

**CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA 2D MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA,
REGISTRO SP Y RESISTIVO, CASO DE ESTUDIO ZONA MAMATOCO, SANTA
MARTA (MAGDALENA), COLOMBIA.**

ORLANDO RIVEROS RUEDA



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2016

**CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA 2D MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA,
REGISTRO SP Y RESISTIVO, CASO DE ESTUDIO ZONA MAMATOCO, SANTA
MARTA (MAGDALENA), COLOMBIA.**

ORLANDO RIVEROS RUEDA

Trabajo de Grado para optar al título de Geólogo

Director

**JAIRO ALBERTO TORRES PEÑA
Universidad Industrial de Santander**

Tutor

**GERMAN ANDRÉS HERNÁNDEZ RODRÍGUEZ
Giese Pozos e Ingeniería S.A.S**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA**

2016

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mis padres que con el mayor de los esfuerzos me apoyaron incondicionalmente y motivacionalmente han logrado hacer realidad una de mis metas profesionales y que quiero retribuirles todo con acciones que los hagan sentirse privilegiados de tener un hijo profesional, íntegro y con principios. A mi familia; este logro va para todos ustedes que siempre estuvieron pendientes y de una u otra manera me brindó su apoyo.

A todas las personas que de una u otra manera creyeron en mí.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo quiero darle gracias a DIOS por permitirme culminar una más de las etapas de mi vida profesional, quien le agradezco por mantener en alto la esperanza y ganas de luchar a pesar de las adversidades.

A mis padres, que a pesar de todo nunca se rindieron en el momento de apoyarme anímicamente, emocionalmente y profesionalmente; que siempre estuvieron ahí a mi lado pendientes de dar su mano.

A mi hermana, familia y amigos que siempre estuvieron pendientes del proceso y a pesar de ser un momento luchado se culminó satisfactoriamente.

A mi director Jairo Alberto Torres Peña, que con su ocupada vida laboral me dedico el tiempo para apoyarme, guiarme en el proceso para formarme como profesional.

A Giese Pozos e Ingeniería SAS por darme la oportunidad de aplicar los conocimientos aprendidos en mi proceso académico.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. JUSTIFICACIÓN.....	18
2. OBJETIVOS.....	19
2.1 OBJETIVO GENERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3. MARCO TEÓRICO	20
3.1 PROSPECCIÓN GEOLÉCTRICA.....	20
3.2 RESISTIVIDAD	20
3.3 RESISTIVIDAD DE LOS MATERIALES GEOLÓGICOS	21
3.4 MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	23
3.5 TIPOS DE ARREGLOS ELECTRODICOS	24
3.5.1 Configuración Wenner.	25
3.5.2 Configuración Schlumberger.....	26
3.5.3 Configuración Polo-Dipolo.	27
3.5.4 Configuración Dipolo-Dipolo.	28
3.6 TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	29
4. UBICACIÓN GEOGRÁFICA	31
5. MARCO GEOLÓGICO LOCAL	33
5.1 ESTRATIGRAFÍA	33
5.2 DEPÓSITO PALEÓGENO.....	33
5.2.1 Esquistos de Gaira (Eeg).....	33
5.3 DEPÓSITOS CUATERNARIOS.....	36
5.3.1 Depósitos aluviales (Qal).....	37

5.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	37
6. METODOLOGÍA	39
6.1 FASE DE COMPILACIÓN.....	39
6.2 FASE DE CAMPO	39
6.2.1 Adquisición de los datos.	40
6.3 PROCESAMIENTO DE DATOS	41
6.4 INTERPRETACIÓN	42
7. RESULTADOS.....	43
7.1 TOMOGRAFÍA 2D	43
7.1.1 Tomografía resistividad eléctrica 2D N° 1	44
7.1.2 Tomografía resistividad eléctrica 2D N° 2.....	46
7.1.3 Tomografía resistividad eléctrica 2D N° 3.....	48
7.1.4 Tomografía resistividad eléctrica 2D N° 4.....	49
7.1.5 Tomografía resistividad eléctrica 2D N° 5.....	51
7.1.6 Tomografía resistividad eléctrica 2D N° 6.....	53
7.1.7 Tomografía resistividad eléctrica 2D N° 7.....	54
7.2 REGISTRO ELÉCTRICO.....	56
7.3 COMPARACIÓN REGISTRO ELÉCTRICO CON LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 2D	59
7.4 COLUMNA ESTRATIGRÁFICA GENERALIZADA COMPARADA CON LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 2D.....	60
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	61
9. CONCLUSIONES	64
BIBLIOGRAFÍA.....	66
ANEXOS	68

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Rango de resistividades y conductividades reales de algunos minerales, sedimentos, rocas y fluidos.....	22
Figura 2. Dispositivo tetraelectródicos para la medida de la resistividad del suelo	24
Figura 3. Arreglos electródicos en estudios de resistividad y sus factores geométricos.	25
Figura 4. Dispositivo Wenner.....	26
Figura 5. Dispositivo Schlumberger.....	26
Figura 6. Dispositivo Polo-Dipolo.....	27
Figura 7. Dispositivo Dipolo-Dipolo.....	29
Figura 8. Secuencia de mediciones para construir una pseudosección utilizando una configuración en un controlador multielectrodo.....	30
Figura 9. Ubicación geográfica de la zona de trabajo. Imagen satelital donde la línea verde me indica el área de estudio.	32
Figura 10. Mapa Geológico detallado del área de estudio a escala 1:2.000.....	38
Figura 11. Equipo ABEM TERRAMETER Is.....	40
Figura 12. Interpretación Hidrogeológica para el perfil 1 en configuración Wenner. A) Medición Pseudosección Resistividad Aparente, b) Calculo Pseudosección Resistividad Aparente, c) Modelo Inversión Resistividad.....	45
Figura 13. Modelo Geológico del Perfil Tomográfico T1 de la Configuración Wenner.	46
Figura 14. Interpretación Hidrogeológica para el perfil 2 en Configuración Wenner. A) Medición Pseudosección Resistividad Aparente, b) Calculo Pseudosección Resistividad Aparente, c) Modelo Inversión Resistividad.....	47

Figura 15. Modelo Geológico del Perfil Tomográfico T2 de la Configuración Wenner.	47
Figura 16. Interpretación Hidrogeológica para el perfil 3 en Configuración Wenner. A) Medición Pseudosección Resistividad Aparente, b) Calculo Pseudosección Resistividad Aparente, c) Modelo Inversión Resistividad.....	48
Figura 17. Modelo Geológico del Perfil Tomográfico T3 de la Configuración Wenner.....	49
Figura 18. Interpretación Hidrogeológica para el perfil 4 en Configuración Wenner. A) Medición Pseudosección Resistividad Aparente, b) Calculo Pseudosección Resistividad Aparente, c) Modelo Inversión Resistividad.....	50
Figura 19. Modelo Geológico del Perfil Tomográfico T4 de la Configuración Wenner.	50
Figura 20. Interpretación Hidrogeológica para el perfil 5 en Configuración Wenner. A) Medición Pseudosección Resistividad Aparente, b) Calculo Pseudosección Resistividad Aparente, c) Modelo Inversión Resistividad.....	52
Figura 21. Modelo Geológico del Perfil Tomográfico T5 de la Configuración Wenner.	52
Figura 22. Interpretación Hidrogeológica para el perfil 6 en Configuración Wenner. A) Medición Pseudosección Resistividad Aparente, b) Calculo Pseudosección Resistividad Aparente, c) Modelo Inversión Resistividad.....	53
Figura 23. Modelo Geológico del Perfil Tomográfico T6 de la Configuración Wenner.	54
Figura 24. Interpretación Hidrogeológica para el Perfil 7 en Configuración Wenner. A) Medición Pseudosección Resistividad Aparente, b) Calculo Pseudosección Resistividad Aparente, c) Modelo Inversión Resistividad.....	55
Figura 25. Modelo Geológico del Perfil Tomográfico T7 de la Configuración Wenner.	55
Figura 26. Equipo de Registro Eléctrico.....	56
Figura 27. Registro Eléctrico.....	57
Figura 28. Comparación Tomografía eléctrica 2D con el Registro Eléctrico.....	59

Figura 29. Comparación tomografía eléctrica 2D con la columna estratigráfica. ...60

Figura 30. Ubicación Geográfica. Polígono mostrando zona de mayor Interés

(Rojo). La flecha indica el mejor punto para llevar a cabo el sondeo exploratorio. 63

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Georreferenciación tomografías.....	41
Tabla 2. Correlación hidrogeológica.	43

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Columna estratigráfica generalizada a escala 1:200	68
ANEXO B. Registro eléctrico	69

RESUMEN

TITULO: CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA 2D MEDIANTE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA, REGISTRO SP Y RESISTIVO, CASO DE ESTUDIO ZONA DE MAMATOCO, SANTA MARTA (MAGDALENA), COLOMBIA.*

AUTOR: ORLANDO RIVEROS RUEDA **

PALABRAS CLAVES: TOMOGRAFÍA, ADQUISICIÓN, RESISTIVIDAD

DESCRIPCIÓN

Para la Caracterización geofísica 2D de la zona de Mamatoco ubicada en Santa Marta departamento del Magdalena (Colombia) se emplearon los métodos geoelectricos de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), Registro SP y Resistivo para delimitar el acuífero que solventara la escasa presencia del agua. La zona de estudio esta predominada por Depósitos Aluviales del Cuaternario con espesores aproximados de 22.8 m con algunos fragmentos de roca Metamórfica del Paleógeno (Esquistos de Gaira) Meteorizados con espesores aproximados de 9 m; todo esto ha sido influenciado a nivel regional por la Falla Bucaramanga-Santa Marta.

Siete TRE fueron utilizadas para elaborar la caracterización geofísica de la zona de estudio; los perfiles 2D se obtuvieron utilizando el método TRE. Implementando la configuración Wenner se obtuvo una profundidad de investigación promedio de 29.9 metros con unos valores de resistividad que oscilan entre los 4 a 40000 Ohm.m donde la presencia del acuífero está profundizándose con unos valores de resistividades entre 66.6 a 155 Ohm.m. Igual forma se logró determinar la mayor zona saturada hacia el Norte. Aplicando los otros métodos geoelectricos los resultados dan evidencia de la precisión y detalle al momento de integrarse para la caracterización de una zona y su mejor punto para realizar un sondeo exploratorio.

* Proyecto de Grado. Modalidad Práctica Empresarial

** Facultad de Ingeniería Físicoquímica. Escuela de Geología. Director: Jairo Alberto Torres Peña. Tutor: German A. Hernández

ABSTRACT

TITLE: 2D GEOPHYSICAL CHARACTERIZATION, THROUGH ELECTRIC TOMOGRAPHY (SP REGISTER AND RESISTIVE), THE CASE STUDY MAMATOCO ZONE, SANTA MARTA (MAGDALENA), COLOMBIA

AUTHOR: ORLANDO RIVEROS RUEDA**

KEYWORDS: TOMOGRAPHY, ACQUISITION, RESISTIVITY

DESCRIPTION

For 2D geophysical characterization of the Mamatoco area located in Santa Marta, department of Magdalena (Colombia) the geoelectric methods of Electrical Resistivity Tomography (ERT) , Register SP and Resistive were used to delineate the aquifer that will solve the scarcity of water. The study area is predominated by Quaternary alluvial deposits with approximate thicknesses of 22.8 m with some fragments of metamorphic rock of the Paleogene (Gaira Schist), weathered with approximate thickness of 9 m; all this has been influenced regionally by the Bucaramanga-Santa Marta fault.

Seven TRE were used to develop Geophysical characterization of the study area; 2D profiles were obtained using the TRE method. Implementing Wenner configuration, an average research depth of 29.9 was obtained with resistivity values ranging from 4 to 40000 ohm.m, where the presence of the aquifer is deepening with resistivity values between 66.6 to 155 ohm.m. Similarly, it was possible to determine the most saturated area to the North. Applying the other geoelectric methods, the results give evidence of accuracy and detail when integrated to the characterization of an area and its best place to carry out an exploratory survey

* Graduate Project Mode Industry Practice

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Geology. Director: Jairo Alberto Torres Peña. Tutor: German A. Hernández

INTRODUCCIÓN

Los métodos eléctricos de corriente continua son unos de los métodos geofísicos más utilizados para buscar agua subterránea: constituyen un apoyo muy eficiente para el geólogo a fin de determinar la zona más favorable donde se tiene que hacer una perforación y lograr el caudal más importante posible¹.

La tomografía de resistividad eléctrica (TRE) es uno de los pocos métodos que permite reconocer puntualmente las características geológicas definido por perforaciones o pruebas de penetración. Como otros métodos, la tomografía tiene sus ventajas y desventajas. La incuestionable capacidad mínima invasora es la mayor ventaja de este método.²

Este proyecto busca caracterizar geofísicamente 2D con TRE la zona de estudio apoyándose en otros métodos geoelectricos como Registro SP y Resistivo; donde inicialmente se hace el reconocimiento geológico de la zona de estudio para determinar litologías y estructuras en superficie, igualmente se adecuo la zona para iniciar con la adquisición de los datos mediante la TRE que utiliza la configuración Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo donde se inyecta una corriente eléctrica al terreno para que un ordenador fijo recepciones los diferenciales de voltaje de las rocas y así obtener las resistividades aparentes, posteriormente se procesa en el software ©RES2DINV para obtener valores de resistividades reales y ahí si escoger el método con datos más certeros, menor error y mayor profundidad (Wenner) para analizar las resistividades reales y determinar la disposición de las rocas en el subsuelo. El registro eléctrico SP y

¹ BERNARD, J.; LEITE, O. Utilización de métodos de resistividad en los estudios hidrogeológicos. España: Instituto geológico y minero de España (IGME), 2000. Pags. 191-196.

² KIELBASINSKI, K.; MIESZKOWSKI, R. Application of electrical resistivity tomography to detection of geological setting. Geologija. 2008. Vol. 50. Supplement. Pags. S101-S107.

Resistivo es un método directo donde nos da valores de resistividad real a profundidad en contacto con la roca.

Los ripios obtenidos de la perforación se detallaran metro a metro para realizar la columna estratigráfica generalizada a escala 1:200 que se comparó con la TRE llegando a conclusiones realmente positivas en cuanto el nivel de detalle de la Tomografía de Resistividad Eléctrica a pesar de no tener la misma escala. Todos estos métodos geoelectricos dieron un punto georreferenciado donde realizar el sondeo exploratorio, hasta que profundidad perforar y que tipo de agua subterránea explotar.

Por lo cual se plantean una serie de objetivos que se llevaran a cabo para poder realizar la caracterización geológica 2D de la zona de estudio con la mejor calidad de datos, menor porcentaje de error y mayor grado de detalle en los estudios geoelectricos a utilizar.

1. JUSTIFICACIÓN

El presente estudio busca posibles fuentes de agua subterránea para el abastecimiento de áreas afectadas por la escasa presencia de este recurso a partir de una técnica llamada Tomografía de resistividad eléctrica (TRE) debido a que existe un contrato con numero de orden GPI 2016-005 con objeto: contrato civil de obra para realización de un pozo profundo a 60 mts en 8" de diámetro en obra del parque del Agua, en la ciudad de Santa Marta, Magdalena entre Giese Pozos E Ingeniería sas y la Gobernación del Magdalena se enmarca la importancia de satisfacer la necesidad del cliente brindando un servicio de calidad para la prospección y explotación de aguas subterráneas mediante un estudio geoelectrico (TRE, Registro SP y Resistivo) para determinar el mejor punto y profundidad a perforar.

Dentro de las funciones establecidas y delegadas por Giese Pozos e Ingeniería SAS estuvo la adquisición de los datos e interpretación del registro eléctrico de la zona de estudio donde contamos con un personal capacitado de 5 personas (1 geólogo, 3 auxiliares y 1 practicante) que al finalizar todo el proceso se entregaron 7 tomografías eléctricas donde se ubicaron los mejores puntos para realizar la perforación e interpretación del registro eléctrico.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar mediante geofísica 2D el subsuelo en la zona de Mamatoco (parque del agua), Santa Marta, Magdalena.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reconocer geológicamente la zona de trabajo de Mamatoco (Santa Marta) enfocándose en el componente estructural a una escala 1:2.000.
- Adquirir los datos e interpretarlos para determinar la disposición de las rocas en el subsuelo y su mejor punto para realizar la perforación.
- Realizar la interpretación geológica a partir de los datos de la tomografía 2D en la zona de Mamatoco (parque del agua), Santa Marta, Magdalena.
- Comparar la tomografía eléctrica 2D con otro método eléctrico (Resistivo y Potencial Espontaneo) para corroborar la información obtenida en el perfil tomográfico.
- Construir columna estratigráfica generalizada del pozo a partir de los ripios y compararla con la Tomografía eléctrica 2D.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 PROSPECCIÓN GEOLÉCTRICA

La finalidad de una prospección geoelectrica es conocer la forma, composición y dimensiones de estructuras o cuerpos inmersos en el subsuelo a partir de medidas en la superficie. Mediante la prospección geoelectrica conseguimos trazar una cartografía de resistividades aparentes del subsuelo que nos darán información sobre las estructuras que subyacen en él.³

3.2 RESISTIVIDAD

La resistividad eléctrica r de un material describe la dificultad que encuentra la corriente a su paso por él. De igual manera se puede definir la conductividad s como la facilidad que encuentra la corriente eléctrica al atravesar el material. La resistencia eléctrica que presenta un conductor homogéneo viene determinada por la resistividad del material que lo constituye y la geometría del conductor. Para un conductor rectilíneo y homogéneo de sección s y longitud l la resistencia eléctrica es

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (3.2)$$

³ GASULLA, M. Medida de la resistividad eléctrica del subsuelo. En: Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica del subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales. Tesis Doctoral. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería Electrónica, 1999. Pags. 2-1—2-24.

A partir de esta ecuación podemos despejar la resistividad

$$\rho = \frac{R \cdot s}{l} \quad (3.3)$$

La unidad de resistividad en el Sistema Internacional es el ohm por metro ($\Omega \times m$). La conductividad se define como el inverso de la resistividad.⁴

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.4)$$

3.3 RESISTIVIDAD DE LOS MATERIALES GEOLÓGICOS

Los métodos eléctricos de corriente continua son unos de los métodos geofísicos más utilizados para buscar aguas subterráneas: constituyen un apoyo muy eficiente para el geólogo a fin de determinar la zona más favorable donde se tiene que hacer una perforación y lograr el caudal más importante posible.⁵

En efecto, el agua contenida en las capas del subsuelo tiene suficientes sales para asegurar la conducción de la corriente eléctrica aplicada al suelo; la medida de la resistividad eléctrica traduce la aptitud de los terrenos a permitir el paso de la corriente en relación con la presencia del agua. **Ver Figura 1.**

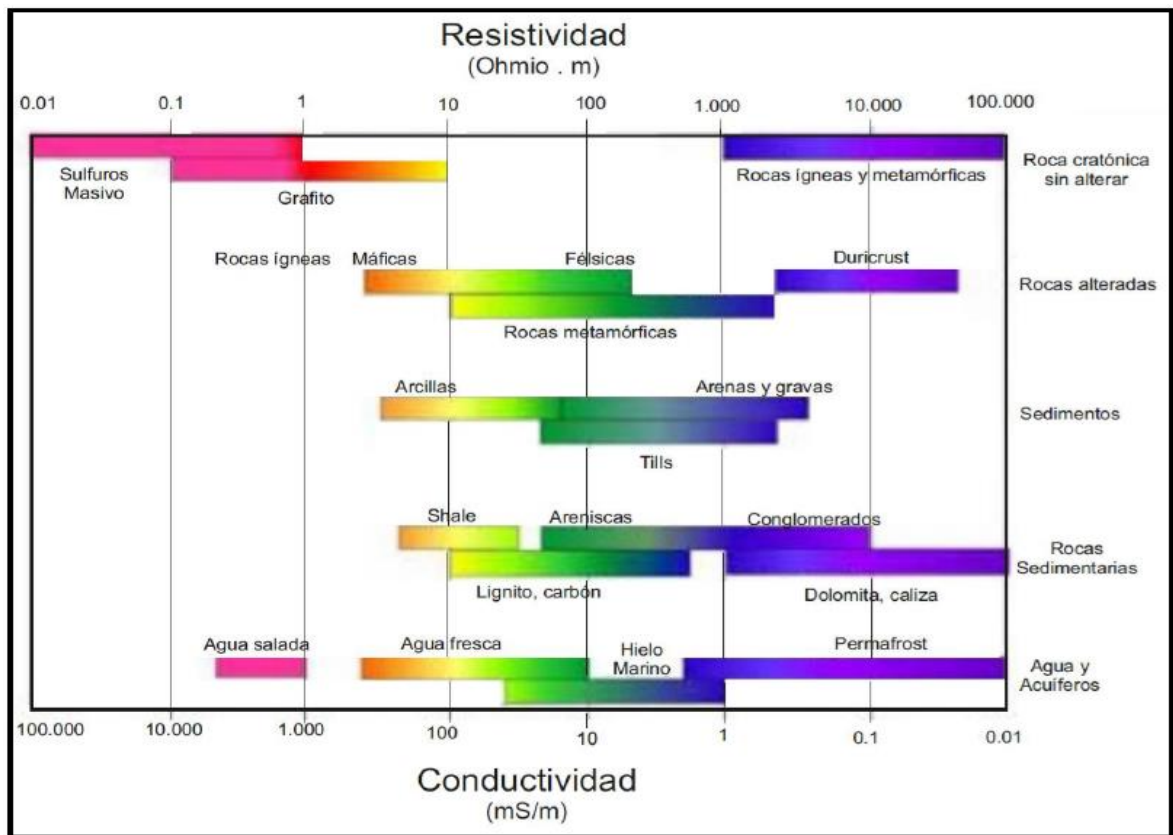
Hay tres factores principales que influyen directamente sobre la resistividad de un terreno:

⁴ Ibid.

⁵ BERNARD, LEITE, Op. Cit.

- 1- La porosidad de la roca: a mayor porosidad, ya sea intrínseca o de fractura, menor resistividad.
- 2- La resistividad del agua: a menor resistividad del agua (más salada), menor resistividad de la roca.
- 3- La arcillosidad del terreno: a mayor arcillosidad, menor resistividad. Una arcilla que constituye un terreno impermeable tiene mucha agua intersticial que hace bajar la resistividad de la roca, pero que no produce caudal.⁶

Figura 1. Rango de resistividades y conductividades reales de algunos minerales, sedimentos, rocas y fluidos



Fuente: SARMIENTO, M.L. Validez de la propiedad física de la resistividad eléctrica como herramienta de prospección de arenas Bituminosas. Caso de estudio: minas la Emilia y Santa Teresa en cercanías del municipio de Pesca, Boyacá, Colombia. 2015

⁶ Ibid.

3.4 MEDIDA DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

La **Figura 2** muestra el principio de medida de la resistividad del suelo: se inyecta una corriente I entre el par de electrodos AB y se mide la tensión DV entre el par de electrodos MN. Si el medio es homogéneo de resistividad r , la diferencia de tensión es⁷:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right) \quad , \quad (3.5)$$

donde AM, AN, BM, BN son las distancias entre electrodos. La resistividad viene dada por la expresión

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I} \quad , \quad (3.6)$$

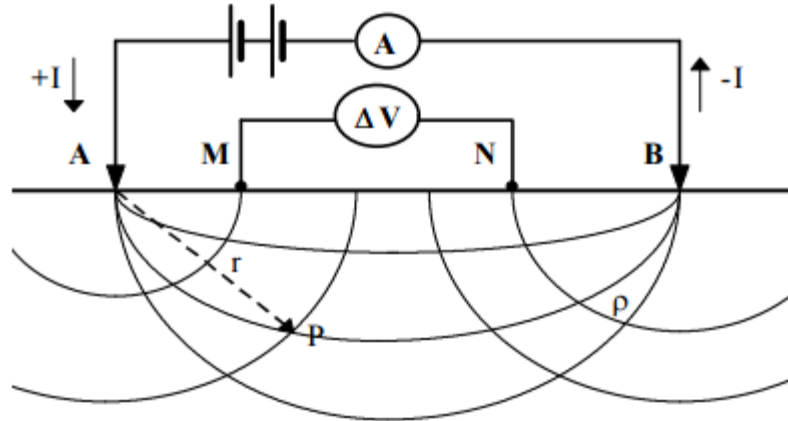
donde

$$k = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad , \quad (3.7)$$

es un factor geométrico que depende exclusivamente de la disposición de los electrodos. De hecho, (3.6) es equivalente a (3.3) pero con un factor geométrico diferente

⁷ GASULLA, Op. Cit.

Figura 2. Dispositivo tetraelectródicos para la medida de la resistividad del suelo.



Fuente: GASULLA, M. Medida de la resistividad eléctrica del subsuelo. En: Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica del subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales. Tesis Doctoral. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería Electrónica, 1999.

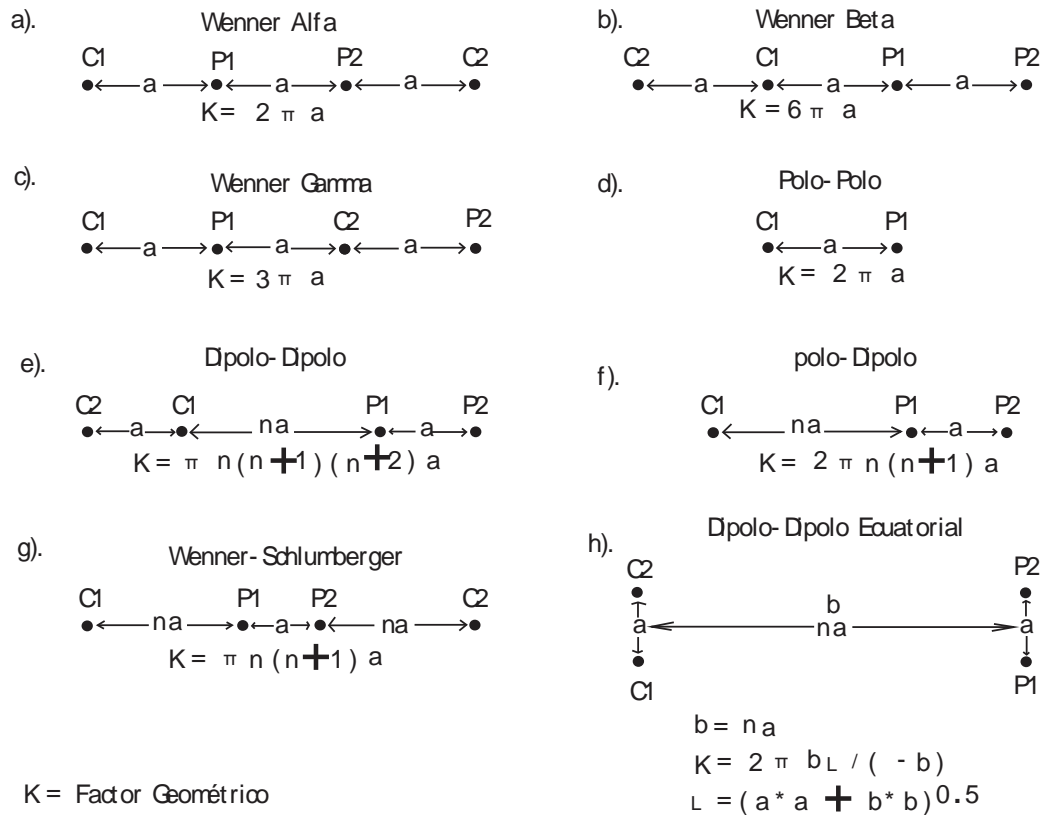
3.5 TIPOS DE ARREGLOS ELECTRODICOS

Los diferentes tipos de arreglos junto con sus factores geométricos son mostrados en la **Figura 3**; estos varían en la posición de los pares de electrodo y la distancia entre ellos⁸. Los dispositivos tetraelectródicos lineales más utilizados son: Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo⁹. El tipo de arreglo electródica a emplear depende del objetivo de la investigación y del tipo de prospección a utilizar. Para este trabajo se empleó la configuración Wenner.

⁸ CADENA, W; Caracterización geoelectrica del subsuelo para la prospección de agua subterránea en el área de MENZULY Campestre, Piedecuesta, Santander, 2015. Pp 31-40.

⁹ GASULLA, Op. Cit.

Figura 3. Arreglos electródicos en estudios de resistividad y sus factores geométricos.

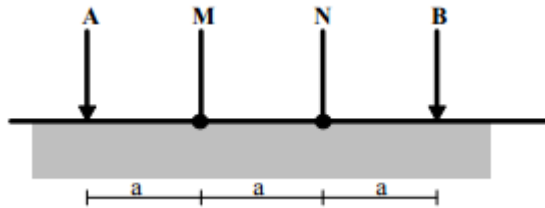


Fuente: Modificado de LOKE, M, H. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies. Practical guide to 2-D and 3-D surveys. 2000. Pags. 1-61.

3.5.1 Configuración Wenner. Los electrodos se disponen equidistantes sobre una línea en el orden AMNB (Figura 4)¹⁰.

¹⁰ Ibid

Figura 4. Dispositivo Wenner



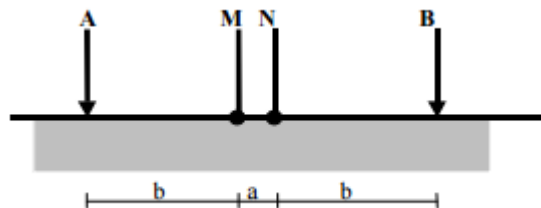
Fuente: GASULLA, M. Medida de la resistividad eléctrica del subsuelo. En: Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica del subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales. Tesis Doctoral. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería Electrónica, 1999.

El factor geométrico del dispositivo se deduce de (3.7)

$$K = 2\pi a \quad (3.8)$$

3.5.2 Configuración Schlumberger. Se trata de una composición simétrica de los electrodos AMNB dispuestos en línea, donde la distancia de los electrodos detectores MN es mucho menor que la de los inyectores AB (Figura 5). En la práctica, $AB > 5MN$.¹¹

Figura 5. Dispositivo Schlumberger



Fuente: GASULLA, M. Medida de la resistividad eléctrica del subsuelo. En: Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica del subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales. Tesis Doctoral. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería Electrónica, 1999.

¹¹ Ibid

El coeficiente del dispositivo en este caso es

$$k = \pi \frac{b(b+a)}{a} \quad (3.9)$$

Si definimos $L = b + a/2$, el factor geométrico se puede expresar como

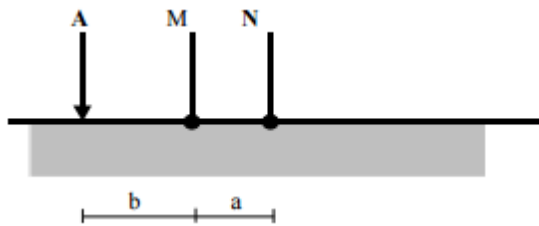
$$k = \pi \left(\frac{L^2}{a} - \frac{a}{4} \right) \quad (3.10)$$

Si la distancia a que separa los electrodos M y N tiende a cero el factor geométrico queda

$$k = \pi \frac{L^2}{a} \quad (3.11)$$

3.5.3 Configuración Polo-Dipolo. En este dispositivo el electrodo B se lleva a una gran distancia (teóricamente en el infinito) de los otros tres (Figura 6.)¹².

Figura 6. Dispositivo Polo-Dipolo



Fuente: GASULLA, M. Medida de la resistividad eléctrica del subsuelo. En: Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica del subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales. Tesis Doctoral. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería Electrónica, 1999.

¹² Ibid

El factor geométrico del dispositivo en este caso es

$$k = 2\pi \frac{b(b+a)}{a} \quad (3.12)$$

Cuando $a \ll b$ este dispositivo es equivalente al semi-Schlumberger. Una variación del dispositivo polo-dipolo se obtiene moviendo uno de los electrodos de potencial, por ejemplo N, a un punto distante (teóricamente al infinito). En este caso el factor geométrico es

$$k = 2\pi b \quad (3.13)$$

que coincide con la expresión del dispositivo Wenner, por lo que también recibe el nombre de dispositivo half-Wenner.¹³

3.5.4 Configuración Dipolo-Dipolo. En la configuración Dipolo-Dipolo (Figura 7) el espaciamiento tanto en los electrodos de corriente como en los de potencial es α , y la distancia entre los puntos medios de cada par es L . por tanto, $L \gg \alpha$.¹⁴

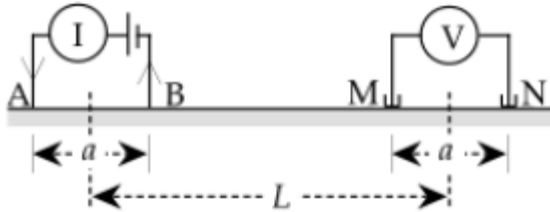
La resistividad aparente esta expresada como:

$$\rho = \frac{\pi V}{1} \left(\frac{L(L^2 - \alpha^2)}{\alpha^2} \right) \quad (3.14)$$

¹³ TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. Applied Geophysics, Cambridge University Press. 1990. British Library.

¹⁴ CADENA, Op. Cit.

Figura 7. Dispositivo Dipolo-Dipolo



Fuente: CADENA, W; Caracterización geoelectrica del subsuelo para la prospección de agua subterránea en el área de Menzuly Campestre, Piedecuesta, Santander, 2015. Pp 31-40.

3.6 TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

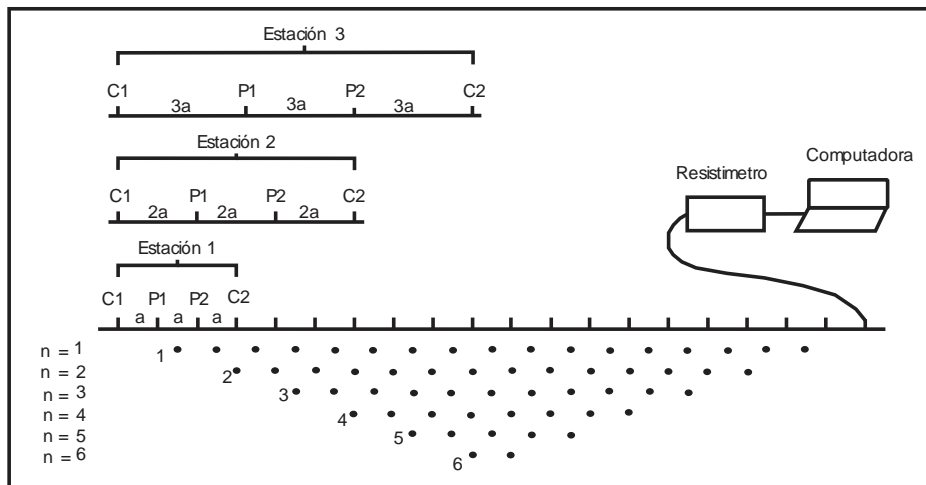
La tomografía de resistividad eléctrica es una combinación de algunos métodos como los sondeos geoelectricos, potencial espontaneo y sección transversal geoelectrica. La corriente directa se utiliza para las mediciones.

Para iniciar todo el proceso, se establecen los electrodos en una línea. La distancia entre los electrodos es constante, cada electrodo está conectado por un cable de múltiples líneas con el controlador principal. El controlador principal consta de un multiplexor y un mero de resistividad eléctrica con la posibilidad de adquisición de datos. Las mediciones de resistividad aparente se hacen para una cierta combinación de electrodos.

Después de las mediciones, la combinación de electrodos ($C_1 C_2 - P_1 P_2$) (**Figura 8**) es modificada automáticamente acorde al esquema previo. El efecto final de la serie de mediciones es una distribución 2D de resistividades aparentes del suelo.

Podemos visualizar los resultados obtenidos, procesarlos e interpretarlos. El resultado final usando el método de inversión es un modelo de las resistividades reales del suelo con una profundidad real.¹⁵

Figura 8. Secuencia de mediciones para construir una pseudosección utilizando una configuración en un controlador multielectrodo.



Fuente: Modificado de Kielbasinski, k.; Mieszkowski, R. Application of electrical resistivity tomography to detection of geological setting. Geologija. 2008. Vol. 50. Supplement. Pags. S101-S107.

¹⁵ KIELBASINSKI, MIESZKOWSKI, Op. Cit.

4. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La zona de Mamatoco está ubicada en la parte NW de Colombia en el departamento del Magdalena sector de la Troncal del Caribe que comunica a Barranquilla con Riohacha, se encuentra limitado al Este por la Parte Occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta la cual afloran rocas ígneo-metamórficas sobre las coordenadas:

X: 11°13'22.08"N

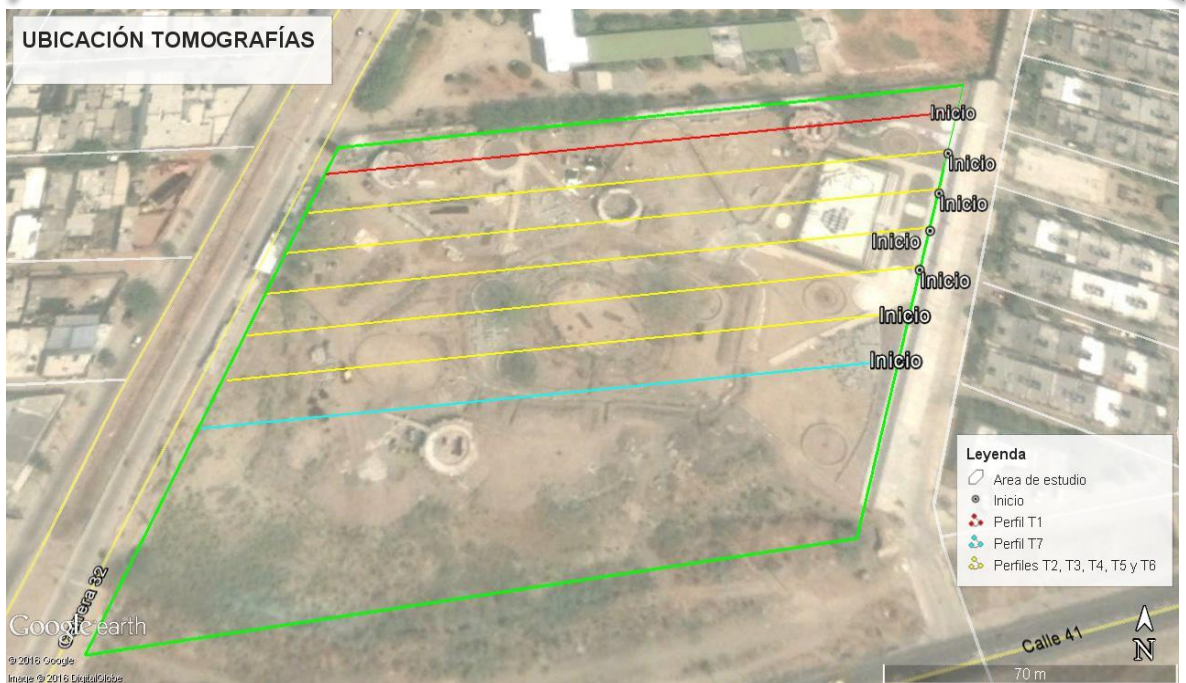
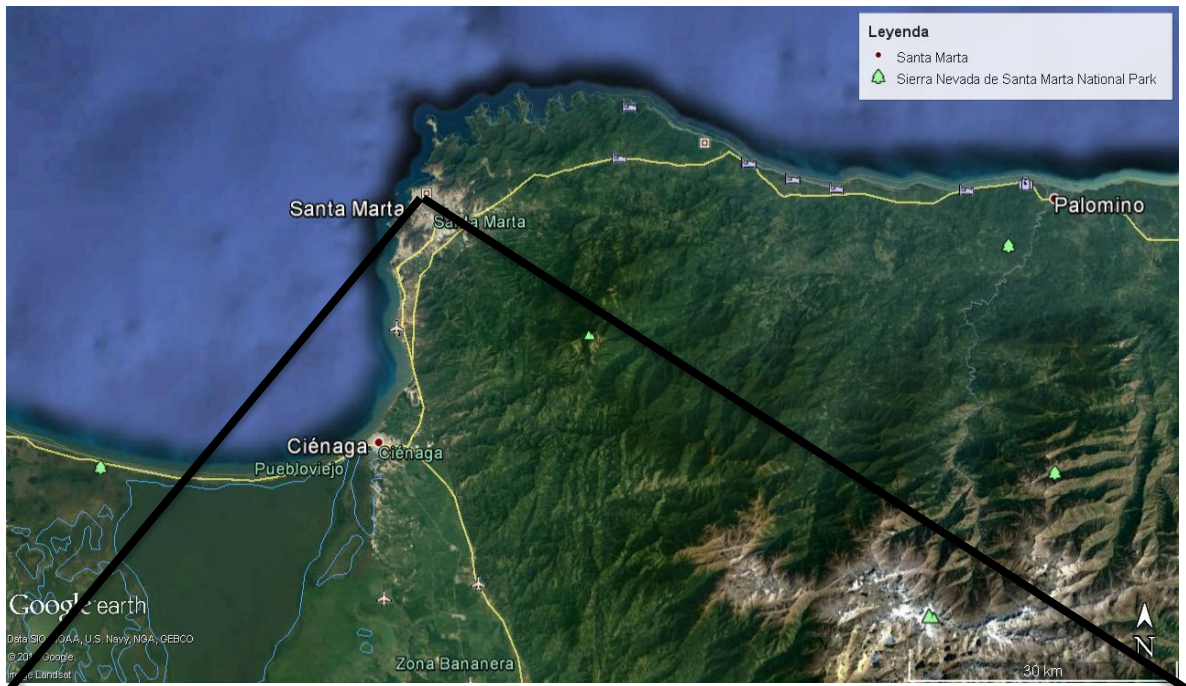
X: 11°13'25.84"N

Y: 74°10'31.26"O

Y: 74°10'23.81"O

Las tomografías se realizaron en un área retrabajada sin construir de 2.6 Hectáreas. **Ver Figura 9.**

Figura 9. Ubicación geográfica de la zona de trabajo. Imagen satelital donde la línea verde me indica el área de estudio.



Fuente: Google Maps Earth.- Mapa Satelital en Vivo

5. MARCO GEOLÓGICO LOCAL

5.1 ESTRATIGRAFÍA

El área de estudio está ubicada en la parte Norte de Colombia en estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta (Magdalena) donde afloran rocas metamórficas de edad Paleógeno y Depósitos Cuaternarios recientes ubicados al occidente de la Sierra Nevada. Estructuralmente hablando a nivel regional la zona está enmarcada por grandes sistemas de fallas como el de Bucaramanga-Santa Marta pero a escala más local el área de interés posee zonas de fracturamiento pero a profundidad.

5.2 DEPÓSITO PALEÓGENO

En este Periodo se encuentra la roca metamórfica Esquistos de Gaira (Eeg) que aflora en la parte Nororiental del área de estudio.

5.2.1 Esquistos de Gaira (Eeg). Definen este cuerpo como el más inferior de las dos unidades de paraesquistos muy similares, que fueron metamorfoseados del mismo grado metamórfico en el mismo tiempo.

Consiste de esquistos anfibólicos densos, negros y micaesquistos. La parte más inferior contiene algunas capas de filita clorita con marcada foliación *crinkled*, con pequeños cristales de cloritoide y espesartita. Las rocas ultramáficas metamorfoseadas y esquistos grafiticos son constituyentes menores. Presenta complicaciones estructurales y cambios metasomáticos relacionados con el

Batolito Complejo de Santa Marta. Los mica esquistos son principalmente esquistos biotíticos, pero algunos contienen moscovita y biotita.¹⁶

Presenta biotita semitransparente metamórfica baja en hierro de un brillo plateado a la superficie. En la quebrada La Aguja afloran esquistos biotíticos con niveles de biotita oscura, de 30 m de espesor, aproximadamente. Los esquistos biotíticos al sur de la quebrada La Aguja buzan hacia el sur, bajo el Neis de Buritaca. Se observa un nivel de esquistos graníticos intercalados con los esquistos biotíticos cerca al contacto con los neises. Los esquistos biotíticos de la quebrada La Aguja en algunos sectores muestran una débil foliación secundaria. Cuarzofeldespáticos y anfibólicos, esquistos grafiticos, anfibolitas esquistosas y de grano fino, rocas ultramáficas y probablemente mármoles. Se reporta la presencia de bauxita en forma representativa en los esquistos que afloran en los cerros de Santa Marta y en las vías a Gaira y El Rodadero. En la serranía de Córdoba se observaron rocas intermedias entre esquistos y neises cuarzo feldespáticos, milonitizados con actinolita-tremolita y clorita como alteración, con estructuras ocelares y pliegues ptigmáticos; hacia el norte, esquistos micáceos y esquistos de color azul verdoso compuestos por cuarzo, feldespato, clorita y moscovita, probablemente granate, que grada a un granitoide rico en cuarzo¹⁷.

Esquistos moscovíticos con granate y delgados cuerpos de neises anfibólicos o anfibolitas bandeadas; hacia el norte, los esquistos se vuelven más cuarzofeldespáticos y podrían considerarse más como una estructura seudonéisica la que originan el cuarzo y la plagioclasa. Están afectados por metasomatismo, deformación metamórfica y estructural, y originan rocas con texturas mixtas en ciertos sectores, como el sector cercano al contacto con el batolito y en la zona de Falla Bucaramanga - Santa Marta. Xenolitos o cuerpos sin absorber de esquistos, se encuentran en la vía a Minca. Es probable que estos

¹⁶ TSCHANZ, C.; JIMENO, A.; CRUZ, J. Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta Area. Preliminary report. Escala 1:200.000. Ingeominas, Informe 1829, 288 p. 1969. Bogota.

¹⁷ HERNÁNDEZ, M. Ingeominas. Geología de las planchas 11 Santa Marta y 18 Ciénaga. 2001. Pags. 27-71.

sectores de esquistos sean partes sin granitizar por acción del Batolito de Santa Marta.¹⁸

Se encuentran cuerpos bastante heterogéneos debido a la acción del sistema de Falla Bucaramanga - Santa Marta, con numerosas fricciones y cizallamiento que dificulta la clasificación de la roca. Se diferencian “fragmentos” de rocas félsicas y máficas, y cuerpos lenticulares o lo que eran bandas desplazadas y alongadas, al punto de no ser posible seguir las en forma continua. Los cuerpos máficos corresponden a anfibolita masiva o presentan intercalaciones delgadas de los félsicos, que corresponden composicional y texturalmente a granodiorita anfibólica y neis anfibólico.

Hacia el oriente se observa una variación en la distribución de bandas y el contenido de micas, y se evidencia un cambio de tipo litológico. La roca presenta micas de coloración gris plateado que le dan un brillo característico con delgadas bandas félsicas, menores a 0,5 cm, cuarzo feldespáticas, irregulares, en una estructura ocelar continua a discontinua que se hacen más elongadas y con terminaciones angulosas en la dirección de la sección.¹⁹

Los esquistos micáceos y anfibólicos se pueden subdividir en tres unidades, una caracterizada por la presencia de grafito, otra por el predominio de biotita y estructuras augen, una tercera por neises - esquistos biotíticos y moscovíticos que le dan a la superficie de la roca un brillo plateado. Los minerales como cuarzo, plagioclasa, anfíboles, en general, son anhedrales de grano muy fino a grueso; la moscovita y la biotita conservan su hábito hojoso²⁰.

¹⁸ TSCHANZ, JIMENO, CRUZ, Op. Cit.

¹⁹ HERNÁNDEZ, Op. Cit.

²⁰ Ibid

Contactos

En algunas áreas estudiadas no fue posible establecer las relaciones estratigráficas de los Esquistos de Gaira, debido a los cambios litológicos, complicaciones estructurales y cambios metasomáticos relacionados con el Batolito Complejo de Santa Marta. El contacto de esta unidad con las Filitas de Taganga no se pudo observar en campo, aunque en algunos sectores ha sido delimitado fotogeológicamente como fallado. El contacto con el Neis de Buritaca ha sido observado en campo y aparentemente es neto²¹.

Edad y correlación

La datación radiométrica de K/Ar, en anfíbol, dio como resultado, para la edad del metamorfismo, $50,3 \pm 8,1$ Ma.²²

Génesis

Los fenómenos de metasomatismo y deformación metamórfica y estructural producen una zona de migmatización dentro de los esquistos, formados por metamorfismo de grado medio.²³

5.3 DEPÓSITOS CUATERNARIOS

La unidad cuaternaria ocupa casi el 80 % del área de estudio donde principalmente son originados por los ríos. Los Depósitos Aluviales (Qal) son descritos a continuación.

²¹ Ibid

²² Ibid

²³ Ibid

5.3.1 Depósitos aluviales (Qal). Son los depósitos formados por los principales ríos. Están constituidos principalmente por gravas y fragmentos de rocas metamórficas e ígneas de las diferentes unidades del basamento cristalino de la Sierra Nevada de Santa Marta. Se ubican a lo largo y ancho del cauce del río en forma de terrazas; los principales depósitos son los formados por el río Sevilla, río Frío. Estos depósitos son diferenciables fotogeológicamente y la superficie de inundación es de 1 km de ancho, aproximadamente. Existen otros depósitos aluviales intermontanos recientes, como el caso del río Aguja, Toribio y Córdoba, sin embargo, no son cartografiables²⁴.

Depósitos aluviales estratificados de carácter arenolimosos se observan el de la quebrada Espíritu Santo, Don Jaca, El Doctor y la quebrada Marinca en la región de Jolonura. Los depósitos fluviales de la Plancha 11 Santa Marta están formados por los conos aluviales, terrazas y depósitos aluviales estratificados de los principales drenajes como Don Jaca, El Doctor, Gaira, Manzanares y Bachicha. En algunos casos, estas acumulaciones se interdigital y forman una cadena continua de abanicos. En la quebrada Espíritu Santo se encuentra un Cuaternario estratificado de arenas y arcillas, hacia la base es más arcillosa y pasa a ser más arenosa, con arenas gruesas de origen polimíctico compuesto por cuarzo y líticos en una matriz arcillosa; es de origen aluvial²⁵.

5.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

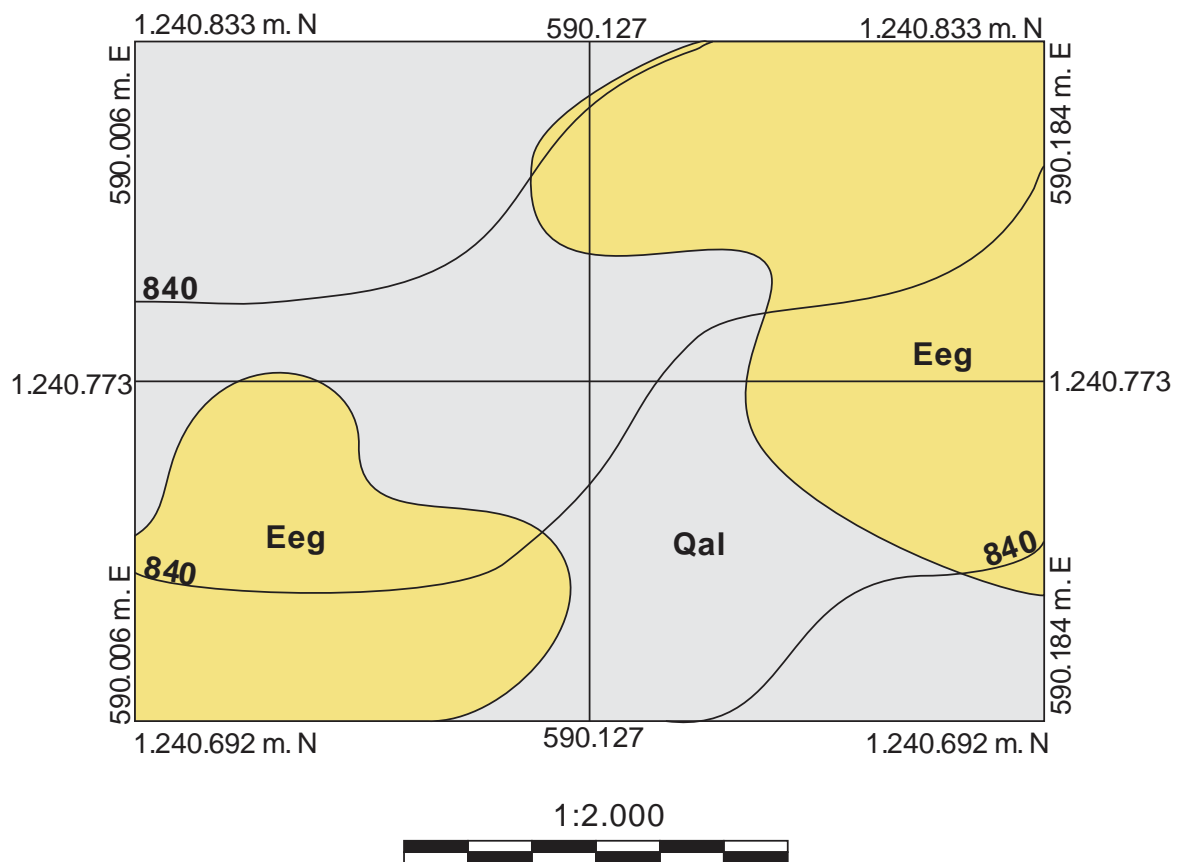
Las principales fallas de la Plancha 11 Santa Marta son de orientación NE. Se observa claramente cómo afectan las filitas y los esquistos; se determinaron fotogeológicamente en su mayor parte, aunque en campo forman zonas de

²⁴ Ibid

²⁵ Ibid

milonitización y cataclasis como en la vía Santa Marta - Rodadero y la vía a Neguanje. Los datos sobre planos y desplazamientos no se pudieron medir en campo, para las estructuras identificadas. Las fallas que afectan la cuarzodiorita del Batolito de Santa Marta, se evidencian por las zonas de milonitización, sin embargo, no se puede determinar el tipo de falla. **Ver Figura 10.**²⁶

Figura 10. Mapa Geológico detallado del área de estudio a escala 1:2.000.



²⁶ Ibid

6. METODOLOGÍA

La metodología que se llevó a cabo en este proyecto consto de 4 fases principalmente:

6.1 FASE DE COMPILACIÓN

En esta fase se realizó la recopilación bibliográfica acerca de la Geología, hidrogeología, hidrogeofísica en artículos, revistas, boletines sacados de la base de datos de la Universidad Industrial de Santander y demás fuentes bibliográficas con el fin de afianzar el conocimiento para el desarrollo de este proyecto. De igual manera esta revisión previa de información me ayudo a reforzar la temática a abarcar en el proyecto.

6.2 FASE DE CAMPO

Esta fase consistió en reconocer geológicamente la zona de estudio, enfocándose en la geología estructural, estratigrafía e hidrogeología, de igual manera se analizaron los diversos factores para la ejecución de la tomografía como área total del predio, topografía del terreno; además, debido a que el área de estudio corresponde a una zona de construcción de un parque lo que debería estar no construido para mejorar la calidad de los datos.

6.2.1 Adquisición de los datos. Se realizaron 7 tomografías de Resistividad Eléctrica paralelas en dirección E-O con las configuraciones Wenner, Schlumberger, Dipolo-Dipolo y Polo-Dipolo donde cada línea media 200 m separadas cada 12 m utilizando un equipo ABEM TERRAMETER Is (**Figura 11**); para esto se utilizaron:

- Ordenador principal.
- 61 Electroodos en acero inoxidable.
- 61 pinzas para conectar los electrodos al cable multielectrodico.
- Cable conector entre el ordenador principal y la fuente de energía.
- 8 juegos cables multielectrodico con un espaciamiento de electrodos cada 20 m.
- Batería de 12 V.

Figura 11. Equipo ABEM TERRAMETER Is



Fuente: Equipo ABEM TERRAMETER Is. ABEM Instrument Manual, 2011

Se geo referenció cada tomografía (**Tabla 1**) usando un GPS Garmin 64s. El tipo de configuración electródica utilizada para cada tomografía fue Wenner, Schlumberger, Dipolo-Dipolo y Polo-Dipolo; pero se enfatizó en el arreglo Wenner porque es muy sensible a cambios de resistividad vertical por lo cual es útil para capas horizontales.

Tabla 1. Georreferenciación tomografías

TOMOGRAFÍA	COORDENADA PUNTO INICIAL		COORDENADA PUNTO FINAL		SEPARACIÓN ELECTRODOS [m]	ORIENTACIÓN	LONGITUD [m]	TIPO DE METODO	FACTOR GEOMETRICO	ERROR [%]	RESULTADO
	LATITUD	LONGITUD	LATITUD	LONGITUD							
T1	11°13'25,90" N	74°10'24,57" O	11°13'25,35" N	74°10'30,22" O	2,5	E-O	200	Wenner	K= 15.73	13.0	Aceptable
T2	11°13'25,45" N	74°10'24,34" O	11°13'24,82" N	74°10'30,29" O	2,5	E-O	200	Wenner	K= 15.73	13.3	Aceptable
T3	11°13'25,17" N	74°10'24,11" O	11°13'24,79" N	74°10'29,98" O	2,5	E-O	200	Wenner	K= 15.73	15.0	Aceptable
T4	11°13'24,63" N	74°10'24,40" O	11°13'24,44" N	74°10'30,18" O	2,5	E-O	200	Wenner	K= 15.73	13.9	Aceptable
T5	11°13'24,34" N	74°10'24,44" O	11°13'24,06" N	74°10'30,18" O	2,5	E-O	200	Wenner	K= 15.73	13.0	Aceptable
T6	11°13'23,66" N	74°10'24,46" O	11°13'23,66" N	74°10'24,46" O	2,5	E-O	200	Wenner	K= 15.73	15.6	Regular
T7	11°13'23,40" N	74°10'24,57" O	11°13'23,31" N	74°10'24,49" O	2,5	E-O	200	Wenner	K= 15.73	9.9	Aceptable

6.3 PROCESAMIENTO DE DATOS

En esta fase se elaboró el procesamiento e interpretación de la tomografía realizada mediante el software ©RES2DINV para la TRE 2D, aplicando el método de inversión donde las resistividades aparentes se convierte en resistividades reales, generando un perfil 2D del subsuelo respectivamente.

Terminada las mediciones de cada TRE, se exporto desde el ordenador principal los archivos en .DAT para el procesamiento en el software, en el cual se caracterizaron los números de iteraciones, extermino de puntos malos para obtener un perfil con calidad.

6.4 INTERPRETACIÓN

En esta fase se realizó la interpretación detallada de cada tomografía de resistividad eléctrica para establecer los diferentes tipos de rocas y fluidos presentes en el subsuelo con el fin de determinar la mejor zona para la captación de agua subterránea.

7. RESULTADOS

7.1 TOMOGRAFÍA 2D

El proceso de inversión de datos de resistividad aparente obtenidos en la campaña de campo para la TRE realizada en el predio, se realizó usando el software ©RES2DINV. Se personalizaron los parámetros: coeficiente de amortiguamiento (λ) inicial y mínimo, rango de resistividad posible, razón entre el filtro vertical y lateral, método para el cálculo de resistividades aparentes, tipo de malla para la construcción del diagrama de bloques, raíz cuadrática de los errores mínima, número de iteraciones, modalidad de solución de mínimos cuadrados y metodología para el cálculo de la matriz Jacobiana; parámetros que fueron escogidos teniendo en cuenta la calidad de los datos, cantidad de datos, hipótesis de la distribución litológica del área y sugerencias²⁷:

Las conductividades eléctricas medida en el agua subterránea y a partir de los trabajos realizados de geoelectrónica para aguas subterráneas en diferentes partes del país y los datos del inventario o reconocimiento de aljibes y litologías de la zona, se interpretó el modelo de distribución de resistividad y se proponen la tabla de resultados de la Tomografía eléctrica 2D para el predio. Ver **Tabla 2**.

Tabla 2. Correlación hidrogeológica.

RESISTIVIDAD (OHM)	CORRELACIÓN HIDROGEOLÓGICA
< -11	Rocas de grano Fino granulares (Arcillas)
11-17	Rocas de grano Fino granulares (Arcillas y Limos)
17-26	Rocas de grano Fino granulares (Arcillas y Limos)

²⁷ LOKE, Op. Cit.

RESISTIVIDAD (OHM)	CORRELACIÓN HIDROGEOLÓGICA
26-39	Rocas de grano Fino granulares Limos; Saprolito Limoso Saturado (?)
39-59	Suelo Limoso; Arenas y limos Saturados, Saprolito areno-limoso Saturado (?)
59-88	Suelo Arenoso; Arenas Finas Saturadas; Saprolito areno-limoso saturado, Roca muy fracturada Saturado
88-133	Suelo Arenoso, Saprolito limoso Seco; Arenas medias saturadas; Saprolito con poca matriz, Roca muy fracturada, Saturada.
133-199	Suelo Arenoso, Arenas gruesas saturadas, Saprolito arenoso saturado con poco matriz, roca muy fracturada, saturada.
199-299	Suelo arenoso seco; Arenas y gravas saturadas, Saprolito limoarenoso seco, Roca muy fracturada, saturada (?)
299-449	Gravas y arenas saturadas; Saprolito areno -limoso seco; Roca fracturada, saturada (?)
449-674	Suelos secos, Arenas secas, Gravass saturadas, Roca muy poco fracturada, Saturada (?)
674-1012	Rocas superficiales secos; Roca Fracturada
1012-1518	Rocas superficiales secos; Roca poco Fracturada
1518-2278	Rocas superficiales secos; Roca muy poco Fracturada
2278-3417	Rocas superficiales secos; Roca compacta, diaclasas cerradas.
3417-5125	Roca compacta sin diaclasamiento
5125-7688	Roca Compacta.

En cada uno de los perfiles se hace la interpretación geológica y su respectiva correlación hidrogeológica, como también en el Perfil 2 se propone la ubicación de un sondeo exploratorio el cual muestra sobresalientes condiciones para llevar a cabo una perforación en búsqueda de capas saturadas de aguas subterráneas a partir de los 12 m.

7.1.1 Tomografía resistividad eléctrica 2D N° 1

PERFIL 1

Para el perfil T1 la primer capa con un espesor que oscila de 0 a 0.625 m con una resistividad de 4.63 Ohm.m podría estar asociado a unas arcillas, en la segunda

capa con un espesor de 12 m con una resistividad de 205 Ohm.m podría estar asociado a una arena seca con algunos cantos de roca dura hacia el final de la línea y en la tercera capa con un espesor de 17.9 m con una resistividad de 79.4 Ohm.m podría estar asociado a unas arenas permeables saturadas. **Ver Figura 12.**

A partir del arreglo de Wenner que muestra los contornos horizontales se generó el modelo geológico del perfil T1 donde se observó depósitos Aluviales con algunos fragmentos de roca Metamórfica (Esquistos de Gaira). **Ver Figura 13.**

Figura 12. Interpretación Hidrogeológica para el perfil 1 en configuración Wenner. A) Medición Pseudosección Resistividad Aparente, b) Calculo Pseudosección Resistividad Aparente, c) Modelo Inversión Resistividad.

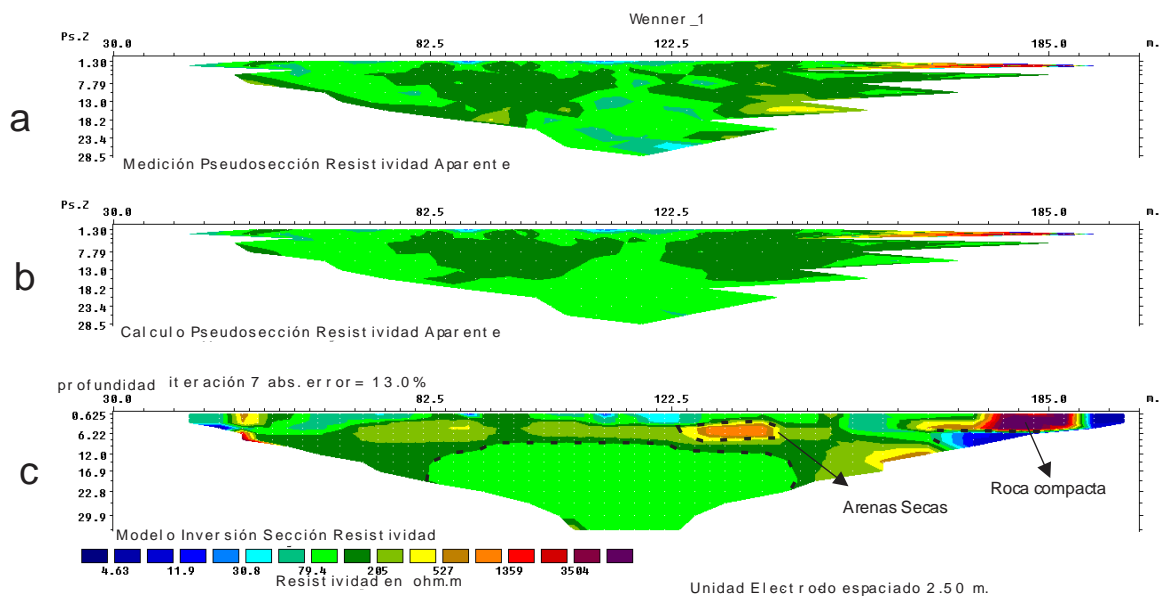
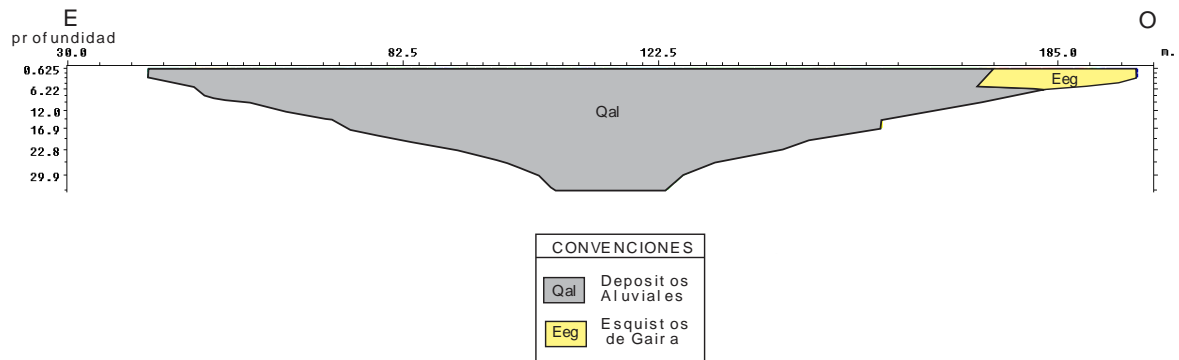


Figura 13. Modelo Geológico del Perfil Tomográfico T1 de la Configuración Wenner.



7.1.2 Tomografía resistividad eléctrica 2D N° 2

PERFIL 2

Para el perfil T2 la primer capa con un espesor de 5 m con una resistividad de 15.2 Ohm.m podría estar asociado a unas arcillas, en la segunda capa con un espesor de 7 m con una resistividad que oscila de 276 a 878 Ohm.m podría estar asociado a una arena seca con algunos cantos de roca y en la tercera capa con un espesor de 17.9 m con una resistividad de 86.6 Ohm.m podría estar asociado a unas arenas permeables saturadas. **Ver Figura 14.**

A partir del arreglo de Wenner que muestra los contornos horizontales se generó el modelo geológico del perfil T2 donde se observó depósitos Aluviales con algunos fragmentos de roca Metamórfica (Esquistos de Gaira) y algunas estructuras de fracturamiento. **Ver Figura 15.**

Figura 14. Interpretación Hidrogeológica para el perfil 2 en Configuración Wenner. A) Medición Pseudosección Resistividad Aparente, b) Calculo Pseudosección Resistividad Aparente, c) Modelo Inversión Resistividad.

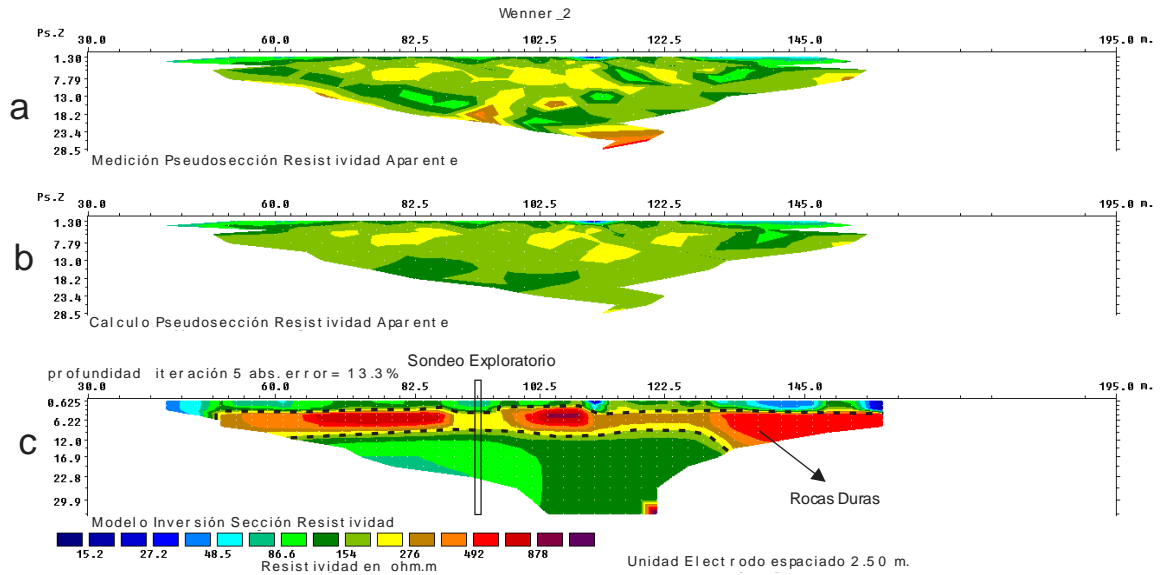
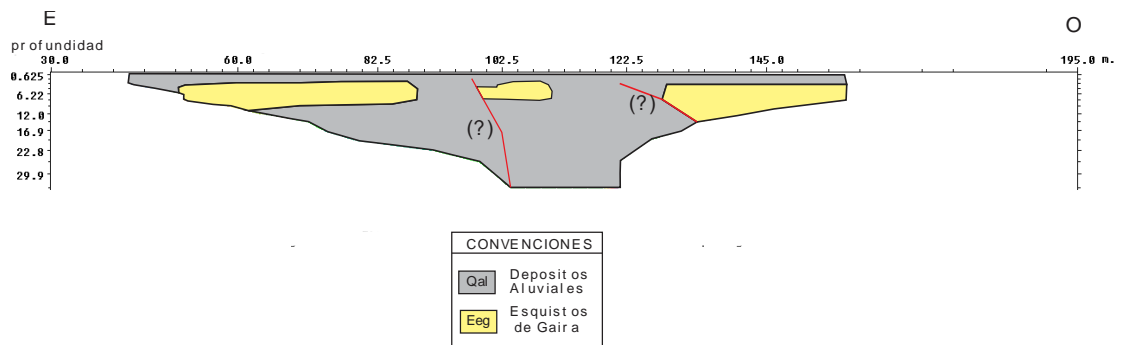


Figura 15. Modelo Geológico del Perfil Tomográfico T2 de la Configuración Wenner.



7.1.3 Tomografía resistividad eléctrica 2D N° 3

PERFIL 3

Para el perfil T3 la primer capa con un espesor de 3 m con una resistividad de 5.12 Ohm.m podría estar asociado a unas arcillas, en la segunda capa con un espesor que oscila de 9 m al inicio a 26 m al final de la línea con una resistividad de 364 a 2005 Ohm.m podría estar asociado a una arena seca con algunos cantos de roca dura hacia el final de la línea y en la tercera capa con un espesor de 17.9 m con una resistividad de 66.2 Ohm.m podría estar asociado a unas arenas permeables saturadas. **Ver Figura 16.**

A partir del arreglo de Wenner que muestra los contornos horizontales se generó el modelo geológico del perfil T3 donde se observó depósitos Aluviales con algunos fragmentos de roca Metamórfica (Esquistos de Gaira). **Ver Figura 17.**

Figura 16. Interpretación Hidrogeológica para el perfil 3 en Configuración Wenner. A) Medición Pseudosección Resistividad Aparente, b) Calculo Pseudosección Resistividad Aparente, c) Modelo Inversión Resistividad.

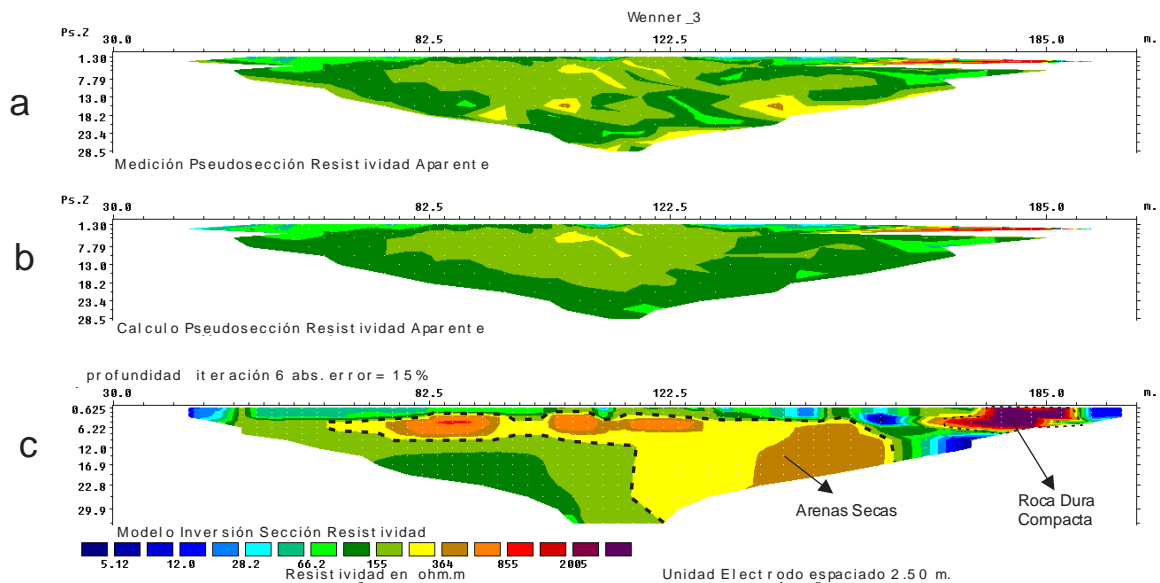
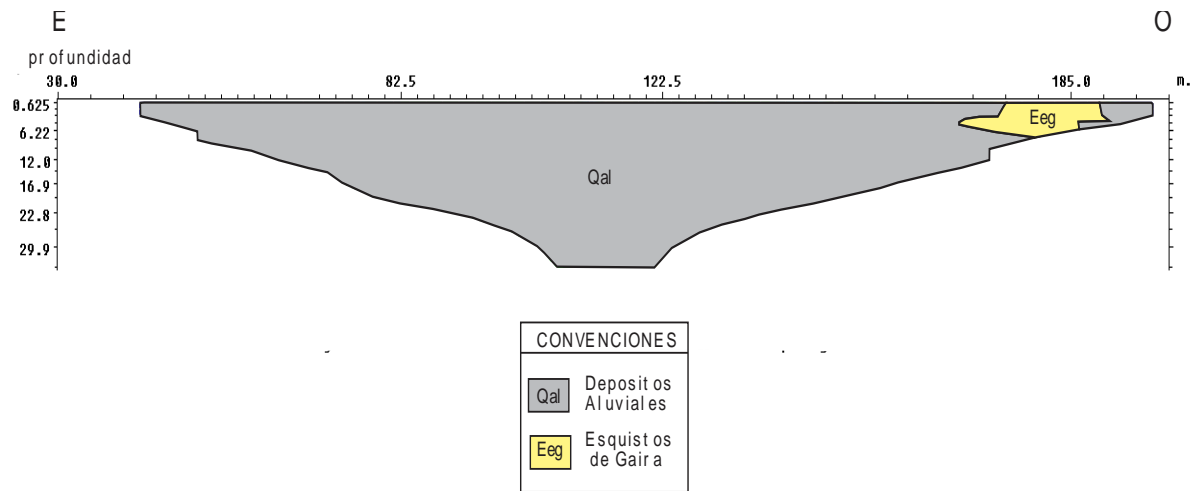


Figura 17. Modelo Geológico del Perfil Tomográfico T3 de la Configuración Wenner.



7.1.4 Tomografía resistividad eléctrica 2D N° 4

PERFIL 4

Para el perfil T4 la primera capa con un espesor de 6 m con una resistividad de 14.7 Ohm.m podría estar asociado a unas arcillas y hacia el final de la línea una roca dura compacta, en la segunda capa con un espesor de 10.9 m con una resistividad de 163 a 810 Ohm.m podría estar asociado a una arena seca con algunos cantos de roca dura hacia el final de la línea y en la tercera capa con un espesor de 13.9 m con una resistividad de 73.1 Ohm.m podría estar asociado a unas arenas permeables saturadas. **Ver Figura 18.**

A partir del arreglo de Wenner que muestra los contornos horizontales se generó el modelo geológico del perfil T4 donde se observó depósitos Aluviales con algunos fragmentos de roca Metamórfica (Esquistos de Gaira). **Ver Figura 19.**

Figura 18. Interpretación Hidrogeológica para el perfil 4 en Configuración Wenner. A) Medición Pseudosección Resistividad Aparente, b) Calculo Pseudosección Resistividad Aparente, c) Modelo Inversión Resistividad.

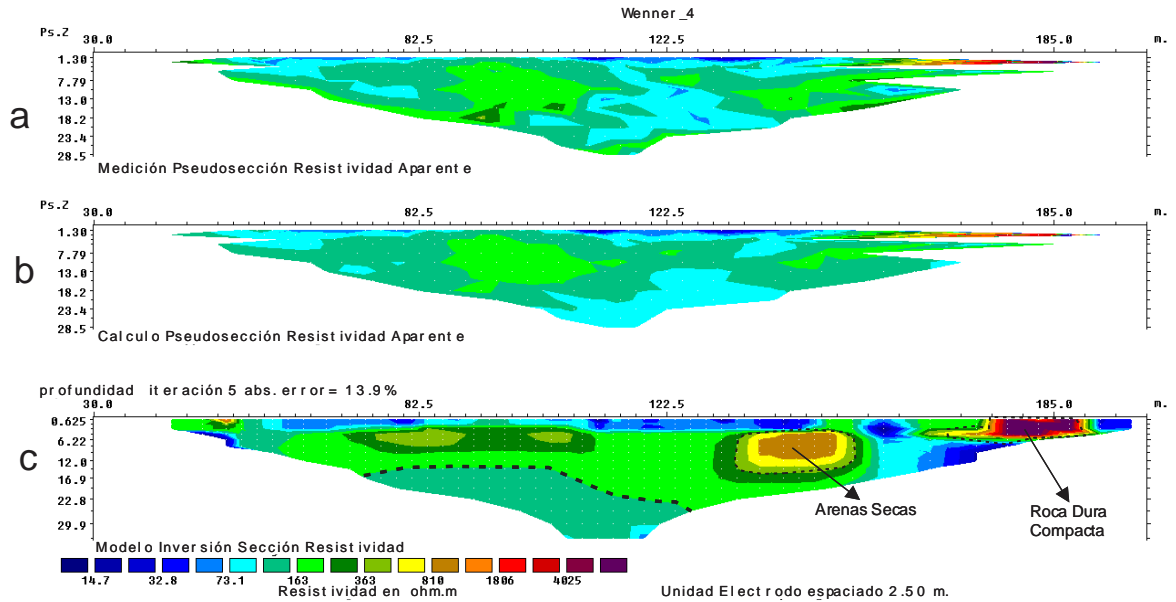
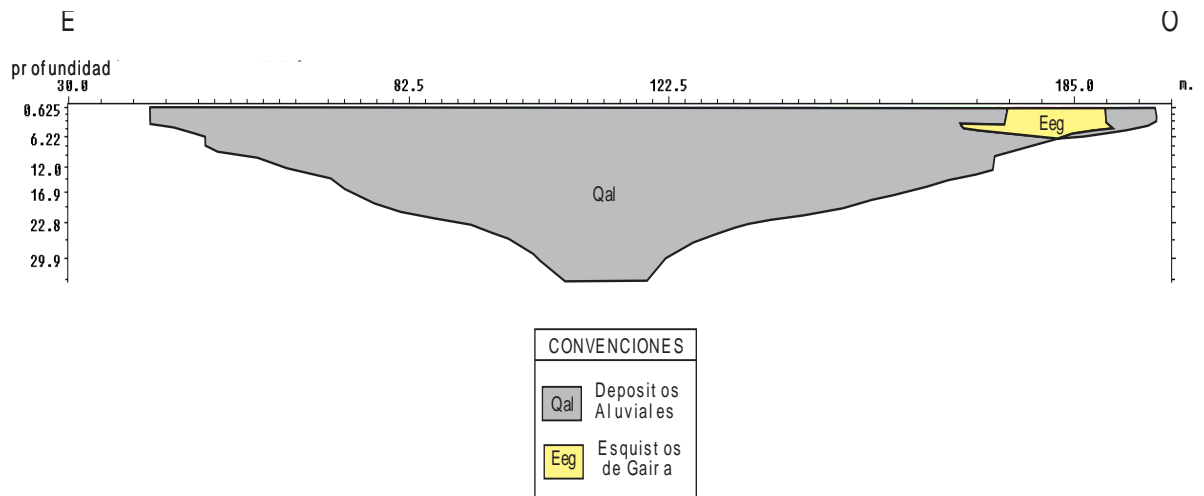


Figura 19. Modelo Geológico del Perfil Tomográfico T4 de la Configuración Wenner.



7.1.5 Tomografía resistividad eléctrica 2D N° 5

PERFIL 5

Para el perfil T5 la primer capa con un espesor de 6 m con una resistividad de 4.63 a 3504 Ohm.m podría estar asociado a unas arcillas con canto de roca dura compacta al final de la línea, en la segunda capa con un espesor que oscila de 9 m con una resistividad de 205 Ohm.m podría estar asociado a una arena seca con algunos cantos de roca dura hacia el final de la línea y en la tercera capa con un espesor de 17.9 m con una resistividad de 79.4 Ohm.m podría estar asociado a unas arenas permeables saturadas. **Ver Figura 20.**

A partir del arreglo de Wenner que muestra los contornos horizontales se generó el modelo geológico del perfil T5 donde se observó depósitos Aluviales con algunos fragmentos de roca Metamórfica (Esquistos de Gaira). **Ver Figura 21.**

Figura 20. Interpretación Hidrogeológica para el perfil 5 en Configuración Wenner. A) Medición Pseudosección Resistividad Aparente, b) Calculo Pseudosección Resistividad Aparente, c) Modelo Inversión Resistividad.

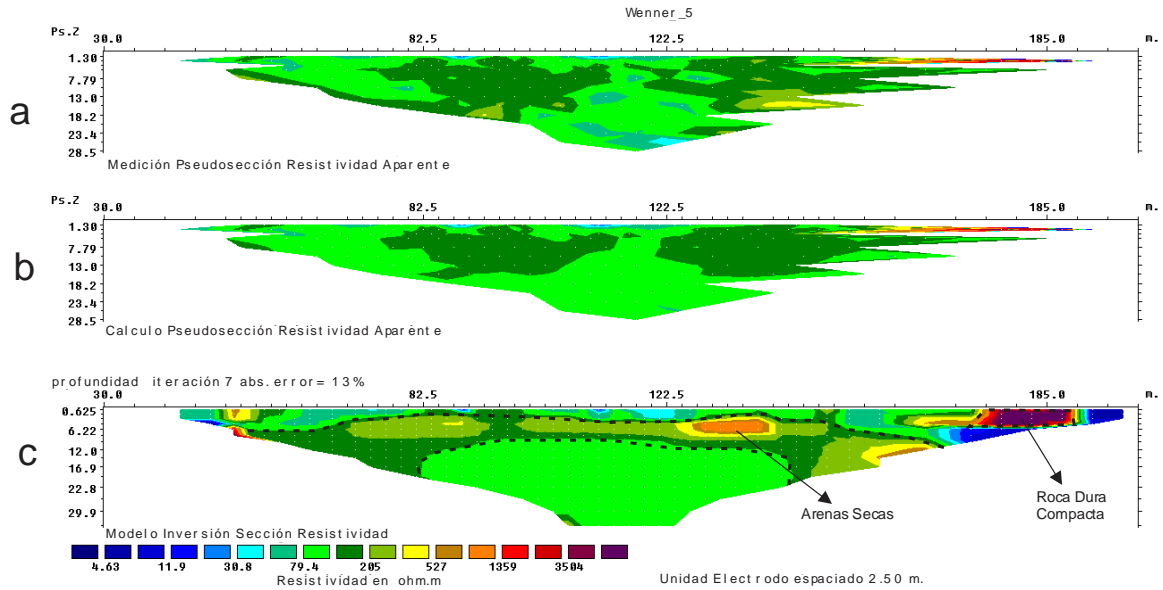
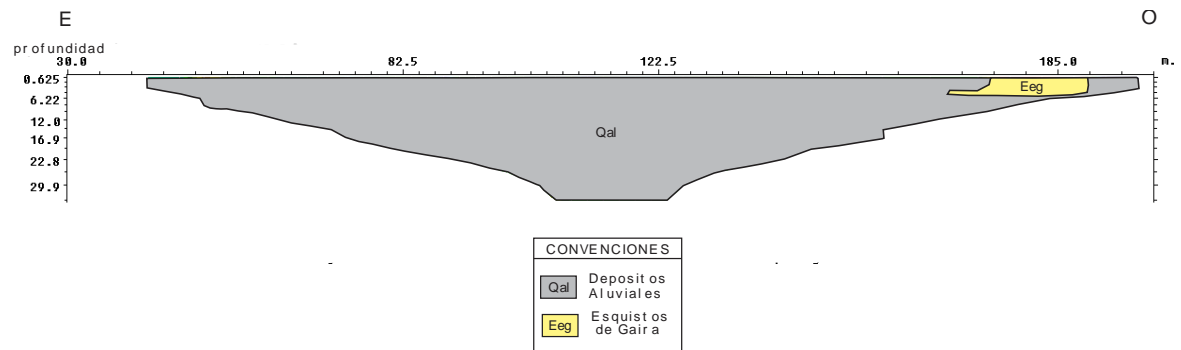


Figura 21. Modelo Geológico del Perfil Tomográfico T5 de la Configuración Wenner.



7.1.6 Tomografía resistividad eléctrica 2D N° 6

PERFIL 6

Para el perfil T6 la primer capa con un espesor de 3 m con una resistividad de 4.41 Ohm.m podría estar asociado a unas arcillas, en la segunda capa con un espesor 13.9 m con una resistividad de 120 a 448 Ohm.m podría estar asociado a una arena seca con algunos cantos de roca dura hacia el inicio de la línea y en la tercera capa con un espesor de 13 m con una resistividad de 80 Ohm.m podría estar asociado a unas arenas permeables saturadas. **Ver Figura 22.**

A partir del arreglo de Wenner que muestra los contornos horizontales se generó el modelo geológico del perfil T6 donde se observó depósitos Aluviales con algunos fragmentos de roca Metamórfica (Esquistos de Gaira). **Ver Figura 23.**

Figura 22. Interpretación Hidrogeológica para el perfil 6 en Configuración Wenner. A) Medición Pseudosección Resistividad Aparente, b) Calculo Pseudosección Resistividad Aparente, c) Modelo Inversión Resistividad.

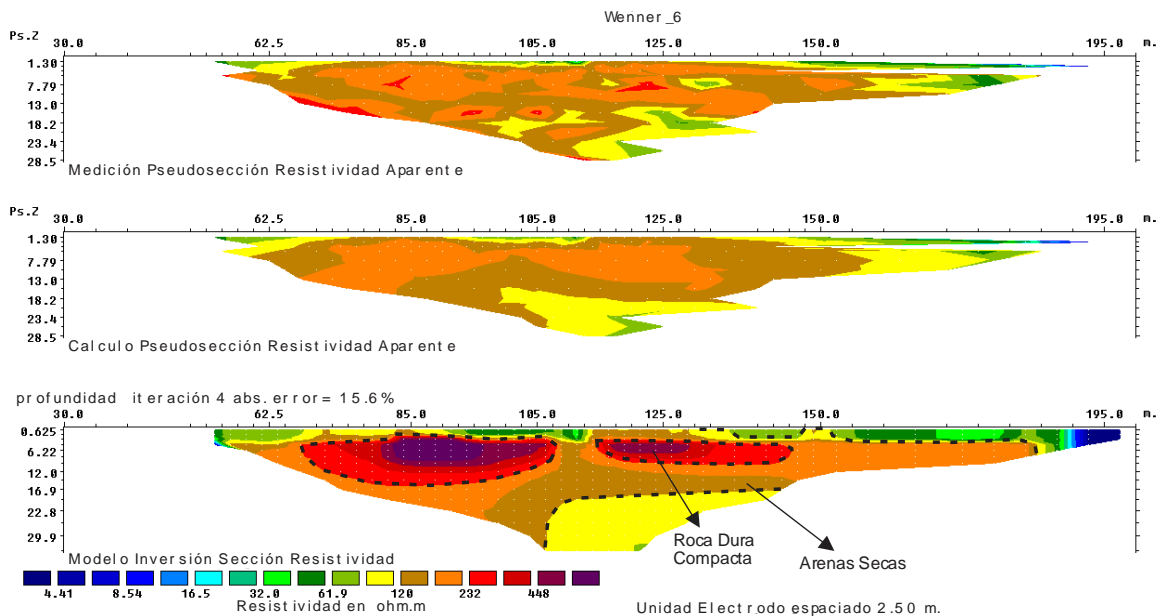
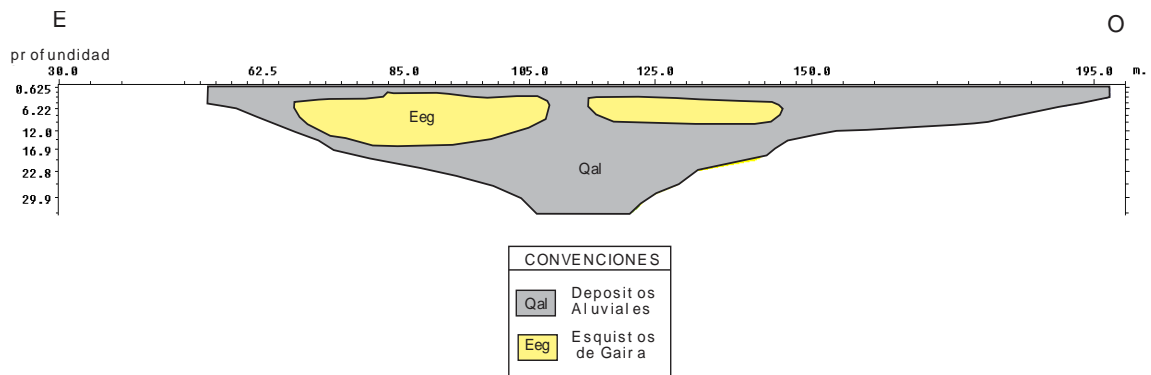


Figura 23. Modelo Geológico del Perfil Tomográfico T6 de la Configuración Wenner.



7.1.7 Tomografía resistividad eléctrica 2D N° 7

PERFIL 7

Para el perfil T7 la primer capa con un espesor de 3 m con una resistividad de 5.19 Ohm.m podría estar asociado a unas arcillas, en la segunda capa con un espesor de 9 m con una resistividad de 951 a 12878 Ohm.m podría estar asociado a una arena seca con algunos cantos de roca dura hacia el inicio de la línea y en la tercera capa con un espesor de 17.9 m con una resistividad de 70.3 Ohm.m podría estar asociado a unas arenas permeables saturadas. **Ver Figura 24.**

A partir del arreglo de Wenner que muestra los contornos horizontales se generó el modelo geológico del perfil T7 donde se observó depósitos Aluviales con algunos fragmentos de roca Metamórfica (Esquistos de Gaira). **Ver Figura 25.**

Figura 24. Interpretación Hidrogeológica para el Perfil 7 en Configuración Wenner. A) Medición Pseudosección Resistividad Aparente, b) Calculo Pseudosección Resistividad Aparente, c) Modelo Inversión Resistividad.

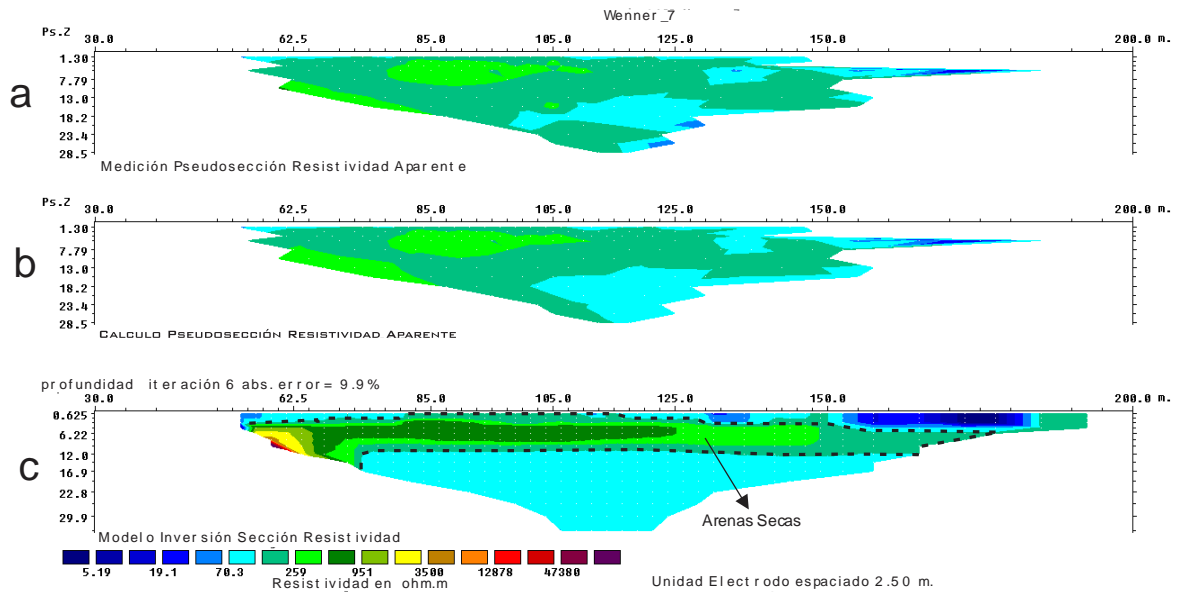
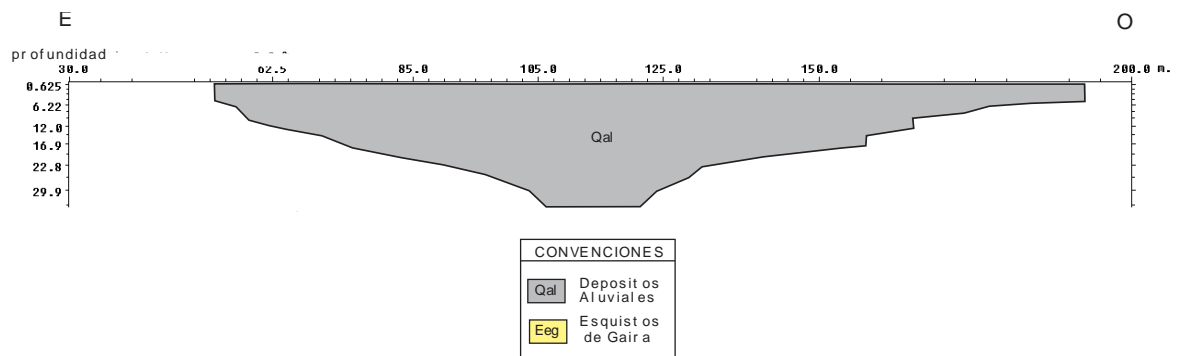


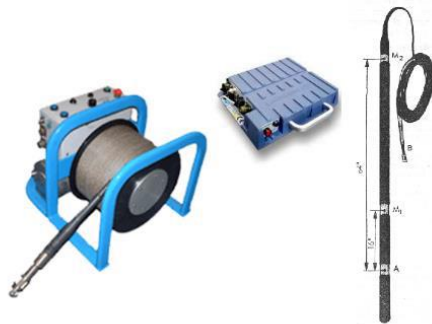
Figura 25. Modelo Geológico del Perfil Tomográfico T7 de la Configuración Wenner.



7.2 REGISTRO ELÉCTRICO

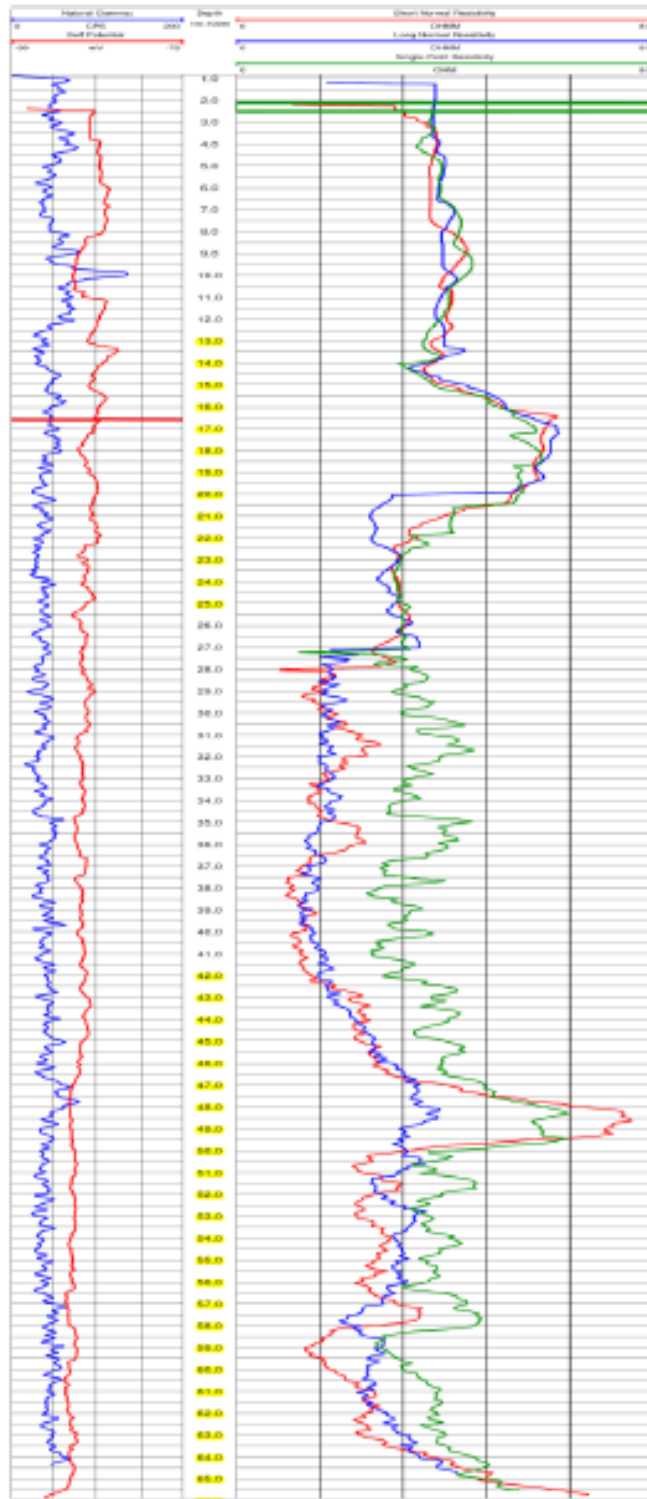
Para la realización del registro eléctrico se utilizó un equipo computarizado **MICROLOGGER** y una sonda eléctrica **ELXG 7067** de **ROBERTSON GEOLOGGING** (Ver **Figura 26**), que obtiene los perfiles de Resistividad Normal Corta y Larga, Resistividad Puntual, Potencial Espontáneo y Rayos Gamma. Ver **figura 27**.

Figura 26. Equipo de Registro Eléctrico.



Fuente: Equipo de Registro Eléctrico. Empresa ROBERTSON GEOLOGGING. Disponible en: <http://www.geologging.com/>

Figura 27. Registro Eléctrico.



El análisis del registro eléctrico se realizó a partir del Gamma Natural a una escala de 0-200 CPS, Potencial espontaneo a una escala de -99 a -78 mV y el Resistivo largo a una escala de 0-80 Ohm.m tomando como punto de partida el metro 16 que es donde empieza la sonda a funcionar en contacto con el agua. En pozo se ubicaron filtros que son los que salen en amarillo en el registro eléctrico. A continuación se especificara metro a metro lo que muestra el registro eléctrico:

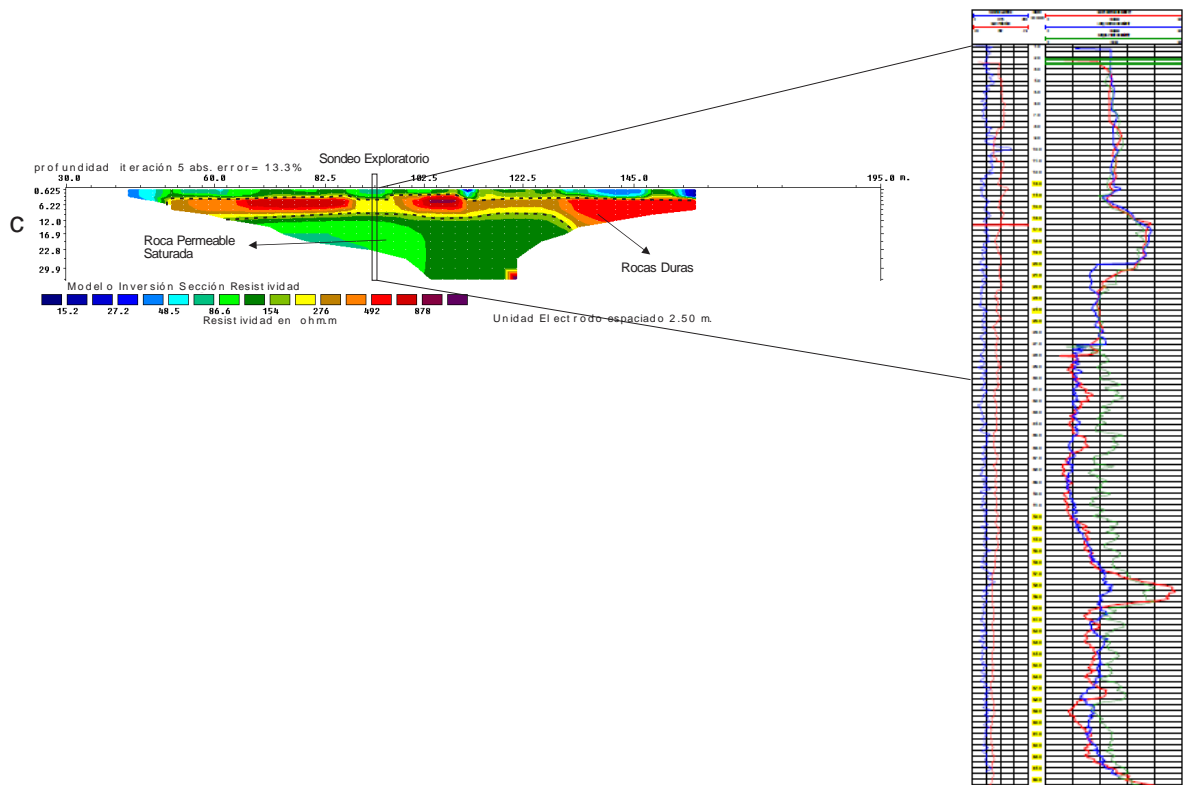
- Metro 0 a 14: en este segmento el Gamma Natural indica que hay unas rocas limo-arenosas, el potencial espontaneo corrobora la información anterior dando unos valores de una roca impermeable y el Resistivo Largo da unos valores de 32 a 35 Ohm.m.
- Metro 14 al 25: en este segmento el Gamma Natural indica que hay unas Arenas Limpias, el potencial espontaneo corrobora la información anterior dando unos valores de una roca permeable y el Resistivo Largo da unos valores de 32 a 56 Ohm.m lo cual indica que dentro de estas arenas limpias hay agua.
- Metro 25 al 28: en este segmento el Gamma Natural indica unas arenas arcillosas, el Potencial Espontaneo indica una variación de los valores por lo que indica una roca impermeable y el Resistivo Largo da unos valores de 18-28 Ohm.m lo cual indica que en estas Arenas Arcillosas no hay presencia de Agua. En conclusión hay una arena arcillosa donde predomina la Arcilla.
- Metro 28 al 40: en este tramo el Gamma Natural indica unas Arenas limpias con valores de 38 CPS, el Potencial Espontaneo indica que hay una roca permeable y el Resistivo Largo me da valores de 12-16 Ohm.m lo cual indica que en estas Arenas permeables no hay agua.
- Metro 40 al 60: en este segmento el Gamma Natural da valores de 40 a 50 CPS lo que indica una arena limpia, en el Potencial Espontaneo corrobora diciendo que hay una roca permeable y el Resistivo Largo da valores entre 16 y 30 Ohm.m lo cual indica que hay agua en la roca.

7.3 COMPARACIÓN REGISTRO ELÉCTRICO CON LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 2D

Haciendo una interpretación detallada de ambos métodos eléctricos se llegaron a entrelazar entres si para poder comprobar y dar un concepto más preciso de lo encontrado en el subsuelo. **Ver Figura 28.**

Cabe resaltar que en ambos métodos eléctricos hubo un cambio notorio a partir del metro 14 en una capa de aproximadamente 8 metros de espesor de resistividad de 52 Ohm.m donde podría asociarse a un contacto litológico.

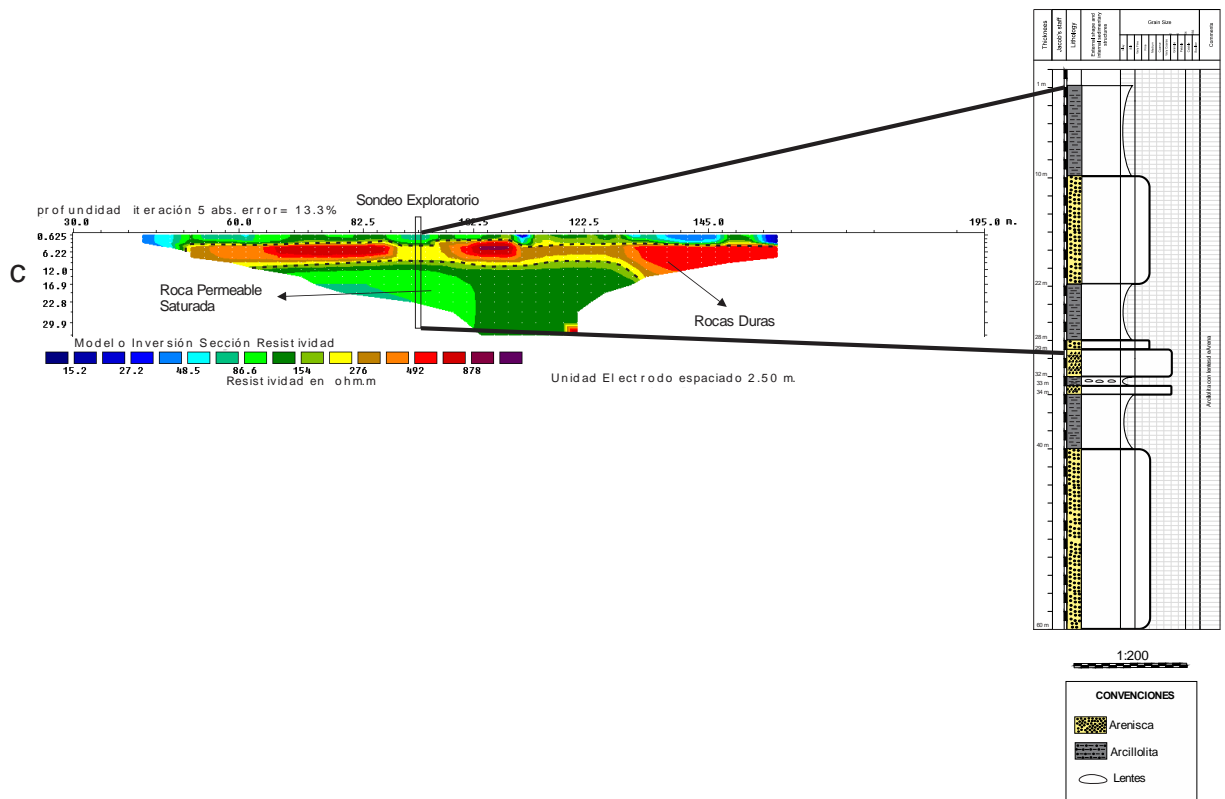
Figura 28. Comparación Tomografía eléctrica 2D con el Registro Eléctrico.



7.4 COLUMNA ESTRATIGRÁFICA GENERALIZADA COMPARADA CON LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 2D.

Basados en los ripios obtenidos metro a metro en la perforación se realizaron los análisis litológicos del pozo para el desarrollo de la columna estratigráfica a escala 1:200 donde se comparó con el perfil tomográfico 2D y se determinó que en la totalidad de la profundidad de investigación hay una intercalación de limolitas con arenas que varían de tamaño de grano fino a conglomeráticas. **Figura 29.**

Figura 29. Comparación tomografía eléctrica 2D con la columna estratigráfica.



8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los perfiles se determinaron:

- A nivel de superficie se encontraron capas limo-arenosa distribuidas heterogéneamente con materiales secos de 3 metros de espesor aproximadamente. La resistividad para los materiales finos limo arenosos oscilaron entre los 15 a 20 Ohm.m.
- Infrayaciendo esta capa superficial se detectaron capas de arenas y gravas secas hasta los 30 m de profundidad aproximadamente intercalados con algunos bloques Ígneo-metamórficos hasta los 6m de profundidad los cuales deben evitarse al momento de la perforación. Hacia el extremo oeste se acuñan estas arenas secas dando paso a unas arenas saturadas de las cuales se detallaron en el siguiente ítem. Este material perteneciente a arenas secas y gravas son de alto contenido de matriz y cemento por lo cual no permite el alojamiento de aguas entre sus poros o es mínimo su aporte. Estas capas se presenta en la mayoría de los perfiles hacia el centro de la Tomografía y presenta resistividades entre los 100 y 300 Ohm.m.
- Se determinó así mismo una zona de “potencial interés”, de litologías de arenas finas-medias intercaladas con gravas finas saturadas con resistividades que oscilan entre los 26 Ohm.m a 76 Ohm.m. La zona de mayor interés se ubica hacia el Este de los perfiles mostrando capas permeables con buena porosidad primaria, las cuales permitirían el alojamiento de aguas subterráneas a partir de los 16 m en su parte más superficial y alcanzando aproximadamente los 50 a 60 m en profundidad.

- Apoyándonos en la tomografía eléctrica 2D se determinaron las zonas de fracturamiento de las rocas que son áreas de interés potencial ya que sirven como medio de transporte para el fluido (Porosidad Secundaria); estas zonas son identificables ya que se presentan un diferencial de resistividades en capas continuas.

Con base en los perfiles 2D obtenidos, correlación entre las configuraciones Wenner, se propuso la realización de un sondeo exploratorio el cual se profundizo alrededor de los 70 m, atravesando las capas permeables identificadas en cada una de las tomografías de resistividad eléctrica 2D. La ubicación del sondeo en coordenadas geográficas y su posición en el lote se muestran a continuación (**Tabla 3 y Figura 30**):

Tabla 3. Posición Geográfica para el Sondeo Exploratorio.

Tomografía Eléctrica 2D Perfil PARQUE DEL AGUA			
Posible Sondeo Exploratorio	Posición Geográfica (Datum WGS84)		
	Latitud (Norte)	Longitud (Oeste)	Profundidad
Sondeo Exploratorio 1	11°13'25.21"N	74°10'26.52"O	70

Figura 30. Ubicación Geográfica. Polígono mostrando zona de mayor Interés (Rojo). La flecha indica el mejor punto para llevar a cabo el sondeo exploratorio.



Fuente: Google Maps Earth - Mapa Satelital en Vivo.

9. CONCLUSIONES

- Las rocas presentes en el subsuelo se encuentran saturadas de aguas subterráneas a partir de los 12 m y tienen el potencial de ser penetradas hasta los 70 m de profundidad arrojando a priori caudales con buen rendimiento, aunque este solo se podrá determinar de manera exacta a través de una prueba de bombeo.
- Las tomografías de resistividad eléctrica 2D realizadas en la zona permitieron observar con claridad el comportamiento del acuífero, ya que este se abre hacia el norte y se cierra hacia el sur, teniendo claridad en esto se puede establecer las mejores zonas para llevar acabo la perforación y posterior explotación del recurso hídrico.
- La Tomografía eléctrica 2D ha determinado las zonas de fracturamiento (porosidad Secundaria) a nivel del subsuelo ya que a nivel superficial no se encontraron rasgos para determinar estas fracturas (Fallas, Diaclasas).
- Mediante el reconocimiento de campo y estudios geológicos se concluye que la zona de trabajo está influenciada por dos litologías donde la más antigua es del periodo Paleógeno (Esquistos de Gaira) y la reciente del Cuaternario (Depósitos Aluviales), en el ámbito estructural a nivel de superficie no se determinó estructuras pero a nivel de profundidad la tomografía de Resistividad eléctrica 2D fue la mejor herramienta para determinar dichas estructuras (Fallas, Diaclasas).
- La Tomografía de Resistividad eléctrica 2D, ha mostrado ser una herramienta muy valiosa para poder conocer la distribución de las distintas rocas en el subsuelo, permitiendo ver con alta precisión las mejores zonas, para realizar las

investigaciones mecánicas que nos permita encontrar el recurso. No obstante, su aplicación siempre debe estar acompañada de un control de campo que permita relacionar las resistividades con los materiales presentes en el sitio.

- El Registro eléctrico es un método muy confiable y se observa en el capítulo 7.3 donde se analiza y se compara con las muestras sacadas del pozo (Ripios) aunque hay una variedad de métodos que al compararlos dan precisión.
- Comparando la Tomografía eléctrica 2D con el registro eléctrico se concluye que el registro eléctrico es un método directo con mayor detalle ya que es un análisis metro a metro y en la tomografía de Resistividad Eléctrica como método indirecto el detalle de espesores va aumentando a escala logarítmica.
- La Tomografía eléctrica 2D mostro una eficacia y precisión en los resultados siendo comparada con la columna estratigráfica a partir de los ripios obtenidos del pozo, lo cual es el grado de detalle mayor en cuanto a lo que encontramos en el subsuelo; por lo cual podemos decir que la tomografía eléctrica 2D es 95 % confiable.

BIBLIOGRAFÍA

Abem. Manual de Instrucción. 2011. Pag. 1

BERNARD, J.; LEITE, O. Utilización de métodos de resistividad en los estudios hidrogeológicos. España: Instituto geológico y minero de España (IGME), 2000. Pags. 191-196.

CADENA, W. Caracterización geoelectrica del subsuelo para la prospección de agua subterránea en el área de Menzuly Campestre, Piedecuesta, Santander, 2015. Pags 31-40.

GASULLA, M. Medida de la resistividad eléctrica del subsuelo. En: Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica del subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales. Tesis Doctoral. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Ingeniería Electrónica, 1999. Pags. 2-1—2-24.

HERNÁNDEZ, M.; CLAVIJO J. Ingeominas. Geología de la plancha 11 Santa Marta. 1998.

HERNÁNDEZ, M. Ingeominas. Geología de las planchas 11 Santa Marta y 18 Ciénaga. 2001. Pags 27-71.

KIELBASINSKI, k.; MIESZKOWSKI, R. Application of electrical resistivity tomography to detection of geological setting. Geologija. 2008. Vol. 50. Supplement. Pags. S101-S107.

LOKE, M, H. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies. Practical guide to 2-D and 3-D surveys. 2000. Pags. 1-61.

PALACKY, G.V. Resistivity characteristics of geologic targets, in electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Vol 1, Theory.1987. Págs. 52-129. ISBN 978-1-56080-263-1.

SARMIENTO, M.L. Validez de la propiedad física de la resistividad eléctrica como herramienta de prospección de arenas Bituminosas. Caso de estudio: minas la Emilia y Santa Teresa en cercanías del municipio de Pesca, Boyacá, Colombia. 2015.

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. Applied Geophysics, Cambridge University Press, British Library. 1990.

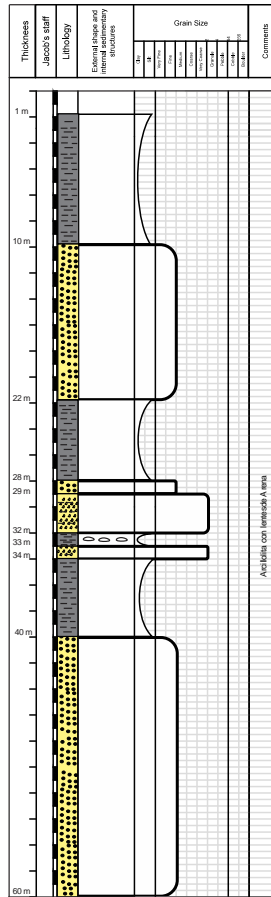
TSCHANZ, C.; JIMENO, A.; CRUZ, J. Geology of the Sierra Nevada de Santa Marta Area. Preliminary report. Escala 1:200.000. Ingeominas, Informe 1829, 288 p. 1969. Bogotá.

Res2DInv, 2010, Geotomo Software, Manual V. 3.59. Malasya.

Rugged, Full-featured Handheld with GPS, GLONASS and Wireless Connectivity. Disponible en: <https://buy.garmin.com/en-US/US/prod140022.html>. Fecha de consulta: Abril de 2016.

ANEXOS

ANEXO A. Columna estratigráfica generalizada a escala 1:200



Columna Estratigráfica Generalizada Sección Parque del Agua
 Santa Marta (Magdalena), Colombia
 Orlando Riveros Rueda
 Universidad Industrial de Santander
 2016

1:200

CONVENCIONES	
	Arenisca
	Arcillolita
	Lentes

