

Evaluación geofísica en rocas Cretácicas sedimentarias de los municipios de Barichara, Mogotes y el sector conocido como la Mesa de los Santos en el departamento de Santander, mediante sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDТ) y sondeos eléctricos verticales (SEV).

Andrea Juliana Díaz Duarte

Andrés Felipe Duarte Tarazona

Trabajo de Grado Presentado como Requisito para Optar al Título de Geólogos

Director:

Jairo Alberto Torres Peña

Magister en Ciencias de la Tierra

Codirectores:

Rocio del Pilar Bernal Olaya

PhD in Geología

Carlos Alberto Mantilla Barrios

Geólogo

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Químicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2019

Agradecimientos

Se le agradece a la entidad GYS LTDA y a la escuela de Geología de la Universidad Industrial de Santander por el apoyo para realizar esta investigación.

Contenido

	Pág.
Introducción	16
1. Objetivos	18
1.1 Objetivo General	18
1.2 Objetivos específicos	18
2. Generalidades y Conceptos	20
2.1 Localización del Área de Estudio	20
2.2 Marco Geológico	21
2.3 Metodología	26
3. Adquisición y Procesamiento de Datos	28
3.1 Adquisición de Datos	28
3.2 Procesamiento de Datos	32
4. Resultados y Discusión	34
4.1.1 Resultados del municipio de Mogotes.	36
4.1.2 Resultados municipio de Barichara.	41
4.1.3 Resultados sector de la Mesa de los Santos.	46
4.1.4 Correlación de resultados.....	48

4.2 Discusión de Resultados	51
5. Conclusiones.....	53
Referencias Bibliográficas	55
Apéndices.....	59

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. A. Localización del área de estudio del departamento de Santander en los municipios de Mogotes, Barichara y La Mesa de los Santos a gran escala. B. Distribución de SEVs, SEDTs y Tomografías de Mogotes. C. Distribución de SEVs, SEDTs y Tomografías de Barichara. D. Distribución de SEVs, SEDTs y Tomografías de La Mesa De Los Santos.....	21
Figura 2. Base Cartográfica.	22
Figura 3. Base Cartográfica.	23
Figura 4. Base Cartográfica.	23
Figura 5. Columna estratigráfica de la formación Simití, en la sección de Barichara-San Gil, en el departamento de Santander.	24
Figura 6. Columna estratigráfica de la formación Los Santos, en el sector de La Mesa De Los Santos, en el departamento de Santander.....	25
Figura 7. Esquema básico de arreglos geoelectricos Schlumberger y Wenner. Los electrodos de corriente están representados por A y B; mientras que los de potencial por M y N. Para la distribución Wenner los electrodos se encuentran a una misma distancia a.....	27
Figura 8. A. Campañas de campo de adquisición de datos SEDT, en el municipio de Mogotes. B. Campañas de campo de adquisición de datos SEDT, en el municipio de Barichara. C. Equipo de adquisición de SEDT, WalkTEM.	28
Figura 9. Arreglo para SEDT tipo antena coincidente de bobina rectangulares, antena transmisora de 40x40 m (línea azul) y antena receptora de 10x10 m (línea roja).....	29

Figura 10. A. Campañas de campo de adquisición de datos SEV, en el sector de La Mesa De Los Santos. B. Campañas de campo de adquisición de datos SEV, en el municipio de Mogotes. C. Campañas de campo de adquisición de datos SEV, en el municipio de Barichara.	31
Figura 11. Resultados TRE realizada en la zona de estudio para el municipio de Mogotes.	35
Figura 12. Resultados TRE realizada en la zona de estudio para el municipio de Barichara.....	35
Figura 13. Resultados TRE realizada en la zona de estudio para el sector de La Mesa De Los Santos.....	36
Figura 14. A. Perfil geoelectrico generalizado, para la zona de estudio en el municipio de Mogotes, a partir de SEV. B. Perfil geológico basado en la clasificación de Palacky (1987).	38
Figura 15. A. Curva de decaimiento. B. Perfil unidimensional generado a partir de la curva de decaimiento para los SEDT en el municipio de Mogotes.....	40
Figura 16. A. Perfil geoelectrico generalizado, para la zona de estudio en el municipio de Mogotes, a partir de SEDT. B. Perfil geológico basado en la clasificación de Palacky (1987).	41
Figura 17. A. Perfil geoelectrico generalizado, para la zona de estudio en el municipio de Barichara, a partir de SEV. B. Perfil geológico basado en la clasificación de Palacky (1987)....	43
Figura 18. A. Curva de decaimiento. B. Perfil unidimensional generado a partir de la curva de decaimiento para los SEDT en el municipio de Barichara.	45
Figura 19. A. Perfil geoelectrico generalizado, para la zona de estudio en el municipio de Barichara, a partir de SEDT. B. Perfil geológico basado en la clasificación de Palacky (1987). 46	
Figura 20. A. Perfil geoelectrico generalizado, para la zona de estudio en el sector de La Mesa De Los Santos, a partir de SEV. B. Perfil geológico basado en la clasificación de Palacky (1987)..	48
Figura 21. Correlación de resultados, de cada una de las técnicas empleadas para la zona del municipio de Mogotes.....	49

Figura 22. Correlación de resultados, de cada una de las técnicas empleadas para la zona del municipio de Barichara.	50
Figura 23. Correlación de resultados, de cada una de las técnicas empleadas para la zona del sector de La Mesa De Los Santos.....	51

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Localización de SEV, con arreglo Schlumberger (SCH) y Wenner (WE) y su apertura máxima en (AB/2).....	32
Tabla 2. Ejemplo de los resultados de resistividades reales, espesores y profundidades del subsuelo a partir de SEV, de arreglo tipo Schlumberger, en los sectores del municipio de Mogotes.....	37
Tabla 3. Ejemplo de resultados de resistividades reales, espesores y profundidades del subsuelo a partir de SEV, de arreglo tipo Wenner, en los sectores del municipio de Mogotes.	37
Tabla 3. Resultados de resistividad, desviación estándar de la resistividad (Res. DEST), espesor de las capas, desviación estándar del espesor de las capas (Esp. DEST), profundidad y desviación estándar de la profundidad (Pro. DEST), a partir de SEDT, en el área de estudio en el municipio de Mogotes.....	39
Tabla 4. Ejemplo de resultados de resistividades reales, espesores y profundidades del subsuelo a partir de SEV, de arreglo tipo Schlumberger, en los sectores del municipio de Barichara	42
Tabla 5. Ejemplo de resultados de resistividades reales, espesores y profundidades del subsuelo a partir de SEV, de arreglo tipo Wenner, en los sectores del municipio de Barichara.....	42
Tabla 5. Resultados de resistividad, desviación estándar de la resistividad (Res. DEST), espesor de las capas, desviación estándar del espesor de las capas (Esp. DEST), profundidad y desviación estándar de la profundidad (Pro. DEST), a partir de SEDT, en el área de estudio en el municipio de Barichara.	44
Tabla 6. Ejemplo de resultados de resistividades reales, espesores y profundidades del subsuelo, para el sector de la Mesa de los Santos.....	47

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Resultados de resistividades reales, espesores y profundidades del subsuelo a partir de SEV, de arreglo tipo Schlumberger y Wenner, en los sectores del municipio de Mogotes.....	59
Apéndice B. Resultados de resistividad, desviación estándar de la resistividad (Res. DEST), espesor de las capas, desviación estándar del espesor de las capas (Esp. DEST), profundidad y desviación estándar de la profundidad (Pro. DEST), a partir de SEDT, en el área de estudio en el municipio de Mogotes.....	61
Apéndice C. Curva de decaimiento. B. Perfiles unidimensionales generados a partir de las curvas de decaimiento para los SEDT en el municipio de Mogotes.	66
Apéndice D. Resultados de resistividades reales, espesores y profundidades del subsuelo a partir de SEV, de arreglo tipo Schlumberger y Wenner, en los sectores del municipio de Barichara. ..	70
Apéndice E. Resultados de resistividad, desviación estándar de la resistividad (Res. DEST), espesor de las capas, desviación estándar del espesor de las capas (Esp. DEST), profundidad y desviación estándar de la profundidad (Pro. DEST), a partir de SEDT, en el área de estudio en el municipio de Barichara.	71
Apéndice F. Curvas de decaimiento. B. Perfiles unidimensionales generados a partir de las curvas de decaimiento para los SEDT en el municipio de Mogotes.	76
Apéndice G. Resultados de resistividades reales, espesores y profundidades del subsuelo a partir de SEV, de arreglo tipo Schlumberger y Wenner, en el sector de La Mesa De Los Santos.....	80

Resumen

Título: Evaluación geofísica en rocas cretácicas sedimentarias de los municipios de Barichara, Mogotes y el sector conocido como la Mesa de los Santos en el departamento de Santander, mediante sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT) y sondeos eléctricos verticales (SEV).*

Autores: Andrea Juliana Díaz Duarte, Andrés Felipe Duarte Tarazona**

Palabras clave: SEV; SEDT; Geofísica; Resistividad; Geoeléctrica; Cretácico.

Descripción

Las técnicas de prospección geoeléctricas, buscan detectar los efectos superficiales, que produce el flujo de una corriente eléctrica, a través del subsuelo. En modelos geológicos de capas horizontales, el parámetro geofísico medido es la resistividad, la cual aporta información de espesores y profundidades de las capas, a partir de contrastes en los materiales. Este trabajo tiene como objetivo, evaluar las técnicas geoeléctricas SEDT y SEV, en litologías cretácicas, de tipo sedimentario, aflorantes en los municipios de Mogotes, Barichara y el sector de La Mesa De Los Santos, ubicados en el departamento de Santander-Colombia, pertenecientes a las formaciones Simití y Los Santos.

Para el desarrollo de este trabajo, se realizaron: 20 SEV y 4 SEDT, en zonas donde anteriormente se habían hecho adquisiciones de tomografías de resistividad eléctrica (TRE) (GYS LTDA, 2017), lo que permitió correlacionar los resultados obtenidos con las diferentes técnicas. Dicha correlación entre los tres métodos eléctricos mencionados, permitió visualizar capas de lodolitas, con rangos de resistividades entre los 13.1 a 118 Ohm.m a una profundidad promedio de 35 m, en el municipio de Mogotes; areniscas con rangos de 154 a 399 Ohm.m, con profundidad promedio de 27.25 m, en el municipio de Barichara, y rangos de 472 a 912 Ohm.m a una profundidad promedio de 20 m, en La Mesa De Los Santos.

Finalmente, con la interpretación de los resultados obtenidos, junto a geología de la zona, se generó un perfil geológico generalizado para cada sector; en el cual se observó que, la profundidad máxima de investigación correlacionable es de 80 m. Cabe resaltar que los SEDT proporcionaron información a mayor profundidad que los otros dos métodos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Geología Director: Jairo Alberto Torres Peña. Magister en Ciencias de la Tierra

Abstract

Title: Geophysical evaluation in cretaceous sedimentary rocks of the municipalities of Barichara, Mogotes and the sector known as Mesa De Los Santos in the department of Santander, using electromagnetic soundings in the time domain (SEDT) and vertical electric soundings (SEV).*

Authors: Andrea Juliana Díaz Duarte, Andrés Felipe Duarte Tarazona**

Keywords: SEV; SEDT; Geophysics; Resistivity; Geoelectric; Cretaceous.

Description

Geoelectric prospecting techniques are based mainly on detecting the surface effects produced by the flow of an electric current through the subsoil. The physical parameter that is obtained is the resistivity, which provides information of thicknesses and depths of the layers, from contrasts in the materials. The objective of this work is to evaluate the SEDT and SEV geoelectric techniques, in cretaceous lithologies, sedimentary type, from the municipalities of Mogotes, Barichara and the La Mesa De Los Santos sector, located in the Department of Santander-Colombia, where they emerge mainly the Simiti and Los Santos formations.

For the development of this work, 20 SEVs and 4 SEDTs were performed in areas where electrical resistivity tomography (TRE) had been previously acquired (GYS LTDA, 2017), which allowed to correlate the results obtained with the different techniques. This correlation between the three electrical methods mentioned, allowed to visualize layers of mudstone, with ranges of resistivities between 13.1 to 118 Ohm.m at an average depth of 35 m, in the municipality of Mogotes; sandstones with ranges from 154 to 399 Ohm.m, with average depth of 27.25 m, in the municipality of Barichara, and ranges from 472 to 912 Ohm.m at an average depth of 20 m, at La Mesa De Los Santos.

Finally, with the interpretation of the results obtained, together with the geology of the area, a generalized geological profile was generated for each sector; in which it was observed that the maximum depth of correlatable research is 80 m. It should be noted that the SEDT provided information in greater depth than the other two methods.

* Degree Work

** Faculty of Chemical Physics Engineering. School of Geology Director: Jairo Alberto Torres Peña. Master of Earth Sciences

Introducción

Las zonas de estudio mencionadas anteriormente se encuentran situadas al noreste del país en la región andina, en el territorio central del departamento de Santander, y se caracterizan por poseer rocas sedimentarias pertenecientes al periodo cretácico, donde las litologías más comunes son intercalaciones de arenitas, arcillolitas y limolitas de carácter fosilífero. Incluso también se puede evidenciar lentes de arenita de cuarzo limpios, minerales accesorios y concreciones calcáreas, correspondientes a las formaciones Paja, Tablazo, Simití y los Santos (Moreno y Sarmiento, 2002).

Con el fin de reconocer litologías principalmente de las formaciones Simití y Los Santos, se aplicaron técnicas de carácter geoelectrico (SEV, SEDT, TRE) las cuales tienen como propósito identificar las litologías, espesores, estructuras del subsuelo y cuerpos de agua, mediante propiedades físicas como la resistividad.

Algunos estudios realizados en Estados Unidos en el Parque Nacional Everglades y sus alrededores en la Florida, han mostrado la eficacia de usar SEDT, para caracterizar litologías a grandes profundidades, obteniendo información sobre la base del acuífero de Biscayne y buscar evidencia de agua fresca que fluye hacia la Florida. (Fitterman y Deszcz-Pan, 1999). En Hawaii, se realizaron 24 SEDT, que permitieron conocer la distribución de resistividades en la parte inferior del East Rift del Volcán Kilauea, (conocida localmente como el área Puna) durante el verano de 1974 como parte de los estudios geofísicos del Proyecto Geotérmico de Hawaii. (Kauahikaua, 1981). Por otro lado, en Argentina, en el límite sur de la precordillera Mendocina,

estudios de geofísica, lograron describir los límites de estructuras geológicas y contactos presentes en la zona, ya que a partir de 4 SEV al norte del río Mendoza, se distinguieron formaciones Paleozoicas infrayacentes a estratos de edad Triásica. (Mamani, 2017).

Igualmente, en Colombia la aplicación de técnicas geoeléctricas, ha permitido definir modelos del subsuelo; por ejemplo, en el departamento de Antioquia, se aplicaron un total de 276 SEV en el altiplano de Rionegro y el Valle de la Unión, con el fin de establecer una caracterización geoeléctrica de la zona, obteniendo un mapa de isolíneas de resistividad. (Hoyos, 2001). En Jerusal- Cundinamarca se han realizado estudios geoeléctricos para la definición de capas, prospección y exploración de agua subterránea. (Subsuelo3D S.A.S, 2017).

En el departamento de Santander para las zonas aledañas a La Mesa De Los Santos en límites con el municipio de Piedecuesta, exactamente en el sector de Incomesa, y en la finca Villa Isabellita, se han implementado Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) y otros levantamientos geoeléctricos, para determinar áreas con potencial almacenamiento de aguas subterráneas. Las mediciones alcanzaron profundidades de investigación de hasta 80 metros y acertaron en la ubicación de tres cuerpos de agua, con anomalías resistivas de 100 a 400 ohmios por metro. (GYS LTDA, 2017 a).

Esta investigación expone las mediciones resultantes de implementar dos técnicas geoeléctricas aplicadas (SEDT y SEV), y su posterior correlación, a través de la elaboración de perfiles geoeléctricos, sustentados en columnas estratigráficas y la geología de las zonas, donde afloran rocas cretácicas con litologías contrastantes.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar por medio de técnicas geofísicas las rocas Cretácicas sedimentarias en los municipios de Barichara, Mogotes y el sector conocido como La Mesa de los Santos en el departamento de Santander, mediante Sondeos Electromagnéticos en el Dominio del tiempo (SEDT) y Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).

1.2 Objetivos específicos

Realizar un reconocimiento en las zonas de estudio para recolectar información geológica de superficie, (datos estructurales, geomorfológicos y litológicos) a fin de determinar los parámetros apropiados para llevar a cabo el diseño de los ensayos geofísicos; y posteriormente correlacionar dicha información con los resultados de los datos geofísicos.

Diseñar y llevar a cabo la adquisición de datos geofísicos mediante las técnicas de exploración SEV y SEDT, con el fin de evidenciar los contrastes de resistividad en las zonas de interés.

Obtener perfiles en profundidad de los rangos de resistividad reales mediante la inversión de las curvas de resistividad aparente y decaimiento medidas en campo.

Evaluar la resolución de las medidas de resistividad en rocas sedimentarias Cretácicas, con el fin de determinar espesores para las litologías presentes.

Evidenciar las ventajas y desventajas de cada uno de los ensayos geofísicos en cuanto a la adquisición, procesamiento e interpretación de datos para este tipo de rocas sedimentarias Cretácicas limitada a las zonas de estudio.

2. Generalidades y Conceptos

2.1 Localización del Área de Estudio

Esta investigación se llevó a cabo en tres zonas de estudio que abarcan parte de los Municipios de Mogotes, Barichara y La Mesa De Los Santos, (Figura 1), cuya localización geográfica se describe continuación: La primera zona de estudio se encuentra localizada en la finca Arcabuco, hacia el Oriente de la cabecera municipal de San Gil, sobre la vía que conduce al municipio de Mogotes, en las coordenadas planas: 1.110.500 m E -1.216.750 m N (sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS, origen Bogotá).

Para el caso de la segunda zona de estudio, su localización es en la provincia Guanentina en el departamento de Santander, en la región conocida como Mesa de Barichara, al noreste del Municipio de Barichara. Ubicada en coordenadas promedio 1.226.830m E –1.095.430m N (sistema de coordenadas MAGNA-SIRGAS, origen Bogotá).

Por último, la tercera zona de estudio se encuentra localizada en el sector de la Mesa de los Santos, Santander, en la finca Villa Isabellita. Coordenadas promedio de la zona 1.108.311,46 m E –1.247.484,11 m N, perteneciente al municipio de Los Santos.

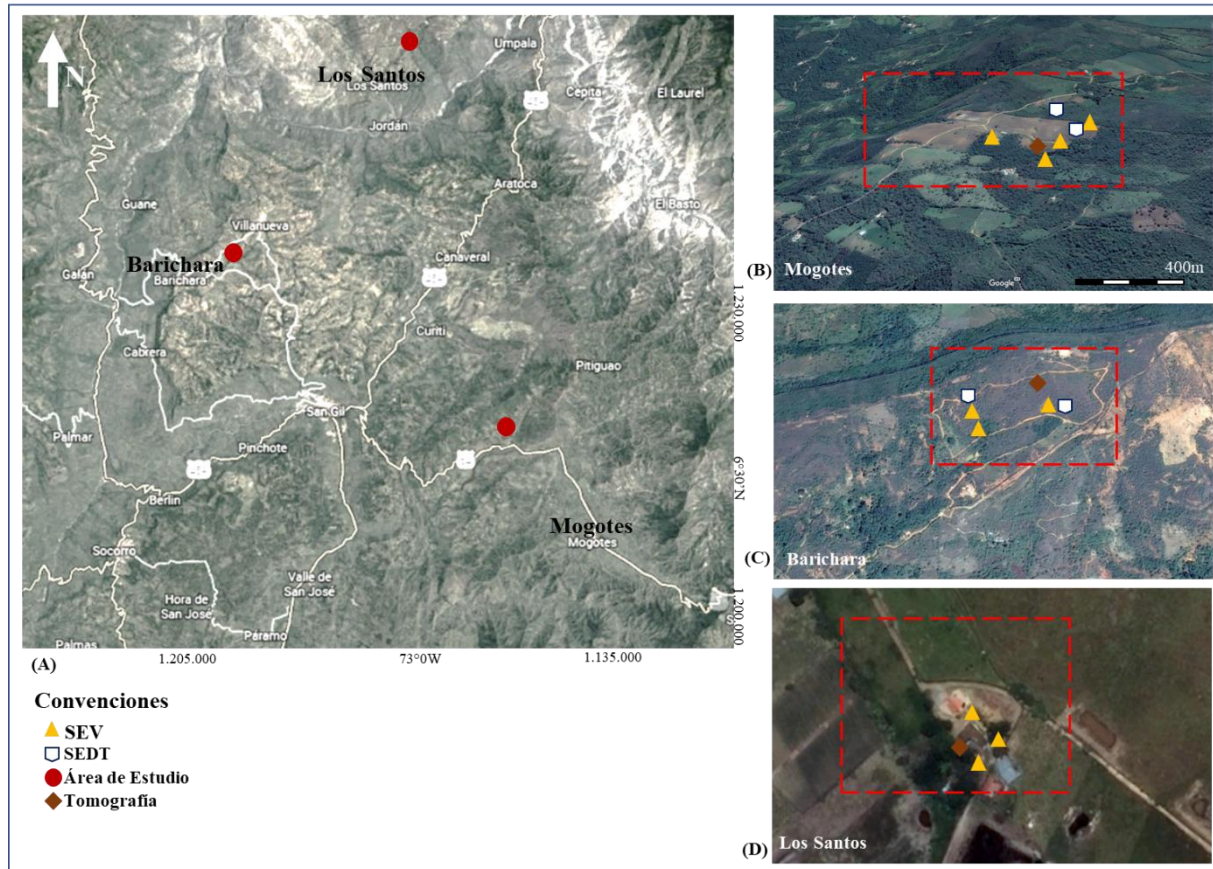


Figura 1. A. Localización del área de estudio del departamento de Santander en los municipios de Mogotes, Barichara y La Mesa de los Santos a gran escala. B. Distribución de SEVs, SEDTs y Tomografías de Mogotes. C. Distribución de SEVs, SEDTs y Tomografías de Barichara. D. Distribución de SEVs, SEDTs y Tomografías de La Mesa De Los Santos. Adaptado de Google Earth (2017).

2.2 Marco Geológico

Según el Servicio Geológico Colombiano (SGC 1985), la primera zona de estudio se encuentra en la formación Simití, unidad compuesta litológicamente por secciones de lutitas de tonalidad gris a gris oscuro amarillento, alternadas con lentes de areniscas y ocasionalmente de calizas.

Infrayaciendo esta unidad se encuentra la formación Tablazo, que presenta calizas arenosas a arcillosas de tonalidad gris, lutitas grises y margas e intercalaciones de areniscas de grano fino (Figura 2).

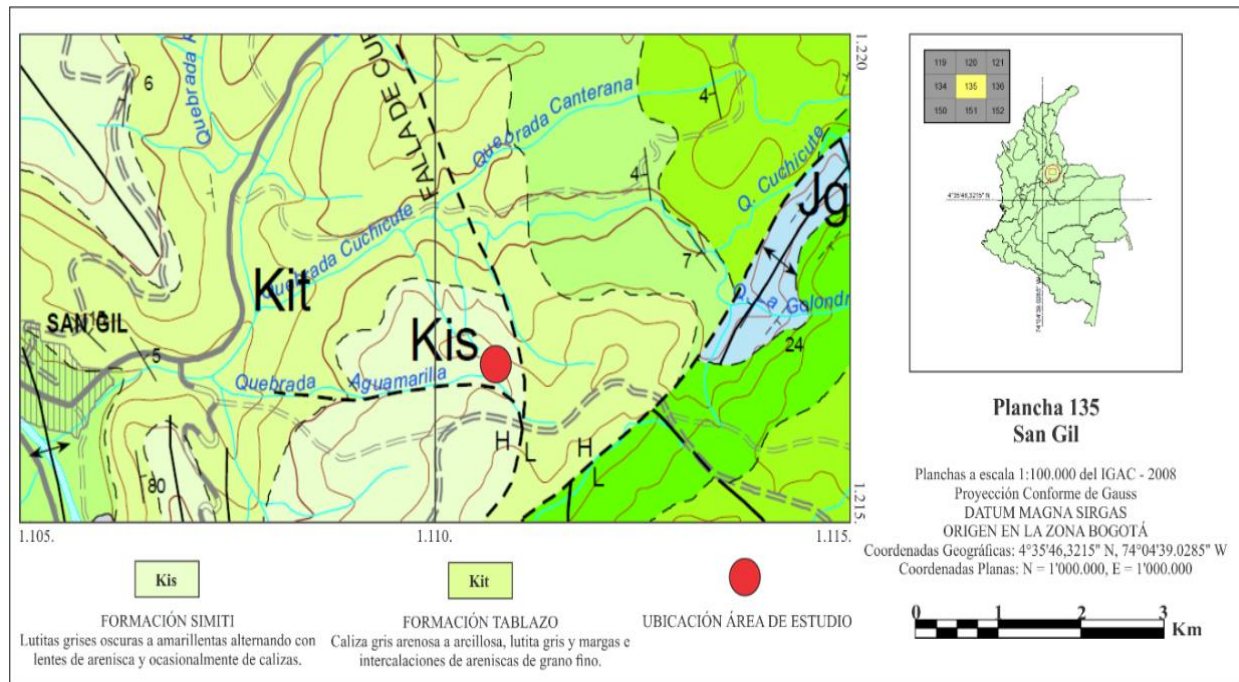


Figura 2. Base Cartográfica. Adaptado de: Plancha 135 de San Gil a escala 1:100.000 del SGC – 1985. Cercanías del Municipio de Mogotes.

De igual manera se presentan aflorando las formaciones Simití y Tablazo en la segunda zona de estudio, en el Municipio de Barichara. La formación Paja definida como una unidad de lutitas negras, abundantes concreciones calco-piritosas, y delgadas intercalaciones de caliza grisáceas infrayace la formación Tablazo (Figura 3).

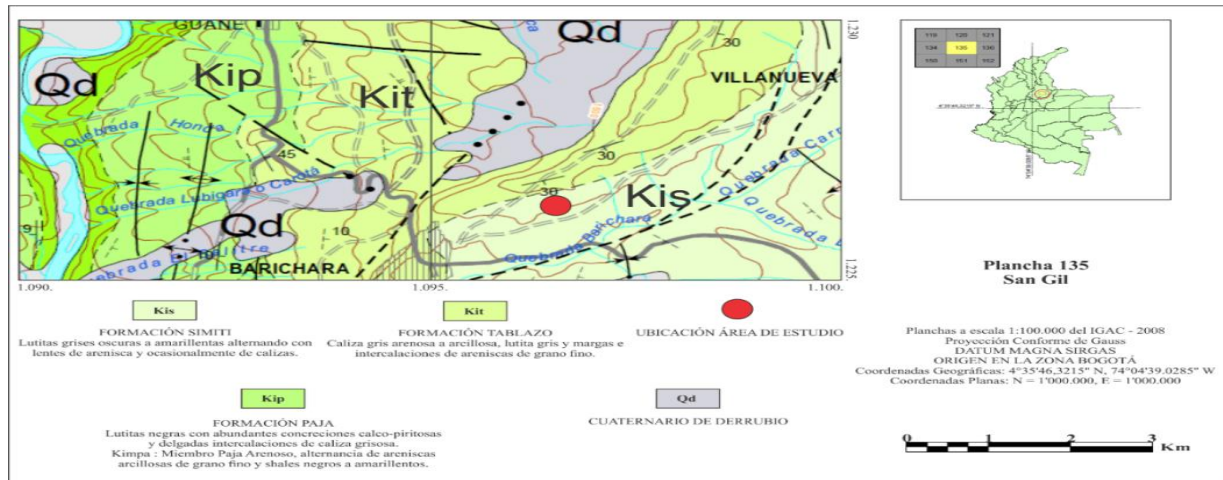


Figura 3. Base Cartográfica. Adaptado de: Plancha 135 de San Gil a escala 1:100.000 del SGC – 1985. Cercanías del Municipio de Barichara.

Finalmente, en el sector de La Mesa De Los Santos, la zona de estudio está ubicada en la Formación Los Santos, unidad compuesta en la parte superior por areniscas cuarzosas, y en la parte inferior por limolitas y areniscas pardas rojizas conglomeráticas (Figura 4).

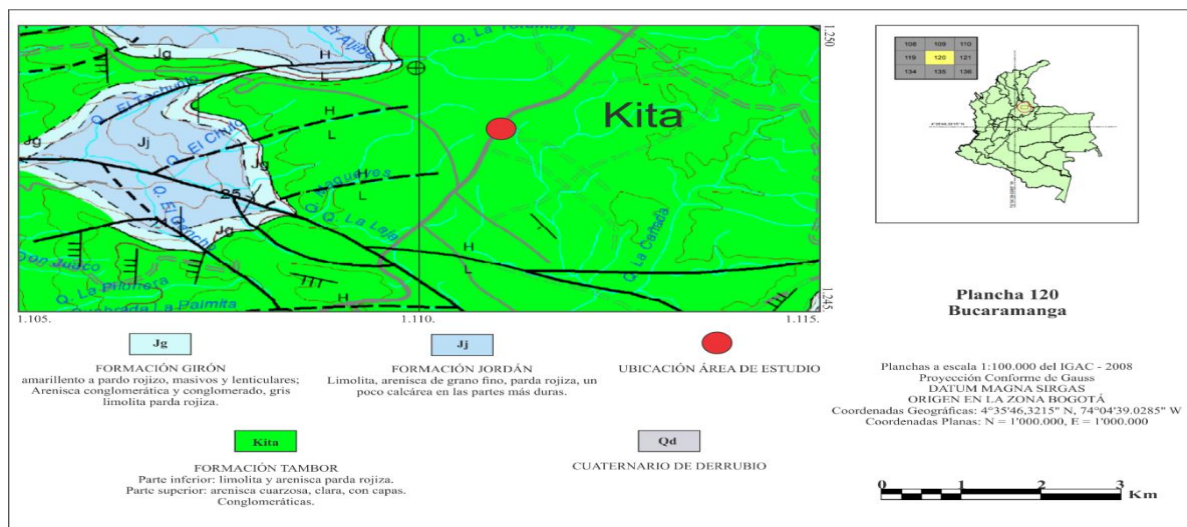


Figura 4. Base Cartográfica. Adaptado de: Plancha 120 de Bucaramanga a escala 1:100.000 del SGC – 1985. Cercanías del Sector de La Mesa de los Santos.

La sección estratigráfica en el sector de Mogotes y Barichara corresponde, a la formación Simití, del Albiense- Cretácico inferior, que aflora en los municipios de Barichara-San Gil del departamento de Santander. Este segmento está conformado por 55% de lodolitas, 38% de arenitas de cuarzo, 7% de arenitas de cuarzo fosilífero. Las lodolitas presentan láminas de arenita de cuarzo limpio, que oscilan de delgadas a muy delgadas. Estas contienen ocasionalmente concreciones calcáreas y láminas de material carbonoso. Las arenitas de cuarzo blancas a grises son limpias y presentan láminas delgadas de material carbonoso y moscovita. Otras arenitas de cuarzo negras contienen lentes lodosos oscuros y láminas de arenitas de cuarzo limpio. (Figura 5). El espesor de esta formación en este sector, es de 160 m aproximadamente. (Moreno y Sarmiento, 2002).

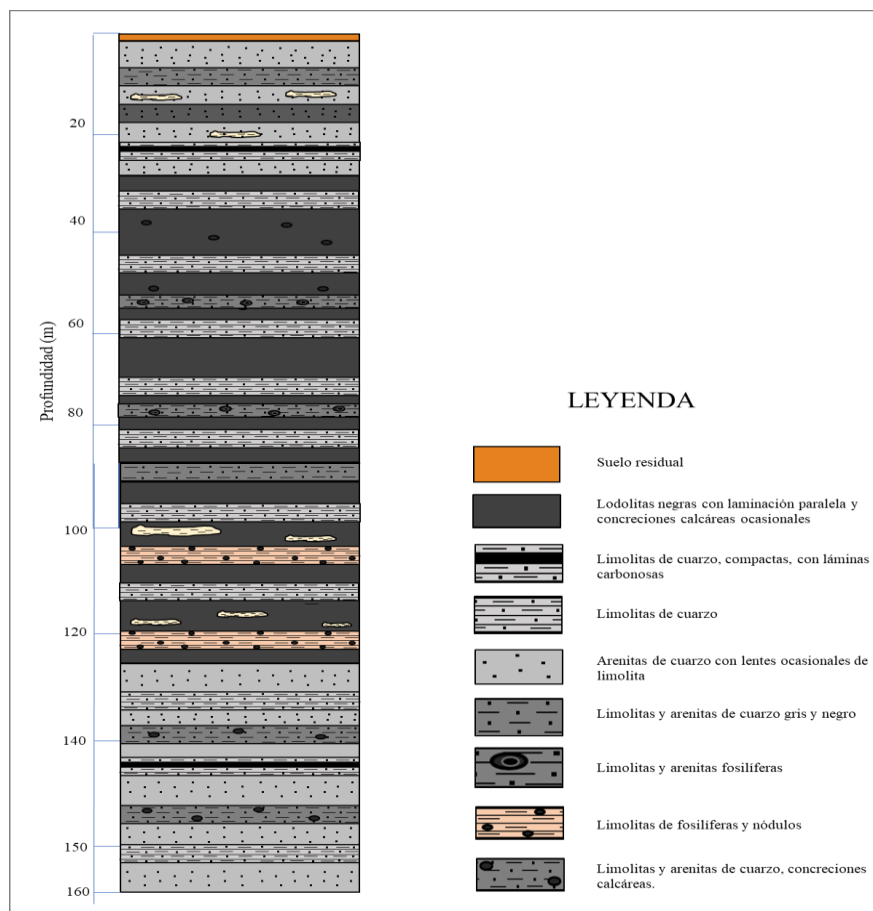


Figura 5. Columna estratigráfica de la formación Simití, en la sección de Barichara-San Gil, en el departamento de Santander. Adaptado de Moreno y Sarmiento (2002).

La sección estratigráfica en el sector de La Mesa De Los Santos corresponde, a la formación Los Santos del Valanginiense- Cretácico inferior. Este segmento está conformado por capas gruesas a muy gruesas de sublitoconglomerados a sublitoconglomerados arenosos alternados con capas muy gruesas de areniscas conglomeráticas, y areniscas limosas de grano medio a fino. También presenta cuarzo arenitas de grano medio y areniscas de grano fino a medio. El espesor para el miembro inferior de esta formación es aproximadamente 120 m. (Aldana, 2008) (Figura 6).

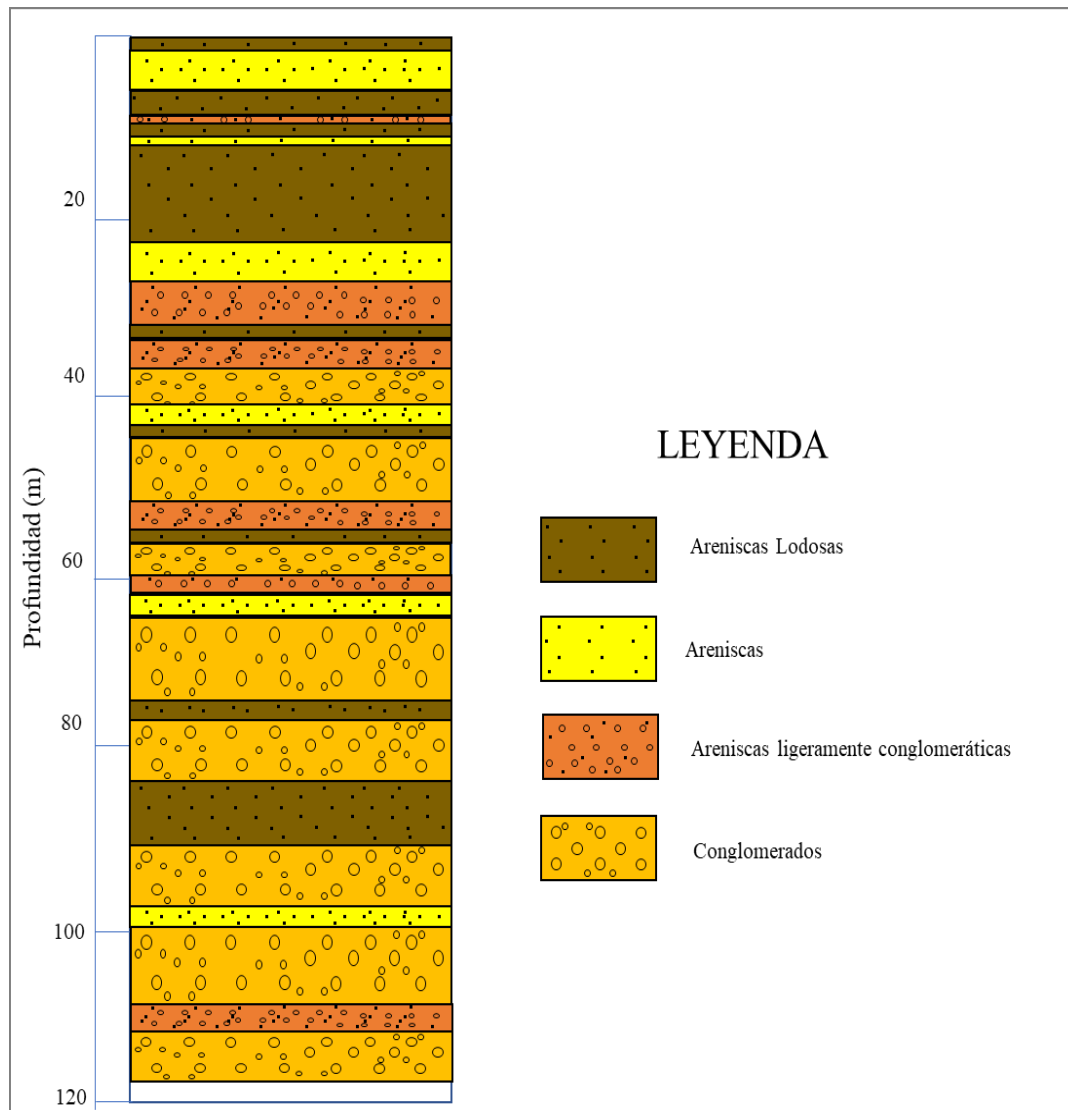


Figura 6. Columna estratigráfica de la formación Los Santos, en el sector de La Mesa De Los Santos, en el departamento de Santander. Adaptado de Aldana (2008).

2.3 Metodología

Este trabajo se desarrolló en tres fases; iniciando con la adquisición de datos geofísicos, luego el procesamiento de dichos datos y por último la interpretación de los resultados. Las técnicas geofísicas aplicadas en las tres zonas de estudio son conocidas como SEDT y SEV. Cabe resaltar que paralelo a la adquisición de datos geoeléctricos, se realizó una campaña de campo para observar la geología del área, y tomar datos estructurales; dichos datos presentaron buzamientos muy bajos, ideales para la aplicación de las técnicas.

Los SEDT consisten en hacer circular una corriente constante sobre la superficie del terreno, durante un tiempo determinado, a través de una bobina. A lo largo del tiempo, la corriente se prende y apagan generando un cambio en el campo eléctrico. Esta variación, genera un campo magnético primario. Por la conductividad de los materiales del subsuelo, corrientes eléctricas pueden inducirse a partir de la variación del campo magnético primario en el tiempo. Las corrientes inducidas fluyen en trayectorias cerradas que se conocen como corrientes de Eddie, las cuales migran a profundidad y lateralmente, cuya intensidad disminuye con el paso del tiempo, variación que produce un campo magnético secundario transitorio, opuesto al campo magnético primario. Este campo secundario produce un voltaje variable en el receptor, donde la forma del decaimiento de este voltaje contiene información sobre la resistividad en el subsuelo. (Newman et al., 1986) (Orellana, 1982).

Los SEV constituyen uno de los métodos de campo para determinar la variación en profundidad de las propiedades eléctricas del subsuelo, estos consisten en una serie de determinaciones de

resistividades aparentes en un volumen de roca, efectuadas con una separación creciente entre los electrodos de emisión y de recepción. (Orellana, 1982). Para la elaboración de este estudio se aplicaron dos tipos de arreglos, Schlumberger y Wenner. El primer arreglo se caracteriza por tener la distancia entre los electrodos de potencial MN se mantiene constante, variando la distancia entre los electrodos de corriente AM y BN en un factor “ n ”, siendo ésta para la primera medición igual a “ a ”, para la segunda igual a “ $2a$ ” y así sucesivamente. En el segundo arreglo la separación entre los electrodos AM, MN y NB, que varía por un factor “ n ” secuencial, es decir, si en la primera medición se tiene una abertura “ a ”, $n=1$, en la siguiente el espaciamiento entre los electrodos será de $a \cdot n$ siendo $n=2$, y así sucesivamente. Esta variación permitirá que a medida que se incremente “ n ” la profundidad de muestreo aumentará también. (González y Viridiana, 2012) (Figura 7).

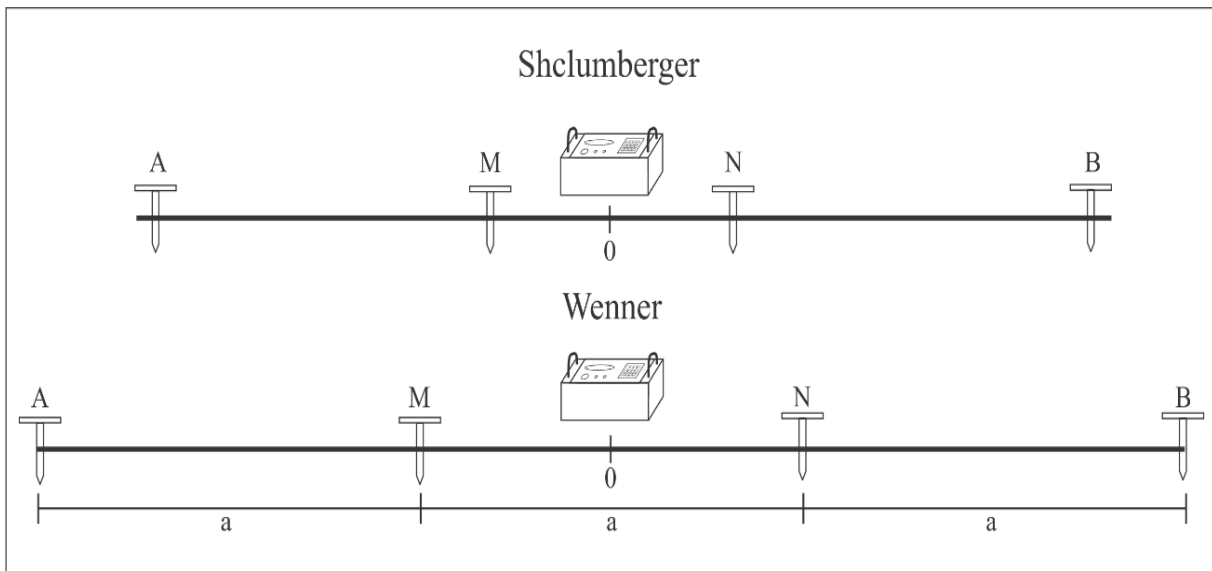


Figura 7. Esquema básico de arreglos geoelectricos Schlumberger y Wenner. Los electrodos de corriente están representados por A y B; mientras que los de potencial por M y N. Para la distribución Wenner los electrodos se encuentran a una misma distancia a . Adaptado de: Lowrie (2007).

3. Adquisición y Procesamiento de Datos

3.1 Adquisición de Datos

Para la adquisición de datos de los SEDT el equipo electromagnético que se utilizó fue *WalkTEM* de la marca *ABEM* (GuidelineGeo, 2018) que se muestra en la Figura 8, el cual está compuesto por 2 antenas, una receptora de resistividad, de 10x10 m de doble canal y 500Hz; y otra transmisora de corriente, de 40x40 m y 10 A; un PC integrado y baterías internas. El arreglo utilizado fue de tipo bobina coincidente, este se caracteriza por presentar sus antenas de forma rectangular, centradas una con respecto a la otra., como se muestra en la Figura 9.



Figura 8. A. Campañas de campo de adquisición de datos SEDT, en el municipio de Mogotes. B. Campañas de campo de adquisición de datos SEDT, en el municipio de Barichara. C. Equipo de adquisición de SEDT, *WalkTEM*.

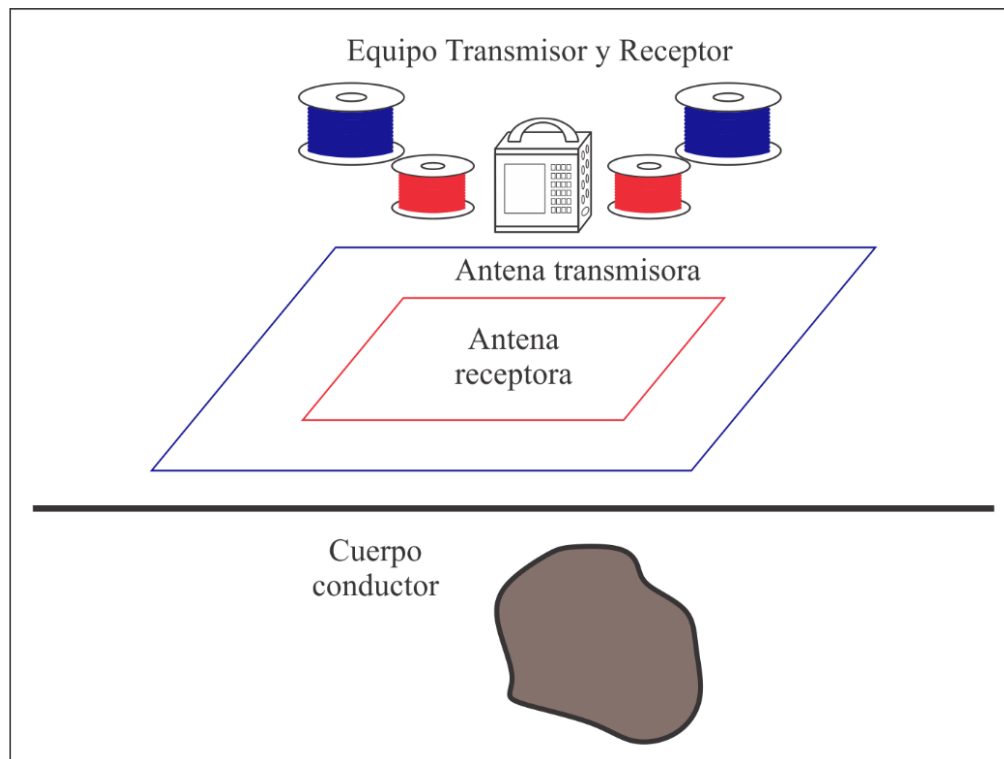


Figura 9. Arreglo para SEDT tipo antena coincidente de bobina rectangulares, antena transmisora de 40x40 m (línea azul) y antena receptora de 10x10 m (línea roja). Adaptado de: Lowrie (2007).

El funcionamiento del equipo se basa en el fenómeno electromagnético, que es una relación entre el campo eléctrico y el campo magnético. Maxwell establece un conjunto de cuatro ecuaciones que pueden modelar los campos eléctricos y magnéticos del subsuelo.

E: intensidad de campo eléctrico (V/m)

B: inducción magnética (Tesla)

D: Desplazamiento dieléctrico (C/m²)

H: Intensidad de campo magnético (A/m)

J: Densidad de corriente (A/m²)

Ley de Gauss para campos eléctricos

La ley de Gauss explica la relación entre el flujo del campo eléctrico y una superficie cerrada, Ecuación (1). Se define como flujo eléctrico:

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (1)$$

Ley de Gauss para campos magnéticos

Los campos magnéticos, no comienzan y terminan en cargas diferentes, a diferencia de los campos eléctricos. Esta ley primordialmente indica que las líneas de los campos magnéticos deben ser cerradas, Ecuación (2):

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

Ley de Ampere

Ampere formuló una relación para un campo magnético inmóvil y una corriente eléctrica que no varía en el tiempo, Ecuación (3):

$$\nabla \times H - \frac{dD}{dt} = j \quad (3)$$

Ley de Faraday

La ley de Faraday nos habla sobre la inducción electromagnética, la que origina una fuerza electromotriz en un campo magnético. Un campo magnético que depende del tiempo implica la existencia de un campo eléctrico, Ecuación (4):

$$\nabla \times E - \frac{dB}{dt} = 0 \quad (4)$$

En el caso de la adquisición de datos de los SEV se empleó el *STING*, un equipo digital geoelectrico utilizado para mediciones de resistividad. (AGI USA, 2018) (Figura 10). El *STING* cuenta con los siguientes componentes: La consola, unidad central básica llamada *STING R1*; 4 electrodos de acero; 4 carretes, dos para inducir corriente (AB) y los otros dos para medir potencial (MN), con una extensión de 300 y 100 m respectivamente; 4 cables conectores encargados de unir la consola con cada uno de los carretes; 4 pinzas metálicas encargadas de conectar los electrodos a los carretes; una batería de 12 V.

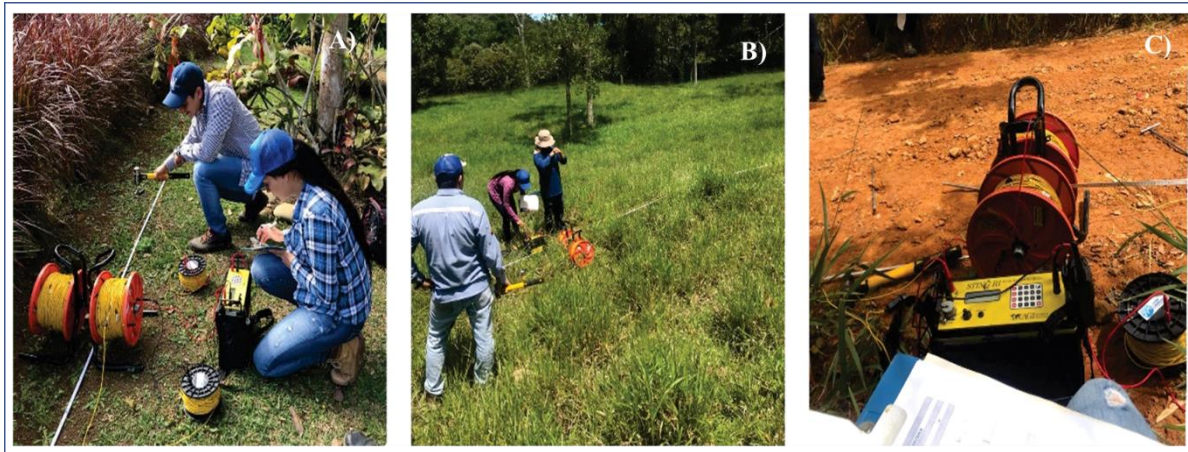


Figura 10. A. Campañas de campo de adquisición de datos SEV, en el sector de La Mesa De Los Santos. B. Campañas de campo de adquisición de datos SEV, en el municipio de Mogotes. C. Campañas de campo de adquisición de datos SEV, en el municipio de Barichara.

El equipo toma automáticamente lecturas consecutivas en un intervalo de tiempo, lo que le permite promediar los resultados finales. La separación máxima entre los electrodos (AB/2) para cada tipo de arreglo se observa en la Tabla 1; la profundidad máxima alcanzada a partir del (AB/2)

fue de 80 m. En los arreglos tipo Wenner la apertura máxima fue de 75 m, debido a que a una distancia mayor los valores de resistividad eran exageradamente altos con respecto a la tendencia, o erróneos según lo indicado por el equipo.

Tabla 1.

Localización de SEV, con arreglo Schlumberger (SCH) y Wenner (WE) y su apertura máxima en (AB/2).

Municipio	SEV	E(m)	N(m)	Altura(msnm)	Arreglo	Apertura maxima (m)
Mogotes	SEV1	1'110.310	1'216.877	1697	SCH	400
					WE	75
	SEV2	1'110.348	1'216.844	1701	SCH	400
					WE	75
	SEV3	1'110.364	1'216.869	1703	SCH	400
					WE	75
	SEV4	1'110.413	1'216.878	1712	SCH	400
					WE	75
Mesa de los santos	SEV1	1'110.344	1'248.725	1685	SCH	400
					WE	150
	SEV2	1'110.442	1'248.730	1681	SCH	400
					WE	150
	SEV3	1'109.688	1'249.535	1673	SCH	150
					WE	75
Barrichara	SEV1	1'095.456	1'226.914	1467	SCH	600
					WE	75
	SEV2	1'109.373	1'226.818	1450	SCH	600
					WE	75
	SEV3	1'095.496	1'226.840	1644	SCH	600
					WE	75

3.2 Procesamiento de Datos

En esta fase se realiza el procesamiento de los datos obtenidos por los SEDT, utilizando software *ViewTEM* (2013), que parte de la curva de resistividad aparente, la cual se obtiene en función del tiempo y se procesa mediante el modelado por capas, siguiendo el método de prueba y error, en el

que se propone un cierto número de capas, dependiendo de las inflexiones de las curvas y los tiempos en los que ocurren las inflexiones, para generar un modelo unidimensional.

Para el modelamiento, la selección de datos que presentan la misma tendencia, y la eliminación de datos ruidosos es necesaria, ya que este método calcula soluciones con base en los datos tomados y puede obtener un número infinito de resultados. Luego de generar un perfil con un ajuste aceptable, este se utiliza para calcular una regresión automática, o inversión, que defina valores óptimos de resistividad a profundidad, bajo el criterio del error cuadrático medio mínimo. (Flores y Velasco, 1998). Luego el modelo de resistividad a profundidad se suaviza definiendo capas que evidencian mayor detalle. El número de capas está dado por la regularización de Tikhonov (Tikhonov y Arsenin, 1997).

El procesamiento de datos obtenidos con los SEV, se hizo por medio del software *IPI2Win* (2011). El *IPI2Win* procesa los datos por medio de la inversión automática, para calcular una resistividad real a diferentes profundidades, ajustando la respuesta que produzca un menor error de ajuste. Para este proceso se usa un filtrado de datos que provee una solución rápida y precisa para una amplia gama de modelos que cubren todas las situaciones geológicas razonables. (Shevnin, 2013). El problema de inversión es resuelto utilizando una variante del algoritmo de Newton, (Muñoz, 2013 y Hamel, 2013) para el número mínimo de capas a partir de la aproximación de Tikhonov (Corbo, 2013). El software con los datos de entrada cargados genera el gráfico de la curva de datos observados con escala logarítmica, los valores de tomados en campo están dados por puntos, y la línea que une todos los puntos es el resultado del suavizado generado por el programa.

El fin del programa es comparar la curva de datos observados con una curva teórica, para obtener los valores reales de resistividades aparentes de cada capa del subsuelo. Si las curvas concuerdan la una con la otra, la curva teórica tendría un error de ajuste aceptado.

Este error de ajuste se obtiene por medio de un procedimiento matemático propuesto por Zohdy (1989), comparando los puntos que componen la curva teórica, con los puntos que componen la resistividad aparente calculada y la curva de datos observados. Cuanto mayor sea el resultado del error medio cuadrático porcentual, mayor es la diferencia entre los puntos de la curva teórica. Según el método propuesto por Zohdy (1989), al encontrar un mínimo determinado menor que 2% respecto a la curva de resistividad aparente o de datos observados es una curva teórica candidata, y menor al 5% es una curva teórica aceptada.

4. Resultados y Discusión

Con las mediciones hechas con los SEV y SEDT, se obtuvieron 36 perfiles geoeléctricos 1D, en los cuales se observaron los contrastes de resistividades a profundidad, en las diferentes locaciones de medida. Empezaremos con la descripción de los resultados de las TRE realizadas por GYS LTDA (2017, a, b, c) que guardan coherencia con la inversión de resistividad de los puntos adquiridos:

En el municipio de Mogotes (GYS LTDA, 2017 a) se observaron tres unidades geoeléctricas; la primera con un rango de resistividad de 120 a 1500 Ohm.m a una profundidad de 10 m

aproximadamente; y la segunda con resistividades entre 10 a 60 Ohm.m a una profundidad de 30 m aproximadamente; por último, una unidad con resistividades entre 500 a 1500 Ohm.m. a profundidad de 80 m. (Figura 11).

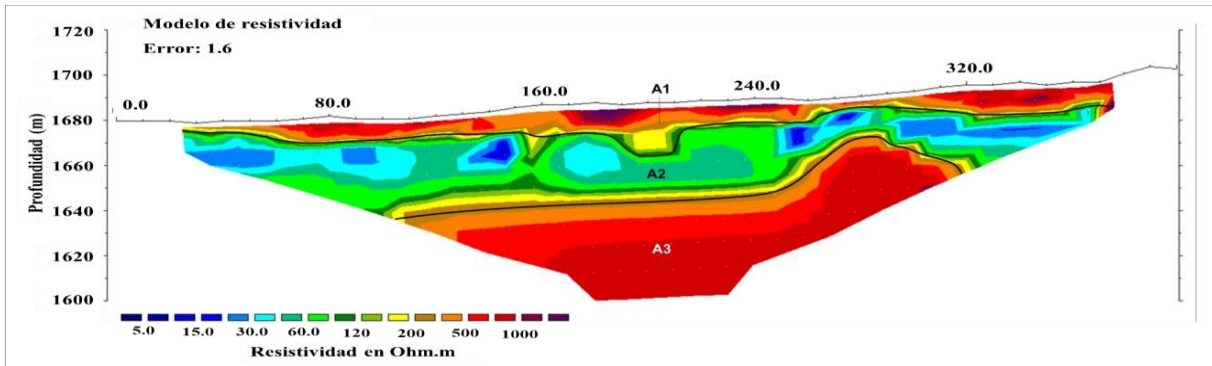


Figura 11. Resultados TRE realizada en la zona de estudio para el municipio de Mogotes. Adaptado de: GYS LTDA (2017, b).

En el municipio de Barichara (GYS LTDA, 2017 b) se observaron dos unidades geoelectricas; la primera con un rango de resistividad de 400 a 900 Ohm.m a una profundidad de 20 m aproximadamente; y la segunda con resistividades entre 35 a 75 Ohm.m a una profundidad de 70 m aproximadamente. (Figura 12).

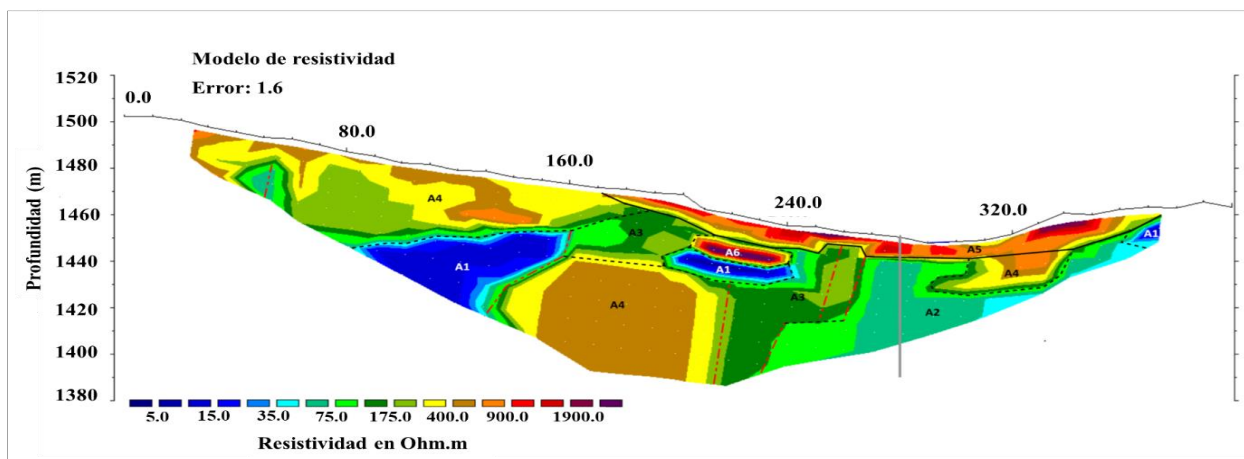


Figura 12. Resultados TRE realizada en la zona de estudio para el municipio de Barichara. Adaptado de: GYS LTDA (2017, b).

En el sector de La Mesa De Los Santos (GYS LTDA, 2017 c) se observaron tres unidades geoelectricas; la primera con un rango de resistividad de 400 a 900 Ohm.m a una profundidad de 20 m aproximadamente; y la segunda con resistividades entre 300 a 500 Ohm.m a una profundidad de 30 m aproximadamente; por último, una unidad con resistividades entre 1500 a 1600 Ohm.m. a profundidad de 60 m. (Figura 13).

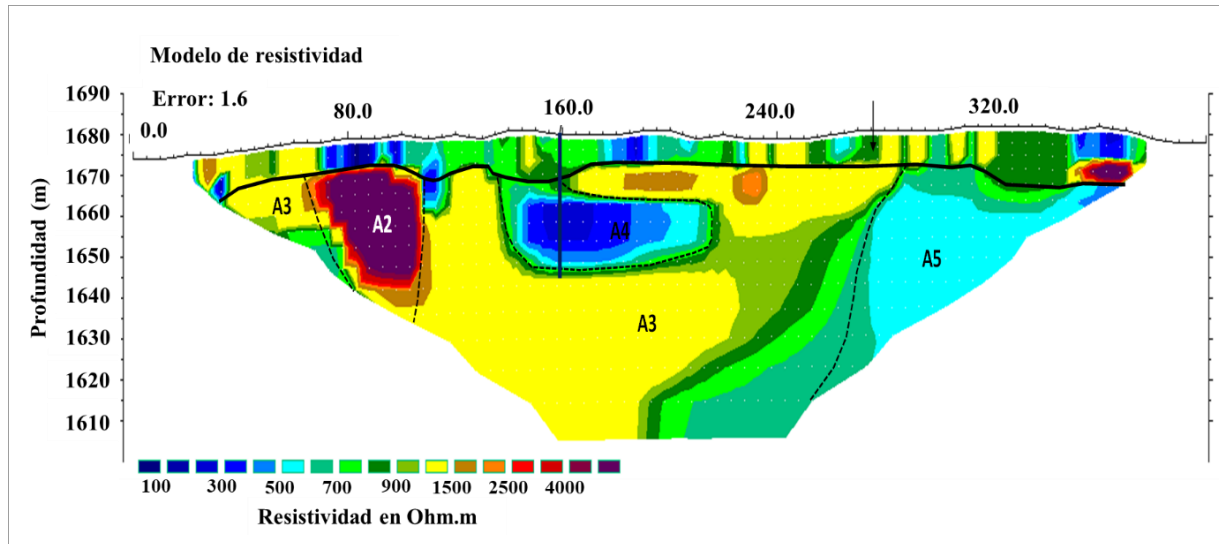


Figura 13. Resultados TRE realizada en la zona de estudio para el sector de La Mesa De Los Santos. Adaptado de: GYS LTDA (2017, c).

4.1.1 Resultados del municipio de Mogotes. Inicialmente, en el municipio de Mogotes se realizaron 8 SEV (Anexo A), donde la profundidad de investigación máxima fue de 133 m, y los rangos de resistividad estuvieron entre 13.1 a 2688 Ohm.m aproximadamente. En la Tabla 2.1A se pudieron observar que los cambios en las resistividades se dieron a profundidades similares en todos los SEV, en dos capas de tope a base con espesores promedio de 2.01 a 2.91 m, y resistividad entre 125 a 1670 Ohm.m, y de 18 a 35 m, y resistividad de 13.1 a 118 Ohm.m. Estos resultados se reafirman con los valores obtenidos en los ensayos tipo Wenner (Tabla 2.1B), cuya profundidad de estudio alcanzó los 13 m, y en el que se muestra una capa de espesores promedio de 2.45 a

2.519 m y resistividad entre 1063 y 2924 Ohm.m, que coinciden con la primera capa de las mediciones hechas con el arreglo Schlumberger.

Tabla 2.

Ejemplo de los resultados de resistividades reales, espesores y profundidades del subsuelo a partir de SEV, de arreglo tipo Schlumberger, en los sectores del municipio de Mogotes.

1. Arreglo Schlumberger-Mogotes			
N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad
1	80.7	0.612	0.612
2	626	0.567	1.18
3	1670	0.835	2.01
4	20.7	6.39	8.4
5	57.8	12	20
6	103	16.6	37
7	286	34.3	71.3
8	885	—	—
Error 2.5%			

Tabla 3.

Ejemplo de resultados de resistividades reales, espesores y profundidades del subsuelo a partir de SEV, de arreglo tipo Wenner, en los sectores del municipio de Mogotes.

1. Arreglo Wenner- Mogotes			
N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad
1	1063	2.45	2.45
2	43.4	9.35	11.8
3	93.3	—	—
Error 2.05 %			

Partiendo del procesamiento mencionado anteriormente, se generó un perfil geoelectrico unificado, donde se promediaron dichas resistividades y profundidades. En los primeros 2 m de

profundidad aumento la resistividad, desde 1026 a 2924 Ohm.m, seguidamente hubo una disminución hasta los 30 m, con resistividades entre 13.1 a 118 Ohm.m, y a los 76 m de profundidad nuevamente aumento, con un rango de resistividad de 160 a 372 Ohm.m como se observa en la Figura 14A.

Para cada tipo de litología existe un rango característico de resistividad propuesto por diversos autores como, Kalenov (1957), Telford (1990), Keary (1996), Orellana y Mooney (1996), Lowrie (2007); En este estudio la clasificación se hizo con la tabla de resistividades propuesta por Palacky (1987). (Figura 14B).

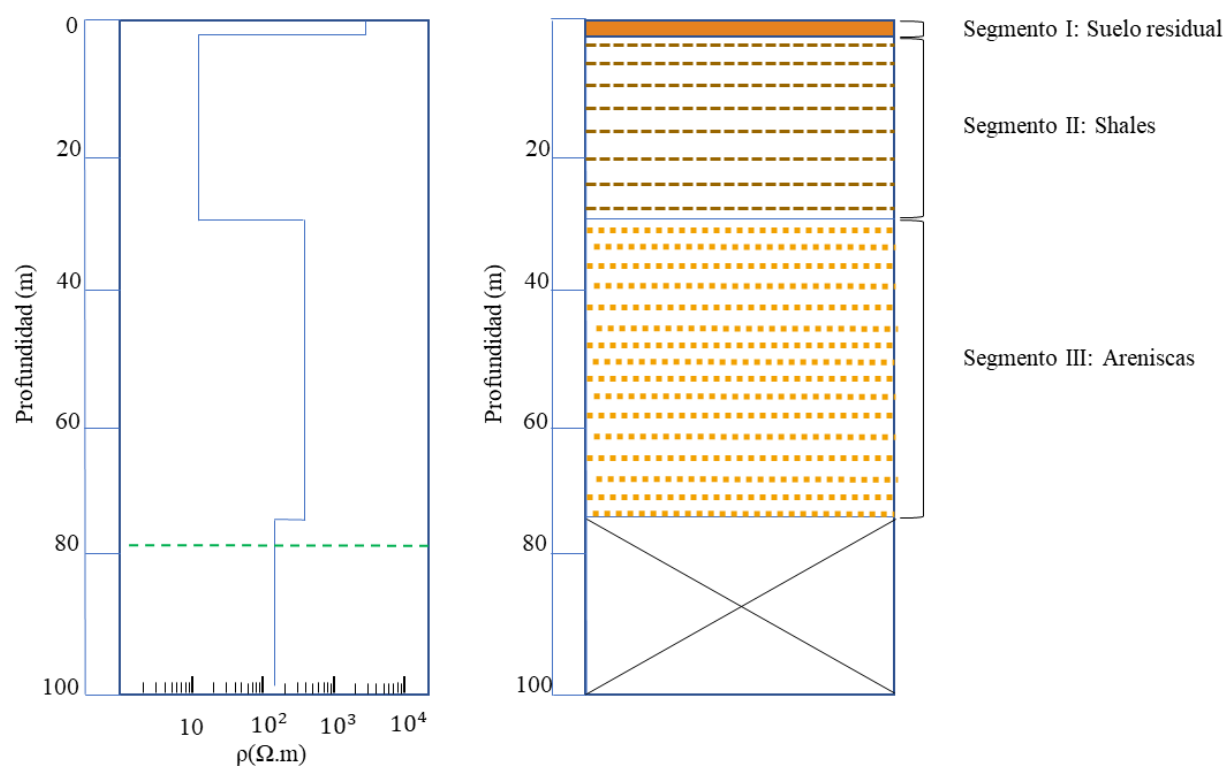


Figura 14. A. Perfil geoelectrico generalizado, para la zona de estudio en el municipio de Mogotes, a partir de SEV. B. Perfil geológico basado en la clasificación de Palacky (1987).

También, en el municipio de Mogotes, se realizaron 2 SEDT (Anexo B), que alcanzaron profundidades de medición de hasta 257 m aproximadamente, con rangos de resistividad entre 21.7 a 138 Ohm. Tabla 3.

Tabla 3.

Resultados de resistividad, desviación estándar de la resistividad (Res. DEST), espesor de las capas, desviación estándar del espesor de las capas (Esp. DEST), profundidad y desviación estándar de la profundidad (Pro. DEST), a partir de SEDT, en el área de estudio en el municipio de Mogotes.

N	$\rho(\Omega.m)$	Res.DEST	Espesor (m)	Esp.DEST	Profundidad (m)	Pro.DEST
1	52.2	1.29	3.68	1.001	3.68	1.001
2	41.8	1.35	4.15	1.001	7.83	1.001
3	37.5	1.31	4.69	1.001	12.5	1.001
4	35.7	1.34	5.29	1.001	17.8	1
5	34.5	1.32	5.97	1.001	23.8	1
6	53	1.42	6.74	1.001	30.5	1
7	90.7	1.53	7.61	1.001	38.1	1
8	126	1.61	8.6	1.001	46.7	1
9	138	1.65	9.71	1.001	56.4	1
10	124	1.64	11	1.001	67.4	1
11	94.2	1.59	12.4	1.001	79.8	1
12	64.1	1.52	14	1.001	93.7	1
13	41.9	1.46	15.8	1.001	110	1
14	30	1.41	17.8	1.001	127	1
15	28.7	1.41	20.1	1.001	147	1
16	38.2	1.46	22.7	1.001	170	1
17	57.2	1.54	25.6	1.001	196	1
18	81.4	1.73	28.9	1.001	225	1
19	104	2.05	32.7	1.001	257	1
20	120	2.52	—	—	—	—

Para cada SEDT se obtuvieron 8 perfiles geoeléctricos (Anexo C), (Figura 15), a partir de ello se logró observar que los contrastes de resistividad se encuentran a profundidades similares en

todas las gráficas. La información obtenida de los perfiles se integró, para generar un modelo del comportamiento de resistividad, profundidad y espesores de las capas, evidenciado en la Figura 16A, y se realizó una interpretación de las unidades geológicas a partir de la definición de resistividades, hecha por Palacky (1987). (Figura 16B).

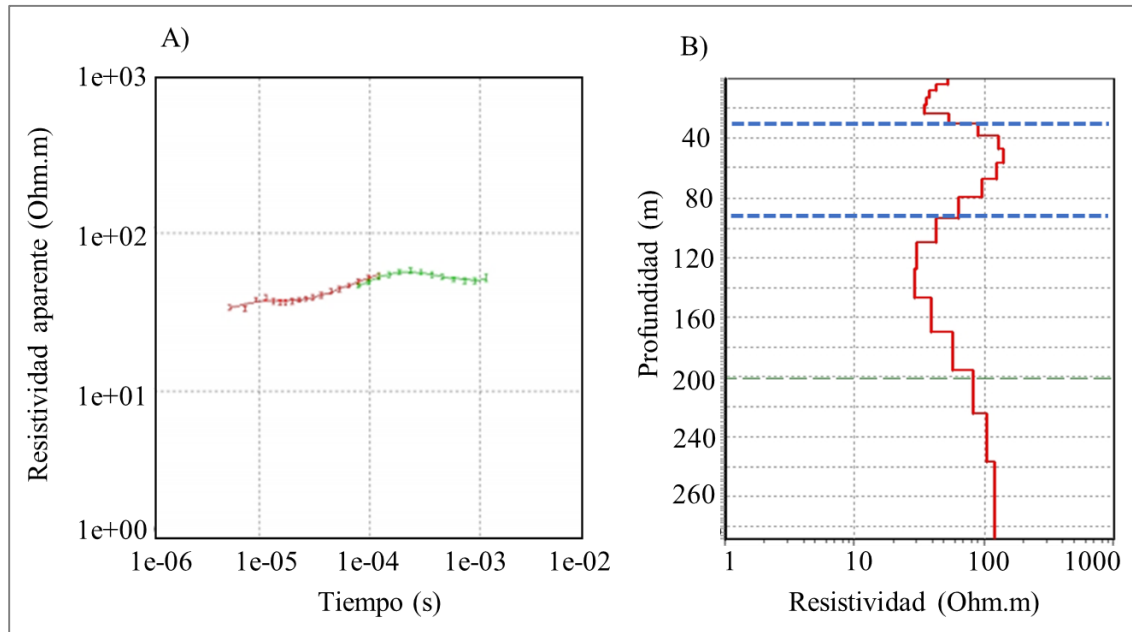


Figura 15. A. Curva de decaimiento. B. Perfil unidimensional generado a partir de la curva de decaimiento para los SEDT en el municipio de Mogotes.

Las líneas punteadas de color azul en los perfiles, indican el límite de las capas teniendo en cuenta los puntos de inflexión, mientras que la línea punteada de color verde corresponde a la máxima profundidad de confiabilidad de datos; dicha confiabilidad es estimada por el equipo dependiendo de la longitud de las antenas emisoras y receptoras. El primer punto de inflexión se observa a un rango de resistividad entre 34.5 a 53 Ohm.m y una profundidad de 30.5 m; el siguiente cambio con un rango de resistividad entre 94.2 a 138 Ohm.m y una profundidad 79 m.

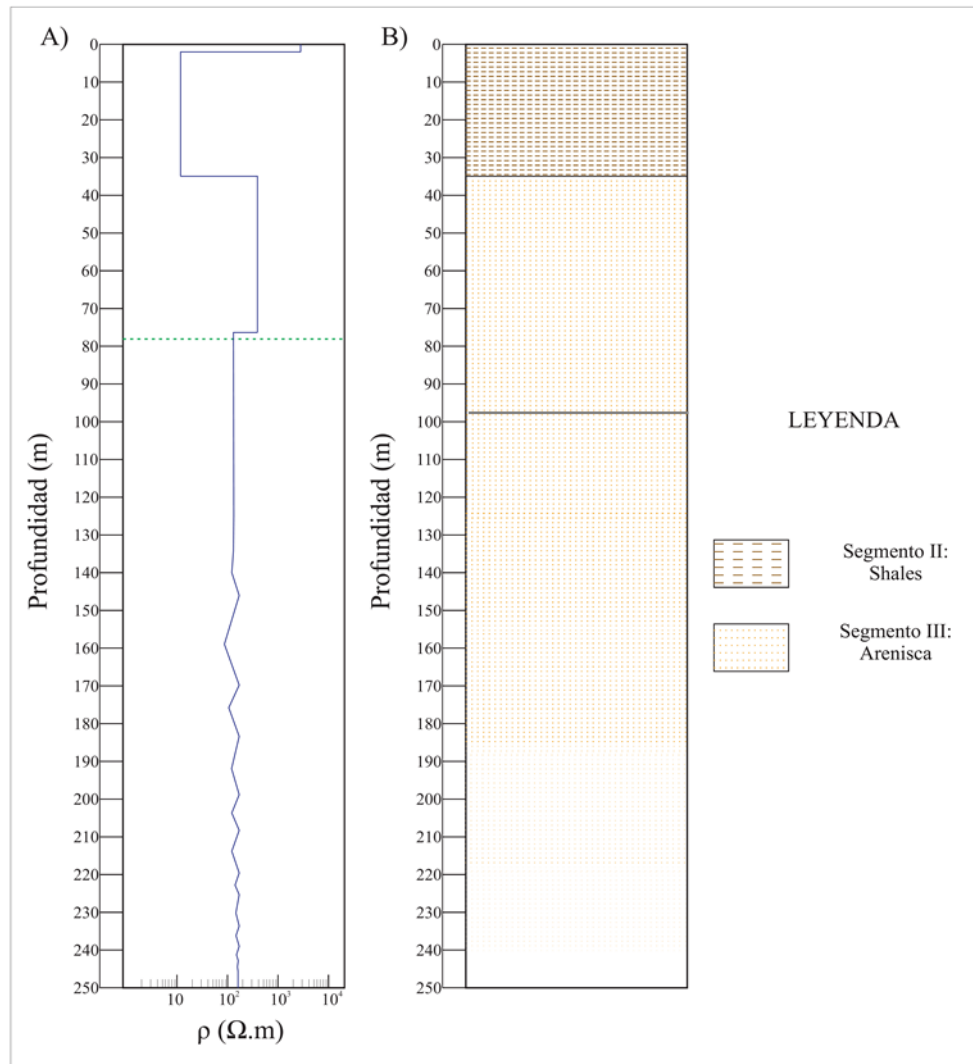


Figura 16. A. Perfil geoelectrico generalizado, para la zona de estudio en el municipio de Mogotes, a partir de SEDT. B. Perfil geológico basado en la clasificación de Palacky (1987).

4.1.2 Resultados municipio de Barichara. En la segunda zona, en el municipio de Barichara, se realizaron 6 SEV (Anexo D) donde la profundidad máxima de investigación alcanzada se dio a 153 m, y los rangos de resistividad fueron de 63.1 a 6473 Ohm.m aproximadamente. En la Tabla 4.1A se pudieron observar que los cambios en las resistividades se dieron a profundidades similares, con espesores promedio de 1.11 a 2.36 m, y resistividad entre 1388 y 6473, para la

primera capa; de 12.6 a 49.5 m de profundidad y resistividad entre 329 y 337 Ohm.m, para la segunda capa; de 27.5 a 153 m de profundidad y una resistividad de 37.8 a 138 Ohm.m, para la tercera capa. Estos resultados se reafirman con los valores obtenidos en los ensayos de tipo Wenner (Tabla 4.1B), mostrando espesores promedio de 3 a 3.67 m y resistividad entre 1820 y 6147 Ohm.m, que coinciden con la primera capa.

Tabla 4.

Ejemplo de resultados de resistividades reales, espesores y profundidades del subsuelo a partir de SEV, de arreglo tipo Schlumberger, en los sectores del municipio de Barichara

1. Arreglo Schlumberger- Barichara			
N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad
1	1697	0.69	0.69
2	6473	1.67	2.36
3	329	47.1	49.5
4	67.3	4.64	54.1
5	85.8	35	89.1
6	37.8	63.4	153
7	1136	—	—
Error 2.46 %			

Tabla 5.

Ejemplo de resultados de resistividades reales, espesores y profundidades del subsuelo a partir de SEV, de arreglo tipo Wenner, en los sectores del municipio de Barichara.

1. Arreglo Wenner- Barichara			
N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad
1	6147	3	3
2	399	9.5	12.5
3	408	—	—
Error 2.81 %			

Junto con el procesamiento de los datos y los resultados de resistividades reales, se generaron perfiles geoelectricos generales, donde se mostró inicialmente un aumento en la resistividad de 6473 Ohm.m a una profundidad promedio de 2.39 m, posteriormente se observa una disminución a los 27.25 m, entre 400 a 750 Ohm.m, y finalmente un nuevo descenso en la resistividad a los 87.27 m, con rangos de 35 a 58 Ohm.m. (Figura 17A). La interpretación geológica de estas tenencias se hizo teniendo en cuenta los valores teóricos de resistividad definidos por Palacky (1987). (Figura 17B).

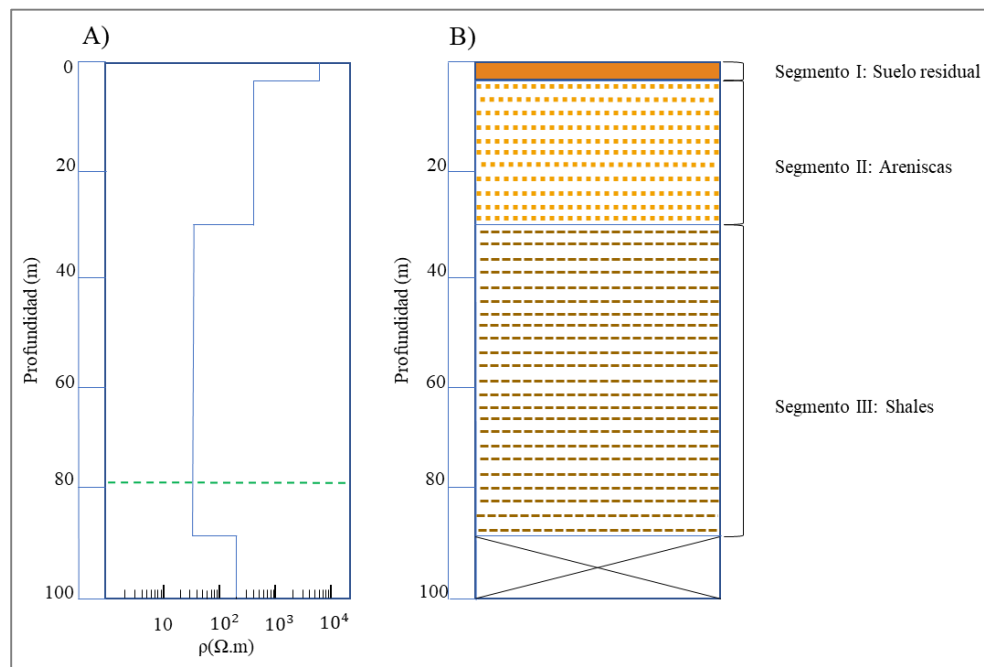


Figura 17. A. Perfil geoelectrico generalizado, para la zona de estudio en el municipio de Barichara, a partir de SEV. B. Perfil geológico basado en la clasificación de Palacky (1987).

Así mismo, en el Municipio de Barichara, se realizaron 2 SEDT (Anexo E), que alcanzaron profundidades de hasta 148 m aproximadamente, con rangos de resistividad entre 12.8 a 292 Ohm. (Tabla 5).

Tabla 5.

Resultados de resistividad, desviación estándar de la resistividad (Res. DEST), espesor de las capas, desviación estándar del espesor de las capas (Esp. DEST), profundidad y desviación estándar de la profundidad (Pro. DEST), a partir de SEDT, en el área de estudio en el municipio de Barichara.

N	$\rho(\Omega.m)$	Res.DEST	Espesor (m)	Esp.DEST	Profundidad (m)	Esp.DEST
1	72,3	1,64	2,02	1,001	2,02	1,001
2	68	1,43	2,29	1,001	4,31	1,001
3	63,7	1,52	2,58	1,001	6,89	1,001
4	65,4	1,54	2,91	1,001	9,8	1
5	76,9	1,52	3,29	1,001	13,1	1
6	93,5	1,56	3,71	1,001	16,8	1
7	99,7	1,59	4,19	1,001	21	1
8	82,6	1,57	4,73	1,001	25,7	1
9	50,2	1,49	5,34	1,001	31,1	1
10	25,9	1,36	6,03	1,001	37,1	1
11	22,8	1,36	6,81	1,001	43,9	1
12	29,2	1,44	7,69	1,001	51,6	1
13	26,9	1,43	8,68	1,001	60,3	1
14	17,9	1,36	9,8	1,001	70,1	1
15	17	1,37	11,1	1,001	81,1	1
16	29,3	1,47	12,5	1,001	93,6	1
17	52,3	1,6	14,1	1,001	108	1
18	80,8	1,76	15,9	1,001	124	1
19	108	1,97	18	1,001	142	1
20	130	2,28	—	—	—	—

Para el caso de los SEDT se obtuvieron 8 perfiles geoelectricos (Anexo F); en la Figura 18 se pueden observar un perfil con su respectiva curva de decaimiento, donde fue posible ver los contrastes de resistividad a profundidades similares, y se pudo generar un modelo unificado, que evidencia dos paquetes de litología diferentes. (Figura 18B).

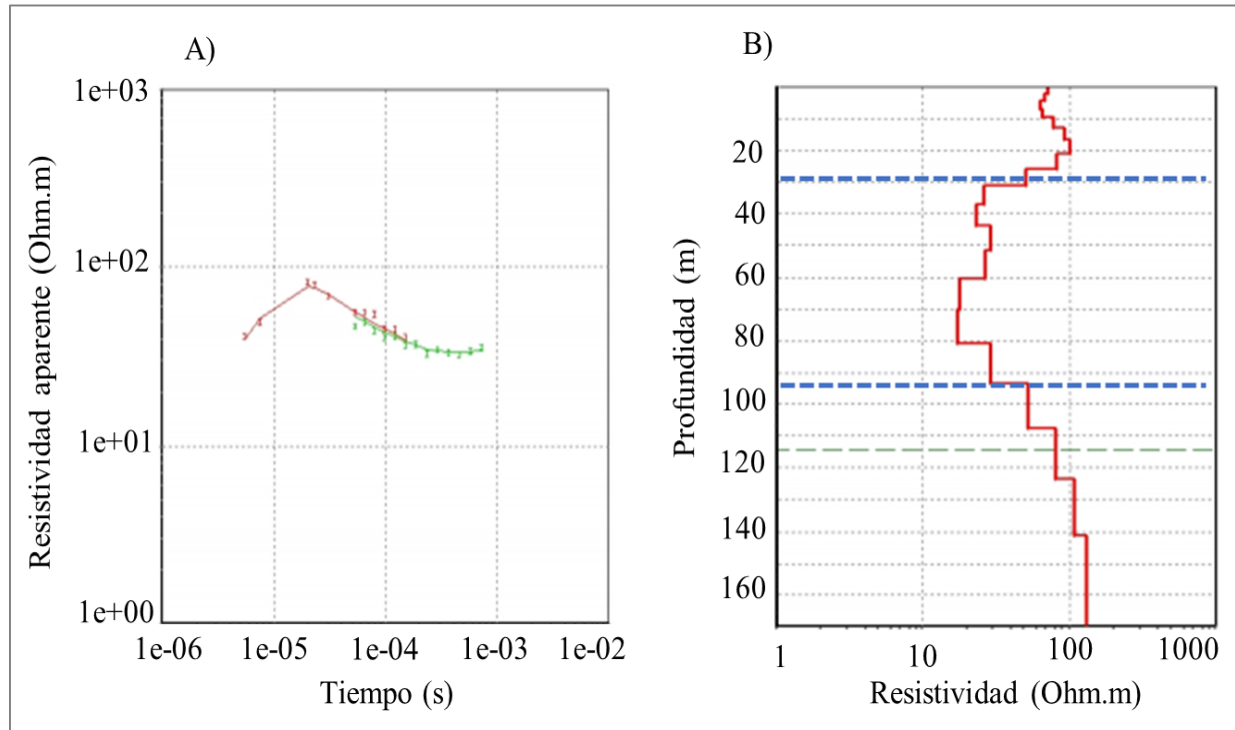


Figura 18. A. Curva de decaimiento. B. Perfil unidimensional generado a partir de la curva de decaimiento para los SEDT en el municipio de Barichara.

Las líneas punteadas azules en los perfiles, indican el límite de las capas teniendo en cuenta los puntos de inflexión; mientras que la línea punteada verde corresponde a la máxima profundidad de confiabilidad de datos. El primer punto de inflexión se observa a un rango de resistividad entre 50.2 a 99.7 Ohm.m y a una profundidad de 31.1 m; el segundo punto de inflexión se marca a un rango de resistividad entre 17 a 29.2 Ohm.m y una profundidad de 81.1 m (Figura 19A). La interpretación de las unidades geológicas se hace a partir de la definición de resistividades teóricas hechas por Palacky (1987). (Figura 19B).

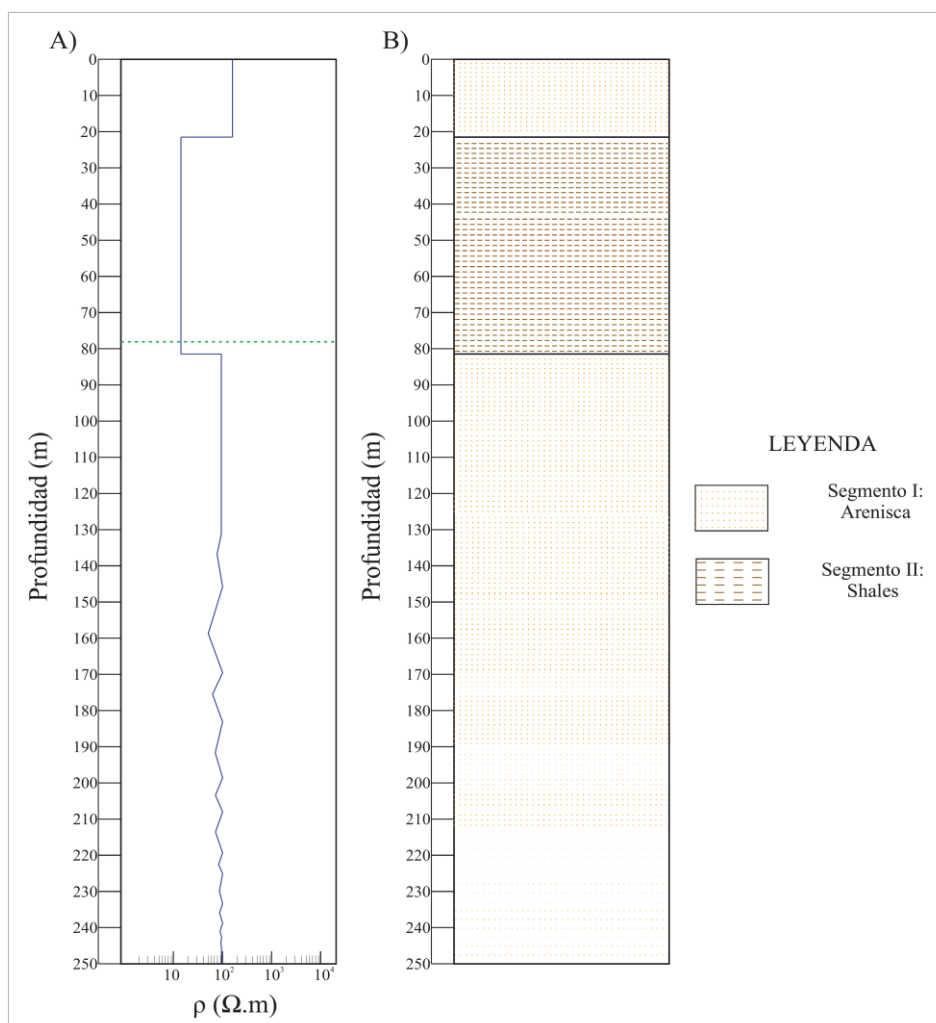


Figura 19. A. Perfil geoelectrico generalizado, para la zona de estudio en el municipio de Barichara, a partir de SEDT. B. Perfil geológico basado en la clasificación de Palacky (1987).

4.1.3 Resultados sector de la Mesa de los Santos. En La Mesa De Los Santos, se realizaron 6 SEV (Anexo G), donde la profundidad máxima de investigación alcanzada se dio a 69 m, y los rangos de resistividad fueron de 548 a 1872 Ohm.m aproximadamente. Tabla 6.

Tabla 6.

Ejemplo de resultados de resistividades reales, espesores y profundidades del subsuelo, para el sector de la Mesa de los Santos.

1. Arreglo Schlumberger			
N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad
1	722.4	7.807	7.807
2	724.7	11.79	19.6
3	717.1	3.369	22.97
4	548.1	4.155	27.12
5	1872	41.88	69.01
6	320.3	-	-
Error 1.88%			

Mediante del procesamiento de los datos y los resultados de resistividades reales, se generaron perfiles geoelectricos unificados, donde se promediaron dichas resistividades y profundidades, mostrando a los 20 m rangos de resistividades de 472.9 a 902 Ohm.m, posteriormente se observa una disminucion hasta los 27.12 m con resistividades entre 501.2 a 548.1 Ohm.m, y finalmente un nuevo aumento en la resistividad que alcanza los 76 m y resistividades entre 1801 a 1872 Ohm.m, como se muestra en la Figura 20A. La interpretaci3n de las unidades geol3gicas se hace a partir de la definici3n de resistividades te3ricas hecha por Palacky (1987). (Figura 20B).

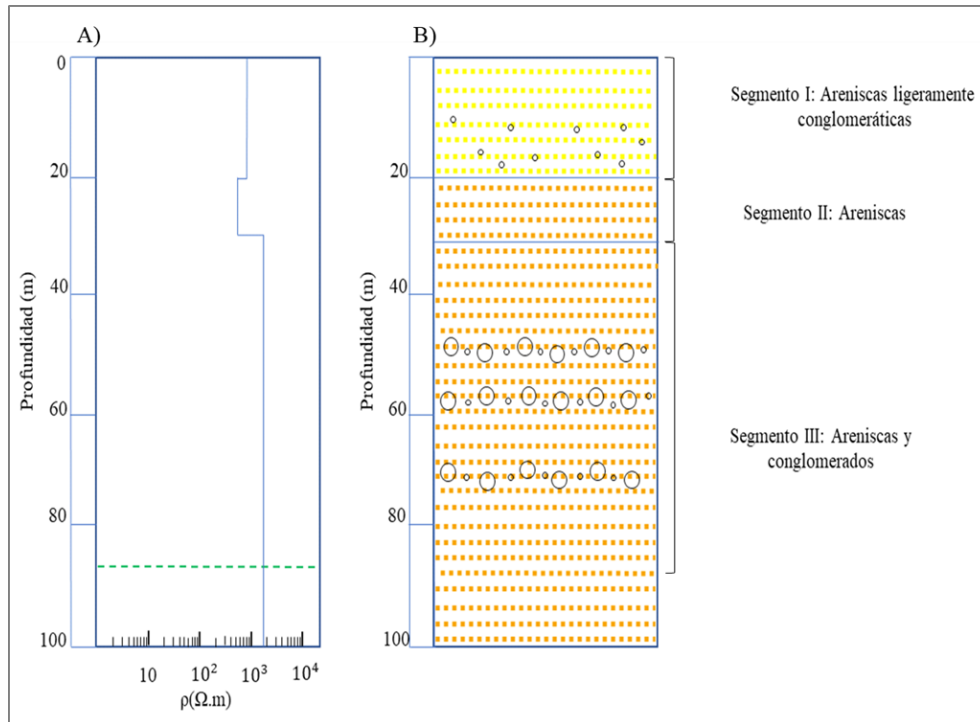


Figura 20. A. Perfil geoelectrico generalizado, para la zona de estudio en el sector de La Mesa De Los Santos, a partir de SEV. B. Perfil geológico basado en la clasificación de Palacky (1987).

4.1.4 Correlación de resultados. Partiendo de los resultados mostrados anteriormente, se identificaron capas con características de resistividades y espesores similares. Una vez identificadas las tendencias de resistividad a profundidad, de las formaciones de estudio, se compararon con la distribución del área sugerida por estudios previamente realizados (TRE), para hacer equivalencias y obtener una definición del comportamiento en el subsuelo de la formación Simití y los Santos.

Para la zona del municipio de Mogotes, se pudo evidenciar que la Formación Simití presenta un paquete de shales con un espesor promedio de 33 m, y otro de areniscas de 41 m aproximadamente, mostrado en la Figura 21.

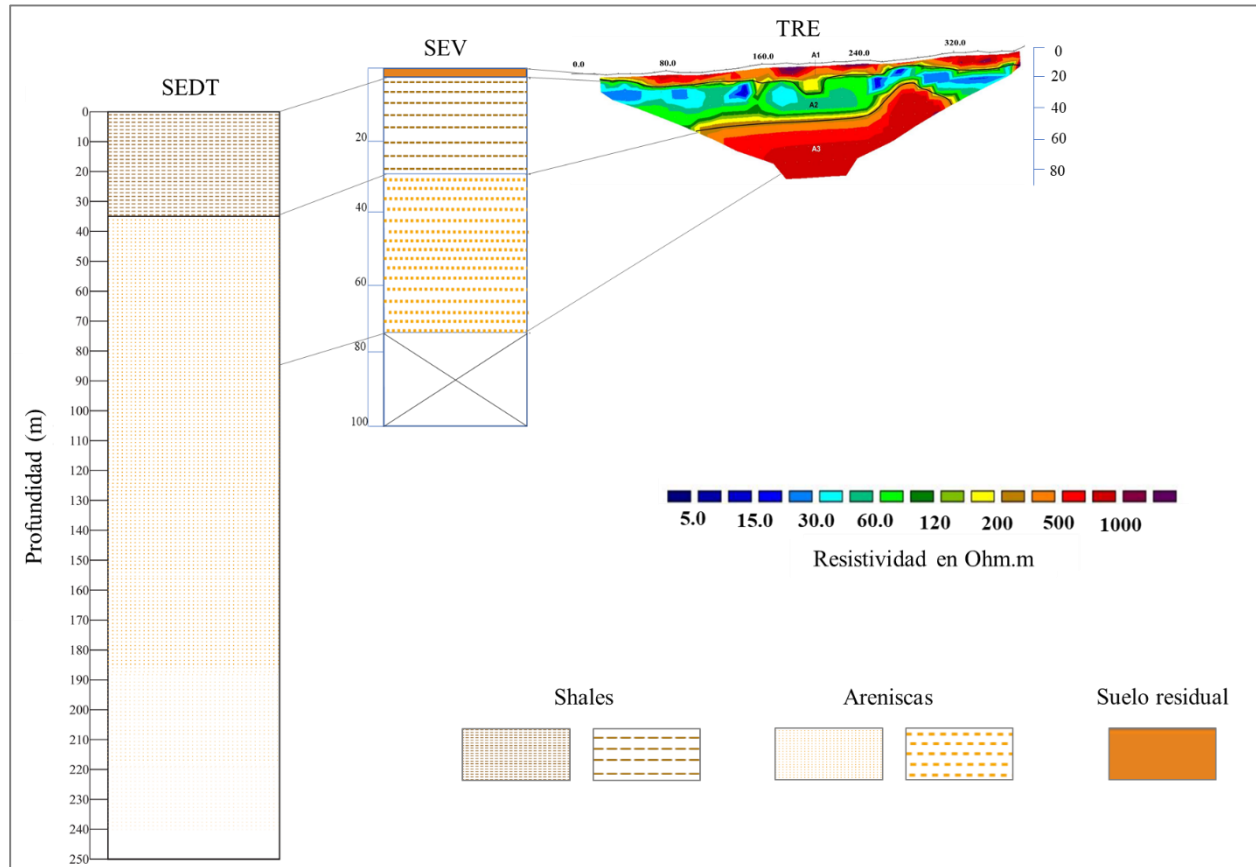


Figura 21. Correlación de resultados, de cada una de las técnicas empleadas para la zona del municipio de Mogotes.

Para la zona del municipio de Barichara, para el muestreo de la formación Simití, se sugiere una capa de areniscas, con un espesor promedio de 24.86 m, y una infrayacente de shales de 60.02 m aproximadamente, mostrado en la Figura 22.

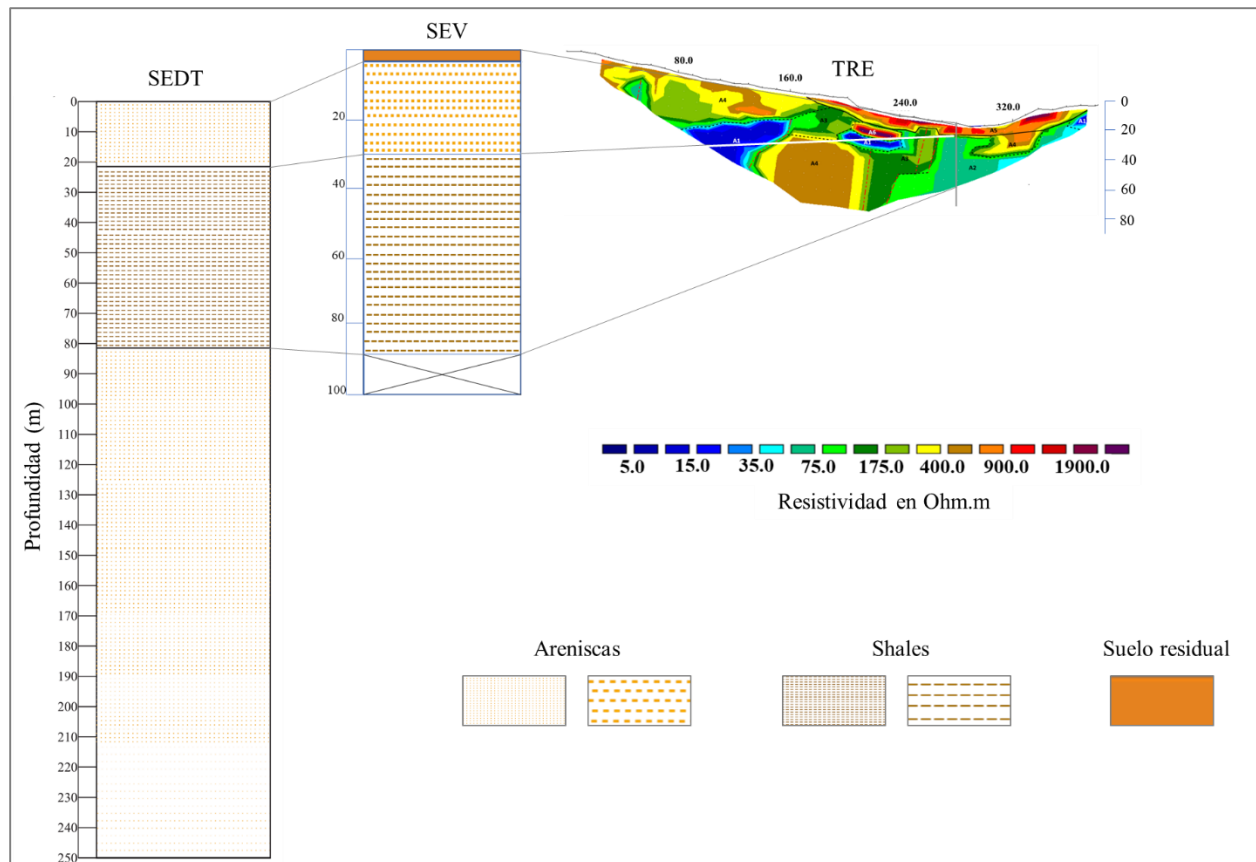


Figura 22. Correlación de resultados, de cada una de las técnicas empleadas para la zona del municipio de Barichara.

Para la zona del sector de La Mesa De Los Santos, se pudo evidenciar que el paquete de areniscas ligeramente conglomeráticas, presenta un espesor promedio de 20 m; el de areniscas de 15 m aproximadamente; y el de areniscas conglomeráticas 65 m, mostrado en la Figura 23.

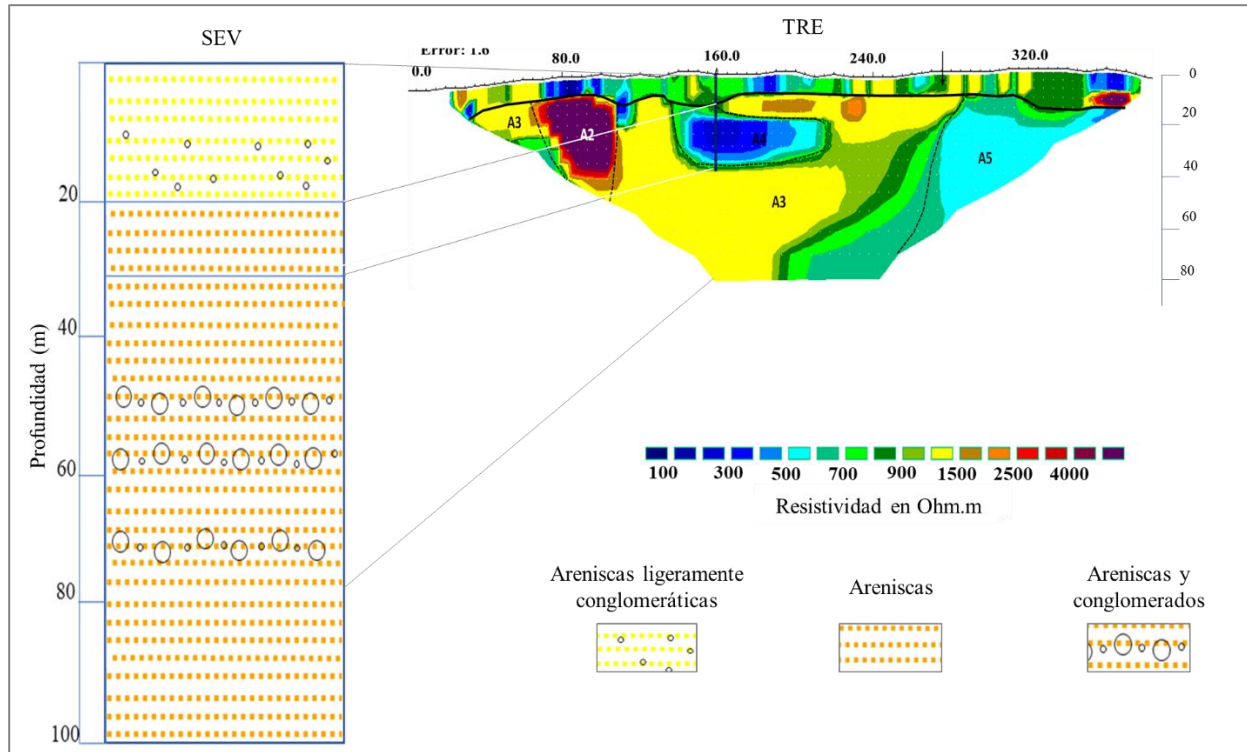


Figura 23. Correlación de resultados, de cada una de las técnicas empleadas para la zona del sector de La Mesa De Los Santos.

4.2 Discusión de Resultados

Correlacionando los resultados obtenidos en la investigación, con base en técnicas de exploración geoelectricas aplicadas, y con un análisis efectuado a través de la información en la zona de estudio, se identificaron tres unidades geoelectricas para cada área, pertenecientes a las formaciones Simití y Los Santos.

Según la litología del municipio de Mogotes (Moreno y Sarmiento, 2002), en el área de estudio predominan paquetes de shales y capas de areniscas delgadas, con intercalaciones de limolitas. Con la integración de la información geoelectrica se determinaron espesores promedio de 33 m

para los shales y 41 m para las areniscas; dichos espesores tienen concordancia con la parte inferior de la sección estratigráfica de la formación Simití (Figura 5).

Igualmente, en la zona del municipio de Barichara se tuvo encuentra la sección estratigráfica propuesta por Moreno y Sarmiento (2002); con la diferencia de que los resultados arrojados tienen concordancia con la parte superior de la sección mencionada. Inicialmente se determinaron areniscas con espesore promedio de 24.86 m y lodolitas de 60.02 m.

Según la litología del sector de La Mesa De Los Santos (SGC, 2018), en el área de estudio predominan areniscas ligeramente conglomeráticas, areniscas y areniscas con conglomerados; a partir de la información geoelectrica, se determinaron espesores promedio de 20 m, para las areniscas ligeramente conglomeráticas, 15 m, para las areniscas y 65 m, para las areniscas con conglomerados; estos espesores tienen concordancia con la sección estratigráfica de la formación Los Santos propuesta por Aldana (2008). (Figura 6).

La descripción de los perfiles geoelectricos se realizó teniendo en cuenta los límites de aumento y descenso de la resistividad, que, en los SEV, SEDT y TRE se presentaban a profundidades similares, aunque cada método se caracterizó por arrojar información en detalle en diferentes sectores; los SEV presentaron buena resolución en las partes más someras evidenciando el suelo, principalmente para los municipios de Mogotes y Barichara, sin embargo no alcanzaron altas profundidades en la vertical; mientras que los SEDT no permitían dar detalle en los primeros metros, pero alcanzaron mayores profundidades, utilizando los modelos suavizados. Asimismo,

las TRE tuvieron un comportamiento similar al de los SEV, no obstante, adicionaron información con imágenes 2D que reflejan de mejor manera el comportamiento en el subsuelo.

Es importante resaltar que al relacionar diferentes métodos eléctricos se puede eliminar la incertidumbre en los resultados arrojados, ya que la resistividad real es un valor relativo que puede ir variando a la hora de ser interpretada dependiendo de la litología presente.

5. Conclusiones

A nivel metodológico y práctico, la adquisición de SEDT, resultó siendo más eficiente con respecto a los SEV ya que esta técnica fue más rápida y se logró triplicar la profundidad de investigación. Cabe aclarar que no hubo buena resolución en los primeros metros de investigación, algo que sí se obtuvo con los SEV.

De acuerdo con el análisis efectuado mediante la integración de la información de las zonas de estudio se identificaron dos unidades geoelectricas en el Municipio de Mogotes, clasificadas como lodolitas, con un espesor de 33 m y rangos de resistividad de 13.1 a 118 Ohm.m y areniscas con un espesor de 41 m y rangos de resistividad de 138 a 372 Ohm.m; una capa de suelo residual, con un espesor de 2 m y rangos de resistividad de 13.1 a 2688 Ohm.m, que corresponden a la parte inferior de la formación Simití. De igual manera en el Municipio de Barichara se determinaron dos unidades geoelectricas, clasificadas como areniscas con un espesor de 24.86 m y rangos de resistividad de 154 a 399 Ohm.m y lodolitas con un espesor 60.02 m y rangos de resistividad de 17 a 138 Ohm.m; el suelo residual de este sector tenía un espesor de 2.39 m con rangos de

resistividad de 1421 a 6473 Ohm.m, pertenecientes a la parte superior de la formación Simití. Por último, en La Mesa De Los Santos, se pudieron identificar tres unidades geoelectricas, clasificadas como, areniscas ligeramente conglomeráticas con un espesor promedio de 20 m y rangos de resistividad de 472.9 a 902 Ohm, areniscas con un espesor de 15 m y rangos de resistividad de 300 a 548.1 Ohm.m; areniscas con conglomerados, con un espesor de 65 m y rangos de resistividad de 1500 a 1872 Ohm.m, todas estas siendo parte de la formación Los Santos.

Una de las ventajas de evaluar dichos sondeos eléctricos y electromagnéticos, es que cada uno proporciona información relevante a diferentes profundidades, lo que los hace complementarios y correlacionable; En este estudio se pudo determinar el comportamiento del subsuelo, y el espesor de las capas, hasta la profundidad de correlación alcanzada, que fue de 80 m.

Referencias Bibliográficas

- Advanced Geosciences, Inc. AGI USA. 2018. SuperSting. Consultado el 1 de agosto del 2018.
<https://www.agiusa.com/>.
- Aldana, S. 2008. Estratigrafía de la formación los Santos, en las secciones de la Navarra y el Calicho en La Mesa De Los Santos, departamento de Santander. Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander.
- Geología y Servicios GYS LTDA. 2017, (a). Exploración geofísica de aguas subterráneas mediante el método de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) en la finca arcabuco, ubicada en el municipio de San Gil, Santander.
- Geología y Servicios GYS LTDA. 2017, (b). Presentación del informe técnico de resultados de: exploración geofísica de aguas subterráneas mediante el método de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) en el municipio de Barichara, Santander.
- Geología y Servicios GYS LTDA. 2017, (c). Presentación del informe técnico de resultados de: exploración geofísica de aguas subterráneas mediante el método de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) en la región de La Mesa De Los Santos, Santander.
- González, T., Viridiana, B. 2012. Definición de zonas de fracturamiento empleando tomografía de resistividad eléctrica 3D. Mexico
- Google 2017. *Mapa departamento de Santander, Colombia en Google Earth*. Consultado el 1 agosto del 2018. <https://earth.google.com/web/>.
- GuidelineGeo. 2018. *ABEM WalkTEM products*. Consultado el 11 de abril del 2018.
<https://www.guidelinegeo.com/product/abem-walktem/>.

- Hamel, L. 2013. The Backprop Algorithm for ANNs. The University of Rhode Island, Departament of Computer Science and Statistics. Island.
- HydroGeophysics Group, Aarhus, Dinamarca. 2013. WalkTEM™ Now has ViewTEM Software as Standard.
- IPI2Win. 2011. *Interpretation of curve. Russia, Moscow, Moscow State University, Geological Faculty, Department of Geophysics*. Consultado el 15 de marzo de 2018. <http://geophys.geol.msu.ru/ipi2win.htm>
- Kalenov, N. 1957. Interpretación de curvas de sondeos eléctricos verticales, versión española, Moscú.
- Lowrie, W. 2007. Fundamental of Geophysics (Ed. 2). (4) (pp. 261-263). *Cambridge University*. Cambridge, England.
- Moreno G., y Sarmiento, G. 2002. Estratigrafía Cuantitativa de las Formaciones Tablazo y Simití en las localidades de Sáchica (Boyacá) y Barichara - San Gil (Santander), Colombia. - Geología colombiana, Bogotá. *Revista Unal*. N. 27. 51-74.
- Newman, A., Hohmann, W., y Anderson, L., 1986. Transientelectromagnetic response of a three-dimensional body in a layered earth, *Earth Science Laboratory, University of Utah REsearch Institute* GE,51, 1608-1627.
- Orellana, E., y Mooney, H. 1996. Master Tables and Curves for Vertical Electrical Sounding over layered structures. Madrid, España: *Interciencia*.
- Palacky, G. 1987. Resistivity characteristics of geologic targets. *Geosciences Journal*, 3, 138-144.
- Servicio Geológico Colombiano. 1985. *Plancha 120, escala 1:100.000. Bucaramanga, Santander*. Consultado el 8 de abril del 2018 <https://www.sgc.gov.co/>

- Shevnin, V. 2013. Russia, Moscow, Moscow State University, Geological Faculty, Department of Geophysics. Consultado el 3 de diciembre de 2018. V.A. Shevnin, I.N.Modin. <http://geophys.geol.msu.ru/ipi2win.htm>.
- Tikhonov, N. y Arsenin, Y. 1997 *Regularization for Ill-posed Cauchy problems associated with generators of analytic semigroups*. (pp. 38-54). Washington, DC.
- Kauahikaua, J. 1981. Interpretation of time-domain electromagnetic soundings in the east rift geothermal area of kilauea volcano, Hawaii. U. S. *Department of the Interior Geological Survey*. 1-25.
- Orellana, E. 1982. Prospección Geoelectrica en Corriente Continua. 2ª ed. Madrid, Paraninfo. Vol. 1.
- Zohdy, R. 1989. A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. *Society of Exploration Geophysicists*. 54(2), 245-253.
- Telford, M., Geldart, P. y Sheriff, E. 1990. *Applied Geophysics* 2nd Edition, Cambridge. LIBRO
- Kearey, P. y Brooks, M. 1991. An introduction to Geophysical exploration. 2da. Edition. *Blackwell scientific publications*, (pp. 254). Oxford.
- Flores, C. y Velasco N., 1998. A comparative analysis between transientelectromagnetic soundings and resistivity soundings in the Tres Virgenes geothermal zone Mexico, Vol 47, 3, 183-199.
- Fitterman, D., y Deszcz-Pan M. 1999. Results of Time-Domain Electromagnetic Soundings in Everglades National Park, Florida. U.S. Geological Survey. U.S. department of the interior. 1-24.

- Hoyos, F. 2001. Sistema hidrogeológico del altiplano de Rionegro y del Valle de la unión en la zona central de Antioquia. *Avances en recursos hidráulicos* (pp. 77-89). Número 8. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín- Colombia.
- Corbo, F. 2013. Estudio de la subducción y su relación con la presencia de fluidos a partir de sondeos magnetotelúricos en el bloque de Jalisco y Oaxaca. Ph. D Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Muñoz, J. 2013. Redes Neuronales Multicapa. Tesis. Universidad de Málaga España.
- Mamani, M. 2017. Geophysical study in southern extreme of precordillera, Mendoza, Argentina. Vol. 19. 3. *Unidad de Geofísica. Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales*. Argentina.
- Subsuelo 3D. 2017. Jerusalén- Cundinamarca.

Apéndices

Apéndice A. Resultados de resistividades reales, espesores y profundidades del subsuelo a partir de SEV, de arreglo tipo Schlumberger y Wenner, en los sectores del municipio de Mogotes.

2. Arreglo Schlumberger-Mogotes				1. Arreglo Schlumberger-Mogotes			
N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad	N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad
1	125	0.573	0.573	1	80.7	0.612	0.612
2	1254	2.34	2.91	2	626	0.567	1.18
3	13.1	3.03	5.94	3	1670	0.835	2.01
4	118	14.8	20.7	4	20.7	6.39	8.4
5	200	37.6	58.4	5	57.8	12	20
6	294	9.88	68.2	6	103	16.6	37
7	104	9.88	105	7	286	34.3	71.3
8	855	—	—	8	885	—	—
Error 2.5%				Error 2.5%			

4. Arreglo Schlumberger-Mogotes				3. Arreglo Schlumberger-Mogotes			
N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad	N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad
1	52.8	0.0626	0.0626	1	119	0.405	0.405
2	2688	1.62	1.68	2	1026	0.544	0.949
3	173	12.2	13.8	3	60.4	12.1	13.1
4	18.4	10.4	24.2	4	26.5	4.96	18.1
5	372	38.4	62.6	5	65.9	20.1	38.1
6	1053	44.1	107	6	160	50.4	88.5
7	2629	—	—	7	236	44.7	133
8	—	—	—	8	1018	—	—
Error 3.72%				Error 2.43%			

2. Arreglo Wenner				1. Arreglo Wenner			
N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad	N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad
1	488	4.74	4.74	1	181	4.02	4.02
2	35.3	7.06	11.8	2	97.4	6.25	10.3
3	134	–	–	3	54.9	–	–
Error 2.18%				Error 1.75%			

4. Arreglo Wenner				3. Arreglo Wenner			
N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad	N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad
1	2924	2.519	2.519	1	1063	2.45	2.45
2	362.5	10.62	13.14	2	43.4	9.35	11.8
3	32.25	–	–	3	93.3	–	–
Error 1.92%				Error 2.05%			

Apéndice B. Resultados de resistividad, desviación estándar de la resistividad (Res. DEST), espesor de las capas, desviación estándar del espesor de las capas (Esp. DEST), profundidad y desviación estándar de la profundidad (Pro. DEST), a partir de SEDT, en el área de estudio en el municipio de Mogotes.

SEDT 1

N	$\rho(\Omega.m)$	Res.DEST	Espesor (m)	Esp.DEST	Profundidad (m)	Esp.DEST
1	52.2	1.29	3.68	1,001	3.68	1,001
2	41.8	1.35	4.15	1,001	7.83	1,001
3	37.5	1.31	4.69	1,001	12.5	1,001
4	35.7	1.34	5.29	1,001	17.8	1
5	34.5	1.32	5.97	1,001	23.8	1
6	53	1.42	6.74	1,001	30.5	1
7	90.7	1.53	7.61	1,001	38.1	1
8	126	1.61	8.6	1,001	46.7	1
9	138	1.65	9.71	1,001	56.4	1
10	124	1.64	11	1,001	67.4	1
11	94.2	1.59	12.4	1,001	79.8	1
12	64.1	1.52	14	1,001	93.7	1
13	41.9	1.46	15.8	1,001	110	1
14	30	1.41	17.8	1,001	127	1
15	28.7	1.41	20.1	1,001	147	1
16	38.2	1.46	22.7	1,001	170	1
17	57.2	1.54	25.6	1,001	196	1
18	81.4	1.73	28.9	1,001	225	1
19	104	2.05	32.7	1,001	257	1
20	120	2.52	—	—	—	—

SED T 2

N	$\rho(\Omega.m)$	Res.DEST	Espesor (m)	Esp.DEST	Profundidad (m)	Esp.DEST
1	57	1.33	3.66	1,001	3.66	1,001
2	39.5	1.35	4.14	1,001	7.8	1,001
3	30.6	1.28	4.67	1,001	12.5	1,001
4	37.5	1.36	5.27	1,001	17.7	1
5	45.7	1.41	5.95	1,001	23.7	1
6	56.1	1.43	6.72	1,001	30.4	1
7	75.6	1.5	7.58	1,001	38	1
8	99.8	1.58	8.56	1,001	46.6	1
9	116	1.62	9.67	1,001	56.2	1
10	116	1.63	10.9	1,001	67.1	1
11	97	1.6	12.3	1,001	79.4	1
12	69.9	1.55	13.9	1,001	93.4	1
13	45.4	1.47	15.7	1,001	109	1
14	30.5	1.41	17.7	1,001	127	1
15	27.6	1.4	20	1,001	147	1
16	36.9	1.45	22.6	1,001	169	1
17	56.5	1.55	25.5	1,001	195	1
18	81.6	1.73	28.8	1,001	224	1
19	105	2.05	32.5	1,001	256	1
20	121	2.52	—	—	—	—

SED T 3

N	$\rho(\Omega.m)$	Res.DEST	Espesor (m)	Esp.DEST	Profundidad (m)	Esp.DEST
1	36.3	1.77	3.16	1,001	3.16	1,001
2	36.7	1.48	3.57	1,001	6.73	1,001
3	37.6	1.53	4.03	1,001	10.8	1,001
4	39.8	1.62	4.55	1,001	15.3	1
5	44.5	1.59	5.14	1,001	20.4	1
6	52.2	1.54	5.8	1,001	26.2	1
7	64	1.59	6.55	1,001	32.8	1
8	78.6	1.67	7.39	1,001	40.2	1
9	92.5	1.72	8.35	1,001	48.5	1
10	101	1.7	9.42	1,001	58	1
11	98.6	1.65	10.6	1,001	68.6	1
12	85.7	1.6	12	1,001	80.6	1
13	65.6	1.55	13.6	1,001	94.2	1
14	45.3	1.5	15.3	1,001	109	1
15	31.1	1.44	17.3	1,001	127	1
16	26.2	1.42	19.5	1,001	146	1
17	29.3	1.49	22	1,001	168	1
18	36.3	1.72	24.9	1,001	193	1
19	42.3	2.26	28.1	1,001	221	1
20	44.5	3.04	—	—	—	—

SED T4

N	$\rho(\Omega.m)$	Res.DEST	Espesor (m)	Esp.DEST	Profundidad (m)	Esp.DEST
1	40.9	1.76	3.39	1,001	3.39	1,001
2	41.1	1.48	3.83	1,001	7.22	1,001
3	41.3	1.54	4.32	1,001	11.5	1,001
4	42	1.62	4.88	1,001	16.4	1
5	44.5	1.58	5.51	1,001	21.9	1
6	50.2	1.52	6.22	1,001	28.2	1
7	60.2	1.56	7.02	1,001	35.2	1
8	74.1	1.64	7.93	1,001	43.1	1
9	88.9	1.67	8.95	1,001	52.1	1
10	98.9	1.66	10.1	1,001	62.2	1
11	98.4	1.63	11.4	1,001	73.6	1
12	84.9	1.6	12.9	1,001	86.5	1
13	62.3	1.55	14.6	1,001	101	1
14	40	1.48	16.4	1,001	117	1
15	27.4	1.41	18.5	1,001	136	1
16	27.7	1.41	20.9	1,001	157	1
17	38.7	1.48	23.6	1,001	181	1
18	55.8	1.67	26.7	1,001	207	1
19	70.6	2.04	30.1	1,001	237	1
20	76.9	2.6	—	—	—	—

SED T5

N	$\rho(\Omega.m)$	Res.DEST	Espesor (m)	Esp.DEST	Profundidad (m)	Esp.DEST
1	122	1.6	3.44	1,001	3.44	1,001
2	76.4	1.38	3.89	1,001	7.33	1,001
3	31	1.37	4.39	1,001	11.7	1,001
4	20.6	1.22	4.95	1,001	16.7	1
5	46.6	1.44	5.59	1,001	22.3	1
6	79.1	1.51	6.32	1,001	28.6	1
7	93.5	1.55	7.13	1,001	35.7	1
8	90.8	1.56	8.05	1,001	43.8	1
9	85.2	1.55	9.09	1,001	52.8	1
10	83.2	1.57	10.3	1,001	63.1	1
11	80.6	1.58	11.6	1,001	74.7	1
12	71.4	1.56	13.1	1,001	87.8	1
13	55.2	1.51	14.8	1,001	103	1
14	38.3	1.46	16.7	1,001	119	1
15	28.8	1.42	18.8	1,001	138	1
16	29.8	1.42	21.3	1,001	159	1
17	39	1.49	24	1,001	183	1
18	50.2	1.69	27.1	1,001	210	1
19	57.3	2.1	30.6	1,001	241	1
20	58.5	2.75	—	—	—	—

SED T 6

N	$\rho(\Omega.m)$	Res.DEST	Espesor (m)	Esp.DEST	Profundidad (m)	Esp.DEST
1	113	1.62	3.44	1,001	3.44	1,001
2	76.2	1.36	3.88	1,001	7.33	1,001
3	34.6	1.37	4.38	1,001	11.7	1,001
4	21.7	1.24	4.95	1,001	16.7	1
5	39.2	1.41	5.59	1,001	22.3	1
6	65.9	1.48	6.31	1,001	28.6	1
7	85.6	1.54	7.12	1,001	35.7	1
8	94.2	1.56	8.04	1,001	43.8	1
9	95.8	1.48	9.08	1,001	52.8	1
10	93.1	1.6	10.3	1,001	63.1	1
11	85.3	1.6	11.6	1,001	74.7	1
12	71.6	1.56	13.1	1,001	87.8	1
13	53.8	1.5	14.8	1,001	103	1
14	37.3	1.45	16.6	1,001	119	1
15	28.7	1.42	18.8	1,001	138	1
16	30.1	1.43	21.2	1,001	159	1
17	39.7	1.49	24	1,001	183	1
18	52.8	1.68	27	1,001	210	1
19	63.2	2.09	30.5	1,001	241	1
20	67.4	2.74	—	—	—	—

SED T 7

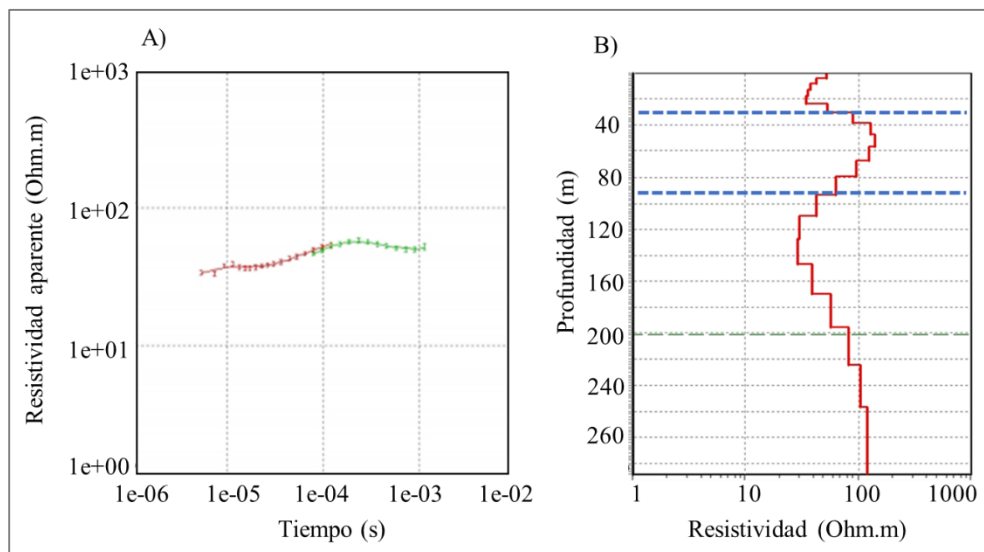
N	$\rho(\Omega.m)$	Res.DEST	Espesor (m)	Esp.DEST	Profundidad (m)	Esp.DEST
1	49.4	1.63	3.65	1,001	3.65	1,001
2	43.9	1.41	4.12	1,001	7.76	1,001
3	36.2	1.49	4.65	1,001	12.4	1,001
4	32.4	1.44	5.25	1,001	17.7	1
5	39	1.41	5.92	1,001	23.6	1
6	58.6	1.52	6.69	1,001	30.3	1
7	86.4	1.59	7.55	1,001	37.8	1
8	111	1.62	8.52	1,001	46.3	1
9	122	1.63	9.62	1,001	46	1
10	114	1.63	10.9	1,001	66.8	1
11	93.1	1.6	12.3	1,001	79.1	1
12	67.2	1.54	13.9	1,001	92.9	1
13	44.8	1.47	15.6	1,001	109	1
14	31	1.42	17.6	1,001	126	1
15	28	1.4	19.9	1,001	146	1
16	36.6	1.45	22.5	1,001	169	1
17	55.5	1.54	25.4	1,001	194	1
18	80	1.72	28.7	1,001	223	1
19	103	2.04	32.4	1,001	255	1
20	120	2.5	—	—	—	—

SED T 8

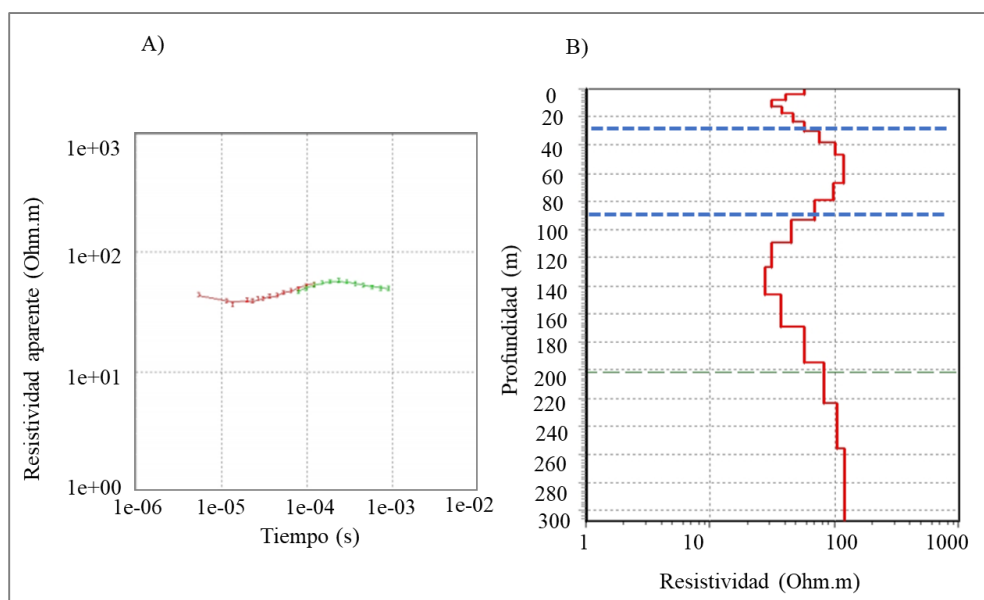
N	$\rho(\Omega.m)$	Res.DEST	Espesor (m)	Esp.DEST	Profundidad (m)	Esp.DEST
1	58.4	1.35	3.62	1,001	3.62	1,001
2	39.4	1.35	4.09	1,001	7.71	1,001
3	28.7	1.28	4.61	1,001	12.3	1,001
4	37.2	1.36	5.21	1,001	17.5	1
5	49.4	1.44	5.88	1,001	23.4	1
6	60.1	1.46	6.64	1,001	30.1	1
7	74.1	1.5	7.5	1,001	37.6	1
8	92	1.57	8.47	1,001	46	1
9	107	1.61	9.56	1,001	55.6	1
10	110	1.62	10.8	1,001	66.4	1
11	96.9	1.6	12.2	1,001	78.6	1
12	72.9	1.56	13.8	1,001	92.3	1
13	48.3	1.49	15.5	1,001	108	1
14	31.7	1.42	17.5	1,001	125	1
15	27.3	1.4	19.8	1,001	145	1
16	35.5	1.44	22.3	1,001	167	1
17	54.7	1.53	25.2	1,001	193	1
18	80.1	1.71	28.5	1,001	221	1
19	104	2.02	32.2	1,001	253	1
20	122	2.48	—	—	—	—

Apéndice C. Curva de decaimiento. B. Perfiles unidimensionales generados a partir de las curvas de decaimiento para los SEDT en el municipio de Mogotes.

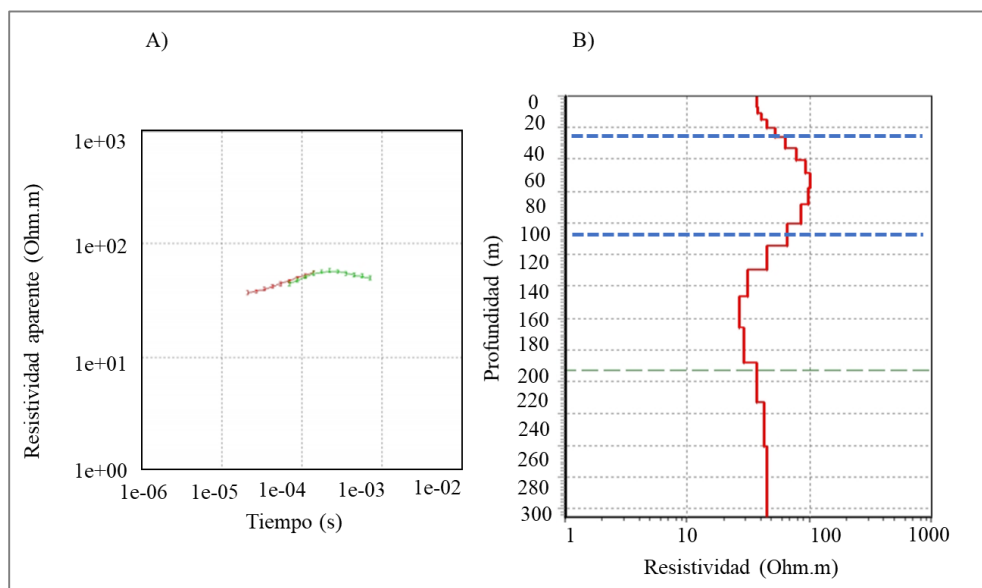
SEDT 1



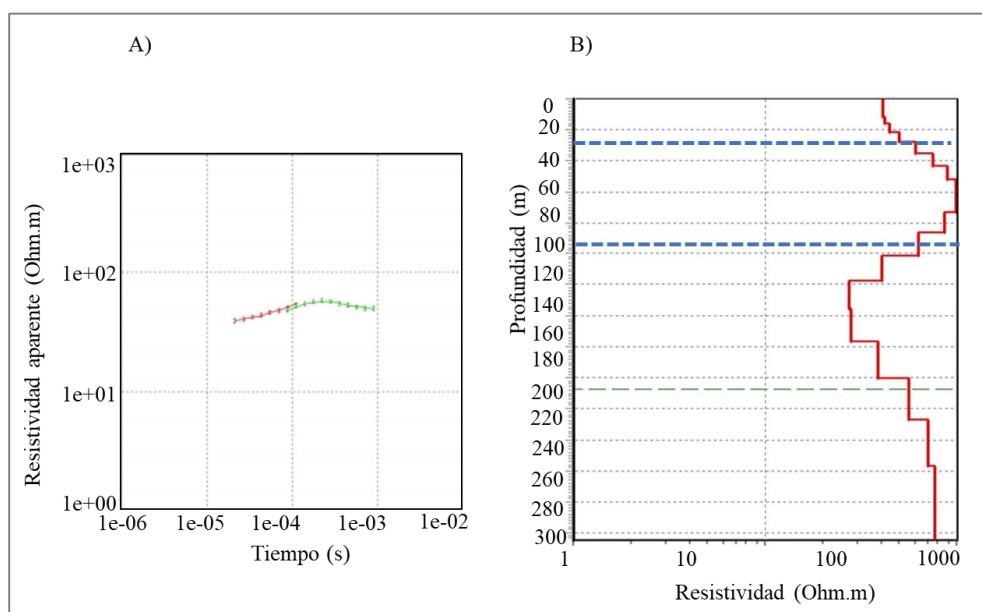
SEDT 2



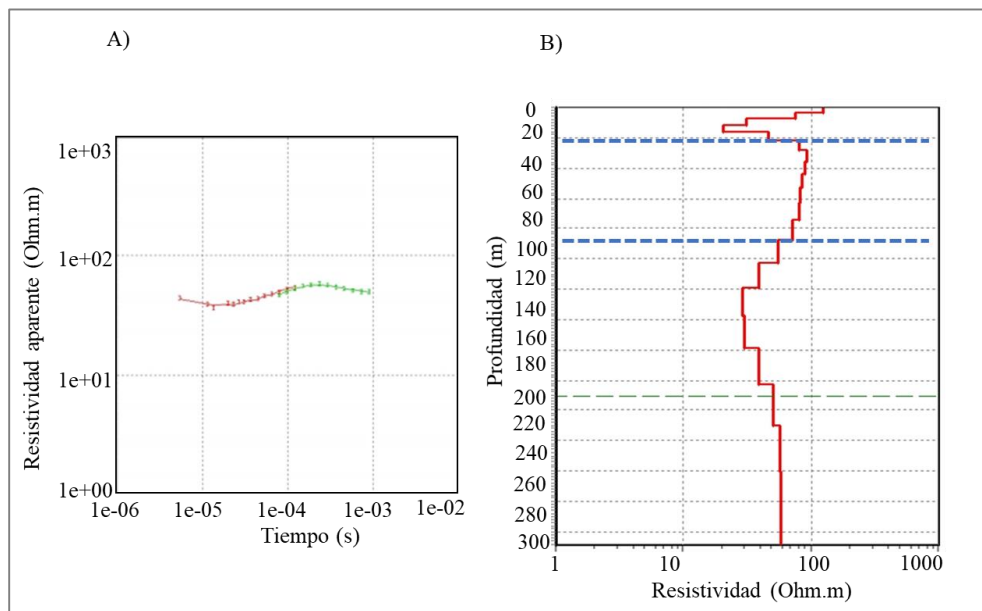
SED T 3



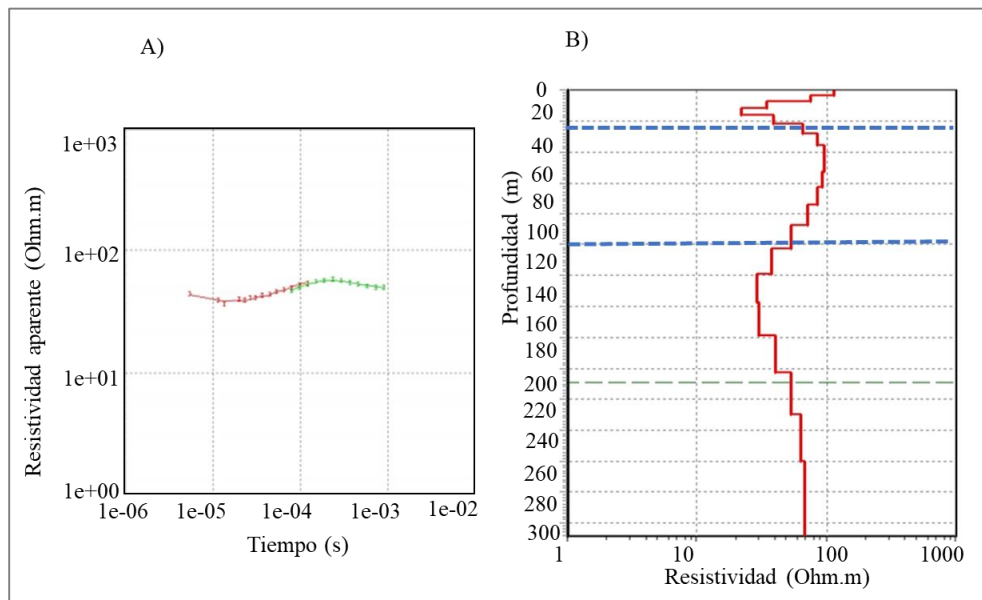
SED T 4



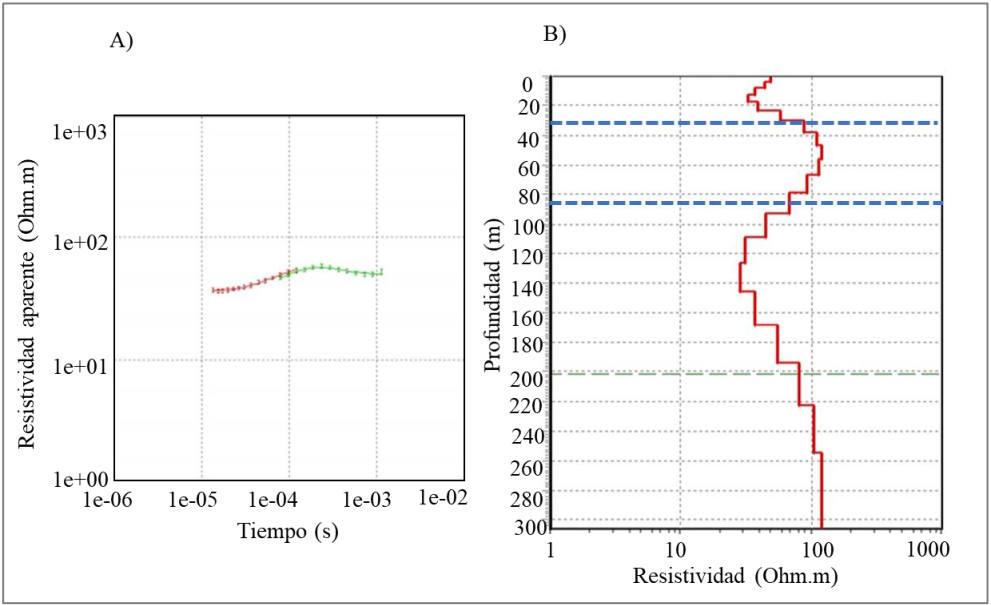
SED T 5



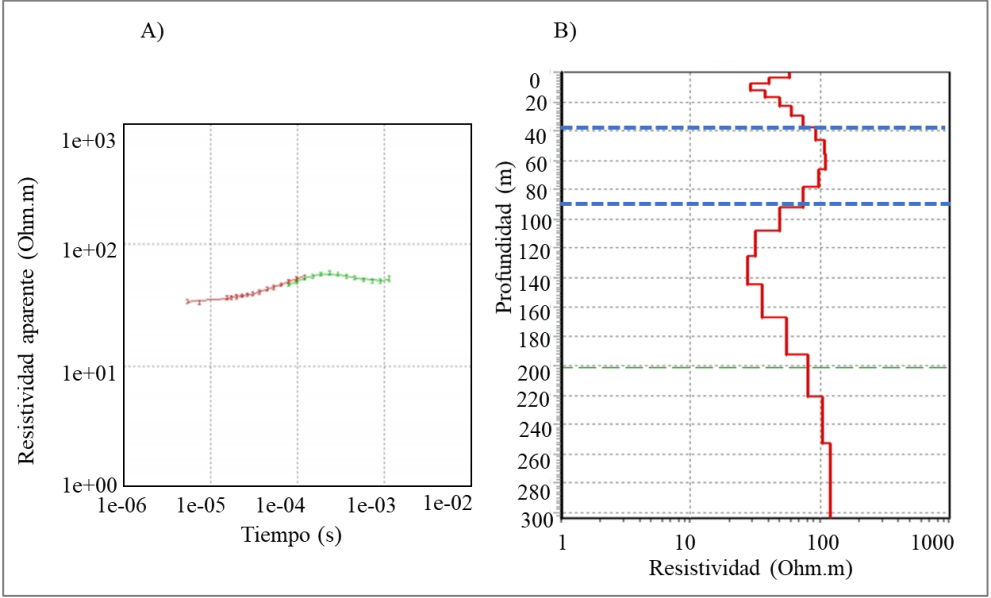
SED T 6



SED 7



SED 8



Apéndice D. Resultados de resistividades reales, espesores y profundidades del subsuelo a partir de SEV, de arreglo tipo Schlumberger y Wenner, en los sectores del municipio de Barichara.

2. Arreglo Schlumberger-Barichara				1. Arreglo Schlumberger-Barichara			
N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad	N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad
1	1388	0.75	0.75	1	1697	0.69	0.69
2	1421	0.358	1.11	2	6473	1.67	2.36
3	337	11.5	12.6	3	329	47.1	49.5
4	138	12.2	24.8	4	67.3	4.64	54.1
5	63.1	2.67	27.5	5	85.8	35	89.1
6	242	45.2	72.6	6	37.8	63.4	153
7	21408	—	—	7	1136	—	—
Error 2.57%				Error 2.46%			

3. Arreglo Schlumberger- Barichara			
N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad
1	1250	0.89	0.69
2	2196	1.86	2.75
3	331	21.6	24.35
4	98.6	5.13	29.48
5	79.6	18	47.48
6	58.9	52.9	100.38
7	1898	—	—
Error 2.21 %			

1. Arreglo Wenner-Barichara				2. Arreglo Wenner-Barichara			
N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad	N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad
1	6147	3	3	1	1820	3.67	3.67
2	399	9.5	12.5	2	164	7.41	11.1
3	408	—	—	3	92.8	—	—
Error 2.81%				Error 2.49%			

3. Arreglo Wenner- Barichara			
N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad
1	3250	3.56	3.56
2	246	6.13	9.69
3	139	—	—
Error 2.12 %			

Apéndice E. Resultados de resistividad, desviación estándar de la resistividad (Res. DEST), espesor de las capas, desviación estándar del espesor de las capas (Esp. DEST), profundidad y desviación estándar de la profundidad (Pro. DEST), a partir de SEDT, en el área de estudio en el municipio de Barichara.

SEDT 1

N	$\rho(\Omega.m)$	Res.DEST	Espesor (m)	Esp.DEST	Profundidad (m)	Esp.DEST
1	72.3	1.64	2.02	1,001	2.02	1,001
2	68	1.43	2.29	1,001	4.31	1,001
3	63.7	1.52	2.58	1,001	6.89	1,001
4	65.4	1.54	2.91	1,001	9.8	1
5	76.9	1.52	3.29	1,001	13.1	1
6	93.5	1.56	3.7	1,001	16.8	1
7	99.7	1.69	4.19	1,001	21	1
8	82.6	1.57	4.73	1,001	15.7	1
9	50.2	1.49	5.34	1,001	31.1	1
10	25.9	1.36	6.03	1,001	37.1	1
11	22.8	1.36	6.81	1,001	43.9	1
12	29.2	1.44	7.69	1,001	51.6	1
13	26.9	1.43	8.68	1,001	60.3	1
14	17.9	1.36	9.8	1,001	70.1	1
15	17	1.37	11.1	1,001	81.1	1
16	29.3	1.47	12.5	1,001	93.6	1
17	52.3	1.6	14.1	1,001	108	1
18	80.8	1.76	15.9	1,001	124	1
19	108	1.97	18	1,001	142	1
20	130	12.28	—	—	—	—

SED T 2

N	$\rho(\Omega.m)$	Res.DEST	Espesor (m)	Esp.DEST	Profundidad (m)	Esp.DEST
1	75	1.62	2.11	1,001	2.11	1,001
2	67.7	1.42	2.38	1,001	4.48	1,001
3	59.6	1.5	1.68	1,001	7.17	1,001
4	62.4	1.48	3.03	1,001	10.2	1
5	91.9	1.52	3.42	1,001	13.6	1
6	160	1.67	3.86	1,001	17.5	1
7	269	1.78	4.36	1,001	21.8	1
8	178	1.73	4.92	1,001	26.8	1
9	91.7	1.58	5.56	1,001	32.3	1
10	35.9	1.42	6.28	1,001	38.6	1
11	12.8	1.23	7.09	1,001	45.7	1
12	18.5	1.36	8	1,001	53.7	1
13	23.2	1.4	9.03	1,001	62.7	1
14	24.2	1.42	10.2	1,001	72.9	1
15	26	1.44	11.5	1,001	84.4	1
16	34.5	1.49	13	1,001	97.4	1
17	51.9	1.59	14.7	1,001	112	1
18	74.8	1.74	16.6	1,001	129	1
19	94.9	1.95	18.7	1,001	147	1
20	105	2.26	—	—	—	—

SED T 3

N	$\rho(\Omega.m)$	Res.DEST	Espesor (m)	Esp.DEST	Profundidad (m)	Esp.DEST
1	64.8	1.57	2.11	1,001	2.11	1,001
2	58.9	1.4	2.38	1,001	4.48	1,001
3	60.1	1.5	2.68	1,001	7.16	1,001
4	83	1.53	3.03	1,001	10.2	1
5	132	1.6	3.42	1,001	13.6	1
6	184	1.7	3.86	1,001	17.5	1
7	199	1.75	4.36	1,001	21.8	1
8	154	1.7	4.92	1,001	26.8	1
9	78	1.55	5.56	1,001	32.3	1
10	24	1.33	6.27	1,001	38.6	1
11	12.3	1.22	7.08	1,001	45.7	1
12	26.4	1.44	8	1,001	53.7	1
13	33	1.48	9.03	1,001	62.7	1
14	24.8	1.42	10.2	1,001	72.9	1
15	19.3	1.38	11.5	1,001	84.4	1
16	27.1	1.46	13	1,001	97.4	1
17	47.3	1.59	14.7	1,001	112	1
18	75.7	1.77	16.6	1,001	129	1
19	106	2.03	18.7	1,001	147	1
20	131	2.38	—	—	—	—

SED T 4

N	$\rho(\Omega.m)$	Res.DEST	Espesor (m)	Esp.DEST	Profundidad (m)	Esp.DEST
1	74.5	1.62	2.11	1,001	2.11	1,001
2	66.5	1.42	2.38	1,001	4.49	1,001
3	59.7	1.5	2.69	1,001	7.18	1,001
4	65.5	1.51	3.04	1,001	10.2	1
5	92.2	1.55	3.43	1,001	13.7	1
6	133	1.64	3.87	1,001	17.5	1
7	161	1.69	4.37	1,001	21.9	1
8	144	1.66	4.93	1,001	26.8	1
9	87	1.57	5.57	1,001	32.4	1
10	33.1	1.45	6.29	1,001	38.7	1
11	12	1.22	7.1	1,001	45.8	1
12	21.8	1.41	8.02	1,001	53.8	1
13	31	1.46	9.05	1,001	62.9	1
14	26.4	1.43	10.2	1,001	73.1	1
15	20.9	1.4	11.5	1,001	84.6	1
16	27	1.45	13	1,001	97.7	1
17	45.2	1.57	14.7	1,001	112	1
18	72	1.75	16.6	1,001	129	1
19	101	2	18.8	1,001	148	1
20	126	2.35	—	—	—	—

SED T 5

N	$\rho(\Omega.m)$	Res.DEST	Espesor (m)	Esp.DEST	Profundidad (m)	Esp.DEST
1	100	3.07	1.88	1,001	1.88	1,001
2	99.3	2.55	2.12	1,001	3.99	1,001
3	97	2.17	2.39	1,001	6.38	1,001
4	92.9	1.92	2.7	1,001	9.08	1
5	86.6	1.8	3.05	1,001	12.1	1
6	78	1.77	3.44	1,001	15.6	1
7	67.6	1.79	3.88	1,001	19.4	1
8	56.3	1.79	4.38	1,001	23.8	1
9	45.1	1.72	4.95	1,001	28.8	1
10	35.3	1.6	5.59	1,001	34.4	1
11	28.3	1.5	6.31	1,001	40.7	1
12	24.8	1.48	7.12	1,001	47.8	1
13	23.6	1.46	8.04	1,001	55.8	1
14	21.2	1.42	9.08	1,001	64.9	1
15	18.6	1.4	10.3	1,001	75.2	1
16	21.5	1.43	11.6	1,001	86.7	1
17	33.1	1.53	13.1	1,001	99.8	1
18	52	1.72	14.8	1,001	115	1
19	73.4	2.02	16.6	1,001	131	1
20	92.3	2.43	—	—	—	—

SED T 6

N	$\rho(\Omega.m)$	Res.DEST	Espesor (m)	Esp.DEST	Profundidad (m)	Esp.DEST
1	292	4.19	1.96	1,001	1.96	1,001
2	272	3.54	2.21	1,001	4.18	1,001
3	241	2.97	2.5	1,001	6.68	1,001
4	204	2.48	2.82	1,001	9.5	1
5	164	2.08	3.19	1,001	16.3	1
6	125	1.79	3.6	1,001	20.3	1
7	87.9	1.64	4.06	1,001	24.9	1
8	56.3	1.61	4.59	1,001	30.1	1
9	33.9	1.59	5.18	1,001	36	1
10	22.1	1.5	5.85	1,001	42.6	1
11	20.2	1.43	6.6	1,001	50	1
12	26.2	1.45	7.45	1,001	58.4	1
13	28.7	1.42	8.41	1,001	67.9	1
14	19.8	1.38	9.5	1,001	78.6	1
15	16.2	1.39	10.7	1,001	90.7	1
16	24.2	1.48	12.1	1,001	104	1
17	43.8	1.61	13.7	1,001	120	1
18	73.5	1.77	15.4	1,001	130	1
19	108	1.99	17.4	1,001	137	1
20	140	2,28	—	—	—	—

SED T 7

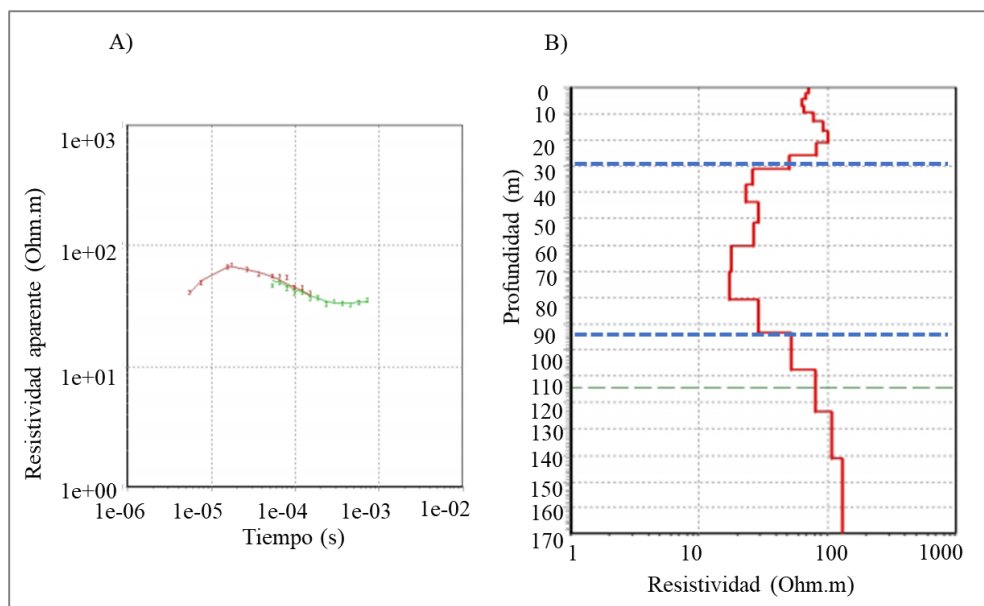
N	$\rho(\Omega.m)$	Res.DEST	Espesor (m)	Esp.DEST	Profundidad (m)	Esp.DEST
1	240	2.34	1.87	1,001	1.87	1,001
2	224	1.89	2.11	1,001	3.98	1,001
3	192	1.65	2.38	1,001	6.36	1,001
4	150	1.59	2.69	1,001	9.05	1
5	107	1.63	3.04	1,001	12.1	1
6	71.8	1.59	3.43	1,001	15.5	1
7	50.3	1.43	3.87	1,001	19.4	1
8	44.2	1.41	4.37	1,001	23.8	1
9	45.3	1.48	4.93	1,001	28.7	1
10	40.4	1.42	5.57	1,001	34.3	1
11	29.4	1.39	6.29	1,001	40.5	1
12	23.6	1.38	7.1	1,001	47.6	1
13	22.5	1.39	8.02	1,001	55.7	1
14	18.6	1.39	9.05	1,001	64.7	1
15	17.3	1.38	10.2	1,001	74.9	1
16	25.5	1.46	11.5	1,001	86.5	1
17	40.1	1.57	13	1,001	99.5	1
18	55.6	1.68	14.7	1,001	114	1
19	67.2	1.87	16.6	1,001	131	1
20	73.1	2.18	—	—	—	—

SED T 8

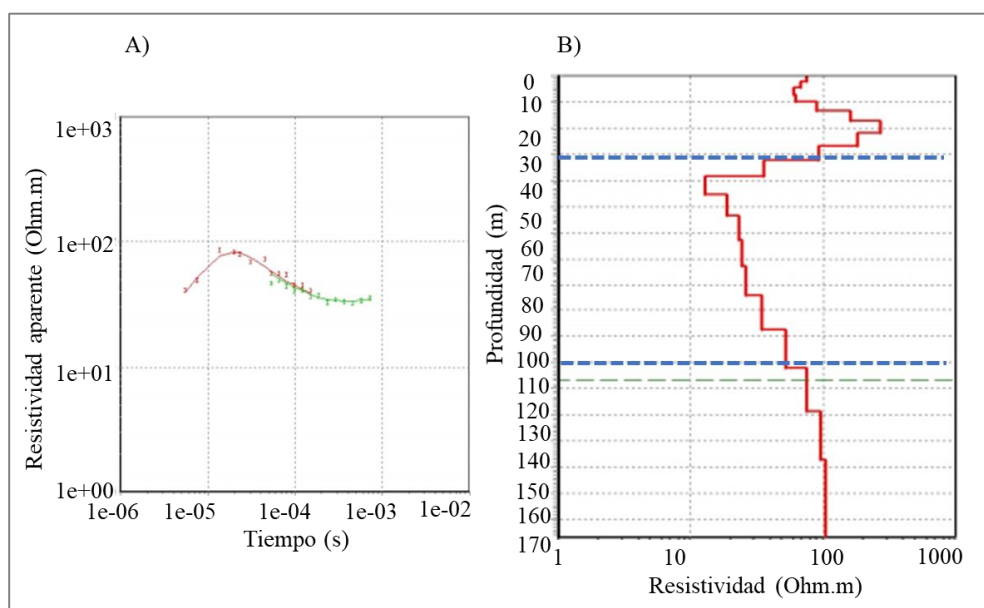
N	$\rho(\Omega.m)$	Res.DEST	Espesor (m)	Esp.DEST	Profundidad (m)	Esp.DEST
1	281	2.5	1.77	1,001	1.77	1,001
2	258	2.03	2	1,001	3.77	1,001
3	216	1.73	2.26	1,001	6.02	1,001
4	165	1.61	2.55	1,001	8.57	1
5	114	1.62	2.87	1,001	11.4	1
6	71.8	1.6	3.24	1,001	14.7	1
7	48.2	1.46	3.66	1,001	18.3	1
8	43.4	1.4	4.14	1,001	22.5	1
9	52.1	1.52	4.67	1,001	27.2	1
10	61.6	1.55	5.27	1,001	32.4	1
11	53.1	1.5	5.95	1,001	38.4	1
12	29.3	1.43	6.72	1,001	45.1	1
13	14.3	1.32	7.59	1,001	52.7	1
14	13.7	1.34	8.56	1,001	61.2	1
15	20.6	1.43	9.67	1,001	70.9	1
16	31.1	1.49	10.9	1,001	81.8	1
17	40.8	1.54	12.3	1,001	94.1	1
18	47.8	1.62	13.9	1,001	108	1
19	52.2	1.64	15.7	1,001	124	1
20	54.8	1.06	—	—	—	—

Apéndice F. Curvas de decaimiento. B. Perfiles unidimensionales generados a partir de las curvas de decaimiento para los SEDT en el municipio de Mogotes.

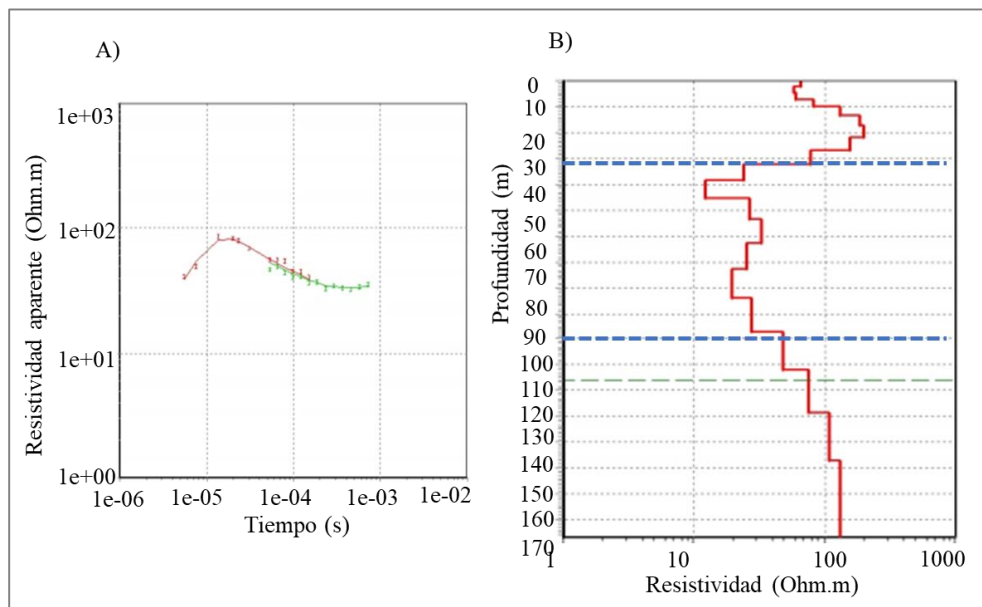
SEDT 1



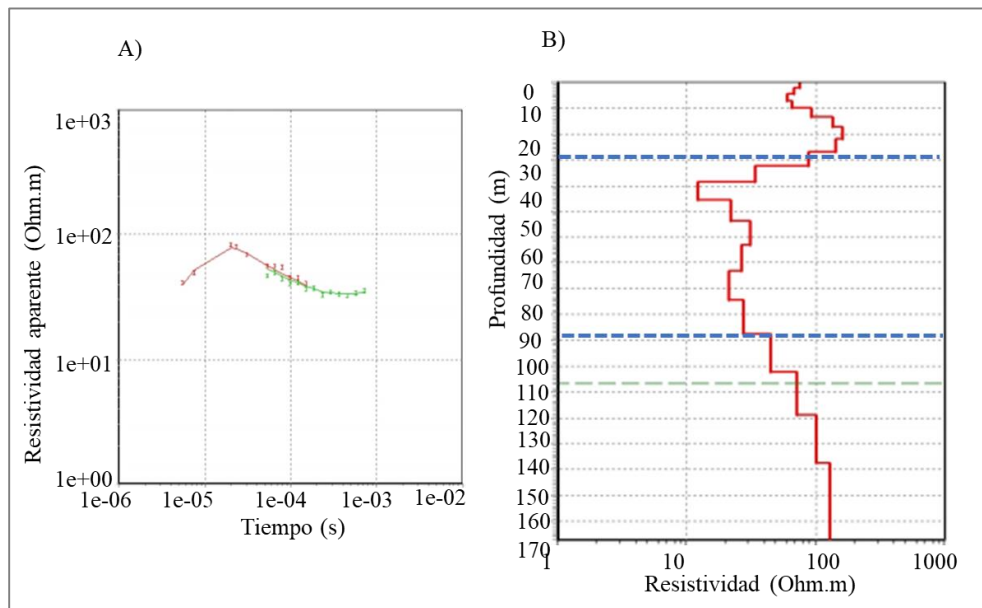
SEDT 2



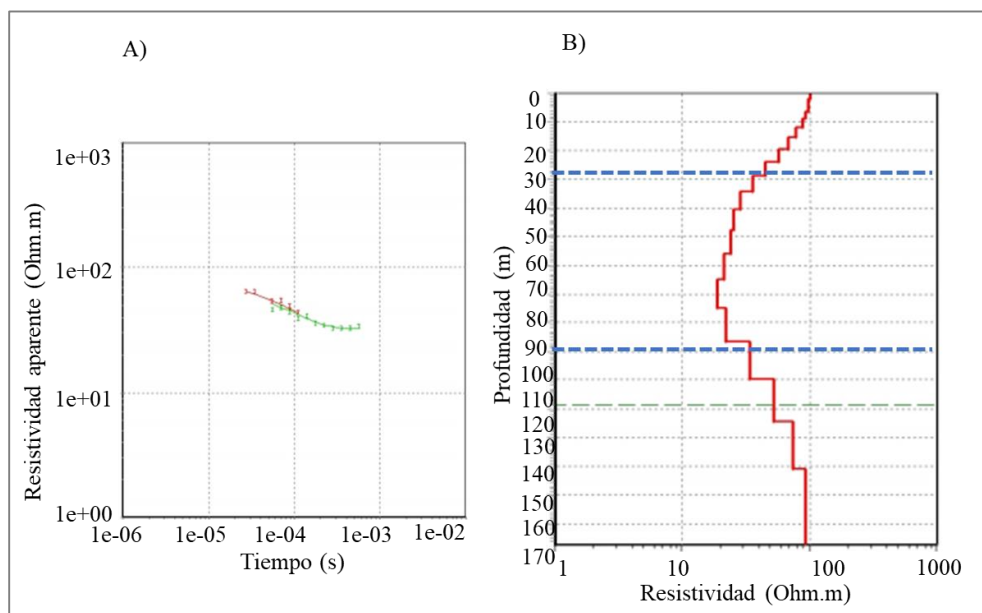
SED T 3



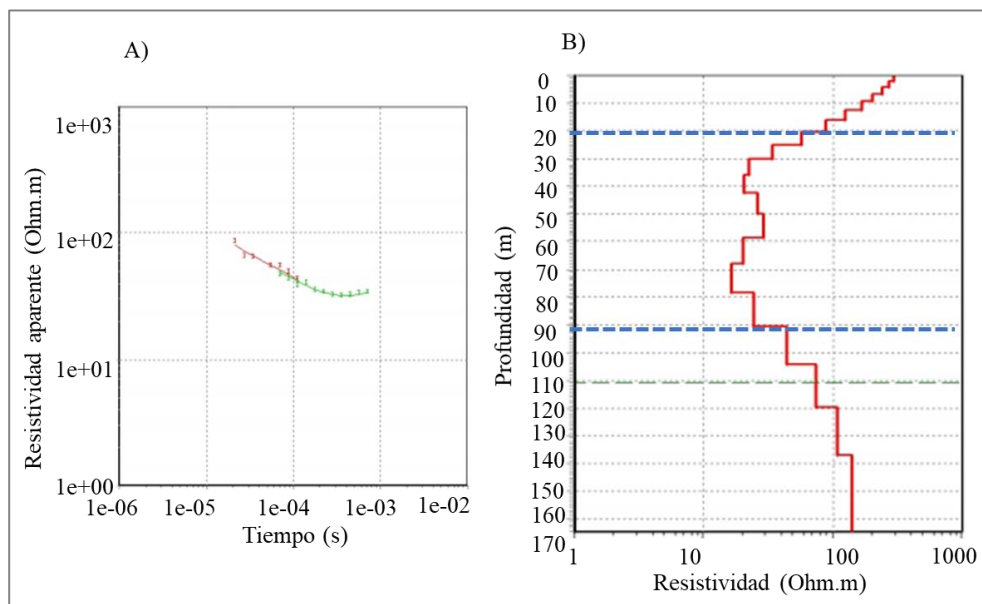
SED T 4



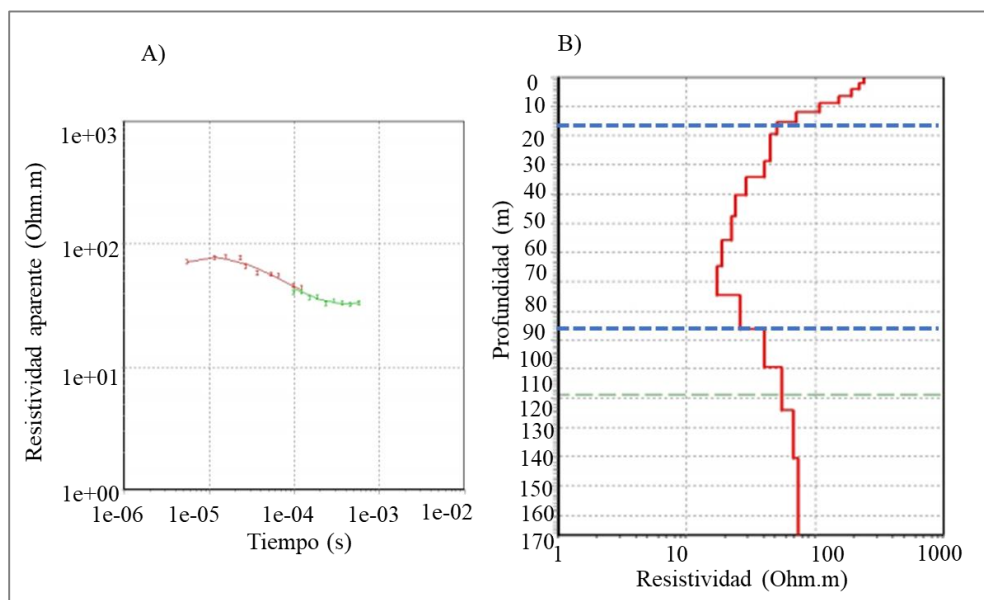
SED T 5



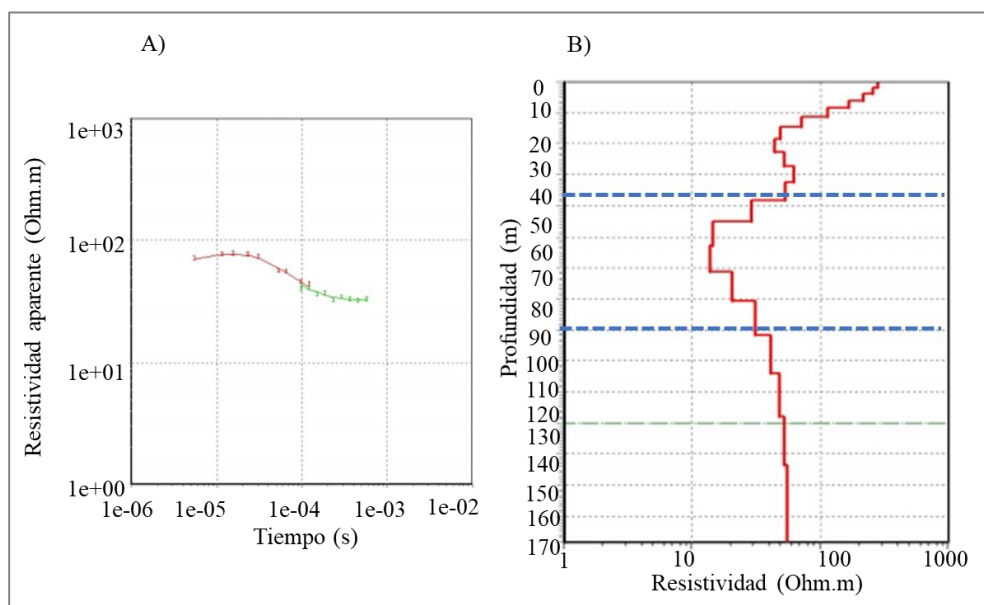
SED T 6



SED T 7



SED T 8



Apéndice G. Resultados de resistividades reales, espesores y profundidades del subsuelo a partir de SEV, de arreglo tipo Schlumberger y Wenner, en el sector de La Mesa De Los Santos.

2. Arreglo Schlumberger-Mesa De Los Santos				1. Arreglo Schlumberger-Mesa De Los Santos			
N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad	N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad
1	472.9	1.12	1.12	1	722.4	7.807	7.807
2	902	0.54	1.66	2	724.7	11.79	19.6
3	806	2.81	4.47	3	717.1	3.369	22.97
4	748	7.25	11.7	4	548.1	4.155	27.12
5	581	22	37.76	5	1872	41.88	69.01
6	1414	—	—	6	320.3	—	—
Error 1.93%				Error 1.88%			

3. Arreglo Schlumberger-Mesa De Los Santos			
N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad
1	623.4	1.97	1.974
2	708	2.353	4.327
3	501.2	5.932	10.26
4	180	31.64	41.9
5	187.2	—	—
Error 1.99%			

2. Arreglo Wenner- La Mesa				1. Arreglo Wenner- La Mesa			
N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad	N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad
1	698	5.96	5.96	1	578	6.36	6.36
2	584	4.9	10.86	2	429.21	3.2	9.56
3	369	—	—	3	436	—	—
Error 2.24 %				Error 1.87 %			

3. Arreglo Wenner- La Mesa			
N	ρ (Ω .m)	h (m)	Profundidad
1	783	8.96	8.96
2	698	3.46	12.42
3	265	—	—
Error 3.1 %			