

Práctica empresarial C.D.M.B: elaboración de una parametrización de respuestas de resistividad y guía metodológica para la adquisición de datos geoelectricos, mediante un sondeo eléctrico vertical paramétrico sobre la Formación Girón en el municipio de Lebrija, Santander.

Jesús Alberto Álvarez Rincón

Trabajo de grado para optar al título de geólogo

Director:

Jaiber Leonardo Villamizar Cáceres

Geólogo

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2018

### **Dedicatoria**

*Dedicado a mis padres Jesus Alvarez Hernández y Yadira Rincón Sánchez, que admiro y quiero con todo mi corazón, por su constante apoyo, ánimo en momentos difíciles y por inculcarme valores y principios que me hicieron quien soy.*

*A mi hermanita María Claudia Alvarez a quien amo y valoro mucho, por todos los momentos compartidos, regaños fastidiosos y lindos detalles conmigo.*

*A mi novia María Alejandra por ser mi pilar y soporte en momentos difíciles, brindarme su amor incondicional y entrar a mi vida como si fuera su casa. “Gracias”*

### **Agradecimientos**

*A mis compañeros Danilo, Nicolás y Smith que me brindaron la ayuda y acompañamiento para realizar la columna estratigráfica de este proyecto.*

*Al profesor Jeiber Leonardo Villamizar Cáceres, a los geólogos Maira Alejandra Rincón Duarte y Carlos Waldurraga por sus observaciones, apoyo y consejos en la realización de este proyecto.*

*A la escuela Geología, su personal docente y administrativo que a lo largo de la vida universitaria colocaron a mi disposición herramientas y espacios permitieron desarrollar grandes aptitudes y un perfil integral como profesional.*

*A la Universidad Industrial de Santander y a la corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga por crear el ambiente y los espacios para crecer a nivel personal y profesional.*

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	15
1. Objetivos .....	17
1.1 Objetivo General.....	17
1.2 Objetivos Específicos.....	17
2. Generalidades.....	18
2.1 Localización .....	18
2.2 Clima .....	19
2.2.1 Pluviosidad.....	20
2.3 Hidrografía .....	21
2.4 Geomorfología .....	24
3. Antecedentes .....	25
4. Marco teórico. ....	27
4.1 Método eléctrico.....	27
4.1.1 Carga eléctrica y campo eléctrico. ....	29
4.1.2 Potencial eléctrico y diferencia de potencial.....	30
4.1.2.1 <i>Potencial de un campo eléctrico en un punto.</i> .....	30
4.1.2.2 <i>Diferencia de potencial entre dos puntos de un campo eléctrico.</i> .....	30
4.1.3 Superficies equipotenciales .....	30
4.1.4 Flujo eléctrico.....	31
4.1.5 Amperio.....	31
4.1.6 Resistencia eléctrica, Ley de Ohm. ....	31
4.2 Propiedades eléctricas de las rocas.....	33
4.2.1 Resistividad .....	33
4.2.2 Conductividad .....	34
4.2.3 Constante Dieléctrica. ....	36
4.2.4 Isotropía y Anisotropía.....	36
4.3 Factores influyentes en la resistividad de las rocas.....	37
4.4 Medición de la resistividad en campo .....	37
4.4.1 Medida de la resistividad en un punto.....	38
4.5 Resistividad aparente .....	40
4.6 Principio de equivalencia .....	41
4.7 Dispositivos o arreglos electródicos.....	42

4.7.1 Configuración Wenner .....	42
4.7.2 Configuración Dipolo-Dipolo .....	43
4.7.3 Configuración Schuemberg.....	43
4.8 Sondeos electricos verticales / vertical electrical sounding. (SEV / VES) .....	44
4.9 Curvas patrón en sondeos eléctricos de más de una capa. ....	46
4.9.1 Curvas patrón .....	46
4.9.2 Curvas tipos.....	48
5. Marco geológico.....	50
5.1 Estratigrafía .....	51
5.1.1 Formación Girón .....	52
5.2 Geología estructural .....	53
5.2.1 Falla Suarez .....	54
6. Metodología. ....	54
6.1 Consulta de bibliografía .....	54
6.2 Reconocimiento de campo .....	55
6.3 Adquisición de datos en campo.....	55
6.3.1 Columna Estratigráfica y Toma de muestra .....	56
6.3.2 Sondeo Eléctrico Vertical .....	56
6.4 Recopilación e interpretación de datos .....	58
6.5 Guía Metodológica para la Adquisición de datos geoelectricos .....	59
6.6 Parametrización de las respuestas de resistividad .....	60
7. Resultados. ....	61
7.1 Selección de área de estudio. ....	61
7.2 Columna Estratigráfica Escala 1:250. ....	64
7.3 Sondeo eléctrico vertical. ....	72
7.4 Parametrización de las respuestas de resistividad .....	77
8. Conclusiones. ....	83
9. Recomendaciones.....	85
Referencias bibliográficas .....	87

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Localización de la zona de estudio. Municipio de Lebrija, Santander. Adaptado de <a href="http://bga.aerooriente.com.co/">http://bga.aerooriente.com.co/</a> y Google Earth Pro .....	18
Figura 2. Precipitación en la estación Palonegro en los años 2005-2009. Adaptado del Plan de desarrollo del municipio de Lebrija 2016-2019: Ambiente, vida y desarrollo. ....	20
Figura 3. División hidrogeológica de la subcuenca Lebrija Alto. Adaptado del Plan de ordenamiento y manejo ambiental: Subcuenca Lebrija Alto, 2007.....	21
Figura 4. Relieve del área de estudio. Adaptado de Google Earth Pro.....	25
Figura 5. Esquema ilustrativo de carga eléctrica y campo eléctrico. Adaptado de (Milson & Eriksen, 2011).....	29
Figura 6. Campo eléctrico tridimensional creado por dos cargas iguales y de signo contrario. Adaptado de (Milson & Eriksen, 2011).....	30
Figura 7. Esquema ilustrativo de la inyección de corriente en el terreno. Adaptado de “Apuntes de prospección geoelectrica”. Ing. Luis A. Estrada, 2015.....	32
Figura 8. Concepto de medida y definición de la resistividad de un material. Adaptado de “Prospección geofísica de superficie aplicada a la hidrogeología”, Teixidó, 2008.....	32
Figura 9. Resistividad eléctrica y conductividad de los materiales geológicos. Adaptado de “Hydrogeophysics as a Multidisciplinary Tool on Aquifer Appraisal”. Falgas. E. 2007, Universidad de Barcelona. ....	33
Figura 10. Inducción de corriente en el terreno. Adaptado de (Milson & Eriksen, 2011).....	38
Figura 11. Esquema ilustrativo de inyección de corriente en 1 punto por 2 electrodos. Adaptado de “Prospección geofísica: Sondeos Eléctricos Verticales”. Javier Sánchez, 2011. ....	39

Figura 12. Ejemplo de electrodos en medio heterogéneo. Adaptado de Teixidó, 2008 .....	40
Figura 13. <b>a)</b> Equivalencia en T, <b>b)</b> Equivalencia en S, esquema representativo. Adaptado de Teixidó, 2008 .....	41
Figura 14. Configuración Wenner. Adaptado de (Lowrie, 2007).....	42
Figura 15. Configuración Dipolo-Dipolo. Adaptado de Lowrie, 2007.....	43
Figura 16. <b>a)</b> Configuración Schulemberg. (Lowrie, 2007) <b>b)</b> Representación esquemática, el fondo muestra el patrón de sensibilidad de la configuración Schulemberg. Adaptado de (ABEM Instrument AB, 2009) .....	43
Figura 17. A la derecha una tabla con las variables requeridas para el cálculo de $(\rho_a)$ y a la izquierda la variación de esta en función de $AB/2$ , en relación logarítmica. Adaptado de Auge, 2008.....	45
Figura 18. Paralelepípedo geológico afectado por la corriente en un dispositivo schlumberger. Adaptado de Auge, 2008.....	46
Figura 19. Grafica de una curva teórica de un SEV. Adaptado de Cantos, 1973. ....	47
Figura 20. Curva tipo para cortes de 1 sola capa. Adaptado de Cantos, 1973.....	48
Figura 21. Curvas tipo para cortes de 2 capas. Adaptado de Cantos, 1973 .....	49
Figura 22. Curvas tipo para cortes de 3 capas. Adaptado de Sánchez, 2011 .....	49
Figura 23. Esquema de un ejemplo ilustrativo para situaciones de 4 o más capas. Adaptado de Sánchez, 2011. ....	50
Figura 24. Mapa geológico del área de estudio. Adaptado de INGEOMINAS, 1997.....	51
Figura 25. Componentes del equipo escuela de geología a) y b) Juegos de cable, c) electrodos de acero inoxidable o no polarizarles, d) Pinza de cocodrilo, e) Consola Terrameter SAS 1000 y batería portable de 12 V.....	58

Figura 26. Selección de Área de estudio en rojo, línea del sondeo en azul y ruta de la columna estratigráfica en amarillo. Adaptado de Google Earth.....	63
Figura 27. Muestra JA-GR-02. Arenisca de grano medio a fino lodosa.....	65
Figura 28. Muestra JA-GR-03. Arenisca de grano grueso a muy grueso lodosa.....	67
Figura 29. Arenisca conglomerática de grano grueso a muy grueso lodosa.....	68
Figura 30. Limolita arcillosa. Muestra JA-GR-08. ....	69
Figura 31. Afloramiento segmento C, Contacto entre las lodolitas (supra yaciendo) y las areniscas (infra yaciendo). Adaptado de Google Earth .....	70
Figura 32. Columna estratigráfica de la Formación Girón, escala 1:250 .....	71
Figura 33. Curva de resistividades en campo, realizadas en IPI2win.....	74
Figura 34. Curva teórica 1 Resistividad Aparente vs $AB/2 SEV1$ , software IPI2win.....	75
Figura 35. Curva teórica 2 Resistividad Aparente vs $AB/2 SEV1$ , software IPI2win.....	77
Figura 36. Correlación columna estratigráfica Segmento C - SEV .....	81

### Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Coordenadas elipsoidales y planas de Gauss Krueger (origen central) de los vértices del área de estudio.....	19
Tabla 2. Precipitación mensual en milímetros, estación aeropuerto Palonegro.....	20
Tabla 3. Disponibilidad de agua La angula-Lajas.....	22
Tabla 4. Demanda total por Microcuencas .....	23
Tabla 5. Índice de escasez para la subcuenca Lebrija Alto.....	24
Tabla 6. Tipos de SEV de acuerdo con su extensión y su principal aplicación.....	45
Tabla 7. Descripción Textural Muestra JA-GR-01 .....	65
Tabla 8. Descripción Textural Muestra JA-GR-03.....	66
Tabla 9. Descripción textural muestra JA-GR-05.....	68
Tabla 10. Descripción textural muestra JA-GR-08.....	69
Tabla 11. Datos adquiridos del SEV .....	72
Tabla 12. Resultados presentados por el software IPI2win para el modelo teórico 1.....	76
Tabla 13. Resultados presentados por el software IPI2win para el modelo teórico 1.....	76
Tabla 14. Correlación litológica y hidrogeológica del modelo teórico 1.....	78
Tabla 15. Tabla de Resistividades teóricas de geomateriales según (Eve & Keys, 1956).....	79
Tabla 16. Resistividades teóricas de geomateriales según (Parasnis, 2012).....	79
Tabla 17. Resistividades teóricas de geomateriales según (Milson & Eriksen, 2011).....	79
Tabla 18. Diferentes Correlaciones litológicas según los distintos autores para el SEV1.....	80

**Lista de Apéndices**

**(Ver apéndices adjuntos en el CD entregado a biblioteca)**

Apéndice A: Formato de construcción de columna estratigráfica por el método de bastoneo.

Apéndice B: Guía metodológica para la adquisición de datos y lectura de respuestas de resistividad

## Resumen

**Título:** Práctica empresarial C.D.M.B: elaboración de una parametrización de respuestas de resistividad y guía metodológica para la adquisición de datos geoelectricos, mediante un sondeo eléctrico vertical paramétrico sobre la Formación Girón en el municipio de Lebrija, Santander. \*

**Autor:** Jesús Alberto Álvarez Rincón\*\*

**Palabras clave:** SEV Paramétricos, Formación Girón, Acuíferos, Acuitardos, Resistividad.

En el municipio de Lebrija, el aumento de la actividad agropecuaria sumado a la creciente demanda por el aumento de la población ha hecho que la demanda de agua de la microcuenca Q. Angula Lajas sea alta, con un porcentaje del 99%. Esto ha generado que la población recurra cada vez más a las alternativas de las aguas subterráneas para poder satisfacer sus necesidades La Formación Girón aflorante en la zona cuenta con litologías de interés hídrico que se han venido explotando a medida que la demanda crece, posee diferentes cuerpos de agua subterráneos que deben ser identificados y caracterizados para su futura protección y exploración. La CDMB es la entidad encargada de dicha tarea. Por esto se pensó en parametrizar las respuestas de resistividad de las facies litológicas con potencial hidrogeológico utilizando el método de sondeos eléctricos verticales.

Las respuestas de resistividad parametrizadas corresponden a 2 litofacies: la primera, lodolitas y limolitas con presencia de paleosuelos intercaladas de arenisca muy fina a fina y la segunda areniscas conglomeráticas de tamaño grueso a granulo con matriz de arena gruesa intercalados de capas de arenisca de grano medio a grueso, con una resistividad de 32.2 Ohm/m y 195 Ohm/m respectivamente.

En la zona de estudio se levantó una columna estratigráfica de 214 m de espesor mediante el método de bastoneo, para la elaboración del SEV paramétrico se utilizó el Equipo Abem Terrameter SAS 1000, procedimiento que se consignó en la Guía metodológica para la adquisición de datos y lectura de respuestas de resistividad, que hace parte de los objetivos de este proyecto de grado en modalidad práctica empresarial.

\*Trabajo de grado

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

**Abstract**

**Title:** Business practice C.D.M.B: preparation of a parametrization of resistivity responses and methodological guidance for the acquisition of geoelectric data, using a vertical parametric electrical sounding on the Formación Girón in the municipality of Lebrija, Santander. \*

**Author:** Jesús Alberto Álvarez Rincón\*\*

**Key words:** Parametric VES, Girón Formation, Aquifers, Aquitard, Resistivity.

In the municipality of Lebrija, the increase in agricultural activity added to the growing demand due to the increase in population has made the demand for water in the Q. Angula Lajas micro-basin be high, with a percentage of 99%. This has generated that the population resorts more to the alternative of the subterranean waters in order to satisfy its needs. The Formación Girón outcropping in the area has lithologies of water interest that have been exploited as the demand grows, it has different bodies of subterranean waters that must be identified and characterized for future protection and exploration. The CDMB is the entity responsible of this task. For this reason, it was thought to parametrize the resistivity responses of the lithological facies with hydrogeological potential using the vertical electric sounding method.

The parametrized resistivity responses correspond to 2 lithofacies: the first, mudstone and siltstone with the presence of interspersed paleosols of fine to fine sandstone and the second, conglomeratic sandstones of coarse to granular size with coarse sand matrix interspersed with layers of grained sandstone medium to coarse, with a resistivity of 32.2 Ohm / m and 195 Ohm / m respectively.

In the study area a stratigraphic column of 214 m thickness was raised by the method of cambering, for the elaboration of the parametric VES, the Abem Terrameter SAS 1000 equipment was used, procedure that was consigned in the Methodological Guide for the acquisition of data and reading resistivity responses, which is part of the objectives of this project of degree in business practice.

\* Bachelor Thesis

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

## Introducción

En las solicitudes de permisos de prospección y exploración del recurso hídrico, específicamente agua subterránea se debe anexar ante la CAR de la zona un informe técnico que posea información geológica del subsuelo, a través del uso de la técnica predilecta tanto en Colombia como en el mundo para la prospección de aguas subterráneas, el método geoelectrico, el cual mide la resistividad de las rocas. Los minerales tienen altas resistividades, por lo que el agua - un material conductor - define la resistividad de la roca dependiendo de su porosidad. Es así como este método se convierte en uno de los más eficientes en detectar y caracterizar rocas húmedas en el subsuelo.

Para dar sentido a los reportes técnicos, el geólogo cumple un papel fundamental, ya que este puede: comprender e interpretar la información geoelectrica adquirida a través de SEVs suministrada en el informe, identificar las características geomorfológicas, estratigráficas y estructurales de los afloramientos de la zona de estudio, además de evaluar de los factores geológicos que pueden llegar a influenciar el acuífero subterráneo con el fin de definir la viabilidad ambiental de la explotación del recurso.

Para que el geólogo pueda cumplir su labor y determinar con un criterio ambiental válido frente al estudio, este debe contar con herramientas que ayuden a comprobar la veracidad e interpretación de los datos en los informes suministrados por los terceros ante la CAR. Con esta premisa, este proyecto de grado tiene como objetivo el mejoramiento de una metodología de estudios geoelectricos, por medio de sondeos eléctricos denominados paramétricos. Los sondeos paramétricos, son sondeos eléctricos verticales realizados sobre unidades aflorantes en la zona,

con el fin de tener una medida de su resistividad, para luego observar, si en otra posición se identifican esas unidades en el subsuelo.

Este proyecto establece un avance en la interpretación y la prospección geofísica con propósito hidrogeológico en el Municipio de Lebrija, Santander. Utilizando el método de los sondeos eléctricos verticales (SEVs), que brindan una información de la resistividad del subsuelo y analizando las unidades aflorantes en la zona para poder realizar una correlación litológica.

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Mejorar el proceso de interpretación y verificación de estudios geoelectricos en las solicitudes de exploración y prospección de agua subterráneas evaluadas por la subdirección de evaluación y control ambiental (SEYCA) de la C.D.M.B.

### 1.2 Objetivos Específicos

- Identificar puntos adecuados para la realización de columnas estratigráficas al mismo tiempo de que sea posible efectuar el SEV paramétrico. (Estructuras sedimentarias, disposición del afloramiento y topografía de la zona)
- Elaborar una parametrización de las respuestas de resistividad obtenidas a través del SEV efectuado sobre facies litológicas pertenecientes a la Formación Girón en el municipio de Lebrija, Santander.
- Desarrollar una guía metodológica para adquisición de datos y lectura de respuestas de resistividad en base a las facies aflorantes pertenecientes a la Formación Girón.
- Asistir a la subdirección de evaluación y control ambiental (SEYCA) de la CDMB en el área de geología, como auxiliar de dicho campo durante 5 meses, en la evaluación de los permisos, licencias y autorizaciones de exploración y prospección de agua subterráneas.

## 2. Generalidades

### 2.1 Localización

La zona de estudio se encuentra ubicada 1 km al sur del Aeropuerto internacional Palonegro, sobre la carretera que conduce a este y a 3 km al este del casco urbano del municipio del municipio de Lebrija, Santander (Figura 1). Entre las coordenadas gauss Krueger y elipsoidales mostradas en la Tabla 1, ubicada en la plancha geológica 120 parte del cuadrángulo H-12, realizada por la entidad INGEOMINAS en el año 1997.

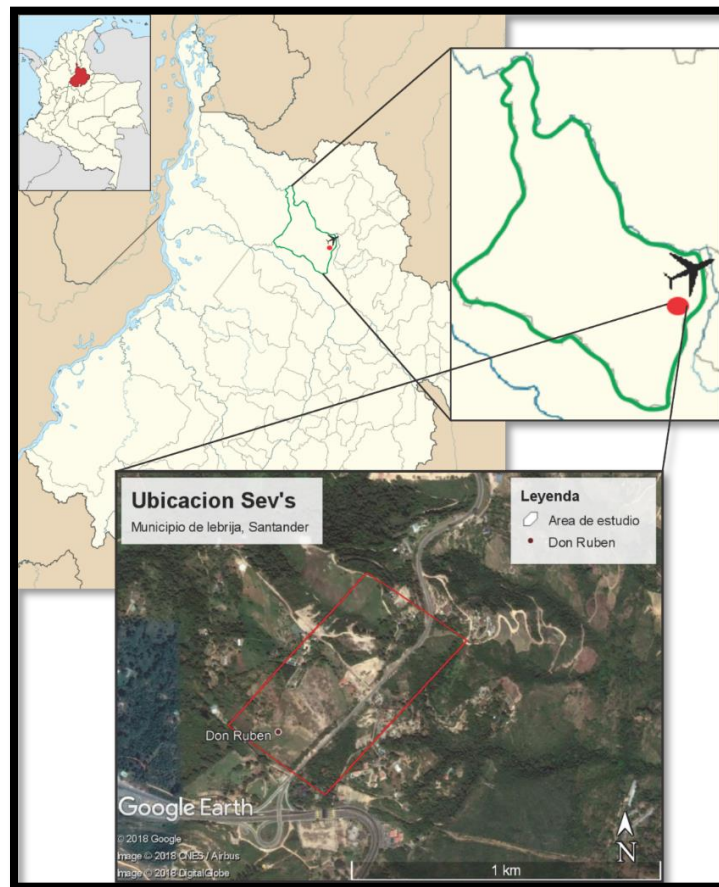


Figura 1. Localización de la zona de estudio. Municipio de Lebrija, Santander. Adaptado de <http://bga.aeroorient.com.co/> y Google Earth Pro

Tabla 1.

*Coordenadas elipsoidales y planas de Gauss Krueger (origen central) de los vértices del área de estudio.*

Vértice	Elipsoidales		Planas Gauss		Altura (msnm)
	Latitud (°)	Longitud (°)	Norte(m)	Este(m)	
<b>I</b>	7°6'12,49''	73°11'6,68''	1277363,7	1098579,0	1081
<b>II</b>	7°6'26,99''	73°10'53,96''	1277809,9	1098968,5	1104
<b>III</b>	7°6'33,94''	73°11'4,10''	1278022,9	1098656,9	1130
<b>IV</b>	7°6'18,66''	73°11'16,86''	1277552,7	1098266,2	1083

Geológicamente el área de estudio se ubica sobre la Formación Girón. Según Royero y Clavijo (2001), se encuentra compuesta por areniscas de grano medio, grueso a ligeramente conglomerático, de color rojo violáceo, rojo grisáceo y gris verdoso, estratificación cruzada, en capas gruesas, con interestratificaciones de limolitas y lodolitas, de color rojo violeta, grisáceo y algunos niveles delgados de conglomerados con guijos de cuarzo hasta de 4 cm.

## 2.2 Clima

El municipio de Lebrija se encuentra ubicado en la zona andina que comprende vertientes y valles de las cordilleras interiores. El tiempo presenta una variación armónica de doble onda, caracterizada por periodos secos y lluviosos más o menos definidos. (Alcaldía de Lebrija, 2016). El periodo seco inicial ocurre durante el tiempo de enero, febrero y parcialmente marzo, los meses lluviosos caracterizados son abril, mayo, junio, y octubre, noviembre y diciembre, con intervalo

de transición entre julio, agosto y septiembre. A su vez las temperaturas oscilan en 18 a 24 °C., para la subcuenca en general (C.D.M.B., 2007)

**2.2.1 Pluviosidad.** Según los datos obtenidos del Plan de Desarrollo del municipio de Lebrija (2016) la estación meteorológica del aeropuerto Palonegro en las coordenadas: 07°08' Norte, 73°11' Oeste, a 1189m.s.n.m, registra las medidas de precipitación utilizando un pluviómetro estándar.

Tabla 2.

*Precipitación mensual en milímetros, estación aeropuerto Palonegro.*

Año	Precipitación Total Anual	Precipitación Mensual Milímetros (Mm)											
		Ene	Fab	Mar	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
2005	1.800,7	41,0	18,1	136,1	180,4	402,3	102,8	156,1	94,8	192,4	244,0	145,3	87,4
2006	2.025,1	86,7	92,4	200	264,2	278,9	172,3	85,3	131,8	146,0	236,7	222,6	108,2
2007	2047,5	26,5	30,8	182,9	213,9	253,5	64,4	219,0	213,0	209,7	344,6	164,1	124,1
2008	2.337,3	88,2	216,9	188,5	120,6	368,2	259,0	220,7	315,3	220,4	188,9	206,2	61,3
2009	1.503,9	99,8	55,2	188,3	168,8	172,4	158,4	97,7	95,8	49,6	160,1	183,9	73,9

Adaptado del Plan de desarrollo del municipio de Lebrija 2016-2019: Ambiente, vida y desarrollo.

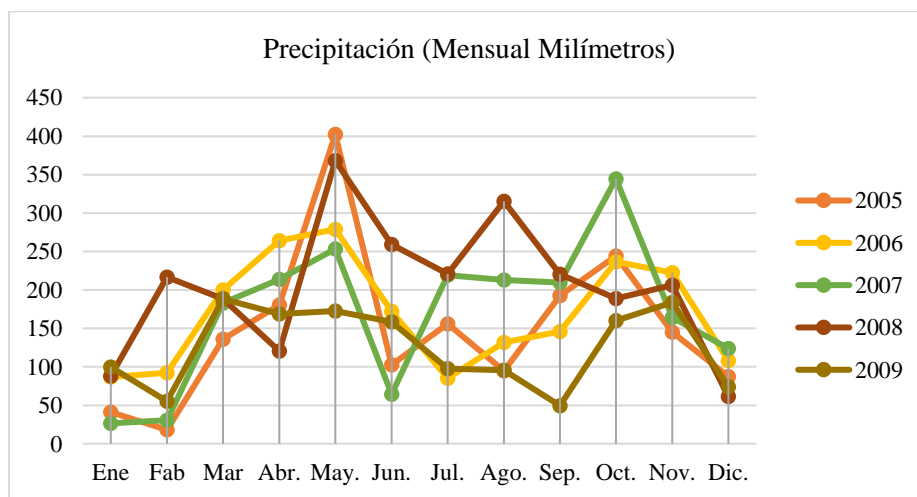


Figura 2. Precipitación en la estación Palonegro en los años 2005-2009. Adaptado del Plan de desarrollo del municipio de Lebrija 2016-2019: Ambiente, vida y desarrollo.

Las precipitaciones en la estación meteorológica no superaron los 188,3 mm mensuales en el año 2009. Las precipitaciones promedio anual desde 1972 hasta 2009 fueron de 1691,72 mm/año (Alcaldía de Lebrija, 2016), sin embargo, en la gráfica anterior se denota una tendencia de precipitaciones a la baja, la cual implica que se deben plantear alternativas en la obtención del recurso hídrico. Según la C.D.M.B (2007), el Municipio de Lebrija tiene una precipitación media anual que varía entre 66 y 2.065 mm, dificultando el acceso al agua superficial en épocas de verano.

### 2.3 Hidrografía

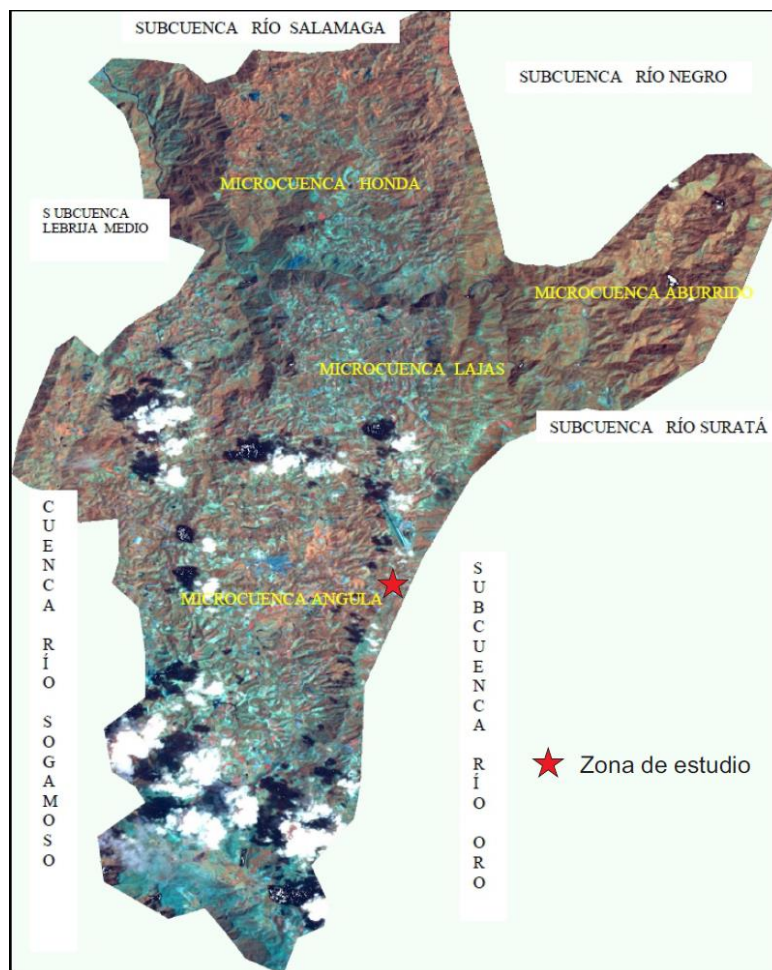


Figura 3. División hidrogeológica de la subcuenca Lebrija Alto. Adaptado del Plan de ordenamiento y manejo ambiental: Subcuenca Lebrija Alto, 2007.

La subcuenca Lebrija Alto está conformada por las microcuencas Angula - Lajas, La Honda y El Aburrido. La microcuenca La Angula – Lajas es el eje central de la subcuenca, y se encuentra dividida en cinco unidades de rendimiento hídrico o áreas de drenaje: Angula Baja, Angula Media, Angula Alta y Puente Nave y Lajas con un total de 21659 hectáreas (C.D.M.B., 2007). La zona donde se realizará el patronaje presentado en el siguiente informe, se encuentra en la microcuenca Angula-Lajas.

El análisis hidrográfico realizado por la C.D.M.B en el plan de ordenamiento y manejo ambiental de la subcuenca de Lebrija alto (2007) divide la quebrada La Angula en cuatro unidades de rendimiento hídrico: Angula Alta, Media, Baja y Puente Nave de forma alargada y Las Lajas de forma irregular, como se muestra a continuación (tabla 3).

Tabla 3.

*Disponibilidad de agua La angula-Lajas*

UNIDAD RENDIMIENTO HÍDRICO	PRECIPITACIÓN M.ANUAL mm-t°C	ALTURA MEDIA MSNM	EVT mm REAL POTENCIAL	ESCORRENT IA MEDIA	AREA HA	CAUDAL UNITARI O Lt/sg/ha	CATEGORIAS		
Puentana	11.30	21.4	1245	782	1281	256	2.280	0.11	Baja
Alta	1197	21.2	1275	824	1249	245	3.681	0.07	Muy baja
Media	1444	22.4	1000	1003	1320	346	5.837	0.06	Muy baja
Baja	1740	23.5	884	1136	1385	618	7.065	0.09	Muy baja
Las Lajas	1483	24.0	806	933	1414	162	2.802	0.06	Muy baja

Adaptado de la monografía UIS-CDMB “Zonificación de unidades ecológicas del paisaje para el manejo sustentable de la subcuenca Quebrada la Angula”

De los estudios realizados para los ordenamientos de las microcuencas Angula – Lajas, La Honda y el Aburrido que se presentan en el Plan de Ordenamiento y Manejo de la Microcuenca Angula – Lajas (2004), se calcularon los valores de caudales y escorrentía a partir de datos climáticos como la precipitación y humedad, obteniendo con ello una aproximación de la disponibilidad del recurso hídrico en estas microcuencas (tabla 4).

Tabla 4.

*Demanda total por Microcuencas*

MICROC UENCA	URH	DUD (M3/año)		DUA (M3/año)		DUP(M3/año)			TOTAL (M3/año)
		Urbano	Rural	Permanentes	Transitorios	Avícola	Bovinos	Porcinos	
	Puente Nave	-	63.072	7.121.9	348.252.4	277.712	3.358	-	699.516.3
	Angula Alta	-	58.604	20.047.5	1.422.393.1	167.381	10.074	970	1.659.422.6
<b>Angula- Lajas</b>	Angula Media	676.666	244.338	1.663.232	4.419.772	2.123.811	30.022	4.375	9.162.416.6
	Angula Baja	-	236.191	1.750.938	9.010.190	1.170.984	33.580	-	12.210.883
	Las Lajas	-	109.324	18.094.4	2.704.463	19.029	11.753	1.212	2.863.874.4
	Subtotal	676.666	711.529	3.459.433.8	17.905.070.5	3.767.917	88.987	6.557	26.616.162.1
	La Honda	-	164.250	-	-	61.641	30.090	-	255.981
	El Aburrido	-	145.781	-	-	105.120	22.009	1.173.3	274.083
	<b>TOTAL</b>	<b>676.666</b>	<b>1.021.560</b>	<b>3.459.433.8</b>	<b>17.905.070.5</b>	<b>3.934.678</b>	<b>141.086</b>	<b>7.730</b>	<b>27.146.226.1</b>

Adaptado del Plan de ordenamiento y manejo ambiental: Subcuenca Lebrija alto C.D.M.B.

La categorización de disponibilidad de agua muestra valores de condición muy baja para la microcuenca Angula, Lajas y La Honda solo garantiza niveles de subsistencia, la microcuenca el Aburrido presenta una condición de Aceptable - Medio (C.D.M.B., 2004).

El índice de escasez para las microcuencas La Honda y El Aburrido, se presenta como una demanda muy baja con porcentajes menores al 2 %. Para la microcuenca Angula Lajas se presenta una demanda alta con porcentaje del 99% para toda la subcuenca, teniendo las URH de Angula Media, Angula Baja y Lajas un índice mayor al 100%, que señala fuerte presión que hay sobre el recurso hídrico por las actividades y usos (C.D.M.B., 2007). A continuación, se presenta de forma detallada el índice de escasez para la Subcuenca Lebrija alto (tabla 5).

Tabla 5.

*Índice de escasez para la subcuenca Lebrija Alto*

MICROC UENCA	URH	Oferta total (m <sup>3</sup> /año)	Oferta Neta (m <sup>3</sup> /año)	Demanda Total (m <sup>3</sup> /año)	Índice de Escasez	Categoría
	Puente Nave	7.874.000	3.942.000	699.516.3	19%	Demanda Baja
	Angula Alta	9.041.802	4.521.401	1.679.469.9	37%	Demanda apreciable
Angula- Lajas	Angula Media	11.037.600	5.518.800	9.162.416.6	166%	Demanda alta
	Angula Baja	20.025.360	10.012.680	12.210.883	121%	Demanda alta
	Las Lajas	5.298.048	2.649.024	286.387.3	108%	Demanda alta
	<b>Subtotal</b>	53.277.810	26.643.905	26.616.162.1	99%	Demanda alta
	La Honda	28.551.180	14.275.590	255.981	1.7%	Demanda muy baja
	El Aburrido	44.150.400	22.075.200	274.083	1.24%	Demanda muy baja
	<b>TOTAL</b>	<b>125.989.390</b>	<b>62.994.695</b>	<b>27.146.226</b>	<b>43%</b>	<b>Demanda apreciable</b>

Adaptado del Plan de ordenamiento y manejo ambiental: Subcuenca Lebrija alto C.D.M.B.

## 2.4 Geomorfología

El relieve en la microcuenca Angula Lajas es representado por lomas y crestones ondulados a fuertemente quebrados, que cambia a escarpado y accidentado hacia la desembocadura de la quebrada Angula, conlleva a procesos erosivos significativos, acelerados por el mal uso de la mayoría de estos suelos. En las microcuencas La Honda y El Aburrido se presenta un relieve con accidentes naturales en paisaje de montaña y lomerío, con cimas, laderas, escarpes, lomas y faldas. (EOT, 2003).

La zona del área de estudio se encuentra en el punto de inflexión entre la escarpa que se observa vía al aeropuerto consecuencia del levantamiento generado por la Falla Suarez y la posterior erosión, lo que se conoce como mesa de Lebrija, como se observa en la Figura 4.

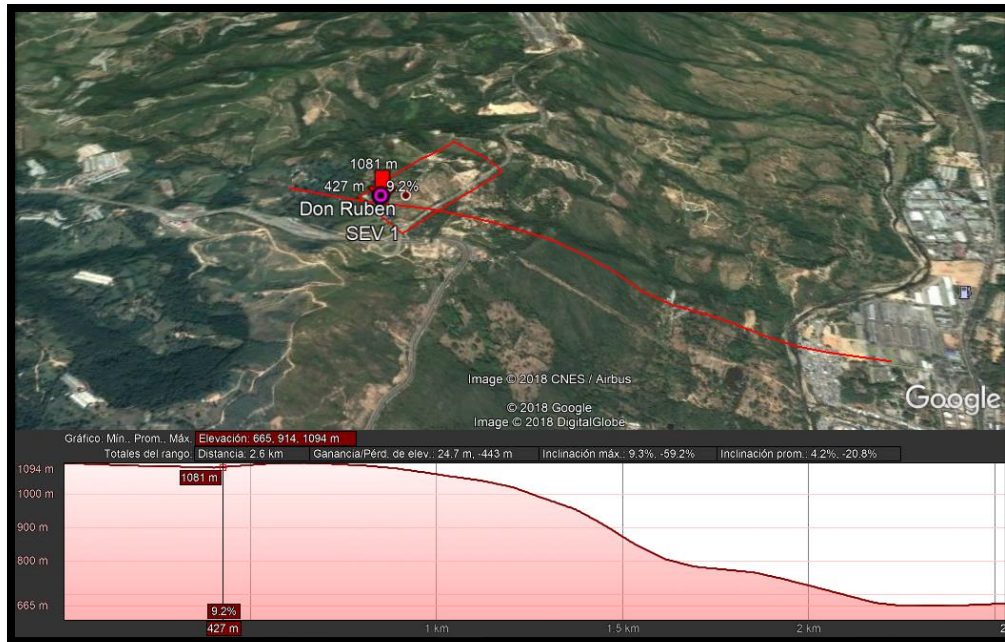


Figura 4. Relieve del área de estudio. Adaptado de Google Earth Pro.

El material geológico de la microcuenca Angula Lajas es conocido como Formación Girón, de edad Jurásico superior- Cretácico inferior (Pons, 1982), por sus propiedades físicas y erosión diferencial han generado paisajes de montaña y lomerío con procesos morfodinámicos de remoción en masa de variada intensidad. (EOT, 2003)

### 3. Antecedentes

Lebrija es un municipio del departamento de Santander que se ubica a 15 Kilómetros de Bucaramanga, y es considerada la ciudad piñera de Colombia, por ser este producto agrícola el más importante renglón en su economía, incluyendo también su producción avícola (pollo, huevo), el cual tuvo un reciente incremento, gracias a la cantidad de galpones que hay en la zona rural dedicada a la crianza de esta ave.

En las últimas décadas, las fuentes de agua superficial como los ríos y lagos han sido sometidas a un mayor estrés hídrico debido al aumento de la actividad agropecuaria intensiva en la región, razón por la cual la demanda de fuentes hídricas subterráneas ha incrementado, tanto así que durante la duración de esta práctica empresarial la mayoría de los permisos de prospección y exploración de los cuales se han elaborados conceptos técnicos preliminares han sido solicitudes en este municipio.

Para la gobernanza del recurso hídrico en el país, el gobierno desarrolló los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCAS), con los cuales se estableció a partir del decreto 1729 de (2002), que la ordenación de una cuenca tiene por objeto principal la caracterización de sus recursos ambientales representada en el diagnóstico el cual refleja su estado actual, el planeamiento del uso y manejo sostenible de sus recursos naturales renovables, de manera que se consiga mantener o restablecer un adecuado equilibrio entre el aprovechamiento económico de tales recursos y la conservación de la estructura físico biótica de la cuenca y particularmente de sus recursos hídricos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2002).

El POMCA de la cuenca de Lebrija alto está conformado por las microcuencas Angula, Lajas, La Honda y El Aburrado, las cuales han sido objeto de estudio desde el año 1997, momento en el que se empezó a llevar a cabo la planificación ambiental de cuencas hidrográficas gracias a la contribución realizada por los siguientes estudios, para el caso de las microcuencas Angula – Lajas se han elaborado monografías sobre la zonificación de unidades ecológicas del paisaje para el manejo sustentable de la microcuenca Q. La Angula, geología aplicada a la zonificación de unidades ecológicas del paisaje para el manejo sustentable de la microcuenca Q. La Angula, caracterización climática aplicada a la zonificación de unidades ecológicas del paisaje para el manejo sustentable de la microcuenca Q. La Angula, cuantificación del recurso hídrico superficial

aplicado a la zonificación de unidades ecológicas del paisaje para el manejo sustentable de la microcuenca Q. La Angula. CORPOICA elaboró el estudio semidetallado de suelos y la CDMB contrató las consultorías para realizar el estudio de la caracterización biótica y zonificación ecológica, estudios de caracterización socioeconómica y estudios de análisis de conflictos de uso y prospectivos respecto a escenarios que permitan establecer zonificación ambiental y reglamentación de uso para el ordenamiento ambiental (C.D.M.B., 2007).

Durante los años 2003 y 2004 la CDMB en convenio con la UIS realizó la investigación para el desarrollo de una aplicación SIG para la cuantificación del recurso hídrico de las microcuencas Angula – Lajas. Para el caso de las microcuencas la Honda y El Aburrado la CDMB elaboró los estudios de diagnóstico, prospectiva y formulación durante el año 2003 insumos que fueron tomados para la formulación de la fase de ejecución y seguimiento y evaluación de la que trata el decreto 1729 de 2002 (C.D.M.B., 2007).

La C.D.M.B. debe evaluar permisos y concesiones para el uso de aguas superficiales y subterráneas de acuerdo con las especificaciones dadas en el decreto único reglamentario 1076 de 2015 en los cuales se exige un sondeo eléctrico vertical, para tener en cuenta la litología y el cuerpo de acuífero subterráneo del cual se pretende obtener el recurso hídrico.

#### **4. Marco teórico.**

##### **4.1 Método eléctrico**

El método eléctrico de prospección se basa en el estudio de campo de potencial eléctrico, tanto en lo referente a los naturalmente existentes en la corteza terrestre, como a los artificialmente

provocados en la misma. Mediante estas mediciones se puede determinar la situación en el subsuelo de menas, así como también es posible reconocer estructuras o accidentes geológicos. La modalidad más empleada y de más amplia aplicación es la segunda, o sea, la de campos artificiales provocados (Cantos, 1973).

Para este método, se utiliza no solamente corriente continua, si no también corriente alterna, ya que esta última es más cómoda de emplear. Sin embargo, muchos prospectores prefieren no emplear la alterna, debido a que su interpretación es considerada como complicada cuando hay que atender posibles fenómenos de inducción, capacidad, etc. (Cantos, 1973)

Así mismo, se obtiene como ventaja de dichos métodos eléctricos, el tener la posibilidad de control de la profundidad de penetración, algo que ocurre similarmente en el método de resistividades, gracias al cual se ha conseguido obtener la técnica de los sondeos eléctricos verticales (SEV), llamados así porque de ellos se pueden deducirse resultados comparables a los sondeos mecánicos (Cantos, 1973).

Según Iakubovskii y Liajov (1980) desde el punto de vista económico, la principal ventaja de los métodos eléctricos es el reducido coste, tanto en equipo como en trabajo de campo, ya que se pueden cubrir grandes extensiones de terreno en un tiempo relativamente corto y por un costo muy bajo, aproximadamente 3 o 4 personas en un SEV. Por otro lado, ya se va generalizando por el mundo el no realizar perforaciones sin una etapa previa de prospección geofísica y especialmente en aguas subterráneas, el método eléctrico es el más usado (Custodio & Llamas, 2001).

En Santander la autoridad ambiental C.D.M.B no recibe ninguna solicitud de prospección y exploración sin la aplicación de SEV en el terreno y su debida interpretación antes de realizar la perforación.

En lo que se refiere al método eléctrico de resistividades su aplicación más útil es en la investigación de aguas subterráneas. Es en realidad el método más adecuado para este tipo de investigación, ya que el único parámetro físico que permite a priori diferenciar netamente una roca seca de una roca impregnada de agua es su conductividad eléctrica (Cantos, 1973).

**4.1.1 Carga eléctrica y campo eléctrico.** Una carga eléctrica (positiva o negativa) genera a su alrededor un campo eléctrico que atrae a otras cargas de signo contrario y repele a las cargas de su mismo signo. La fuerza con que el campo repele o atrae una carga unitaria se denomina intensidad de campo. Si existen varias cargas eléctricas, la fuerza con que una carga ( $q$ ) es atraída o repelida se obtendrá sumando los vectores debidos a cada uno de los campos existentes (Sánchez, 2011).

La unidad de carga eléctrica es el culombio (C) nombrada en honor al físico francés Charles Augustin de Coulomb (NIST, 2006)

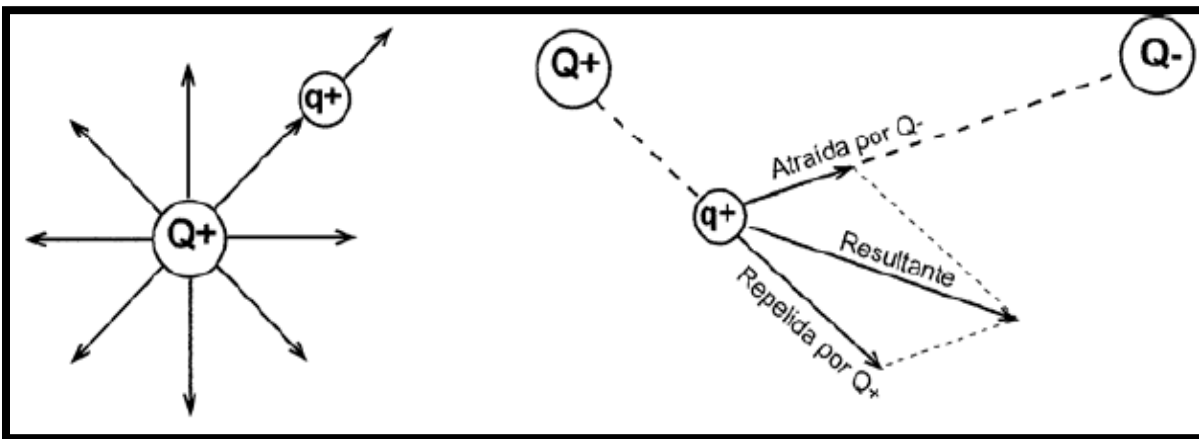


Figura 5. Esquema ilustrativo de carga eléctrica y campo eléctrico. Adaptado de (Milson & Eriksen, 2011)

#### 4.1.2 Potencial eléctrico y diferencia de potencial.

**4.1.2.1 Potencial de un campo eléctrico en un punto.** es el trabajo que realiza el campo para repeler una carga de 1 culombio hasta el infinito (o el que tendríamos que realizar para llevarla desde el infinito hasta ese punto contra las fuerzas del campo) (Sánchez, 2011).

**4.1.2.2 Diferencia de potencial entre dos puntos de un campo eléctrico.** es el trabajo que hay que realizar para mover una carga de 1 culombio de un punto a otro contra las fuerzas del campo (o el trabajo que hace el campo para mover una carga de un punto a otro) (Sánchez, 2011).

**4.1.3 Superficies equipotenciales.** Son el lugar geométrico de los puntos que tienen el mismo potencial. Aunque se trata de superficies tridimensionales, cuando hacemos una representación en un papel (simplificamos la realidad tridimensional a las dos dimensiones del dibujo), la traza de la superficie equipotencial sobre el papel es lo que llamamos línea equipotencial. En la figura 6 se aprecia un campo similar al campo generado al realizar un SEV (Sánchez, 2011).

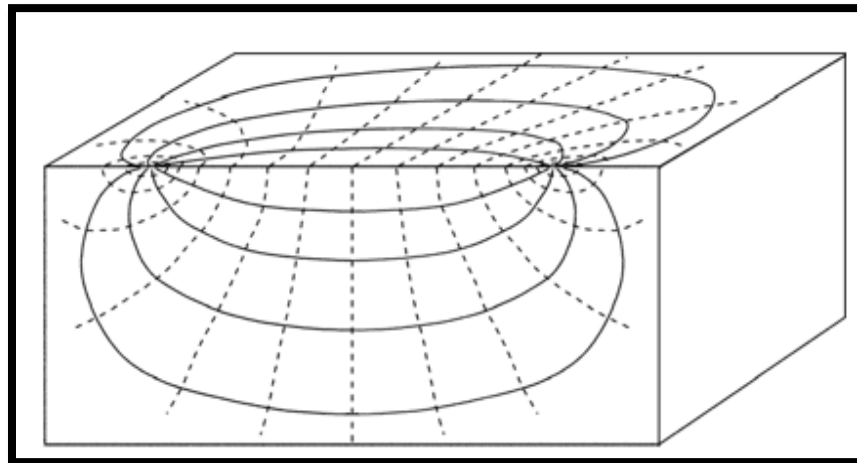


Figura 6. Campo eléctrico tridimensional creado por dos cargas iguales y de signo contrario. Adaptado de (Milson & Eriksen, 2011)

**4.1.4 Flujo eléctrico.** Si existen cargas eléctricas libres en un campo eléctrico, se moverán empujadas por las fuerzas del campo. La medida de este flujo de cargas eléctricas es la intensidad (Sánchez, 2011).

**4.1.5 Amperio.** Se dice que por una sección está circulando una intensidad de un amperio cuando está pasando un culombio por segundo (NIST, 2006).

**4.1.6 Resistencia eléctrica, Ley de Ohm.** Es una ley básica de los circuitos eléctricos. Establece que la diferencia de potencial (V) que aplicamos entre los extremos de un conductor determinado es proporcional a la intensidad de la corriente (I) que circula por el citado conductor. Ohm completó la ley introduciendo la noción de resistencia eléctrica (R); que es el factor de proporcionalidad que aparece en la relación.

$$V = R * I$$

Los parámetros que se suelen medir en prospección geoelectrica son: la diferencia de potencial y la intensidad de corriente, pero el parámetro físico básico que se obtiene es la resistividad del subsuelo, es decir, la resistencia específica de los diferentes terrenos.

Los métodos eléctricos se basan en la Ley de Ohm ( $R=V/I$ ), a grandes rasgos consisten en calcular la resistividad del terreno inyectando una corriente eléctrica conocida (I) mediante electrodos clavados al suelo (Figura 7) y medir la diferencia de potencial en dos electrodos ( $\Delta V$ ) intermedios (Estrada, 2015)

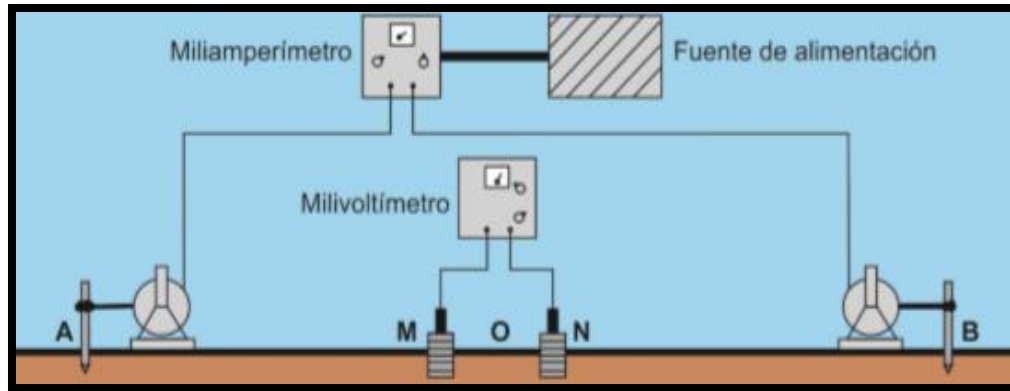


Figura 7. Esquema ilustrativo de la inyección de corriente en el terreno. Adaptado de “Apuntes de prospección geoelectrica”. Ing. Luis A. Estrada, 2015.

Si se aplica la Ley de Ohm directamente, el parámetro que se obtiene es la resistencia total del circuito ( $R$ ), lo cual no es un buen indicador del tipo de material, ya que depende del área y de su longitud. Se necesita, por tanto, un parámetro específico de cada material e independiente de sus dimensiones. Surge así el concepto de resistividad de un material ( $\rho$ ). En prospección geoelectrica las resistividades se calculan porque se conoce  $I$ ,  $V$  y  $L$  (distancia entre electrodos). – El área  $S$  se estima unitaria-. Al cociente  $A/L$  se le suele llamar “constante geométrica” y depende, en cada caso, de la posición donde se clavan los electrodos (Teixidó, 2008).

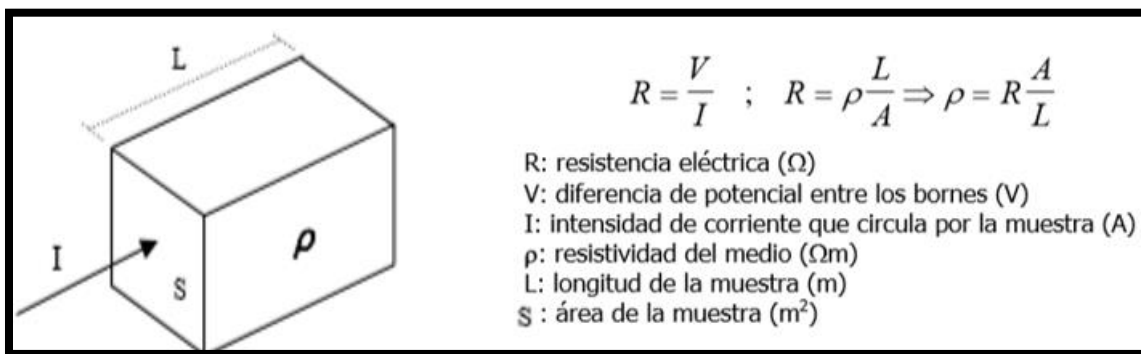


Figura 8. Concepto de medida y definición de la resistividad de un material. Adaptado de “Prospección geofísica de superficie aplicada a la hidrogeología”, Teixidó, 2008.

## 4.2 Propiedades eléctricas de las rocas

Debido a que este método eléctrico está basado principalmente en las diferentes propiedades eléctricas de las rocas es conveniente hacer un repaso de estas:

**4.2.1 Resistividad.** La resistividad es la propiedad más importante y se define como la resistencia en Ohmios medida entre dos caras opuestas de un cubo de materia con dimensiones unitarias, como se visualiza en la Figura 8. Los valores de resistividad que se suelen encontrar en las prospecciones eléctricas para los diferentes tipos de materiales geológicos han sido caracterizados por distintos autores un ejemplo de ello es la tabla recopilada por Falgas (2007) (Figura 9).

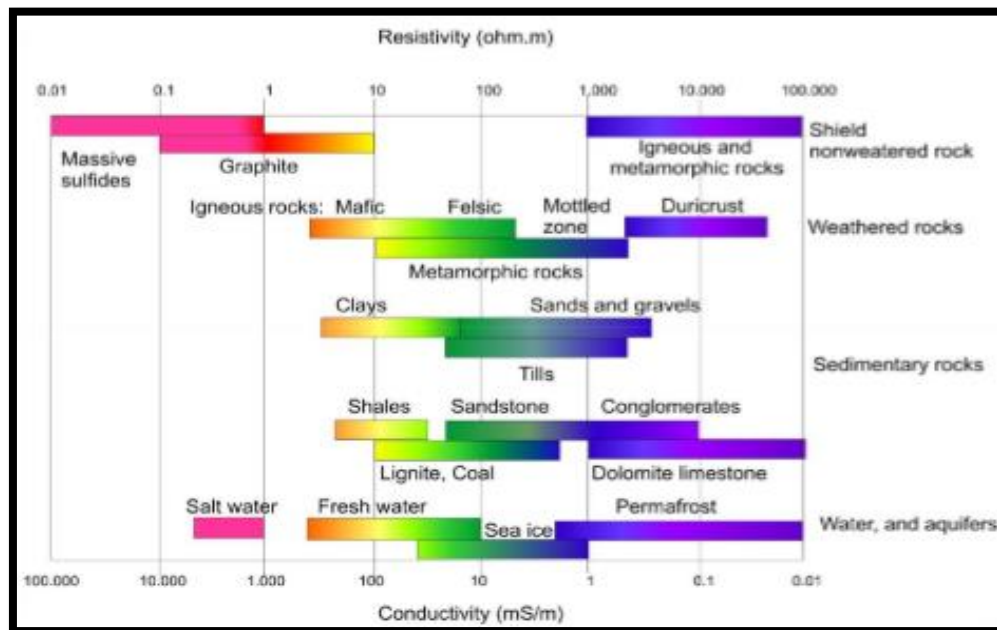


Figura 9. Resistividad eléctrica y conductividad de los materiales geológicos. Adaptado de “Hydrogeophysics as a Multidisciplinary Tool on Aquifer Appraisal”. Falgas. E. 2007, Universidad de Barcelona.

Los valores de resistividad en una roca están determinados más que por su composición mineralógica, por el agua que contienen, fundamentalmente por la porosidad y por la salinidad del agua (Sánchez, 2011).

La resistividad de las arenas puede variar mucho, según la cantidad de agua que contienen y la calidad de esta, por lo que no se suele dar cifras concretas. Pero es de interés saber que estando seca puede ser del orden de  $10^7$  Ohm/Cm, y de 1 Ohm/cm si el agua es salada. De cualquier forma, las diferencias considerables de resistividad que se manifiestan entre una arcilla y una arena con agua dan lugar a que se detecte con cierta claridad un manto acuífero arenosos situado entre capas de arcilla (Cantos, 1973).

**4.2.2 Conductividad.** Se llama así al valor inverso de la resistividad. Se distinguen en los minerales y rocas dos clases de conductividad: una llamada metálica o electrónica, que es la que tienen todos los materiales metálicos que pueden transportar electrones, como la Pirita, la Galena, el Sulfuro de Cobre, la Magnetita, entre otros. Esta conductividad puede desaparecer en estos minerales por la interposición de un mineral aislante como el cuarzo, pues impide la comunicación directa entre los cristales del mineral (Cantos, 1973).

La otra conductividad se llama electrolítica y se refiere a minerales y rocas aislantes en estado de sequedad como las arenas cuarzosas o las areniscas, pero que conducen la corriente gracias al agua que contienen; en este caso existe transporte de iones al paso de la corriente y la conductividad es la función de la cantidad de agua que contienen y la cantidad de sales ionizadas disueltas en ella (Cantos, 1973).

Concretamente, dependerá de los siguientes factores:

- De la proporción en volumen de huecos o Factor de Porosidad. ( $v$ )

- De la disposición geométrica de los poros o Factor de Formación. ( $F$ )
- De la proporción en que los poros están llenos de agua o Factor de Saturación. ( $F_S$ .)
- De la resistividad del agua que contiene, dependiente a su vez de las sales disueltas. ( $\rho_w$ )

Segunda ley de Archie: Heiland establece la relación de los diferentes factores en una roca impregnada de agua (Solana, 2014):

$$\rho = \frac{F}{v} * \rho_w \quad (1)$$

En la zona de saturación, el factor de saturación es igual a la unidad y entonces la formula se convierte en la indicada. Pero en la zona de aireación por encima del nivel hidrostático, ese factor ( $F_S$ ) varía mucho para una roca húmeda: para gravas y arenas gruesas desde el 0,01 hasta 0,40 y para rocas capaces de almacenar agua por acción capilar como las arcillas hasta 0,60 (Cantos, 1973).

$$\rho = \frac{F}{v} * \rho_w * \frac{1}{F_S} \quad (2)$$

En la época calurosa, en el desierto ( $F_S$ ) puede ser prácticamente 0 cerca de la superficie; es decir, que, para una medición eléctrica del suelo, es necesario clavar los electrodos de corriente a bastante profundidad para llegar a zonas algo húmedas y obtener un paso de corriente que registre lecturas apreciables (Solana, 2014).

Las formaciones que más quedan afectadas por su contenido de agua son las arcillas, las formaciones arcillosas, las arenas y las areniscas. Pero las que más quedan afectadas por su factor de formación ( $F$ ) son las areniscas, las cuarcitas, las calizas y las pizarras. En resumen, aquellas que por su formación puedan tener, con un mismo volumen de poros, pero con formas y posiciones geométricas distintas, resistividades de la roca impregnada muy diferentes (Cantos, 1973).

El factor ( $F$ ) está afectado por la forma, posición, orientación y contacto o aislamiento de los poros. Archie estudio la variación de  $F$  para un determinado volumen de arenas y areniscas de la costa del golfo de México cuya porosidad oscilaba entre el 10 y el 40 % dibujando en papel logarítmico los valores de  $F$  en función de la porosidad, lo que le permitió llegar a una relación simple para el factor de formación (Cantos, 1973).

Archie en 1942 formuló la relación entre resistividades de la roca y del fluido y su relación con la porosidad fue enunciada por Winsauer en 1952 (Solana, 2014).

$$F = \frac{\rho}{\rho_w} \quad (3)$$

De dónde sale la primera ley de Archie:

$$F = a * v^{-m} \quad (4)$$

Donde:

a: Factor de ajuste. Rango para rocas sedimentarias no cementadas (0,6-1).

m: Factor de cementación. Rango para rocas sedimentarias no cementadas (1,3-2,15).

**4.2.3 Constante Dieléctrica.** Se llama constante dieléctrica a un valor que expresa la manera de polarizarse un material, cuando se somete a un campo eléctrico.

**4.2.4 Isotropía y Anisotropía.** Se define como isotropía la propiedad que presentan algunos cuerpos, de que una magnitud física (conductividad), sea la misma en cualquier dirección.

En geofísica nos encontramos con lo que se podría llamar anisotropía macroscópica, ya que terrenos formados por cuerpos isótropos, presentan en su conjunto anisotropía, por encontrarse dispuestos en capas o en otro tipo de estructuras, como consecuencia de su formación geológica.

Esto en realidad es un tipo de heterogeneidad, ya que se trata de un sistema eléctrico formado por distintos cuerpos. Que pueden ser homogéneos e isótropos (Cantos, 1973).

#### **4.3 Factores influyentes en la resistividad de las rocas**

Como es bien conocido, una roca sedimentaria se encuentra constituida por armazón, matriz y cemento, y posee además espacios vacíos en su estructura llamados poros, los cuales permiten el paso de los fluidos anteriormente mencionados, que afectan la conductividad de la roca. Según Iakubovskii y Liajov (1980) la resistividad de la roca depende de:

- La resistividad de los minerales que forman la parte sólida de la roca.
- La resistividad de los líquidos y gases que rellenan los poros de la roca.
- Factor de salinidad del líquido que rellena los poros de la roca.
- La humedad de la roca o factor de saturación.
- La porosidad de la roca o volumen de huecos.
- La distribución de sus poros, la textura y forma de la roca.
- Los procesos que ocurren en el contacto de los líquidos de los poros y el esqueleto del mineral.
- La temperatura de la roca.

#### **4.4 Medición de la resistividad en campo**

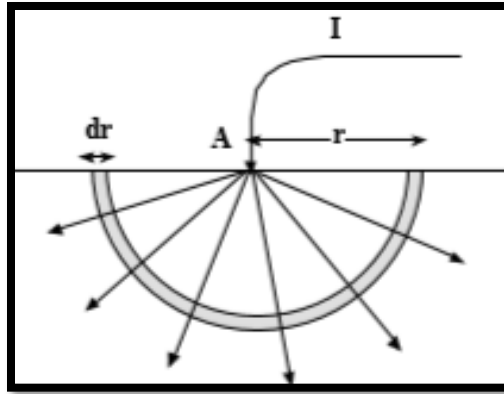


Figura 10. Inducción de corriente en el terreno. Adaptado de (Milson & Eriksen, 2011)

**4.4.1 Medida de la resistividad en un punto.** Supongamos que introducimos una corriente de intensidad ( $I$ ) en el suelo en un punto  $A$ , y mediante la Ley de Ohm calculamos la resistencia, ( $R$ ), que opone al paso de esa corriente un casquete (semiesférico) de radio ( $r$ ) y espesor ( $dr$ ) (figura 10). Aplicando la ley de Ohm (Sánchez, 2011):

$$R = \rho \frac{\text{longitud}}{\text{sección}} = \rho \frac{dr}{2\pi r^2} \quad (1)$$

Pero por ley de Ohm también tenemos que:

$$\text{Intensidad} = \frac{\nabla V}{R} \quad (2)$$

Aplicando la expresión (2):

$$-dV = R * I \quad (3)$$

Y sustituyendo en (3) el valor de ( $R$ ) por el obtenido en (1):

$$-dV = \rho \frac{dr}{2\pi r^2} \quad (4)$$

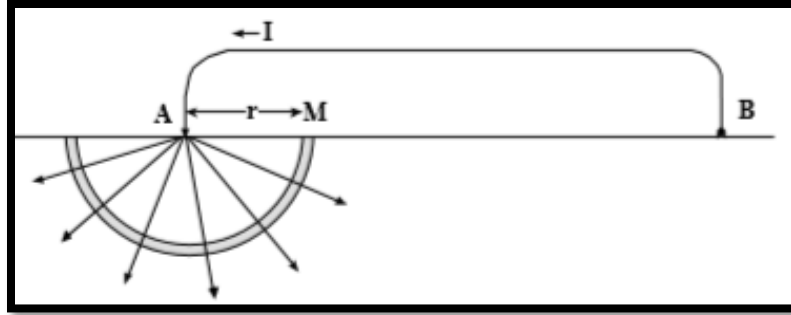


Figura 11. Esquema ilustrativo de inyección de corriente en 1 punto por 2 electrodos. Adaptado de “Prospección geofísica: Sondeos Eléctricos Verticales”. Javier Sánchez, 2011.

Para introducir esa corriente, debe existir otro electrodo B, por lo cual el potencial generado en el punto M será igual al producido por A menos el producido por B. Aplicando dos veces la expresión (4) y restando, obtenemos el potencial en el punto M (Sánchez, 2011)

$$V_M = \frac{\rho I}{2\pi AM} - \frac{\rho I}{2\pi BM} \quad (5)$$

Pero en la práctica no medimos el potencial en un punto (para eso habría que situar uno de los polos del voltímetro en el infinito) sino que medimos la diferencia de potencial entre dos puntos M y N (Sánchez, 2011), aplicando la expresión (5) al punto N resulta:

$$V_N = \frac{\rho I}{2\pi AN} - \frac{\rho I}{2\pi BN} \quad (6)$$

Por tanto, la diferencia de potencial entre los puntos M y N será:

$$V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad (7)$$

Despejando la resistividad ( $\rho$ ):

$$\rho = \frac{V_M - V_N}{I} * \frac{2\pi}{\left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)} \quad (8)$$

Simplificando y llamando K a la segunda fracción, resulta la fórmula que se utilizara en el campo en cada medida:

$$\rho = \frac{V}{I} * K \quad (9)$$

#### 4.5 Resistividad aparente

Es un concepto de importancia fundamental en prospección y surge cuando se realizan mediciones sobre un subsuelo heterogéneo (Figura 12) donde la resistividad medida llamada resistividad aparente ( $\rho_a$ ) es ficticia ya que es un “promedio” de las resistividades bajo cada uno de los electrodos; ni tan sólo puede considerarse media ponderada. Esta resistividad aparente ( $\rho_a$ ) es la variable experimental con la que expresan los datos de campo de la mayoría de los métodos geoelectricos y se toma como base de su interpretación, su unidad también es el  $\Omega.m$  (Teixidó, 2008).

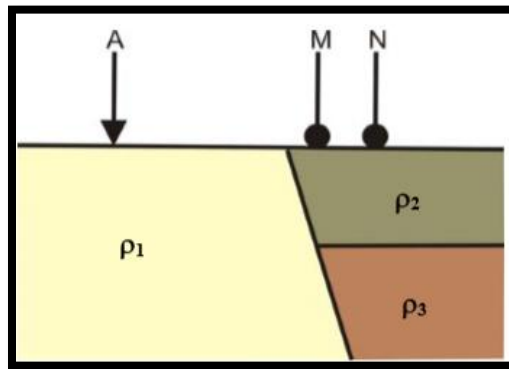


Figura 12. Ejemplo de electrodos en medio heterogéneo. Adaptado de Teixidó, 2008

La resistividad aparente es la resistividad que tendría un medio heterogéneo si al introducir una determinada intensidad ( $I$ ) midiésemos un voltaje ( $V$ ) (Teixidó, 2008).

#### 4.6 Principio de equivalencia

Según Teixido (2008), el principio de equivalencia se presenta en dos casos y es la equivalencia de 2 cortes geoelectricos, aunque sus columnas litológicas no sean semejantes:

- **Equivalencia en T:** Cuando una capa es mucho más resistiva que las suprayacentes y su espesor no es muy grande (menor conductancia  $S$ ). Entonces, puede dividirse su espesor y multiplicarse su resistividad por un mismo número ( $>1$ ) sin que el corte se modifique apreciablemente. (Figura 9.a)
- **Equivalencia en S:** Cuando una capa es mucho menos resistiva que la de las capas suprayacentes, pueden multiplicarse su espesor y su resistividad por un mismo número ( $>1$ ) sin que el corte se modifique apreciablemente (equivalencia en  $S$ ) (Figura 9.b)

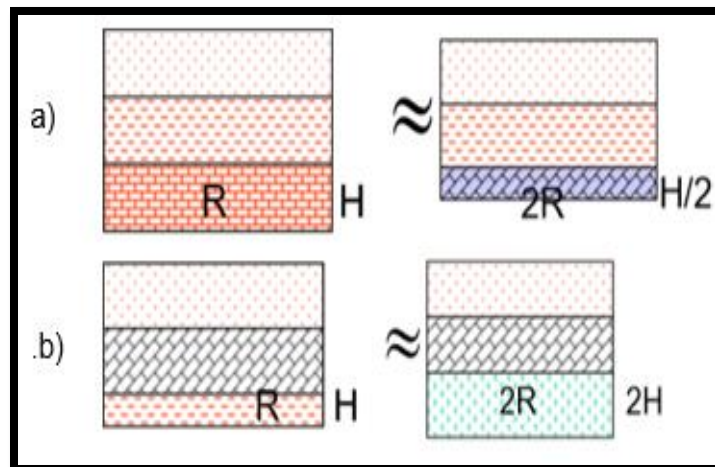


Figura 13. a) Equivalencia en T, b) Equivalencia en S, esquema representativo. Adaptado de Teixidó, 2008

#### 4.7 Dispositivos o arreglos electródicos.

Los arreglos electródicos son una configuración geométrica de transductores (fuentes o receptores) utilizados para generar o registrar un campo eléctrico. (Schlumberger Limited, 2018)

En 1829, el inglés Robert Were Fox descubrió que ciertos minerales producen débiles corrientes eléctricas apreciables desde la superficie (polarización espontánea) y sugirió su uso para la prospección de yacimientos. A partir de esa fecha los métodos prospectivos fueron evolucionando hasta que en 1913 Conrad Schlumberger introduce una fuente artificial (inyección del corriente al suelo) para estudiar la cuenca silúrica de Calvados (Francia) y, alrededor de 1925, él y Frank Wenner idean el dispositivo tetraelectródico base de la prospección actual (Auge, 2008).

**4.7.1 Configuración Wenner.** En la configuración Wenner (Figura 14) los pares de electrodos de corriente (A y B) y de potencial (M y N) están dispuestos a una misma distancia (a), de modo que, si se mueven A y B, también hay que mover M y N. Esta configuración es más usada en países anglosajones y cuando se quiere mantener la profundidad de estudio constante (Sánchez, 2011)

Según Lowrie (2007), la resistividad aparente queda definida por la ecuación:

$$\rho = 2\pi a \frac{V}{I} \quad (10)$$

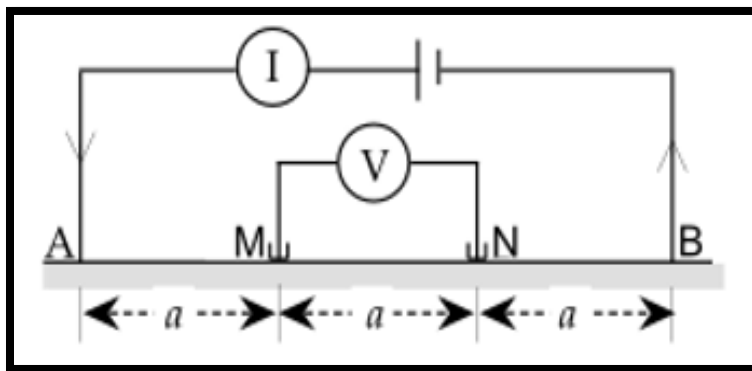


Figura 14. Configuración Wenner. Adaptado de (Lowrie, 2007).

**4.7.2 Configuración Dipolo-Dipolo.** En la configuración Dipolo-Dipolo (Figura 15) el espaciamiento tanto de los electrodos de corriente como en los de potencial es (a), y la distancia entre los puntos medios de cada par es (L). por tanto, (L) Mucho mayor que (a). (**Lowrie, 2007**)

Según Lowrie (2007) la resistividad aparente queda definida por la ecuación:

$$\rho = \frac{\pi V}{I} * \left( \frac{L(L^2 - a^2)}{a^2} \right) \quad (11)$$

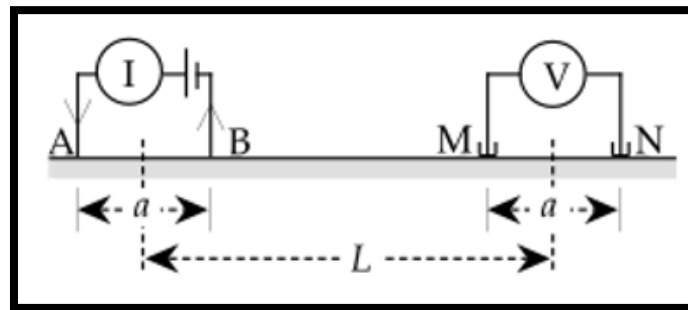


Figura 15. Configuración Dipolo-Dipolo. Adaptado de Lowrie, 2007

**4.7.3 Configuración Schulemberg.** Como se mencionó anteriormente, la distribución de electrodos Schulemberg es la más usada para estudios de resistividad, ya que este presenta diversas ventajas tanto en la posición electródica (los electrodos M y N se desplazan muy poco en campo (Figura 12a)), como en la manera en la que inyecta y distribuye la corriente a lo largo del subsuelo (Figura 12b) lo que permite controlar con mayor facilidad la profundidad de la exploración.

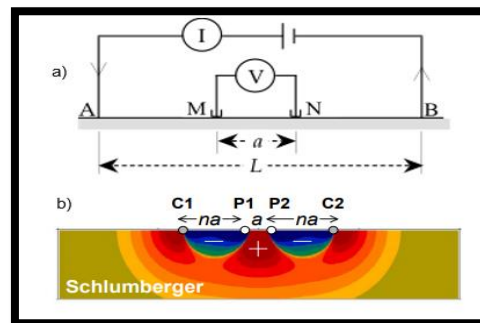


Figura 16. a) Configuración Schulemberg. (Lowrie, 2007) b) Representación esquemática, el fondo muestra el patrón de sensibilidad de la configuración Schulemberg. Adaptado de (ABEM Instrument AB, 2009)

En el dispositivo Schlumberger la distancia MN es pequeña en relación con AB, generalmente  $AB/5 > MN > AB/20$ . En la práctica MN se mantiene tan pequeño como sea posible siempre que se puedan conseguir lecturas correctas del voltímetro (Sánchez, 2011).

Según Lowrie (2007), la resistividad aparente queda definida por la ecuación:

$$\rho = \frac{\pi V}{4I} * \left( \frac{L^2 - a^2}{a} \right) \quad (12)$$

Pero como  $L \gg a$  entonces la ecuación (12) queda simplificada a:

$$\rho = \frac{\pi V}{4I} * \left( \frac{L^2}{a} \right) \quad (13)$$

#### **4.8 Sondeos electricos verticales / vertical electrical sounding. (SEV / VES)**

Anteriormente se indico que si el subsuelo se compone de formaciones de diferentes resistividades, la medida que realizamos de resistividad no corresponde a ninguna de ellas, si no que tendra un valor intermedio conocido como resistividad aparente.

Un SEV consiste en deducir la estructura del subsuelo con una serie de medidas sucesivas de resistividad aparente. Si mantenemos un punto central (O) y vamos abriendo sucesivamente la distancia AB, la corriente electrica atravesara cada vez a mayor profundidad (Figura 17). Los sucesivos valores de resistividad aparente que vamos obteniendo corresponden a profundidades cada vez mayores, por lo que decimos que estamos realizando un SEV (Sánchez, 2011)

Considerando el dispositivo Schlumberger, los SEV se pueden clasificar en función de la separación final entre A y B de la siguiente manera según su extension (tabla 6) (Auge, 2008).

Tabla 6.

Tipos de SEV de acuerdo con su extensión y su principal aplicación.

TIPO DE SEV	LONGITUD	PRINCIPAL APLICACIÓN
Corto	AB hasta 250 m	Geotecnia y arqueología
Normal	250 m < AB < 2.500 m	Hidrogeología
Largo	2.500 m < AB < 25.000 m	Prospección petrolera
Muy largo	Hasta 1.200 km	Investigación geofísica

Adaptado de Auge, 2008.

Luego de establecer la ubicación del sondeo, la dirección de sus alas e instalar el instrumental de medición en el centro, se colocan los 4 electrodos (A, M, N, B) de acuerdo al dispositivo a utilizar (figura 10). Se compensa el potencial natural del terreno y se lo energiza con una corriente continua de intensidad (I) en (mA) (electrodos AB) y se lee la diferencia de potencial ( $\Delta V$ ) en (mV) (electrodos MN). Los valores se vuelcan en una tabla y se calcula la resistividad aparente ( $\rho_a$  en  $\Omega.m$ ).

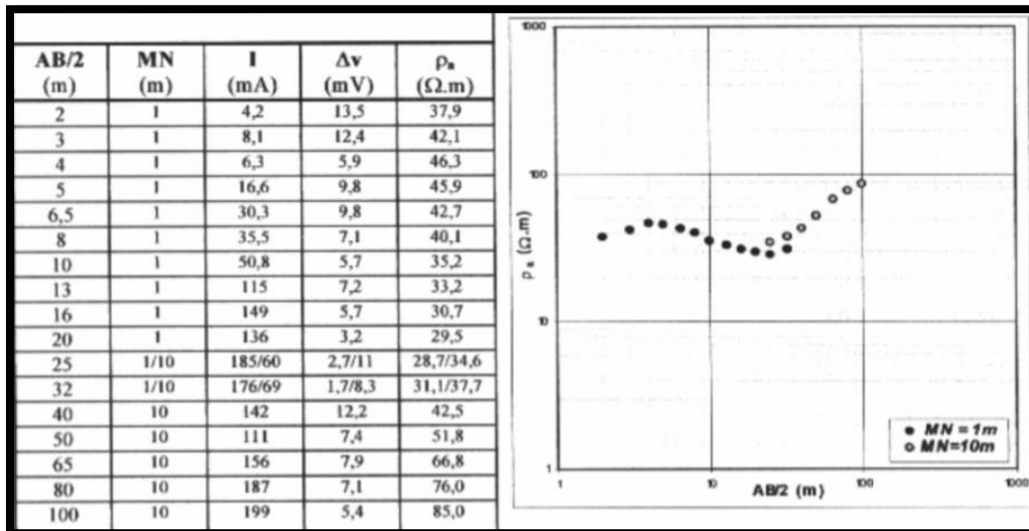


Figura 17. A la derecha una tabla con las variables requeridas para el cálculo de ( $\rho_a$ ) y a la izquierda la variación de esta en función de AB/2, en relación logarítmica. Adaptado de Auge, 2008

La finalidad del SEV es establecer la distribución vertical de la resistividad específica o real e por debajo del sondeo, tomando como base la curva de resistividad aparente. Esto no resulta sencillo pues la profundidad de investigación no es igual a  $AB/2$ , debido a que depende de la geometría de estos dispositivos y de los cambios de resistividades en el subsuelo. Con el objeto de disponer de órdenes de magnitud de los volúmenes involucrados, puede decirse que la mayor parte de la corriente inyectada queda dentro de un paralelepípedo geológico de un ancho  $AB/2$ , de un largo  $3AB/2$  y de un espesor  $AB/4$  (figura 18) (Auge, 2008)

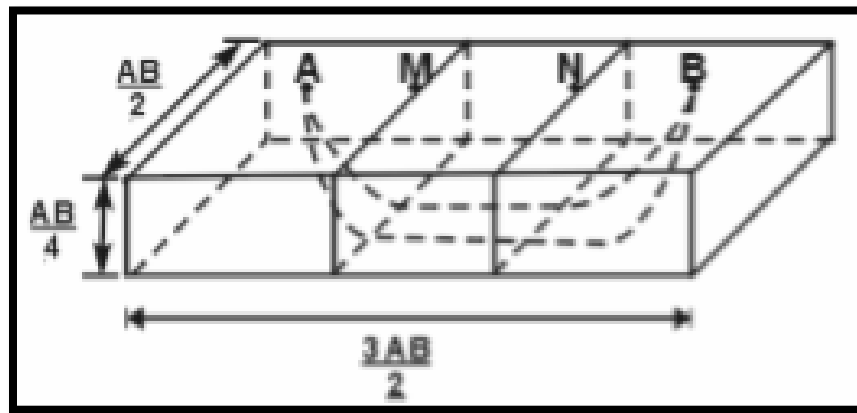


Figura 18. Paralelepípedo geológico afectado por la corriente en un dispositivo schlumberger. Adaptado de Auge, 2008.

#### 4.9 Curvas patrón en sondeos eléctricos de más de una capa.

**4.9.1 Curvas patrón.** Para la interpretación de los SEV se han venido utilizando y abandonando diferentes métodos de interpretación, Nosotros emplearemos los métodos de Orellana y Mooney (1966) que son Buenos y Sencillos de aplicar. La parte manual de este método se realiza en el Software IP2WIN sin embargo se explicará la teoría detrás de estos.

Los datos tomados en las hojas de campo se reflejan en un gráfico (Figura 15), en el que se llevan en ordenadas las resistividades aparentes, y en abscisas la diferencia que hay entre uno de

los electrodos de corriente y el punto O de sondeo( $OA=OB=AB/2$ ). Las escalas tomadas en ambos ejes son logarítmicas, para que la forma y tamaño de la curva sean independientes de las unidades utilizadas en las mediciones, cada grafico es la representación de un sondeo (Cantos, 1973)

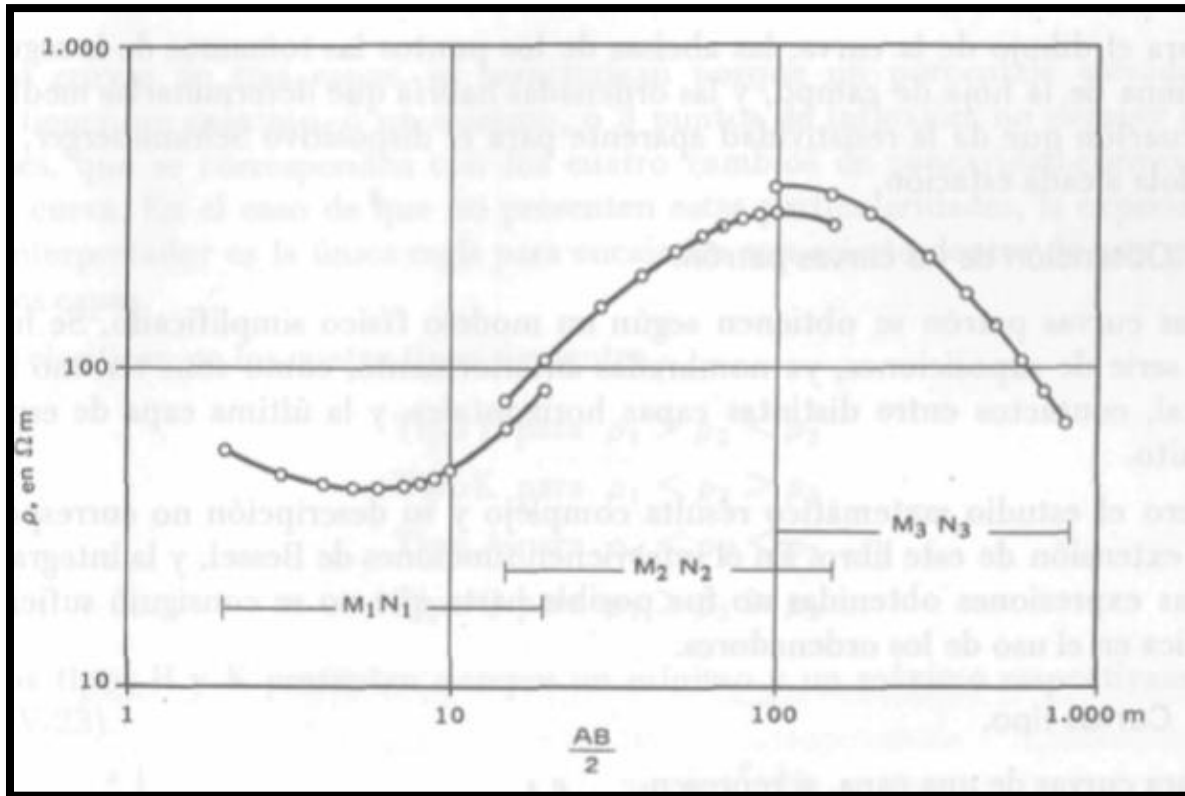


Figura 19. Grafica de una curva teórica de un SEV. Adaptado de Cantos, 1973.

En el papel la curva esta dibujada por puntos, que corresponden a cada medida de resistividad, habiéndose unido los puntos mediante trazos continuos. Se observan en ella tramos escalonados produciéndose estos escalones al cambiar la distancia de los electrodos de potencial MN, estos escalones son suavizados adecuadamente antes de hacer una interpretación del sondeo (Cantos, 1973).

➤ **Factores que considerar antes de decidirse a hacer un SEV.**

Es que el terreno que se está estudiando cumple las hipótesis que sirven de base para el cálculo de las curvas patrón. La primera hace referencia a que las discontinuidades en el subsuelo han de ser horizontales. Si el contacto tiene un buzamiento hasta de 10 a 15°, puede subsanarse orientando la línea de electrodos paralela al arrumbamiento de las formaciones.

La segunda indica que no han de existir variaciones laterales de resistividad. Se recomienda, a no ser que se conozca positivamente la inexistencia de este tipo de discontinuidad, hacer dos SEV perpendiculares en cada estación, o dos paralelos ligeramente separados.

Es importante dibujar en el campo las curvas de resistividad, ya que en ellas se advierten los errores cometidos por discontinuidades laterales, fugas de corriente, mal contacto de los electrodos entre otros, y se puede repetir el sondeo si es conveniente.

**4.9.1 Curvas tipo.** Orellana y Mooney (1966) plantean diferentes situaciones tipo, para distinta cantidad de capas en las cuales se pueden observar variaciones en su resistividad.

**4.9.1.1 Curvas de 1 capa.** Para curvas de una capa se cumple que  $P=P_1$ , la curva sería una recta paralela al eje de abscisas en el punto.

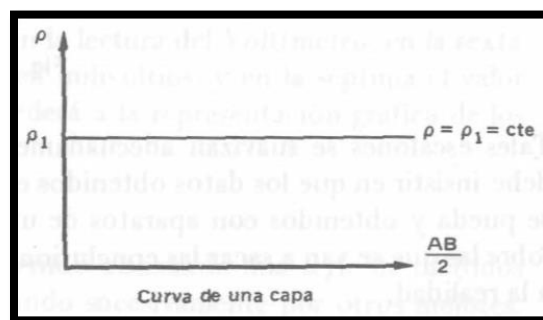


Figura 20. Curva tipo para cortes de 1 sola capa. Adaptado de Cantos, 1973.

**4.9.1.2 Curvas de 2 capas.** Solamente pueden presentarse dos posibilidades: P1 mayor que P2 o P1 menor que P2.

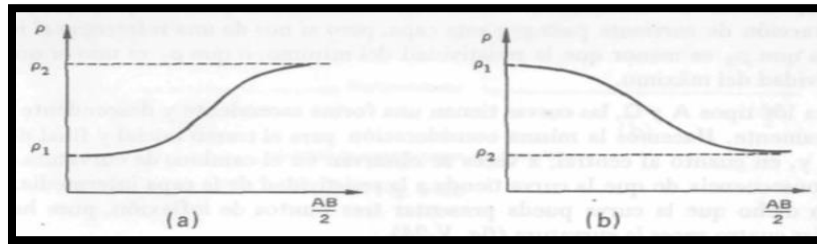


Figura 21. Curvas tipo para cortes de 2 capas. Adaptado de Cantos, 1973

**4.9.1.3 Curvas de 3 capas.** Las curvas de tres capas se caracterizan por que un porcentaje elevado de ellas tienen un máximo, o un mínimo, o 3 puntos de inflexión, no siempre apreciables, que se corresponden con los cuatro cambios de concavidad-convexidad de la curva. En el caso de que no presenten estas particularidades, la experiencia del interpretador es la unida regla para encajarlas con acierto dentro de alguno de estos grupos de 3 capas (Figura 22) (Cantos, 1973) .

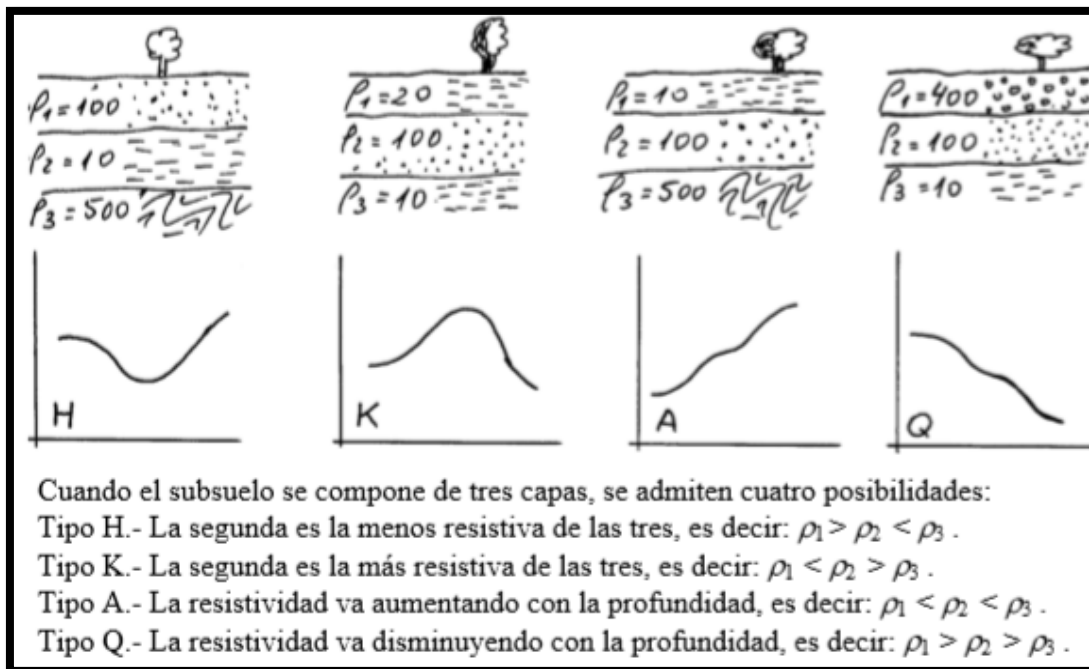


Figura 22. Curvas tipo para cortes de 3 capas. Adaptado de Sánchez, 2011

4.9.1.4 *Curvas de 4 capas o más.* Un corte geoelectrico de cuatro o más capas se descompone en intervalos de 3 en 3, dándole la nomenclatura correspondiente a cada tramo de 3.

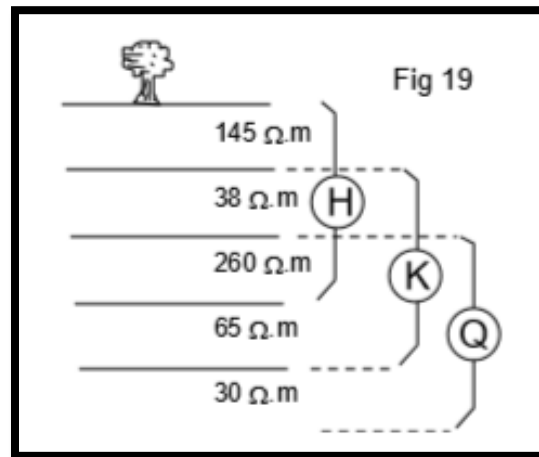


Figura 23. Esquema de un ejemplo ilustrativo para situaciones de 4 o más capas. Adaptado de Sánchez, 2011.

Por ejemplo, en la figura 19 vemos que las tres primeras capas forman un tipo H. la Segunda, tercera y cuarta a un tipo K y finalmente, las capas 3,4 y 5 son tipo Q. Por tanto, el corte completo se diría que es de tipo HKQ.

## 5. Marco geológico

El área de la mesa de Lebrija se caracteriza por corresponder a una zona relativamente estable tectónicamente, a pesar de estar localizada cerca del llamado Nido Sísmico de Bucaramanga, sin embargo se encuentra afectada por una serie de fallas de carácter compresivo como la Falla Suarez que sigue el trazo del Rio Suarez y Rio de Oro, inversa y de alta componente vertical (Royero & Clavijo, 2001), sometiendo a esfuerzos y plegamientos a los estratos, que desde el punto de vista



**5.1.1 Formación Girón.** Según Cediel (1968); correspondiente a una secuencia de areniscas de grano medio a grueso, color gris verdoso, conglomeráticas; con capas de arcillolitas marrón rojiza; los conglomerados contienen guijos de cuarzo y caliza., se describen 7 facies litológicas en la sección tipo del río Lebrija, donde se determinó un espesor de 4.650 m. para esta formación y sus facies son descritas de tope a base así:

- G (1.080 m.) Arenisca de grano grueso con capas de estratificación cruzada de hasta 4m. de espesor, interestratificada con capas conglomeráticas. El tamaño de los granos disminuye gradacionalmente hacia el tope y el color de estas areniscas varía gris verdoso a gris amarillento.
- F (250 m.) Areniscas gris verdosas, conglomeráticas, interestratificadas con capas de limolitas y arcillolitas en estratos de hasta 1 m. de espesor.
- E (1.040 m.) Arenisca de grano medio en capas de hasta 70 cm. de espesor, que varían lateral y verticalmente shales. Es una arenisca de color gris azulado a gris oscuro, con estratificación cruzada y pequeños lentes de material carbonáceo que contienen pequeños restos de plantas pobremente preservados.
- D (650 m.) Limolitas rojas interestratificadas con areniscas gris verdosas en estratos de hasta 1 m. de espesor, con pequeños lentes de material carbonáceo hacia la base.
- C (430 m.) Arenisca de grano medio a grueso en capas de estratificación cruzada de hasta 2.5 m. de espesor, interestratificada con capas conglomeráticas que contienen guijos de cuarzo. Son areniscas duras, bien calibradas y su color varía de gris verdoso a gris claro.
- B (590 m.) Arenisca de grano medio a grueso, interestratificada con capas rojas de limolita y arcillolita. Su color es gris azulado y se presenta en capas con estratificación cruzada de hasta 1 m. de espesor, mientras que las capas rojas varían lateralmente a shales.

- A (610 m.) Arenisca conglomerática de grano grueso y color gris, en capas de estratificación cruzada de hasta 2 m. de espesor, interestratificadas con capas de conglomerados que contienen guijos de cuarzo y caliza.

En el municipio de Lebrija es la unidad de mayor extensión; proyectándose desde el límite oriental con el municipio de Girón, hasta la quebrada Torcoroma entre las veredas Filo de Cruces y Zaragoza, de donde se continua hacia el sur, hasta la confluencia de las quebradas Pujamanes y La Negra en la vereda San Gabriel. Esta unidad conforma la denominada meseta de Lebrija y sobre ella se ha edificado el casco urbano y la mayor parte de la red vial del municipio; de igual manera esta formación ha focalizado el desarrollo de cultivos limpios como la piña, representante del principal reglón económico del municipio (EOT, 2003).

## 5.2 Geología estructural

La Formación Girón aflorante en la zona se encuentra sufriendo un basculamiento y una inclinación en el rumbo debido a la cercanía e influencia de la falla Suarez. A su vez, estas condiciones han causado un aumento de las diaclasas presentes en la roca, lo que incrementan también la porosidad secundaria y mejora las condiciones hidrogeológicas. A continuación, se presenta el dato promedio del rumbo y buzamiento de la capa.

- Dato Estructural Az Rumbo: 225°/45°

**5.2.1 Falla Suarez.** Esta falla se extiende por una longitud de unos 120 km desde Barbosa al sur hasta la Falla de Bucaramanga-Santa Marta 5 km al norte de la capital santandereana; su trazo tiene una dirección N20°E y N25°E, con inclinación al occidente y sigue el curso de los ríos Suárez y Río de Oro. Es una falla inversa de ángulo alto, con una componente vertical importante. París y Sarria en 1988 calculan una velocidad de desplazamiento vertical de 0,1 mm/año; además, se trata de una falla de rumbo con desplazamiento siniestral. (Royero & Clavijo, 2001)

La Falla del Suárez, al occidente del pueblo de Girón afecta capas de la Formación Girón, las cuales se pliegan por arrastre, alcanzando posiciones verticales y en algunos casos invertidas. En cercanías de la falla se observa un fuerte fracturamiento y un alto grado de meteorización de las rocas hasta el punto de llegarse a confundir con depósitos cuaternarios (Julivert, 1993)

Esta falla a lo largo de su trayecto afecta rocas jurásicas y cretácicas, principalmente de las Formaciones Jordán, Girón, Los Santos (Tambor), Rosa Blanca, Paja y cerca de su terminación en la Falla Bucaramanga-Santa Marta, afecta rocas del Paleozoico como son las Formaciones Floresta y Diamante. Existen evidencias de campo que indican actividad tectónica reciente para esta falla (Royero & Clavijo, 2001)

## **6. Metodología.**

### **6.1 Consulta de bibliografía**

En esta fase se consultaron diversas bases de datos, en búsqueda de artículos científicos e información regional que contengan rasgos geológicos de la Formación Girón, tipos de acuíferos, estudios hidrológicos en la zona, modelos y arreglos geoeléctricos adecuados para las condiciones

del afloramiento y demás información útil para realizar los sondeos eléctricos paramétricos en el área.

## **6.2 Reconocimiento de campo**

Se localizaron los mejores sitios con las características más adecuadas para realizar los sondeos eléctricos verticales, se tuvo en cuenta criterios como acceso, distancia a sondeos anteriores, disposición del afloramiento, erosión, topografía, meteorización y demás aspectos que puedan afectar el resultado del estudio.

El área de estudio se encuentra ubicada en el municipio de Lebrija, Santander, y fue seleccionada aplicando los criterios anteriormente mencionados. Esta se encuentra en un área geológicamente levantada por el desplazamiento de una falla inversa de alta componente vertical, dejando así expuesta la Formación Girón, sobre la cual se encuentra toda la meseta de Lebrija y se han realizado excelentes carreteras y vías de acceso debido a la cercanía con el Aeropuerto Internacional Palonegro. A su vez el área cuenta con una vía terciaria perpendicular al rumbo de las capas y con una topografía suave, lo que permitió favorecer las condiciones adecuadas para la realización del SEV.

## **6.3 Adquisición de datos en campo:**

**6.3.1 Columna Estratigráfica y Toma de muestras.** La columna estratigráfica se elaboró con el método de bastoneo el cual consiste en utilizar un bastón guía, de una altura de 1.50 m para medir el espesor real de los estratos, utilizando el rumbo como base estática del bastón y dirección a la cual debe moverse, y el buzamiento de la capa como una inclinación del bastón para obtener las marcas sobre las cuales se irá avanzando verticalmente en el afloramiento.

La columna estratigráfica tuvo un espesor total de 143 bastones, por lo que se estimó que al multiplicar esto por 1.50m, el espesor real levantado fue 214,5 m cuya descripción se encuentra recopilada en el APÉNDICE A.

La escala de la columna estratigráfica fue de 1:250 y fue representada gráficamente usando el software libre SedLog, que permite organizar de manera rápida y clara la información adquirida en campo.

Se tomaron 8 muestras distribuidas entre las 3 Facies litológicas más importantes para el estudio hidrológica. Estas se describieron siguiendo la metodología enunciada en los laboratorios de sedimentología elaborados por Cruz y Caballero (2007)

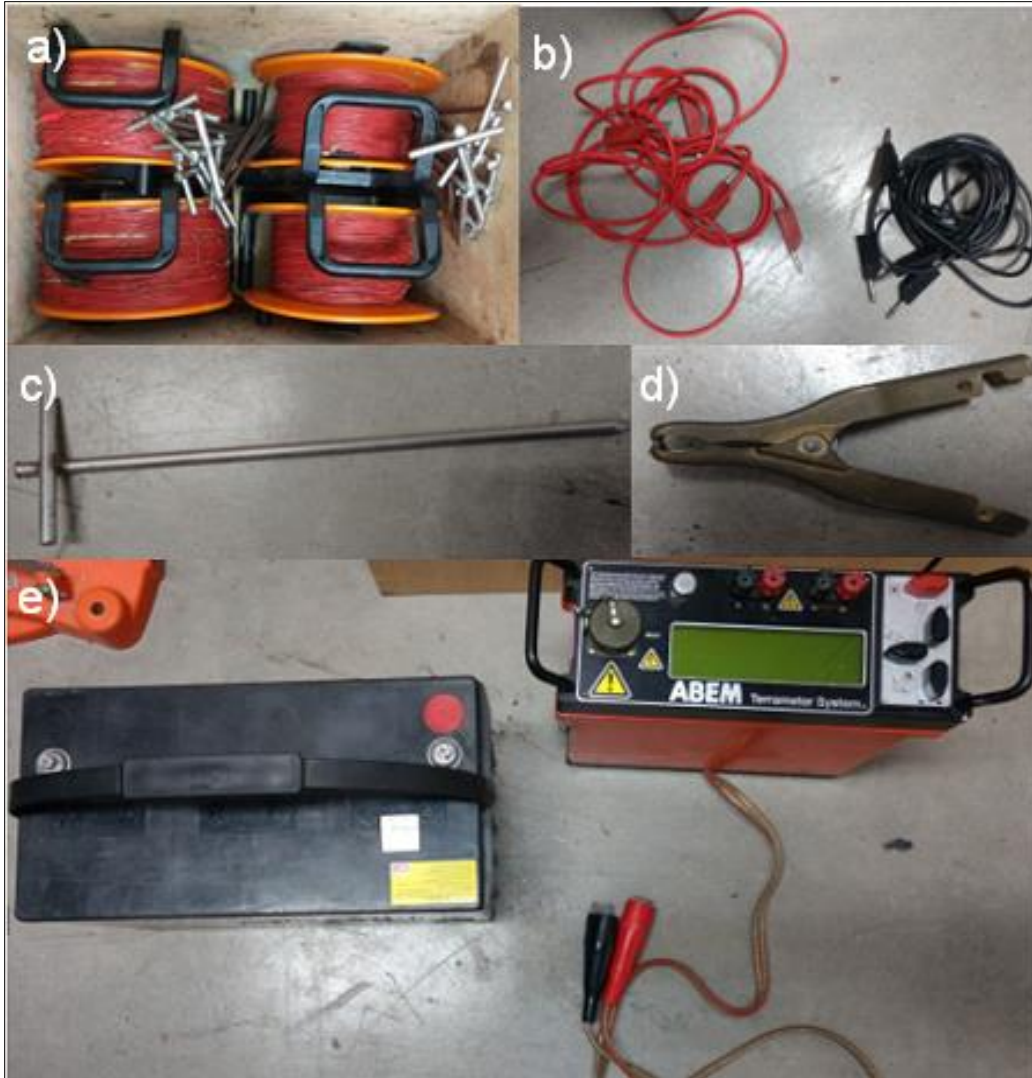
**6.3.2 Sondeo Eléctrico Vertical.** El sondeo eléctrico vertical fue realizado en la zona de estudio ubicada Vía Bucaramanga- Aeropuerto Palonegro 600 m después del peaje, girando a la izquierda por una vía terciaria avanzando 50 m. en las coordenadas:

- X: 1098350.213 m.
- Y: 1277547.269 m.
- Z: 1083 ± 3 m.s.n.m

El procedimiento en detalle para la adquisición de las mediciones de resistividad se encuentra descrito en el APÉNDICE B (Guía metodológica para la adquisición de datos de resistividad en el terreno).

El sondeo eléctrico se realizó utilizando el equipo ABEM TERRAMETER SAS 1000 el cual dispone la escuela de geología de la Universidad Industrial de Santander y tiene los siguientes componentes (Figura 25):

- Batería de Ni-Cd incorporada con un sistema de enganche.
- Adaptador SAS-EBA para la batería externa de 12V.
- 18 electrodos de acero inoxidable o no polarizarles.
- Juegos de cable:
  - 2 carretes de 750m de cable de corriente, 0,75 mm<sup>2</sup>.
  - 2 carretes de 500m de cable de potencial, 0,75 mm<sup>2</sup>.
  - 2 x 2m de cable de conexión, rojo.
  - 2 x 2m de cable de conexión, negro.
- Consola Terrameter SAS 1000.
- Porra para clavar los electrodos.
- 4 pinza de cocodrilo



*Figura 25.* Componentes del equipo escuela de geología a) y b) Juegos de cable, c) electrodos de acero inoxidable o no polarizarles, d) Pinza de cocodrilo, e) Consola Terrameter SAS 1000 y batería portable de 12 V.

#### 6.4 Recopilación e interpretación de datos

Para la interpretación de las respuestas de resistividad se usó el Programa IPI2WIN el cual se puede descargar en el siguiente enlace: <http://geophys.geol.msu.ru/ipi2win.htm>. Este programa es un Software libre desarrollado por la universidad estatal de Moscú y distribuido por GeoScan, el

cual cuenta con un manual en español y no requiere de un proceso especial para su instalación, sin embargo, en la guía metodológica (Apéndice B) se explicará cómo hacer una interpretación de datos aplicando este software.

IPI2Win es capaz de calcular los valores de resistividad aparente solo para los arreglos Schlumberger y medio-Schlumberger. Para los arreglos Wenner, dipolo axial y polo-polo los valores de resistividad aparente deben ser calculados por otros medios. (Geoscan-m Ltd., 2000)

A su vez se utilizó la teoría de curvas patron, propuesta por Orleana y Mooney (1966) , para definir el número de capas litológicas representadas en el papel logarítmico, adquiridas al graficar las respuestas de resistividad obtenidas en campo. Con estas respuestas y utilizando de soporte valores de resistividad para geomateriales, compilados en tablas de resistividad dispuestas por varios autores, se elaboró una interpretación hidrogeológica de las facies litogicas captadas por el SEV.

### **6.5 Guía Metodológica para la Adquisición de datos geoelectricos**

Esta guía se elaboró con el objetivo de generar un manual para realizar prácticas de exploración geoelectrica, dirigido a estudiantes que se encuentren cursando la materia de “Métodos geofísicos”, tomando como ejemplo otros manuales realizados por diferentes profesores en sus prácticas de laboratorio como lo son: Guía de laboratorio de petrología ígnea (2003) por el profesor Luis Carlos Mantilla Figueroa, el manual de laboratorio de geología física (2005), por el profesor Víctor Manuel Caballero y el manual de prácticas de petrología metamórfica (2007) por el profesor Carlos Alberto García.

## 6.6 Parametrización de las respuestas de resistividad

Para realizar la interpretación correspondiente, se debe tener una guía de la resistividad de las rocas aflorantes en la zona. Si en el ejercicio no se posee información sobre la geología de la zona, es necesario acudir a tablas de resistividades de geomateriales. Existe gran cantidad de autores que presentan sus tablas, sin embargo, siempre se resalta que estas fueron diseñadas por experiencias personales o promedios de estudios realizados por cuenta propia, por lo que se recomienda estudiar más de una, debido a que varias de estas presentan diferentes valores de resistividad para el mismo geomaterial.

Teniendo como referencia una guía de valores de resistividad, se procede a realizar una interpretación aproximada del terreno. Para este sondeo eléctrico vertical se realizó una columna estratigráfica (Figura 28), la cual contribuye a la caracterización de las electrocapas que se evidencian en el SEV.

Para realizar la interpretación se geológica e hidrogeológica, se utilizaron las litologías identificadas anteriormente por medio de la columna estratigráfica y los datos de resistividad promedio de los diferentes geomateriales obtenidos en las tablas de diferentes autores. Gracias a lo anterior, se realizó un amarre entre el SEV y la columna estratigráfica.

En el estudio de campo se seleccionó un área en la cual las facies arenosas y conglomeráticas de la Formación Girón estuvieran aflorando con claridad y contrastando los estratos de arcillas y limos. A su vez esta región, debía ser plana topográficamente, para poder realizar el SEV con una profundidad adecuada para alcanzar estos estratos.

En la adquisición del SEV se tuvo en cuenta la precipitación reciente, favoreciendo así la saturación en agua de las formaciones geológicas aflorantes y simulando condiciones de saturación que sufriría una capa acuífera a profundidad. A su vez, en la interpretación hidrogeológica se tuvo en cuenta la experiencia de la zona y de los diferentes SEV realizados por la C.D.M.B.

Para la parametrización de las respuestas de resistividad, se hizo una interpretación geoeléctrica en el Software IPI2win, correlacionando las unidades hidrológicas analizadas y descritas en la columna estratigráfica con las electrocapas identificadas. Esta correlación nos da un aproximado de las respuestas de resistividad reales de las facies litológicas aflorando en el área de estudio, en las condiciones hidrogeológicas descritas anteriormente.

## **7. Resultados.**

### **7.1 Selección de área de estudio.**

La zona de estudio se encuentra ubicada 1 km al sur del Aeropuerto internacional Palonegro, sobre la carretera que conduce al mismo, y a 3 km al este del casco urbano del municipio de Lebrija. En donde el corte para la elaboración de la carretera había dejado a disposición afloramientos muy completos, la exposición de la roca era buena y se poseía un terreno plano de 120 metros muy cercano a la sección estratigráfica para extender el arreglo electródico tipo Schulemberg (Figura 28).

Los criterios para la selección del área de estudio en orden de importancia fueron:

- **Afloramiento con buena exposición de rocas:** La descripción litológica para el patronaje de las respuestas de resistividad es de vital importancia, y es gracias a que se tiene una columna estratigráfica detallada que se pueden correlacionar las respuestas de resistividad aparente en el terreno de diferentes facies geológicas, con las aflorantes en la zona y posteriormente descritas en una columna estratigráfica.
- **Facilidad en el acceso:** El estudio se hizo en 2 vías, una de carácter primario en la cual se levantó la columna estratigráfica y una terciaria la cual permitió que el Equipo ABEM Terrameter SAS 1000 fuera fácilmente descargado y los electrodos acomodados siguiendo una línea recta sin interferencia de algún árbol o accidente geográfico que desviara el arreglo electródico más de 15°.
- **Topografía suave y sin obstáculos en dirección al rumbo:** Para elaborar un sondeo vertical hay que comprobar que el terreno estudiado cumple con las hipótesis que sirven de base para el cálculo de las curvas patrón (Orellana & Mooney, 1966). Las discontinuidades en el subsuelo han de ser horizontales, si el buzamiento es de 10 a 15° puede subsanarse orientando el arreglo electródico paralelo al rumbo de las formaciones, en este caso, la Formación Girón presenta un rumbo de 135° y la carretera sobre la cual se hizo el arreglo electródico posee un Rumbo de 139° lo que permitió hacer un arreglo el electródico sin obstáculos secundarios paralelo al rumbo en una topografía sin pendiente.
- **Información geológica y climatológica:** El área de estudio se encuentra cartografiada en el mapa H12 del INGEOMINAS, en donde se puede encontrar información, por un lado, geológica del terreno y compararla con la adquirida en campo, mejorando así el entendimiento geológico del área de estudio, y, por otro lado, información de la gran influencia estructural sobre la zona que presenta la Falla Suarez. El aeropuerto

internacional Palonegro cuenta con su propia estación meteorológica que permitió acceder a estadísticas sobre pluviosidad y mediciones de precipitación (Alcaldía de Lebrija, 2016) importantes para entender una posible frecuencia en la recarga del sistema acuífero en la zona.

- **Zona en jurisdicción por la C.D.M.B:** El municipio de Lebrija, se encuentra bajo la jurisdicción de la corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga, lo que aumenta el interés de información geológica e hidrogeológica sobre esta zona y permite que a futuro esta información pueda ser entrelazada con la información de sondeos eléctricos verticales realizados por terceros que ya posee la corporación actualmente.



Figura 26. Selección de Área de estudio en rojo, línea del sondeo en azul y ruta de la columna estratigráfica en amarillo. Adaptado de Google Earth

## 7.2 Columna Estratigráfica Escala 1:250.

La columna estratigráfica del área de estudio se elaboró para 214,5 metros de espesor pertenecientes a la Formación Girón. El levantamiento de esta se llevó a cabo utilizando el método de bastoneo. Tanto la descripción litológica de los bastones como las coordenadas de inicio y final de las mismas se encuentran consignadas en el Apéndice B.

La columna estratigráfica (Figura 32) fue representada gráficamente usando el software libre SedLog a una escala de 1:250. Para este estudio la columna se puede dividir en 3 segmentos los cuales serán denominados A, B y C del más antiguo al más nuevo.

**Segmento A:** 70,5 m de espesor. Hacen parte las muestras geológicas JA-GR-01 B2, JA-GR-02 B20, JA-GR-03 B34 Y JA-GR-04 B36. Hacia la base de este segmento encontramos paquetes de arenisca cuarzosa de grano medio a fino con contenido micáceo, de color grisáceo y sin laminación mal calibrados, con granos subesfericas redondeadas a subredondeadas, este paquete se encuentra altamente fracturado y con presencia de oxidación. (Muestra JA-GR-01)



Figura 27. Muestra JA-GR-02. Arenisca de grano medio a fino lodosa.

Tabla 7.

*Descripción Textural Muestra JA-GR-01*

<b>Descripción Textural</b>	<b>Muestra JA-GR-01 Baston 2</b>
Color	Grisáceo
Armazon	60 % Arenisca de grano medio a fino
Matriz	18 % Lodosa
Cemento	7%
Poros	15%
Calibrado	Moderadamente Calibrada
Forma de las partículas	Granos Subesféricos redondeados a subredondeados
Contacto entre granos	Empaquetamiento Cerrado
<b>Descripción:</b> Arenisca de grano medio a fino lodosa, moderadamente calibrada, granos subesféricos redondeados a subredondeados, moderadamente cementada, con porosidad entrepartículas 15 %	

A medida que se va ascendiendo estratigráficamente, la litología va aumentando su tamaño a arenisca gruesas, a conglomerados de tamaño granulo, silíceas, con presencia de intraclastos y líticos, de color rojizo, sin laminación, moderadamente calibrados a mal calibrados, con granos subesfericos subangulares a subredondeados con empaquetamiento cerrado y mala cementación (Muestra JA-GR-03).

Tabla 8.

*Descripción Textural Muestra JA-GR-03.*

<b>Descripcion Textural</b>	<b>Muestra JA-GR-03 Baston 34</b>
Color	Rojizo
Armazon	55 % Arenisca de grano grueso a muy grueso
Matriz	23 % Lodosa Arcillosa
Cemento	4 % Cemento
Poros	18%
Calibrado	Moderadamente Calibrada a Mal calibrada
Forma de las particulas	Granos Subesfericos Subangulares a Subredondeados
Contacto entre granos	Empaquetamiento Cerrado
<b>Descripcion:</b> Arenisca de grano grueso a muy grueso lodosa, moderadamente calibrada a mal calibrada, Granos Subesfericos Subangulares a Subredondeado, mal cementada con porosidad entreparticulas del 18%	

Hacia el tope de este, se encuentra un paquete potente de areniscas de grano medio, cuarzosas con contenido de líticos, sin laminación, color rojizo, mal calibrada, con granos subesféricos subredondeadas, con buena cementación.



Figura 28. Muestra JA-GR-03. Arenisca de grano grueso a muy grueso lodosa.

**Segmento B:** 70 m de espesor. Cubierto.

**Segmento C:** 74 m de espesor. Hacia la base de este segmento se encuentran estratos de arenisca ligeramente conglomerática de grano grueso a granulo, de color grisáceo, moderadamente calibrada, granos subesféricos subangulares a subredondez, mal cementada. (Muestra JA-GR-05) seguidos de un paquete potente de 38 m de espesor, de capas de conglomerado tamaño granulo y guijo, de color grisáceo, con clastos moderadamente sorteados, granos esféricos y buena redondez, con matriz areno lodosa en donde predomina el tamaño de grano medio, intercalados con capas de arenisca de grano medio a grueso, con presencia de cuarzo, color rojizo, moderadamente calibradas subesféricas y subredondez, con buena cementación.

Tabla 9.

*Descripción textural muestra JA-GR-05.*

Descripcion Textural	Muestra JA-GR-05 Baston 102
Color	Grisáceo
Armazon	55% Arenisca conglomeratica de grano grueso a granulos
Matriz	23% Lodo arenosa
Cemento	4% cemento
Poros	18%
Calibrado	Moderadamente calibrada a mal calibrada
Forma de las particulas	Granos subesfericos redondeados
Contacto entre granos	Empaquetamiento Cerrado

**Descripcion:** Arenisca conglomeratica de grano grueso a muy grueso lodosa, moderadamente calibrada a mal calibrada, granos subesfericos redondeados, mal cementada con porosidad entre particulas del 18 %

*Figura 29.* Arenisca conglomerática de grano grueso a muy grueso lodosa

Hacia el tope, la litología cambia a capas de lodolitas y limolitas rojizas masivas, bien calibradas, de granos esféricos y redondeados, buena cementación que presentan motas de color

verde aguamarina que indican la posible presencia de paleosuelos. Asimismo, los estratos hacia el tope presentan calcos de carga.

Tabla 10.

*Descripción textural muestra JA-GR-08.*

Descripcion Textural	Muestra JA-GR-08 Baston 139
Color	Café Oscuro
Armazon	68 % Limosoportada
Matriz	
Cemento	6%
Poros	26%
Calibrado	Buen calibrado
Forma de las particulas	Redondeadas
Contacto entre granos	Empaquetamiento Cerrado

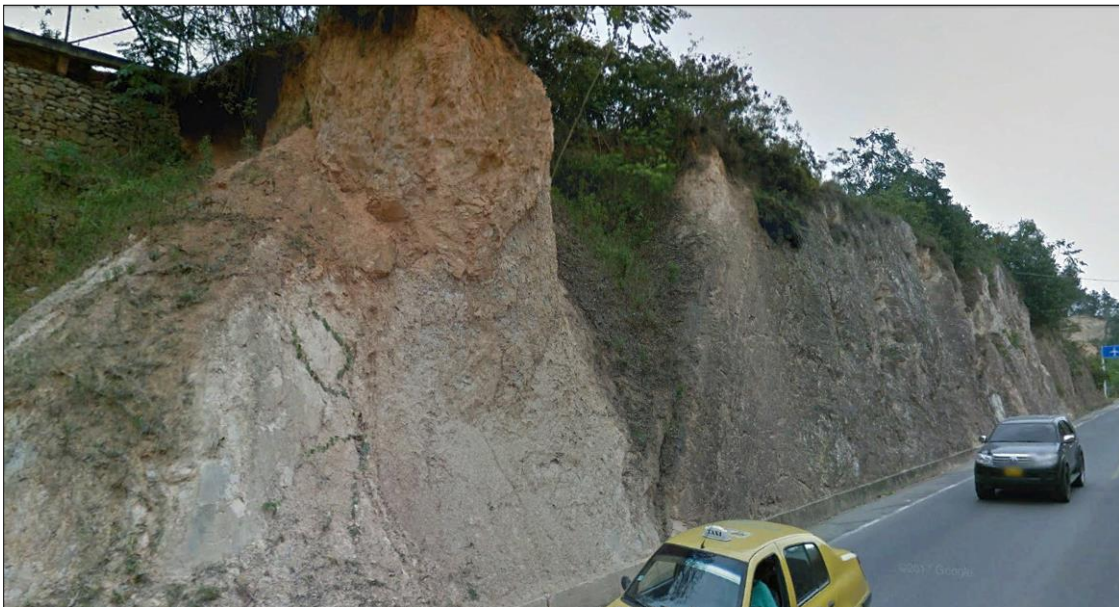
**Descripcion:** Limolita arcillosa, bien calibrada de granos esfericos y redondeados, buena cementacion y con porosidad entre particulas del 26 %



*Figura 30.* Limolita arcillosa. Muestra JA-GR-08.

De la columna también se permitió definir 3 tipos de litofacies.

- Areniscas de grano medio a grueso intercaladas de arenisca muy fina a limos.
- Lodolitas y limolitas con presencia de paleosuelos intercaladas de arenisca muy fina a fina.
- Conglomerados tamaño guijo a guijarro con matriz de arena gruesa intercalados de capas de arenisca de grano medio a grueso.



*Figura 31.* Afloramiento segmento C, Contacto entre las lodolitas (supra yaciendo) y las areniscas (infra yaciendo). Adaptado de Google Earth

Las coordenadas de toma de muestras de campo y sus respectivas descripciones se encuentran consignadas en el APÉNDICE B. Dichas muestras corresponden a 4 tipos de roca sedimentaria diferentes Arcillolitas, Lodolitas, Areniscas y Conglomerados.

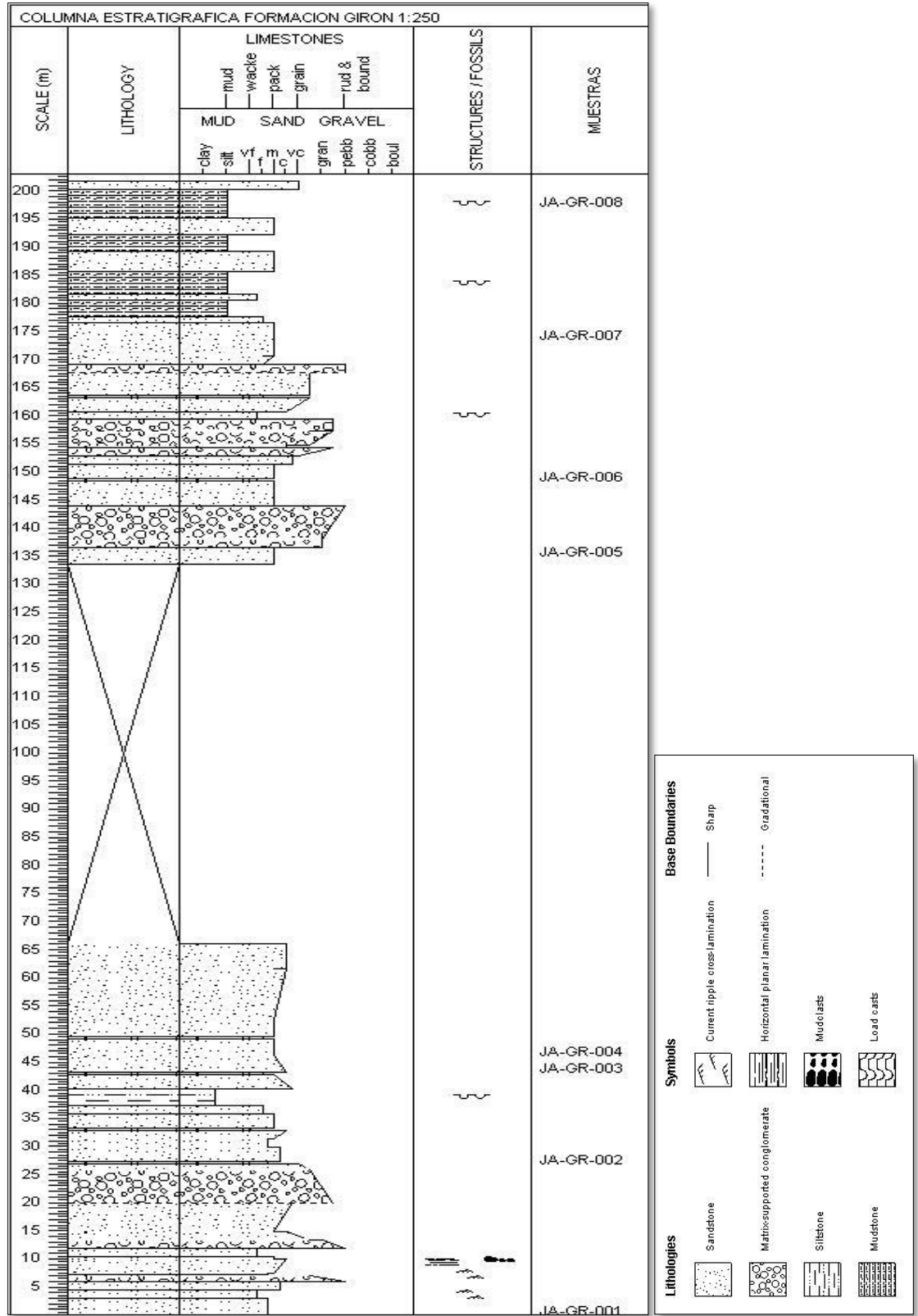


Figura 32. Columna estratigráfica de la Formación Girón, escala 1:250

### 7.3 Sondeo eléctrico vertical.

Para la realización de la parametrización llevada a cabo durante esta práctica empresarial, únicamente se dispuso de un único sondeo eléctrico vertical, ya que, debido a las condiciones topográficas de la zona, los puntos en los cuales se podían realizar los arreglos electródicos en el área, eran limitados. Además de ello, la lejanía de los puntos accesibles, respecto al afloramiento no debía ser demasiada, ya que ello podía aumentar la probabilidad de converger con un cambio lateral de facies en el terreno. De igual manera, cabe resaltar que llevar a cabo un SEV en otra localidad, influiría en costos que no están contemplados bajo el marco de este proyecto.

Para determinar los valores de resistividad aparentes de las litofacies de interés hidrogeológico, se realizó un SEV con un arreglo electródico tipo Schlumberger y con un AB/2 máximo alcanzado de 60 metros y 3 cambios de abertura de MN.

Tabla 11.

*Datos adquiridos del SEV*

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-QUIMICA			
ESCUELA DE GEÓLOGIA			
<b>Fecha:</b> 18/04/2018		<b>Nombre SEV:</b> SEV1	
<b>Equipo:</b> Terrameter SAS 1000		<b>Arreglo:</b> Schlumberger	
<b>Coordenadas</b> X: 1098350.213 m. Y: 1277547.269 m. Z: 1083 ± 3 m.s.n.m		<b>Ubicación:</b> Vía Bucaramanga- Aeropuerto Palonegro 600 m después de pasar el peaje gira a la izquierda por	
N° Inyección	AB/2 (m)	MN/2 (m)	pa ( $\Omega$ .m)
1	1	0.25	62.802
2	2	0.25	111.95

3	3	0.25	137.95
4	4	0.25	136.33
5	5	0.25	131.27
6	7.5	0.25	109.62
7	10	0.25	69.847
8	10	1	94.725
9	12.5	1	87.155
10	15	1	81.627
11	17.5	1	82.813
12	20	1	86.45
13	25	1	83.17
14	25	5	87.647
15	30	5	97.457
16	35	5	104.48
17	40	5	104.18
18	45	5	109.85
19	50	5	116.53
20	60	5	121.92
21	60	10	114.5
<p><b>Observaciones:</b> La medición se ha llevado a cabo 72 horas después de una precipitación, el terreno se encontraba seco superficialmente y los electrodos fueron clavados sobre suelo de recebo depositado para la estabilidad de la vía.</p>			

En la curva experimental de este SEV pueden interpretarse 4 capas gracias a la teoría de la curva patrón mostrada en los numerales anteriores, así como también se puede deducir que dos de ellas (capas 2 y 4) son resistivas y una intermedia (capa 3) conductora. A su vez la capa 1 es

conductora, pero de un espesor muy minúsculo. Sin embargo, como el objeto de este SEV es caracterizar todas las capas posibles dentro de los datos tomados en el sondeo con AB/2 de 60 metros, se generarán 5 capas, ya que como se observó anteriormente en el manejo del software, la última capa es de espesor infinito y se obtendrían datos de resistividad de los cuales se tiene certeza.

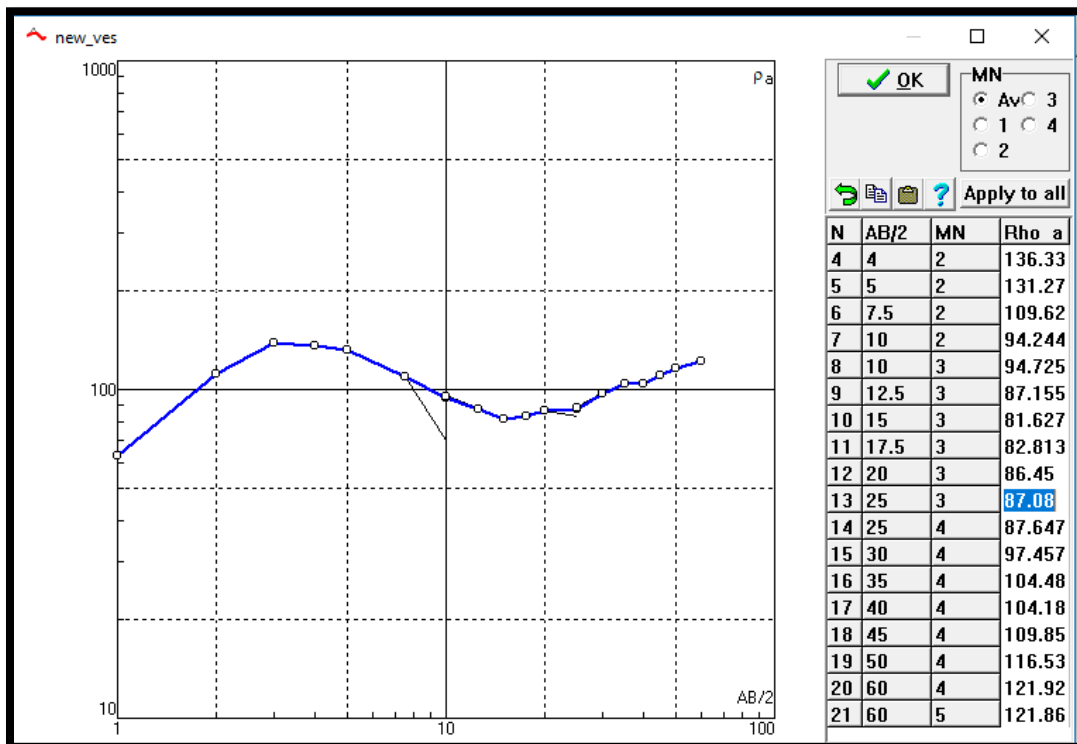


Figura 33. Curva de resistividades en campo, realizadas en IPI2win

IPI2win realiza una inversion de datos que conlleva a que una curva pueda tener varios modelos que se ajustan a la misma. En las siguientes 2 imágenes (Figura 34 y 35) se aprecian dos modelos válidos, pero, gracias a un levantamiento en campo y a la elaboración de la columna estratigráfica, se puede determinar cual modelo se ajusta mas a la realidad geologica de la zona.

**Modelo Teórico 1:**

El procesamiento de los datos fue realizado en el software libre IPI2WIN. El Corte geoelectrico consta de 5 capas, un error de ajuste de 4,03% y una profundidad obtenida 32,2 m. (Figura X). La capa I presenta un espesor de 0,4 m y una resistividad de 35.4 Ohm/m, la capa II presenta un espesor de 0,6m y una resistividad de 814 ohm/m, la capa III presenta un espesor de 5,19 m y una resistividad de 32.2 Ohm/m, la capa VI presenta un espesor de 25,9m y una resistividad de 195 ohm/m. Para la última cuyo espesor se asume como infinito la resistividad es 97,5 ohm/m.

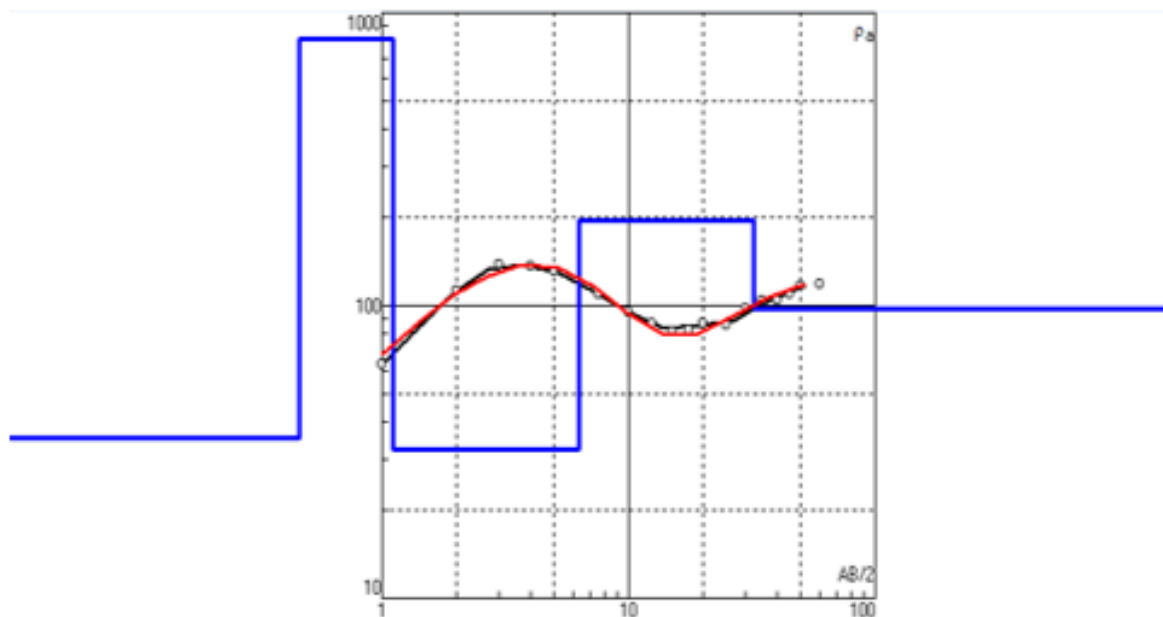


Figura 34. Curva teórica 1 Resistividad Aparente vs AB/2 SEV1, realizado en el software IPI2win.

Tabla 12.

*Resultados presentados por el software IPI2win para el modelo teórico 1*

<b>Electrocapas</b>	<b>Resistividad aparente (<math>\rho_a</math>)</b>	<b>Espesor</b>	<b>Profundidad</b>
<b>1</b>	35.3	0.462	0.462
<b>2</b>	814	0.646	1.11
<b>3</b>	32.3	5.19	6.29
<b>4</b>	195	25.9	32.2
<b>5</b>	97.5		

### **Modelo Teórico 2:**

El Corte geoelectrico consta de 5 capas, un error de ajuste de 4,26% y una profundidad obtenida 32,2 m. (Figura X). La capa I presenta un espesor de 0,4 m y una resistividad de 35.4 Ohm/m, la capa II presenta un espesor de 0,6m y una resistividad de 725 ohm/m, la capa III presenta un espesor de 3,82 m y una resistividad de 46.2 Ohm/m, la capa VI presenta un espesor de 27,9m y una resistividad de 97.5 ohm/m. Para la última cuyo espesor se asume como infinito la resistividad es 322 ohm/m.

Tabla 13.

*Resultados presentados por el software IPI2win para el modelo teórico 1*

<b>Electrocapas</b>	<b>Resistividad aparente (<math>\rho_a</math>)</b>	<b>Espesor</b>	<b>Profundidad</b>
<b>1</b>	35.3	0.462	0.462
<b>2</b>	725	0.646	1.11
<b>3</b>	46.2	3.82	4.93
<b>4</b>	97.5	27.3	32.2
<b>5</b>	322		

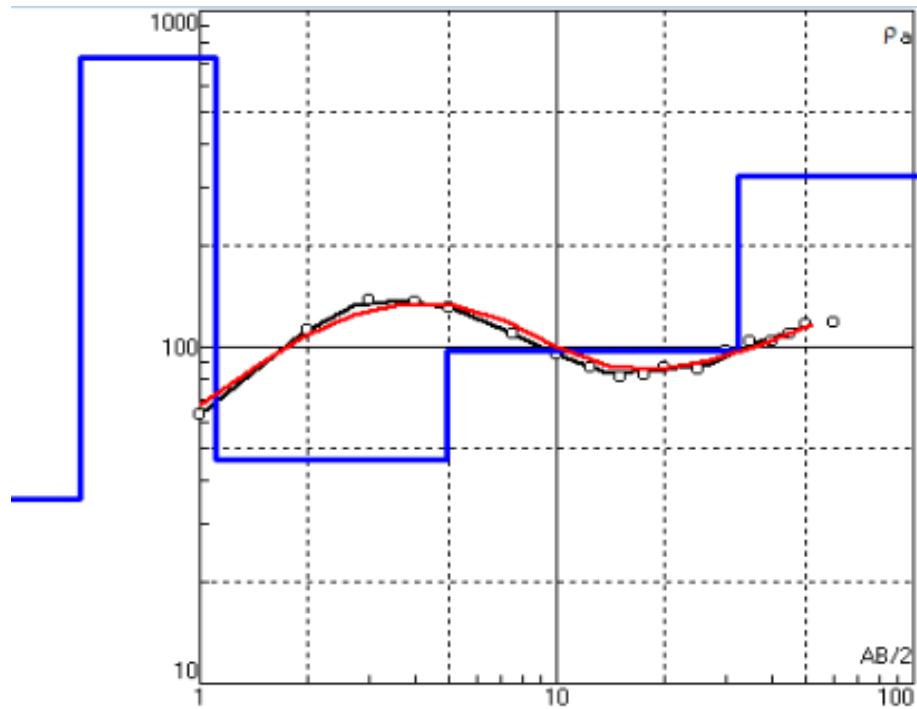


Figura 35. Curva teórica 2 Resistividad Aparente vs AB/2 SEV1, realizado en el software IPI2win.

#### 7.4 Parametrización de las respuestas de resistividad

Para la parametrización de las respuestas de resistividad lo primero que se hizo fue hacer el amarre SEV- Columna. Para ello se proyectó el buzamiento de la formación desde el punto del SEV hasta el afloramiento, luego se tuvo en consideración que debido a que el SEV se hizo sobre una carretera esta tiene materiales de recebo que ocupan un espesor estimado de 1 m. A su vez, se sumó a la ecuación el hecho de que días atrás se presentaron precipitaciones, lo que facilitaría la saturación en agua de las areniscas presentes en la zona por infiltración y así ganaría condiciones de humedad, parecidas a las que tendría la misma litología sometida a condiciones de acuífero.

De acuerdo con las electrocapas presentadas por el modelo teórico 1, Las mediciones de resistividad se pueden observar con su respectiva correlación litológica en la siguiente tabla.

Tabla 14.

*Correlación litológica e hidrogeológica del modelo teórico 1*

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

Esta correlación litológica tiene gran concordancia con la columna estratigráfica levantada en el área de estudio, mientras que el modelo teórico 2, distorsiona los espesores de las electrocapas interpretadas como arcillas y no muestra gran contraste resistivo como debería existir al comparar 2 litologías tan diferentes texturalmente como lo son los limos de las areniscas y conglomerados. Luego se procedió a hacer una comparación entre las tablas de geomateriales preexistentes de distintos autores y la litología levantada en la columna estratigráfica. (Tabla 18).

Tabla 15.

*Tabla de Resistividades teóricas de geomateriales según (Eve & Keys, 1956)*

<b>Material</b>	<b>Resistivity in Ohm-m</b>
Granite	$10^9$ to $10^{12}$
Sandstone	$5.0 \times 10^9$ to $10^{12}$
Porphyry	$10^9$
Limestone (dry)	$6.8 \times 10^4$
Limestone (moist)	$4.0 \times 10^4$
Yellow river sand 0.86% water	830
Yellow river sand 1.52% water	380
Yellow river sand 9.5% water	95
Garden soil 3.3% water	1670
Garden soil 17.3% water	60
Clay 4.4% water	1450
Clay 16.1% water	50
Clay 28.0% water	16

Tabla 16.

*Resistividades teóricas de geomateriales según (Parasnis, 2012)*

<b>Rocks and sediments</b>		<b>Ores</b>	
Limestone (marble)	$> 10^{12}$	Pyrrhotite	$10^{-6} - 10^{-3}$
Quartz	$> 10^{10}$	Chalcopyrite	$10^{-4} - 10^{-1}$
Rock salt	$10^6 - 10^7$	Graphite shales	$10^{-3} - 10^{-1}$
Granite (shield areas)	$5000-10^6$	Graphite (polycrystalline)	$10^{-5} - 10^{-4}$
Granite (Tropical areas)	50-3000	Pyrite	$10^{-4} - 10^1$
Sandstones	35-4000	Magnetite	$10^{-2} - 10^1$
Moraine	8-4000	Haematite	$10^{-1} - 10^2$
Limestone	120-400	Galena	$10^{-2} - 300$
Clays	1-120	Zincblende	$> 10^4$
Tropical vesicular basalts	10-50		

Tabla 17.

*Resistividades teóricas de geomateriales según (Milson & Eriksen, 2011)*

<b>Material</b>	<b>Resistivity Ohm-m</b>	<b>Material</b>	<b>Resistivity Ohm-m</b>
Air	8	Clay	1-100
Ice	100 000-8	Weathered	100-1000
Fresh Water	1 000 000	Bedrock	
Seawater	0.2	Salt	10-10 000 000
Topsoil	50-100	Shale	10-1000
Coal	500-2000	Siltstone	10-10 000
Dry sand	1000-5000	Sandstone	200-8000
Wet sand	500-5000	Chalk	50-200
Gravel	100-1000	Limestone	500-10 000

Tabla 18.

*Diferentes Correlaciones litológicas según los distintos autores para el SEVI*

<b>Resultado de resistividad SEV1</b>	<b>Correlacion litologica según (Milson &amp; Eriksen, 2011)</b>	<b>Correlacion litologica según (Parasnis, 2012)</b>	<b>Correlacion litologica según(Eve &amp; Keys, 1956)</b>	<b>Litologia Columna Estratigrafica</b>
35.3	Arcillas/Shale/Limolita	Arcilla	Arcilla 16.1 % Agua	Arcillas de la carretera donde se corrio el SEV
814	Areniscas/Conglomerados	Areniscas/ Granito (Erosionado)	Areniscas rio Amarillo 0,86% agua	Triturado de diferentes materiales que se le hecha como material de recevo a la via
32.2	Arcillas/Shale/Limolita	Arcilla	Arcilla 16.1 % Agua	lodolitas rojizas masivas, moteadas de color verde aguamarina (páleosuelos) Paquete potente de areniscas cuarzosas masivas, de grano medio a grueso , con contenido de líticos,color rojiza, mal calibrada y esfericidad media buena cementacion intercaladas de capas de conglomerados de tamaño guijo, mal sorteados, buena redondez y esfericidad media con matriz de arenisca de grano medio
195	Limolitas/Shale	Caliza/Arenisca	Areniscas Rio amarillo > 9,5 % agua	Paquete de arenisca muy finas a finas intercaladas con limolitas rojizas masivas, moteadas de color verde aguamarina (páleosuelos)
97.5	Arcillas/Shale/Limolita	Arcilla/Arenisca	Arcilla < 16.1 % Agua /Areniscas Rio Amarillo 9,5 % agua	

Esto con el fin de obtener información teórica y experimental de los mismos geomateriales en diferentes partes del mundo, ya que las tablas propuestas por los distintos autores son adquiridas y promediadas de diferentes estudios que generalmente se aplican sobre facies de cierta formación de interés para cada autor, si observamos la tabla 17 podemos identificar que las mediciones de resistividad efectuadas por Eve & Keys, en 1956 sobre Areniscas del rio amarillo en el valle colorado, USA. Son las que más coinciden con las medidas de resistividad adquiridas el campo para las Facies litológicas del Segmento C de la columna estratigráfica.

A continuación, se presenta el estimado del Amarre entre la Columna Estratigráfica y el SEV1.

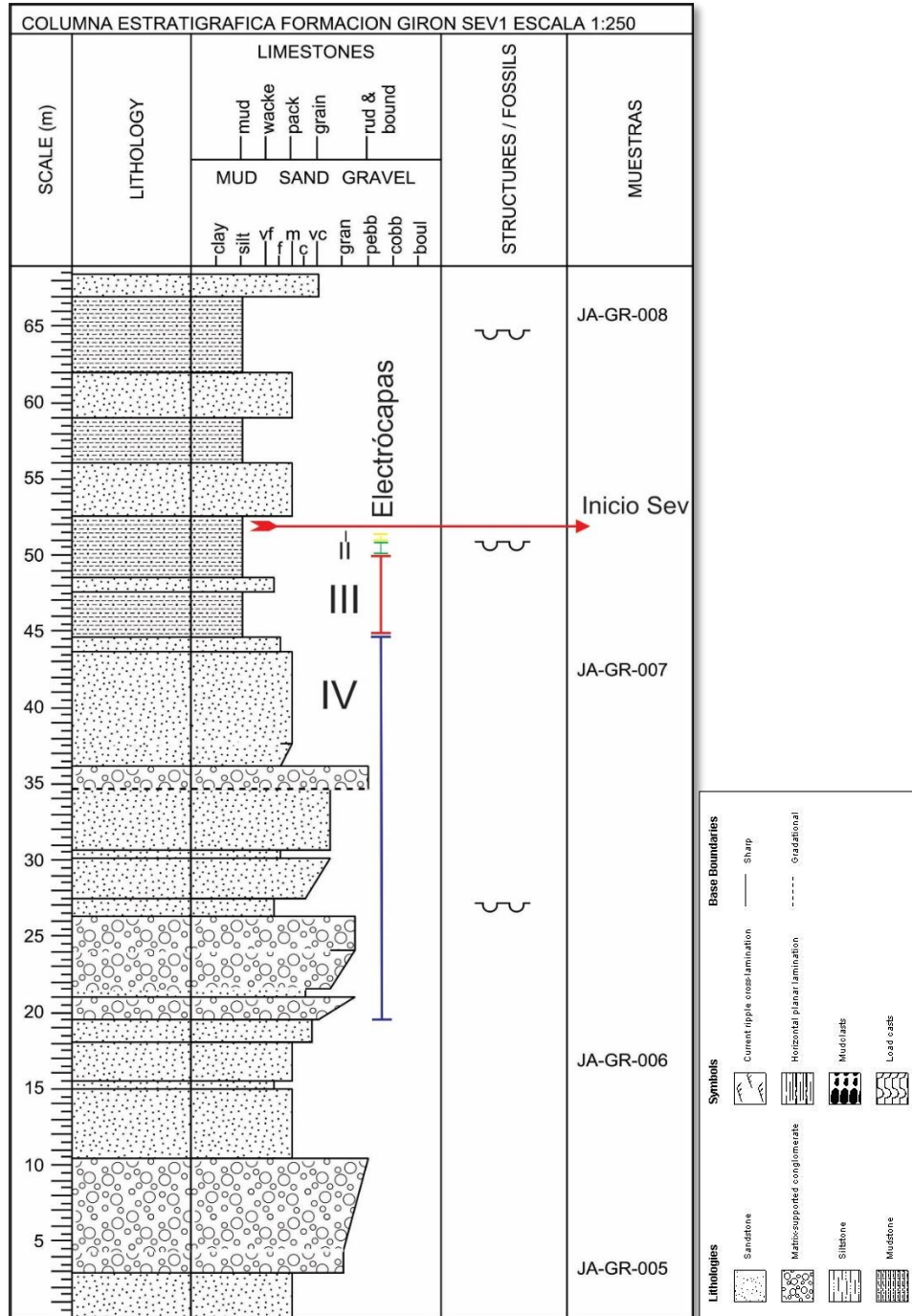


Figura 36. Correlación columna estratigráfica Segmento C - SEV

Gracias a este amarre entre columna y SEV se puede fácilmente identificar 2 Unidades hidrológicas principales: 1, Acuitardo de Arcillas y limolitas rojizas. Y 2 Acuífero de Areniscas gruesas a conglomerados de tamaño guijo moderadamente fracturados.

**U1: Acuitardo de Arcillas y limolitas rojizas.**

Corresponde a capas de 2 a 3 metros de arcillas y limolitas sin fisilidad que se encuentran aflorando en la zona con un rumbo de S45°W y buzando NW45°, la respuesta de resistividad para esta unidad fue de 32,2  $\Omega/m$  y con un espesor de 5,19 m , los limos y las arcillas son materiales que por su textura y estructura se convierten en estratos semipermeables capaces de almacenar mucha agua interna gracias a sus microporos y pero la transmite con mucha dificultad dándole a las capas características hidrológicas de acuitardos.

**U2: Acuífero de Areniscas gruesas a Conglomerados tamaño guijo moderadamente fracturados.**

Corresponde a capas potentes sin laminación moderadamente fracturadas aflorando en la zona con un rumbo de S45°W y buzando NW45°, la respuesta de resistividad para esta unidad fue de 195  $\Omega/m$  y con un espesor de 25,9 m, las areniscas y los conglomerados son materiales que por su textura y estructura se convierten en estratos permeables, aunque almacenan menos agua que las arcillas estos tienen mayor facilidad al trasmitirla dándole a las capas características hidrogeológicas de acuífero.

## 8. Conclusiones.

La zona de estudio se encuentra sometida a una fuerte deformación estructural debido a su cercanía con la falla Suarez. Estos esfuerzos compresivos generan condiciones favorables para el desarrollo de diaclasas y fracturas que mejoran las condiciones hidrológicas de las capas, sin embargo, en el sistema hídrico, pueden significar pérdidas de agua a los acuíferos ya que facilita la percolación de esta por medio de las fisuras.

De la columna estratigráfica se identificaron 3 litofacies 1) Areniscas de grano medio a grueso intercaladas de arenisca muy fina a limos, 2) lodolitas y limolitas con presencia de paleosuelos intercaladas de arenisca muy fina a fina 3) conglomerados tamaño guijo a guijarro con matriz de arena gruesa intercalados de capas de arenisca de grano medio a grueso. Esta se dividió en 3 segmentos diferentes de más antiguo a más nuevo A, B y C. El segmento A de 70,5 metros de espesor, cuya Litofacies predominante es la 1. El segmento B perteneciente a una parte erosionada del afloramiento de 70 m de espesor y el segmento C de 74 m de espesor que presento 2 litofacies hacia la base, la 3 y hacia el tope, la 2, siendo estas últimas sobre las cuales se realizaron las medidas de resistividad presentadas en el SEV1.

El sondeo eléctrico vertical con arreglo electródico Schlumberger, tuvo una abertura total de 120 m lo que permitió obtener respuestas de resistividad de una profundidad estimada de hasta 32,2 m. Más allá de esto el software realiza una interpretación automática e hipotética siguiendo las curvas patrón de Orellana & Mooney (1966), donde se estima el espesor de la última electrocapa como infinito. A parte de esta profundidad, la interpretación geoelectrica no es correlacionable con la columna estratigráfica medida en campo y por lo tanto no se tomó en consideración para realizar el patronaje.

La interpretación geoelectrica realizada por el Software IPI2win generó un Corte geoelectrico que consta de 5 capas, un error de ajuste de 4,03%. La capa I presenta un espesor de 0,4 m y una resistividad de 35.4 Ohm/m y la capa II presenta un espesor de 0,6m y una resistividad de 814 ohm/m. Estas 2 capas se interpretaron como materiales alóctonos del terreno, debido a que el sondeo eléctrico fue realizado sobre una carretera. De igual forma, se obtuvo que dichas resistividades se atribuyen a arcillas y material de triturado conformado por partículas de todos los tamaños que se suele utilizar en este tipo de vías para realizar un mejoramiento de las propiedades físicas del suelo. La capa III presenta un espesor de 5,19 m y una resistividad de 32.2 Ohm/m, la capa VI presenta un espesor de 25,9m y una resistividad de 195 ohm/m, dichas capas se pueden interpretar respectivamente como las unidades hidrogeológicas U1 y U2. Para la última cuyo espesor se asume como infinito la resistividad es 97,5 ohm/m.

Los datos adquiridos mediante la elaboración de la columna estratigráfica y el sondeo eléctrico vertical permitieron definir 2 unidades hidrológicas y sus respectivas respuestas de resistividad para la unidad hidrogeológica 1, Acuitardo de Arcillas y limolitas rojizas su respuesta de resistividad es de 32.2 Ohm/m mientras que para la unidad hidrológica 2, Acuífero de Areniscas gruesas a Conglomerados tamaño guijo moderadamente fracturados su respuesta de resistividad es de 195 ohm/m.

La Parametrización de las litofacies pertenecientes a la Formación Girón corresponden a los resultados realizada en el modelo teórico I, para las condiciones de saturación e influencia estructural en las cuales se realizaron las mediciones del SEV1. La comparación de la litología aflorante y las diferentes respuestas de resistividad estándar adquiridas por varios autores permitió confirmar la interpretación del modelo teórico I, Sin embargo, lo ideal es correlacionar más SEVs

en el municipio con este estudio, esto a su vez ayudaría a identificar los intervalos de resistividad de más facies litológicas o de las mismas en otras condiciones hidrogeológicas.

## 9. Recomendaciones

Se sugiere para próximos trabajos investigativos bajo el mismo marco:

- Efectuar más de un SEV paramétrico en la zona para adquirir mayor densidad de datos, además de poseer más información sobre las otras facies aflorantes de la Formación Girón, todo esto con el fin de caracterizar los sistemas acuíferos y disminuir la incertidumbre actual de los sondeos eléctricos y perforaciones exploratorias en el municipio de Lebrija.
- Realizar modelos 2D y 3D del área de estudio que ayuden a la delimitación de los cuerpos subterráneos, permitiendo así un mayor control por parte de la CDMB en el volumen de agua extraído por las concesiones de agua subterránea para cada acuífero, de manera que se evite la sobreexplotación y posible contaminación de estos.
- Obtener muestras de agua de la Formación Girón para poder caracterizar las propiedades químicas y físicas de esta, ya que los fluidos en la roca juegan un papel importante en sus respuestas de resistividad, siendo esto último considerado fuera de alcance en el presente trabajo investigativo, pero importante para uno futuro.

- Generar información exportable a SIG, que pueda ser sobrepuesta con los demás criterios ambientales que usan los profesionales de este campo encargados del área de aguas subterráneas de la Subdirección de Evaluación y Control Ambiental (SEYCA), con el fin de que estos se puedan utilizar como soporte en los conceptos técnicos elaborados por la CDMB, para dar respuesta a las solicitudes de prospección y exploración de aguas subterráneas.

**Referencias bibliográficas**

- ABEM Instrument AB. (2009). *Instruction Manual Abem Terrameter SAS 1000/4000*. Sundbyberg.
- Alcaldía de Lebrija. (2016). *Mi ecología: Alcaldía de Lebrija, Santander*. Obtenido de Alcaldía de Lebrija Santander: <http://www.lebrija-santander.gov.co/Paginas/PoliticasyEditoriales-ydeActualizacion.aspx>
- Alcaldía de Lebrija. (2016). *Plan de Desarrollo de Lebrija 2016-2019: Ambiente, vida y desarrollo*. Alcaldía de Lebrija, Santander, Lebrija.
- Auge, M. (2008). *Métodos geoeléctricos para la Prospección de agua subterránea*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires.
- C.D.M.B. (2004). *Documento síntesis: Plan de Ordenamiento y Manejo de la Microcuenca Angula – Lajas*. Santander. Bucaramanga: Centro de Documentación CDMB.
- C.D.M.B. (2007). *Plan de ordenamiento y manejo ambiental: subcuenca Lebrija alto*. Corporación Autónoma Regional para la defensa de la Meseta de Bucaramanga, Santander. Bucaramanga: Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga.
- Caballero, V. M., Cruz, L. E., & Castro, E. (2005). *Manual de laboratorio de geología física*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Cantos, J. (1973). *Tratado de geofísica aplicada*. Madrid: IGME.

- Cediel, M. F. (1968). El Grupo Girón, una Molasa Mesozoica de la Cordillera Oriental. *Boletín geológico v.16*.
- Cruz, L. E., & Caballero, V. M. (2007). *Descripción y clasificación de rocas terrígenas por su textura*. Bucaramanga.
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (2001). *Hidrología subterránea*. España: Omega.
- EOT. (2003). *Esquema de Ordenamiento Territorial*. Lebrija: Municipio de Lebrija.
- Estrada, L. A. (2015). *Prospección geoelectrica*. Departamento de Geodesia y topografía, Argentina. Tucumán: Universidad Nacional de Tucuman.
- Eve, A., & Keys, D. A. (1956). *Applied Geophysics in the search for minerals*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Falgas, E. (2007). *Hydrogeophysics as a Multidisciplinary Tool on Aquifer Appraisal*. España: Universidad de Barcelona.
- García, C. A. (2007). *Manual de prácticas de petrología metamórfica*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Geoscan-m Ltd. (2000). *IPI2Win*. Moscú: Universidad Estatal de Moscú.
- Julivert, M. (1993). Los rasgos tectónicos de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de formación de las estructuras. *Boletín Geológico Universidad Industrial de Santander*, 5-102.
- Lakubovskii, I., & Liajov, L. (1980). *Exploración eléctrica*. España: Editorial reverté s.a. Versión española de la 3ra edición rusa.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. Zürich: Swiss Federal Institute of Technology.

Mantilla, L. C. (2003). *Guía de laboratorios de petrología ígnea*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

Milson, J., & Eriksen, A. (2011). *Field Geophysics*. John Wiley And Sons. Ltd.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (06 de Agosto de 2002). Decreto 1729 de 2002. Bogotá, Colombia.

NIST. (2006). *NIST: National Institute of Standards and Technology*. Obtenido de Definición Culombio: <https://www.nist.gov/>

Orellana, E., & Mooney, H. (1966). Master tables and curves for vertical electrical sounding over layered structures. *Madrid interciencia*, 150.

Parasnis, D. (2012). *Principles of applied geophysics*. New York: Springer Science.

Pons, D. (1982). Etude paleobotanique et palynologique de la Formation Giron (jurassique moyencretace inferieur). *Nat. Savantes Brest. Sci.*, 53-78.

Royero, J., & Clavijo, J. (2001). *Mapa geológico generalizado departamento de Santander, memoria explicativa*. Colombia: Ingeominas.

Sánchez, J. (2011). *Prospección geofísica: Sondeos Eléctricos Verticales*. Salamanca: Universidad Salamanca de España. Obtenido de Universidad Salamanca de España.

Schlumberger Limited. (2018). *Schlumberger*. Obtenido de Oilfield Glossary: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/>

Solana, M. (2014). *Comparación de técnicas geofísicas para determinación contaminantes de suelos agrícolas*. Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía.

Teixidó, M. T. (2008). *Prospección geofísica de superficie aplicada a la hidrogeología* . Granada:  
Área de Prospección Geofísica, Instituto Andaluz de de Geofísica (IAG) .