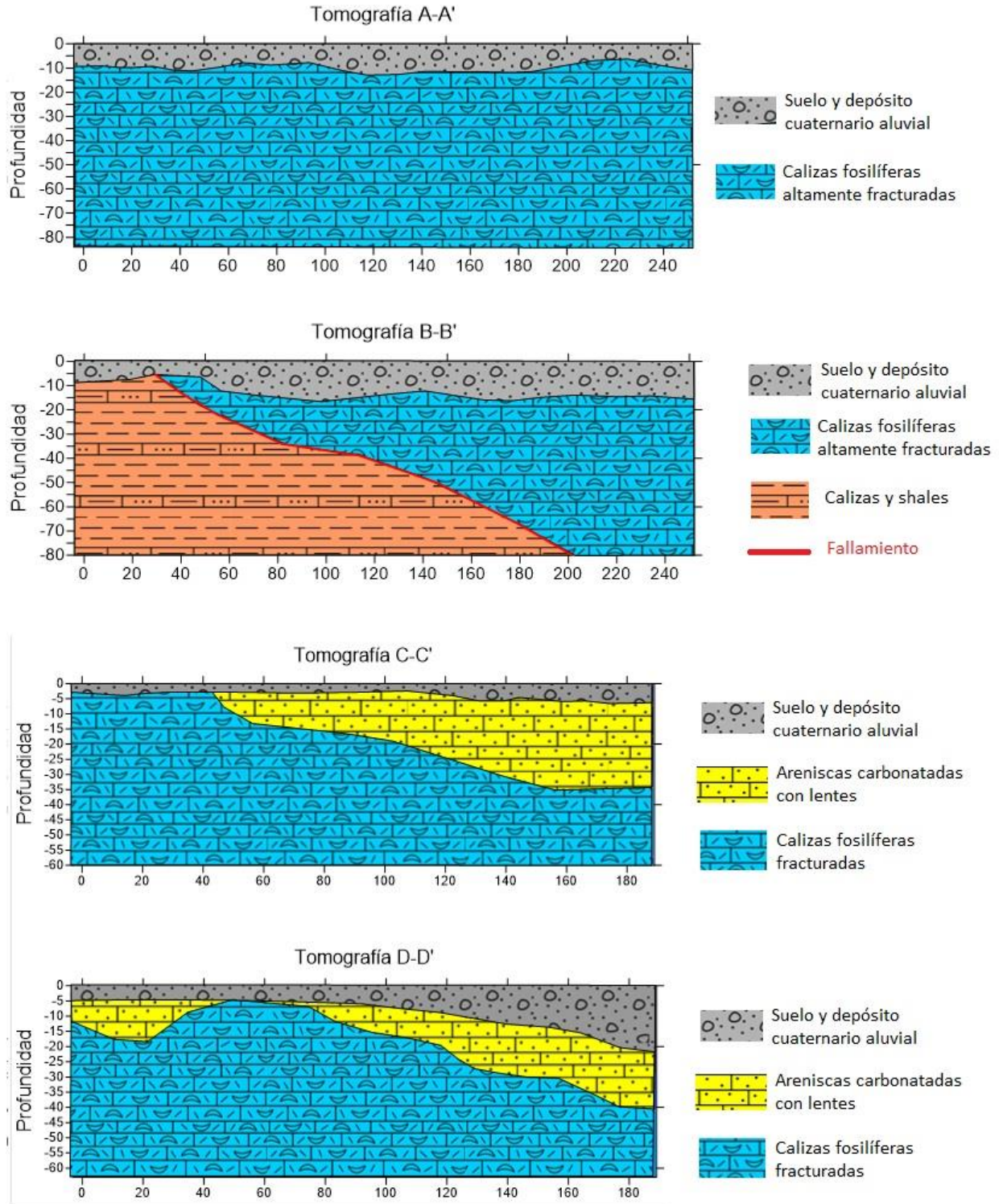


Figura 76. Interpretación de las tomografías de resistividad de acuerdo con la litología presente y valores de resistividades comunes.

6. Conclusiones

Se caracterizaron geológicamente los parámetros litológicos donde se observó que las rocas carbonatadas de las formaciones Cogollo y la Luna, que representan la mayoría de los cuerpos rocosos, presentan excelente porosidad secundaria que favorece la acumulación y el flujo de agua en la zona esto representado por los bajos valores de resistividades que se identificaron en las tomografías de resistividad eléctrica. Se encuentra que en la zona de trabajo predominan los rangos geomorfológicos de morfogénesis estructural sobre el fluvial, denudacional, volcánico, y antropogénico.

En la zona de trabajo afloran las unidades geológicas de base a techo: Formación La Quinta que se encuentra correlacionada con la formación Girón en el VMM, caracterizada por presentar areniscas rojas con tobas riolíticas y conglomerados rojizos con nódulos ferrosos y ceniza volcánica. Se encuentra aflorando el miembro superior del grupo Cogollo caracterizado por alternancias de calizas masivas, calizas lodosas, calizas arenolodosas, margas, todas caracterizadas por presencia de fósiles como braquiópodos, bivalvos, gasterópodos, foraminíferos, concreciones, y areniscas calcáreas; y silíceas; asociados a un ambiente de plataforma continental y marino con eventos de regresión y trasgresión marina donde las secciones delgadas mostraron presencia de glauconita.

A diferencia de la cartografía a escala 1:100.000 presentada por el INGEOMINAS (2010) se encontró para la zona del Manantial Cañaverales afloramientos con litologías asociadas a litofacies correlacionables con el miembro Pujamana de la formación La Luna del VMM. Éstas son calizas tabulares con concreciones de hasta 1 m de diámetro, alternancias de capas delgadas planoparalelas de lodolitas calcáreas, chert rico en hierro con foraminíferos, lodolitas fosfáticas ricas en

foraminíferos y minerales arcillosos de alteración. La formación Cerrejón únicamente se encuentra aflorando en la quebrada El Cequioncito como concreciones carbonatadas altamente alteradas a minerales arcillosos con centros conglomeráticos de restos fosilíferos, con porosidad fenestral, esta litología se asocia a la parte inferior de la formación Cerrejón. Finalmente se encuentran los depósitos cuaternarios conglomeráticos de origen aluvial y coluvial compuestos por rocas terrígenas, carbonatadas y volcanoclásticas cuya porosidad puede almacenar y permitir el flujo.

Los valores de las resistividades de las tomografías TRE (entre 0 y 100 Ωm) indican una alta saturación de aguas ricas en iones disueltos característicos de las rocas carbonatadas (como Ca^{+2} y el CO_3^{-2}) y de minerales arcillosos, sin embargo se presentan contrastes de valores de resistividades hacia el W de la zona, donde se encuentra el contacto fallado de la formación Cogollo con la formación Cerrejón por la falla Cerrejón descrita como de tipo inverso, se interpreta que este fallamiento puede impermeabilizar parcialmente el flujo de agua en dirección EW.

Debido a que el nivel freático de las áreas donde se trazaron los arreglos geoelectrónicos es menor a los 5 m y a la alta saturación de aguas con iones de calcio, carbonatos y otros, no es posible la diferenciación de los tipos de roca, ya que se está recibiendo una información con mayor influencia en las resistividades del agua que de la roca.

Las direcciones de los valores de menor resistividad aparente y resistencia graficados en los diagramas polares de los sondeos eléctricos azimutales tomados en cercanías al Manantial Cañaverales y al anticlinal La Esmeralda son concordantes entre sí y a su vez se pueden asociar con las direcciones de diaclasamiento de los bloques estructurales en los que se encuentran, presentando una dirección preferencial generalizada de fracturamiento de 315° para el Manantial y 300° para el anticlinal, donde se estima que las características de este fracturamiento (relleno, filtración, continuidad, rugosidad, abertura) permite un buen flujo de aguas subterráneas.

Bibliografía

- Alonso Díaz, A. (2001). *Estudio de prospección geofísica y geotécnica para el emplazamiento del embalse de san esteban de andagoya (álava). Proyecto fin de carrera. Ingeniería Geológica. Escuela técnica superior de ingenieros de minas.*
- Archie, G. (1942). *The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining some reservoir characteristics. Trans.AIMME 146, 54-62.*
- Auge, M. (2008). *Métodos Geoeléctricos para la Prospección de Agua Subterránea. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.*
- Busby, J. (2000). *The effectiveness of azimuthal apparent-resistivity measurements as a method for determining fracture strike orientations. Geophysical Prospecting, 48, 677±695.*
- Cantos Figuerola, J. (1974). *Tratado de geofísica aplicada. Madrid: Sección de Publicaciones de la E.T.S. de Ingenieros de Minas.*
- Cedhagen, T. (06 de 16 de 2010). *World Foraminifera Database. Obtenido de Photo Gallery: <http://www.marinespecies.org/foraminifera/photogallery.php?album=772&pic=35794>*
- Chelotti, L., Acosta, N., & Foster, M. (2009). *PerfilesEléctricos de Pozo, Cálculo de Saturación de Fluidos. Cátedra de Geofísica Aplicada.*
- Dirección de Geoamenazas SGC. (2017). *Guía metodológica para la zonificación por movimientos en masa escala 1:25.000 . Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.*
- Estrada Lorenzo, F. (1996). *Prospección geofísica de alta resolución mediante geo-rádar aplicación a obras Civiles. Madrid: Laboratorio de Geotecnia del CEDEX, Ministerio de Fomento.*
- Estrada, L. (2012). *Prospección Geoeléctrica para Ingenieros. Tucumán: FACET.*

- Etayo-Serna. (1985). Paleontología estratigráfica del Sistema Cretáceo en la Sierra Nevada del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia). Proyecto Cretácico. Bogotá: INGEOMINAS.*
- Gomez Isidro, S. (2000). Transición de percolación en flujo de rocas y exponentes anómalos. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.*
- Gómez, J. M. (2015). Atlas Geológico de Colombia 2015. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.*
- González de Vallejo, L. (2002). INGENIERÍA GEOLÓGICA. Madrid: Pearson Educación.*
- GRP Ltda. (2010). Geología de las planchas 21 y 22 Fonseca y Los Remedios. Colombia: INGEOMINAS.*
- GRP Ltda. (2010). Geología de las Planchas 27 y 28 Valledupar y Villanueva. INGEOMINAS.*
- HABBERJAM, G., & WATKINS, G. (1967). THE USE OF A SQUARE CONFIGURATION IN RESISTIVITY PROSPECTING. Geophysical Prospecting 15, 445-467.*
- HERRÁIZ, A. S. (26 de 03 de 2018). La importancia de las aguas subterráneas. Obtenido de Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. X Programa de Promoción de la Cultura Científica y Tecnológica: <http://www.rac.es/ficheros/doc/00923.pdf>*
- IDEAM. (2013). Aguas subterráneas en Colombia: una visión general. Bogotá D.C.*
- IDEAM. (2014). Estudio Nacional del Agua. Bogotá, D.C.*
- IDEAM. (2019). Estudio nacional del agua 2019. Bogotá D.C.*
- IGAC. (2005). Geomorfología aplicada a levantamientos edafológicos y zonificación física de tierras. . Bogotá.*
- INGEOMINAS-UIS. (2007). "Investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de Los Santos y sector nordeste de Curiti". Informe interno. Bogotá: INGEOMINAS.*

- Lakubovskii, I. V., & Liajov, L. L. (1980). Exploración eléctrica. Reverte.*
- Llopis Lladó, N. (1970). Fundamentos de hidrogeología cárstica. Madrid: BLUME.*
- Loke, M. (2012). Tutorial 2-D and 3-D Electrical Imaging Survey. Obtenido de www.geotomosoft.com.*
- Mercado, M. (2003). MAPA GEOLÓGICO DEL DEPARTAMENTO DE LA GUAJIRA . Bogotá, D.C.: INGEOMINAS.*
- Niemeyer Rubilar, H. (1999). Apuntes de Geología Estructural. Antofagasta.*
- Orellana, E. (1974). Prospección Geoeléctrica por Corriente Continua y Campos. Madrid: Paraninfo.*
- Radaideh, O., Grasemann, B., Melichar, R., & Mosar, J. (2016). Detection and analysis of morphotectonic features utilizing satellite remote sensing and GIS: An example in SWJordan. Geomorphology ELSEVIER, 58-79.*
- Rojas, L., & Radic, J. (2002). ESTILOS DE DEFORMACION DEL BASAMENTO Y DE LA COBERTURA SEDIMENTARIA EN LA FAJA PLEGADA Y FALLADA DE MALARGÜE EN EL AREA DE PUESTO ROJAS, MENDOZA, ARGENTINA. XV Congreso Geológico Argentino (págs. 1-6). Santiago de Chile: El Calafate.*
- Rosero, A. (1996). Análisis estructural tridimensional del sistema de fallamiento y plegamiento al sur de Sogamoso, Boyacá, Colombia. Bogotá: Tesis de grado UNAL.*
- Scholle. (2003). A Colour Guide to the Petrography of Carbonate Rocks. AAPG.*
- Servicio Geológico Colombiano. (2015). Glosario de unidades y subunidades geomorfológicas. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía.*
- Taylor, R., & Flemming, A. (1988). Characterizing Jointed system by Azimuthal resistivity survey. Groundwater, 464-474.*

- Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (1990). Applied Geophysics. Cambridge: Cambridge University Press.*
- Udosen, N., & George, N. (2018). Characterization of electrical anisotropy in North Yorkshire, England using square arrays and electrical resistivity tomography. Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.*
- Ujueta, G., & Llinas, R. (1990). Reconocimiento geológico de la parte más septentrional de la Sierra de Perijá. Geología Colombiana No. 17, 197-209.*
- UNESCO. (28 de 03 de 2018). Agua subterránea. Gestión del recurso “invisible”. 1992. Obtenido de <http://unesdoc.unesco.org/images/0009/000914/091435SB.pdf>*
- Zerfass, G., & Andrade, E. (2006). Foraminíferos Bentônicos do Estuário de Cacha-Prego Ilha de Itaparica, Bahia, Brasil. Pesquisas em Geociências, 33 , 43-54.*
- Zodhy, A., Eaton, G., & Mabey, D. (1974). Application of surface geophysics to ground – water investigations. En R. I. Survey, Collection of environmental data (pág. 63). EE.UU: USGS.*
- Zond Geophysical Software. (2016). Program for two-dimensional interpretation of data obtained by resistivity and induced polarization methods (land, borehole and marine variants) . San Petersburgo, Rusia.*
- ZZ Resistivity Imaging Pty Ltd. (s.f.). User Manual for FlashRES-UNIVERSAL64/96 The Full-channel Free ConFiguration Resistivity/IP Exploration System. <http://www.zzgeo.com/>, Adelaide, Australia. Obtenido de <http://www.zzgeo.com/>*