

Caracterización geotécnica del subsuelo en los municipios de San Joaquín y Mogotes Santander
usando métodos geofísicos

Luis Alfredo Marquez Caicedo

Trabajo de Grado para optar al título de Magíster en Geofísica

Director

José David Sanabria Gomez

Físico PhD

Codirectora

Rocío del Pilar Bernal Olaya

Geóloga PhD

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

Este trabajo viene dedicado para todas aquellas personas que apoyaron el desarrollo y ejecución de este trabajo de grado.

Agradecimientos

Agradezco a mi Director José David Sanabria Gomez y a mi Codirectora Rocío del Pilar Bernal Olaya, por su enorme paciencia y dedicación de tiempo durante este largo camino para terminar este trabajo de investigación.

Tabla de Contenido

Introducción	18
1. Objetivos	23
2. Antecedentes	24
2.1. Uso de métodos geofísicos en la caracterización geotécnica	24
3. Marco Teórico	30
3.1. Marco Geológico	30
3.2. Métodos geofísicos	36
3.2.1. Método Sísmico	36
3.2.1.1. Sísmica de refracción	37
3.2.1.2. Análisis multicanal de ondas superficiales - Multichannel Analysis Wave (MASW)	40
3.2.2. Método de resistividad eléctrica	42
3.2.2.1. Propiedades eléctricas de las rocas	43
3.2.2.2. Tomografía de Resistividad Eléctrica	44
3.2.2.3. Arreglos de adquisición	46
3.3. Marco Geotécnico	49
3.3.1. Parámetros geotécnicos o geomecánicos	49

3.3.1.1.	Coeficiente de Poisson (η)	49
3.3.1.2.	Módulo de Young (E)	51
3.3.1.3.	Módulo de rigidez o de cizallamiento (μ o G)	51
3.3.1.4.	Parámetros relacionados a la resistencia al corte	52
	3.3.1.4.1. Ángulo de fricción	53
	3.3.1.4.2. Cohesión	53
4.	Metodología	55
4.1.	Pre-campo	55
4.2.	Exploración de campo y adquisición geofísica	56
4.2.1.	Instrumentación	58
4.3.	Procesamiento e interpretación de los datos	60
4.3.1.	Sísmica de refracción	60
4.3.2.	Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)	63
4.3.3.	Tomografía de Resistividad Eléctrica	64
4.4.	Calculo de parámetros geotécnicos	66
5.	Resultados, análisis y discusión	67
5.1.	Geología local	67
5.2.	Resultados de la adquisición de datos Geofísicos	70
5.2.1.	Sector uno	70
5.2.2.	Sector dos	74

5.3. Cálculo de parámetros geotécnicos	77
5.3.1. Sector 1	78
5.3.2. Sector 2	80
5.4. Modelo geológico-geotécnico preliminar	82
6. Conclusiones	89
7. Recomendaciones	92
Referencias Bibliográficas	92
Apéndices	99

Lista de Figuras

- Figura 1. Localización geográfica de los municipios de Mogotes y San Joaquín 20
- Figura 2. Imagen aérea del sector uno con identificación de eventos morfoodinámicos (deslizamientos delineados en rojo y flujo de detritos delineados en amarillo). 21
- Figura 3. Imagen aérea del sector dos donde se identifican de eventos morfoodinámicos sobre el área estudiada (reptación o terracetas delimitados por la línea azul) 22
- Figura 4. Interpretación y correlación de los datos de sísmica de refracción, SEV y SP, en donde se muestra tres capas diferenciadas en el cuerpo del deslizamiento (material deslizado, zona de falla y argilita fresca), la velocidad de onda longitudinal se encuentra en m/s y la resistividad eléctrica en $ohm \times m$. Tomado de (Bogoslovsky and Ogilvy, 1977; Pulido Gonzáles, 1979) 26
- Figura 5. Mapa geológico de los municipios de Mogotes y San Joaquín Santander, escala 1:100.000. Modificado de (Vargas et al., 1981; Pulido Gonzáles, 1979). El polígono rosado corresponde a los límites municipales y los triángulos las ubicaciones del sector uno y dos como se muestra en las convenciones 35
- Figura 6. Arreglo de adquisición de sísmica de refracción en campo con un sismógrafo de veinte canales, donde se muestra la trayectoria de los rayos que provienen de la onda directa y la refractada. Modificado de (ASTM, 2011) 37

- Figura 7. Modelo de rayos para sismica de refracción, para un medio de capas donde se observa la onda directa, onda reflejada y onda headwave. Modificado de (Stein and Wyession, 2009) 38
- Figura 8. Tiempos de propagación con respecto a la distancia fuente-receptor. Modificado de (Stein and Wyession, 2009) 39
- Figura 9. Ejemplo de curva de dispersión. Fuente:(Xia, 2014) 41
- Figura 10. Arreglo de adquisición con receptores fijos para MASW 2D. Fuente:(Georys, 2016). 42
- Figura 11. Rangos típicos de resistividad eléctrica ($\Omega \times m$) o conductividad eléctrica (mS/m) para materiales geológicos. Fuente:(Ley-Cooper et al., 2015) 44
- Figura 12. Secuencia de medición para la adquisición de los datos de resistividad eléctrica. C1 y C2 corresponde con los electrodos de inyección de corriente, P1 y P2 corresponden con los electrodos de medición de potencial y n corresponde con las capas o niveles a medir. Fuente:(Griffiths and Barker, 1993) 45
- Figura 13. Pseudosección de resistividad aparente medida para una configuración Schlumberger-DD (arriba), con su imagen de resistividad invertida (abajo). Fuente:(Everett, 2013) 46
- Figura 14. Tipos de arreglos para la adquisición de datos geoelectricos 48
- Figura 15. Cambios en la forma de una barra rectangular bajo extensión, cuando el estiramiento es paralelo al eje x , el cuerpo se adelgaza paralelo al eje y y al eje z . Fuente:(Lowrie and Fichtner, 2019) 50

- Figura 16. A. Fotografía del sector uno vía a San Joaquín. B. Quebrada Pepe en el sector dos vereda El Hoyo municipio de Mogotes 55
- Figura 17. Imagen satelital de google earth de los sectores a estudiar A. Sector dos vía a la Quebrada Pepe en la vereda El Hoyo municipio de Mogotes. B. Sector 1 vía que comunica al municipio de San Joaquín desde Mogotes. Fuente: Google Earth 2022 56
- Figura 18. Distribución de las líneas adquiridas en el sector 1 (figura A.) y el sector dos (figura B.) 58
- Figura 19. Sismógrafo ABEM Terraloc Pro 2 y sus accesorios. Fuente: (Guideline, 2018) 59
- Figura 20. Equipo de tomografía eléctrica FlashRES-UNIVERSAL96 de ZZgeo. 60
- Figura 21. Flujo de procesamiento en el Módulo Pickwin para sismica de refracción. Fuente: (Geometrics, 2009). 61
- Figura 22. Flujo de trabajo en el Módulo Plotrefa para inversión por tomografía. Fuente: (Geometrics, 2009). 62
- Figura 23. Fundamento del método de tomografía sísmica. Fuente: (Geometrics, 2009). 63
- Figura 24. Metodología para el calculo de modelos de V_s en Seisimager/sw. Fuente: (Geometrics, 2009). 64
- Figura 25. Modelo de velocidad de onda S invertido, visualizado con GeoPlot. Fuente: (Geometrics, 2009). 64

- Figura 26. Resultado del proceso de inversión de un dato de tomografía de resistividad eléctrica. (superior) Pseudosección de resistividad aparente medida. (Medio) Pseudosección de resistividad aparente calculada. (Inferior) Modelo de resistividades resultante. Fuente: Modificado de (Geotomo, 2010). 66
- Figura 27. Afloramiento rocoso de riolitas y traquitas en el sector uno sobre la vía a San Joaquín A. Riolitas del Alto de los Cacaos intruido por diques fenodacíticos. B. Formación de suelo saprolítico y erosión en surcos 68
- Figura 28. Geología del sector dos, vereda el Hoyo, municipio de Mogotes. A. Afloramiento rocoso de la Formación Rosablanca, sobre el lecho de la Quebrada El Pepe en la parte baja de la ladera estudiada. B. Laderas poco inclinadas con desarrollo de terracetas generadas por el sobrepastoreo. 69
- Figura 29. Perfiles de sísmica de refracción, MASW y tomografía eléctrica resultado de la adquisición geofísica realizada en el sector uno vía San Joaquín 73
- Figura 30. Perfiles de sísmica de refracción, MASW y tomografía eléctrica resultado de la adquisición geofísica realizada en el sector dos, vereda El Hoyo 76
- Figura 31. Parámetros geotécnicos calculados a partir de los resultados de velocidad de onda P y onda S para el Sector 1 84
- Figura 32. Parámetros geotécnicos calculados a partir de los resultados de velocidad de onda P y onda S para el Sector 2 85

Figura 33.	Modelo geológico-geotécnico preliminar del Sector 1 Vía Mogotes San Joaquín Santander	86
Figura 34.	Modelo geológico-geotécnico preliminar del Sector 2 Vereda El Hoyo - Mogotes Santander	88
Figura 35.	Interpretación de primeros arribos para la línea sísmica S6.	100
Figura 36.	Interpretación de primeros arribos para la línea sísmica S8.	101
Figura 37.	Interpretación de primeros arribos para la línea sísmica S7.	102
Figura 38.	Interpretación de primeros arribos para la línea sísmica S9.	103
Figura 39.	Datos adquiridos de la tomografía eléctrica T6. A. Histograma de error relativo de los datos. B. Arreglo de modelo de bloques y distribución de datos de resistividad aparente. C. Modelo invertido de resistividad eléctrica para la línea T6.	105
Figura 40.	Datos adquiridos de la tomografía eléctrica T7. A. Histograma de error relativo de los datos. B. Arreglo de modelo de bloques y distribución de datos de resistividad aparente. C. Modelo invertido de resistividad eléctrica para la línea T7.	106
Figura 41.	Datos adquiridos de la tomografía eléctrica T8. A. Histograma de error relativo de los datos. B. Arreglo de modelo de bloques y distribución de datos de resistividad aparente. C. Modelo invertido de resistividad eléctrica para la línea T8.	107
Figura 42.	Curvas de dispersión para cada CMP que compone el perfil MW6.	108
Figura 43.	Curvas de dispersión para cada CMP que compone el perfil MW7	109
Figura 44.	Curvas de dispersión para cada CMP que compone el perfil MW8.	110

Lista de Tablas

Tabla 1.	Recopilación realizada por Jongmans y Garambois de autores que utilizan los métodos geofísicos en el estudio de la estabilidad de laderas. Tomado de (Jongmans and Garambois, 2007)	25
Tabla 2.	Valores de resistividad de geomateriales en los Valles de San Nicolás y La Unión. Tomado de (Arias et al., 2012)	28
Tabla 4.	Rango de velocidades para ondas compresionales en suelo y roca. Tomado de (Stein and Wyssession, 2009)	40
Tabla 5.	Perfiles geofísicos adquiridos en la fase de campo.	57
Tabla 6.	Cálculo de cohesión y fricción para los sectores de estudio.	78

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Datos sísmica de refracción	99
Apéndice B. Datos Tomografía de resistividad eléctrica (TRE)	104
Apéndice C. Apéndice: Datos análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)	108

Resumen

Título: Caracterización geotécnica del subsuelo en los municipios de San Joaquín y Mogotes Santander usando métodos geofísicos *

Autor: Luis Alfredo Marquez **

Palabras Clave: Geofísica, Parámetros geotécnicos, Sísmica de Refracción, MASW, Tomografía de resistividad eléctrica.

Descripción: Gran parte del territorio del país se encuentra en áreas susceptibles a movimientos en masa, las cuales deben ser estudiadas. Una forma de hacerlo es a través de métodos geofísicos, los cuales permiten obtener parámetros del subsuelo que permiten caracterizar estas áreas y formular medidas que permitan mitigar la amenaza que se presenta. En este trabajo se caracterizaron dos sectores en los municipios de San Joaquín (Sector 1 - vía Mogotes-San Joaquín) y Mogotes (Sector 2 - Vereda El Hoyo) en Santander, a través de sísmica de refracción, MASW 2D y tomografía de resistividad eléctrica, para construir un modelo geológico de cada sector que permita identificar las condiciones de estabilidad del terreno. El trabajo se ejecutó en dos fases. En la primera fase, se realizó una descripción geológica y una campaña de adquisición de datos geofísicos para cada uno de los sectores estudiados. Durante la campaña de adquisición, se levantaron diez (10) líneas geofísicas de 64 m a 117 m de longitud. En el sector 1, se adquirieron dos líneas de cada método (S6, S8, T6, T8, MW6 y MW8); mientras que en el sector 2, se levantó dos líneas de sísmica de refracción (S7 y S9), una línea de tomografía de resistividad eléctrica (T7) y una línea de MASW 2D (MW7). Toda esta información se utilizó para estimar los parámetros geotécnicos de relación de Poisson (ν), módulo de Young (E) y módulo de cizalla (G).

* Trabajo de grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Director: José David Sanabria Gómez, Físico PhD. Codirector: Rocío del Pilar Bernal Olaya, Geóloga PhD.

Como resultado, se identificó en los dos sectores suelos residuales de espesor variable, en los cuales la interfaz entre el suelo residual y el suelo saprófito sirve de superficie de falla. En el Sector 1, donde afloran rocas ígneas, se identificó un suelo residual de 2 a 5 metros de espesor y composición arcillosa, con resistividades inferiores a 3500 Ohm.m. En el sector 2, donde afloran rocas calcáreas, se identificó un desarrollo de suelo de entre 3 y 10 metros de espesor. En la parte baja del perfil de adquisición se observaron resistividades muy altas, que llegan hasta 6000 ohm.m. Para los materiales superficiales del sector 1, se obtuvo un módulo de Poisson menor que 0.35, un módulo de Young menor que 100 kPa y un módulo de cizallamiento menor que 100 kPa. Para el sector 2, se obtuvo un módulo de Poisson menor que 0.35, un módulo de Young menor que 150 kPa y un módulo de cizallamiento menor que 700 kPa. En ninguno de los dos sectores se pudo identificar el nivel freático.

La caracterización geofísica permitió identificar el material inestable presente en cada uno de los sectores estudiados. En el sector 1 se observa un espesor de hasta 5 metros que presenta parámetros geotécnicos asociados a suelos inestables, lo que aumenta la susceptibilidad a la erosión y a la generación de movimientos en masa. En el sector 2, se encontró un espesor de suelo residual de hasta 10 metros, el cual presenta parámetros geotécnicos mayores en comparación con el sector 1, lo que se traduce en una mayor resistencia del suelo.

Abstract

Title: Geotechnical characterization of the subsoil in the municipalities of San Joaquín and Mogotes Santander using geophysical methods *

Author: Luis Alfredo Marquez Caicedo **

Keywords: Geophysics, Geotechnical Parameters, Seismic Refraction, MASW, Electrical Resistivity Tomography.

Description: A large part of the country's territory presents unstable areas which must be studied, one way to do it is through geophysical methods, which allow obtaining subsoil parameters that allow characterizing these areas and formulating measures to mitigate the threat that is presented. In this work, two sectors were characterized in the municipalities of San Joaquín (Sector 1- via Mogotes-San Joaquín) and Mogotes (Sector 2 Vereda El Hoyo) in Santander, through refractive seismic, 2D MASW and electrical resistivity tomography. to build a geological model of each sector that allows to identify the stability conditions of the terrain. The work was carried out in two phases, a field phase in which a geological description was carried out and the geophysical data acquisition campaign for each of the studied sectors. In the acquisition campaign ten (10) geophysical lines from 64 m to 117 m long were erected, in sector 1 two lines of each method were acquired (S6, S8, T6, T8, MW6 and MW8) and in sector 2 Two refractive seismic lines (S7 and S9), an electrical resistivity tomography line (T7) and a 2D MASW line (MW7) were surveyed. As a result, there is the identification in the two sectors of residual soils of variable thickness, in which the residual soil - Saprophytic soil interface serves as a failure surface. In Sector 1, where igneous rocks outcrop, residual soil with a thickness of 2 to 5 meters of clayey composition was identified, the resistivities reported in this sector being less than 3500 Ohm.m. In sector 2 calcareous rocks outcrop and a soil development between 3 m and 10 m thick was identified,

* Master's Thesis

** Science Faculty. School of Physics. Director: José David Sanabria Gómez, PhD Physicist. Co-director: Rocío del Pilar Bernal Olaya, Ph.D. Geologist.

very high resistivities were identified in the lower part of the acquisition profile, reaching up to 6000 ohm.m. For superficial materials, in sector 1 there is a Poisson's modulus <0.35 , a Young's modulus <100 kpa and a shear modulus <100 kpa. For sector 2 there is a Poisson's modulus <0.35 , a Young's modulus <150 kpa and a shear modulus <700 kpa. In neither of the two sectors could the groundwater level be identified. The geophysical characterization made it possible to identify the unstable material available in each of the sectors studied. Sector 1 shows a thickness of up to 5 meters that presents geotechnical parameters associated with unstable soils, which allow a greater action of erosion processes and the generation of mass movements. In sector two, there is a residual soil thickness of up to 10 meters, however it presents greater geotechnical parameters than sector one, which generates greater soil resistance.

Introducción

La frecuencia de los movimientos en masa en Colombia es alta y ha aumentado en la última década debido a factores como la expansión urbana y la intervención humana en el territorio. De hecho, según datos del SGC (Servicio Geológico Colombiano) del año 2017, en la primera década del siglo XXI se registraron más viviendas y personas afectadas por estos eventos que en los treinta años anteriores (Ruiz Peña et al., 2017). Además, el deterioro ambiental ha contribuido a aumentar la susceptibilidad de las zonas a los movimientos en masa. A nivel nacional, el 16% del territorio se encuentra en una situación de alta amenaza, mientras que el 3% está en amenaza muy alta (Ruiz et al., 2012). En la región Andina, el 2.85% del territorio se encuentra en amenaza muy alta, lo que representa el 95% del área total en amenaza muy alta del país, y esto se concentra en el 9.6% del área total de la región (Ruiz et al., 2012).

Mogotes y San Joaquín son municipios del oriente colombiano que se localizan al oeste del departamento de Santander, aproximadamente a 156 km de la ciudad de Bucaramanga. Estos municipios están expuestos a deslizamientos, flujos, caída de rocas y reptaciones asociados a la alta complejidad geológica, geomorfológica y tectónica de la región, clasificándolos como áreas muy susceptibles a movimientos en masa (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

Los daños que ocasionan estos fenómenos sobre la infraestructura vial y edificaciones generan la necesidad de estudiarlos y caracterizarlos desde diversas disciplinas como la geología y la ingeniería geotécnica, que estudian su comportamiento actual y futuro con el objetivo de evaluar su estabilidad y formular las medidas de intervención estructurales (obras de mitigación) necesarias

(Naranjo Aguay and Dranichnikov, 2013).

Los métodos geofísicos son una herramienta muy útil para la caracterización de estas áreas, debido principalmente a su relación costo-beneficio. Permiten adquirir una gran cantidad de información del subsuelo en poco tiempo, son poco invasivos en el terreno y resultan ser, en la mayoría de los casos, más económicos que los métodos tradicionales de exploración del terreno como los sondeos, trincheras y calicatas. (Jongmans and Garambois, 2007). Además existen diversas relaciones empíricas entre las propiedades físico-mecánicas del suelo y parámetros geofísicos como las velocidades sísmicas, que permiten calcular el coeficiente de Poisson, Módulo de Young, el Módulo de rigidez o cizallamiento, entre otros que ayudan a realizar interpretaciones relacionadas con la resistencia y estabilidad del terreno, lo que los hace muy recomendados para reconocimiento geotécnico o como un complemento a los métodos de exploración tradicionales (Naranjo Aguay and Dranichnikov, 2013).

En el presente trabajo se han identificado dos sitios críticos, los cuales han presentado problemas de inestabilidad y han generado afectaciones en el terreno o en vías de importancia (figura 1). El sector uno (triángulo amarillo en la figura 1) se localiza en la vía que comunica al municipio de Mogotes con San Joaquín, en el PR54 + 160 ($6^{\circ}25'55.22''N - 72^{\circ}52'48''W$). En esta zona afloran rocas ígneas del Batolito de Mogotes (JTRcm) y localmente se encuentra la Riolita de San Joaquín. Estas formaciones, por su composición, presentan un desarrollo de suelos profundos (de 5 a 15 metros) y una alta susceptibilidad a movimientos en masa, evidenciado por un importante desarrollo de eventos morfodinámicos, evidenciado por un desarrollo importante de eventos morfodinámicos (figura 2) como deslizamientos y flujo de detritos (Vargas et al., 1981; Correa-Martínez

et al., 2016).

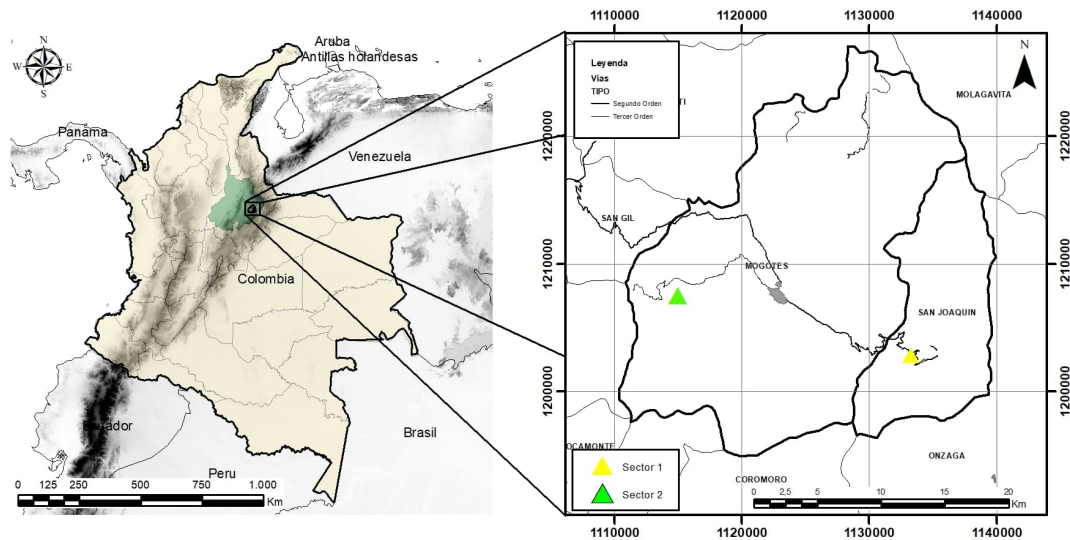


Figura 1. Localización geográfica de los municipios de Mogotes y San Joaquín

El Sector dos (triángulo verde en la figura 1) se encuentra en la vereda El Hoyo del municipio de Mogotes, en potreros colindantes con la carretera que conduce al balneario del Pozo del Ahogado en la Quebrada El Pepe ($6^{\circ}28'26.4''N - 73^{\circ}2'29.4''W$). Allí aflora la formación Rosablanca (Kir), compuesta por calizas que son susceptibles a procesos kársticos y generación de suelos residuales que son fácilmente erosionables. La figura 3 muestra fenómenos de reptación y erosión laminar en la superficie del terreno (Vargas et al., 1981).

Sobre estos sitios se adquirieron líneas de sísmica de refracción, MASW 2D y tomografía eléctrica para realizar una caracterización inicial del terreno y aportar información del subsuelo que permita la construcción de un modelo geológico-geotécnico con información del material del talud (suelo y roca), espesores y geometrías de los materiales, nivel de meteorización, presencia de desclasificaciones, nivel freático y parámetros geotécnicos (coeficiente de Poisson, Módulo



Figura 2. Imagen aérea del sector uno con identificación de eventos morfodinámicos (deslizamientos delineados en rojo y flujo de detritos delineados en amarillo).

de Young, el Módulo de rigidez o cizallamiento), que permita evaluar de forma preliminar las condiciones de estabilidad del terreno y aporte información para un posterior análisis de estabilidad de cada uno de los sitios estudiados.

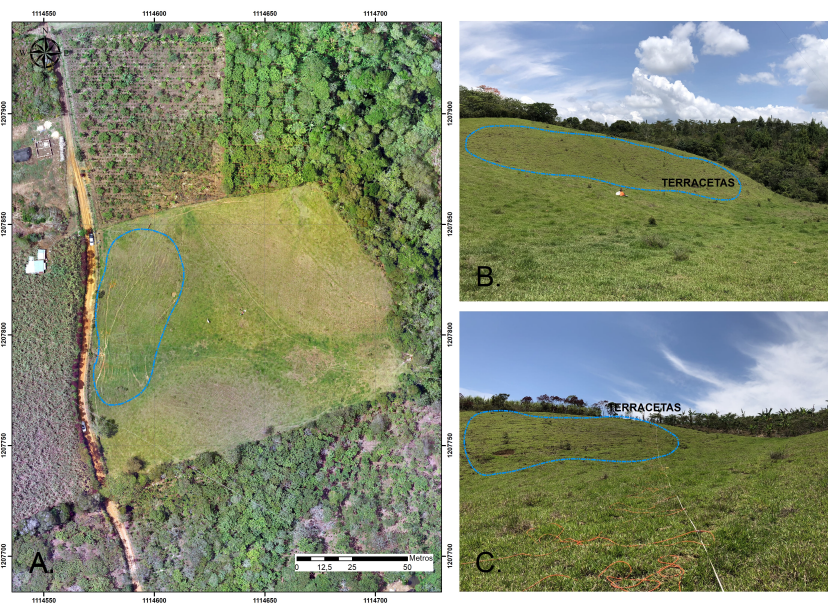


Figura 3. Imagen aérea del sector dos donde se identifican de eventos morfodinámicos sobre el área estudiada (reptación o terracetos delimitados por la línea azul)

1. Objetivos

Objetivo general

Caracterizar las laderas inestables a partir de métodos geofísicos y parámetros geotécnicos en dos sectores de los municipios de Mogotes y San Joaquín en el departamento de Santander.

Objetivos específicos

- Estimar a partir de los datos de sísmica de refracción, MASW y tomografía de resistividad eléctrica los parámetros geológicos de espesor y geometría del suelo residual, las posibles superficies de falla y la presencia de estructuras en el subsuelo en los dos sectores a estudiar;
- Calcular los parámetros geotécnicos de coeficiente de Poisson, Módulo de Young y módulo de rigidez o cizallamiento, a partir de la información geofísica adquirida;
- Generar un modelo geológico de cada zona de estudio, a partir de los parámetros geofísicos adquiridos y los parámetros geotécnicos calculados.

2. Antecedentes

2.1. Uso de métodos geofísicos en la caracterización geotécnica

Existen trabajos que muestran una compilación de los diferentes métodos geofísicos utilizados para la investigación de deslizamientos, agrupando los resultados por método, parámetro físico medido, contexto geológico, tipo de deslizamiento estudiado y resultados obtenidos (Jongmans and Garambois, 2007). Este trabajo (Tabla 1) hace referencia a más de treinta autores que aplican los métodos geofísicos para caracterizar diversos parámetros necesarios para estudiar zonas inestables.

Los métodos geofísicos más utilizados en la exploración geotécnica aplicada al estudio de laderas son los métodos sísmicos, geoeléctricos, electromagnéticos y gravimétricos (Hack, 2000), debido a que presentan buenas resoluciones en superficie, un bajo costo de operación y resultados que permiten identificar los cuerpos de material inestable o deslizado (Jongmans and Garambois, 2007; Hack, 2000; Bogoslovsky and Ogilvy, 1977).

Method	Parameter-information	Geological context	Landslide type	Application	Authors
Seismic reflection	Vp, Vs, 2D vertical sections	Soft sediments (sand to clay)	Earth slide-debris flow ($\alpha=25^\circ$)	Geological boundary (80 m)	Bichler <i>et al.</i> [2004]
	Vp, Vs, 2D vertical sections	Gypsum, shale and sandstone	Complex active slide ($\alpha=10^\circ$)	Slip surface (50 m) within a gypsum layer	Bruno and Marillier [2000]
Seismic refraction	Vp, Vs, 2D vertical sections	Phyllitic rocks, gneiss	Rockslide ($\alpha=26^\circ$)	Internal geometry (layering, faults)	Ferrucci <i>et al.</i> [2000]
	Vp, Vs	Weathered marl and limestone	Active complex slide ($\alpha=7^\circ$)	Slip surface (3 m)	Glade <i>et al.</i> [2005]
Seismic tomography	Vp, Vs	Limestone, shale and debris	Active rock fall-debris slides	Relief of the bedrock (30 m) and internal structure	Mauritsch <i>et al.</i> [2000]
	Vp, Vs	Black marl	Complex mudslide ($\alpha=26^\circ$)	Basal slip surface (9 m)	Caris and Van Asch [1991]
Seismic noise measurements (H/V method)	Vp, 2D vertical sections	Shale	Translational rockslide (vertical cliff)	Geometry of the slide (5-10 m)	Jongmans <i>et al.</i> [2000]
	Vp, 2D vertical sections	Micaschist	Rock slide ($\alpha=32^\circ$)	Geometry and internal structure	Méric <i>et al.</i> [2005]
Vertical electrical sounding (VES)	Vs, 1D vertical profile	Variocoloured clay	Complex earth slide-flow ($\alpha=9^\circ-10^\circ$)	Geometry and thickness (30 m)	Lapenna <i>et al.</i> [2005]
	Vs, 1D vertical profile	Black marl	Complex mudslide ($\alpha=25^\circ$)	Failure surface (35 m)	Méric <i>et al.</i> [2006]
Electrical tomography	Vs, 1D vertical profile	Varved clay	Translational slide ($\alpha=10^\circ$)	Slip surface (27-37 m) and bedrock depths (33-62 m)	Méric <i>et al.</i> [2006]
	ρ , 1D vertical profile	Clayey arenitic rock	Composite soil-rock slump ($\alpha=6^\circ$)	Slip surface (100 m)	Agnesi [2005]
Spontaneous Potential (SP)	ρ , 1D vertical profile	Black marl	Complex mudslide ($\alpha=25^\circ$)	Slip surface and bedrock depths (15 m)	Schmitz <i>et al.</i> [2000]
	ρ , 1D vertical profile	Black marl	Complex mudslide ($\alpha=25^\circ$)	Bedrock depth (7.5 m)	Caris and Van Asch [1991]
Electro-magnetism (EM34 or TEM)	ρ , 2D vertical section	Limestone to shale	Rock slide ($\alpha=22^\circ$)	Slip surface depth (10 m)	Batayneh and Al-Dibat [2002]
	ρ , 2D vertical section	Soft sediments (sand to clay)	Earth slide-debris flow ($\alpha=25^\circ$)	Geological boundary and slip surface depth	Bichler <i>et al.</i> [2004]
Ground penetrating Radar (GPR)	ρ , 2D vertical section	Alluvial debris on gneissic rock	Large rockslide ($\alpha=40^\circ$)	3D slip surface geometry and water flows	Lebourg <i>et al.</i> [2005]
	ρ , 2D vertical section	Clay and sand	Multiple earth slide ($\alpha=8^\circ$)	Geological boundary and slip surface depth	Demoulin <i>et al.</i> [2003]
Borehole radar	ρ , 2D vertical section	Variocoloured clay	Complex earth slide-flow ($\alpha=9^\circ-10^\circ$)	Slip surface depth (30 m)	Lapenna <i>et al.</i> [2005]
	ρ , 2D vertical section	Arenite and clay	Complex active slide ($\alpha=10^\circ$)	Slip surface depth (20 m)	Havenith <i>et al.</i> [2000]
Gravimetry	ρ , 2D vertical section	Micaschist	Large rockslide	Geometry and thickness (100 m)	Méric <i>et al.</i> [2005]
	ρ , 2D vertical section	Clayey sand on crystalline rock	Complex active slide ($\alpha=10^\circ$)	Slip surface depth	Wisén <i>et al.</i> [2003]
Ground penetrating Radar (GPR)	V, 1D horiz. profile and 2D map	Gypsum, shale and sandstone	Complex earth slide-flow ($\alpha=9^\circ-10^\circ$)	Upward flow of water on the landslide	Bruno [2000]
	ρ , 1D horiz. profile and 2D map	Variocoloured clay	Complex active slide ($\alpha=10^\circ$)	Landslide boundary, and water flows	Lapenna <i>et al.</i> [2005]
Gravimetry	ρ , 1D horiz. profile and 2D map	Gypsum, shale and sandstone	Complex active slide ($\alpha=10^\circ$)	Lateral boundary of the slide	Bruno and Marillier [2000]
	ρ , 1D horiz. profile and 2D map	Micaschist	Large rockslide	Lateral boundary of the slide	Méric <i>et al.</i> [2005]
Ground penetrating Radar (GPR)	ρ , 1D horiz. profile and 2D map	Black marl	Complex mudslide ($\alpha=25^\circ$)	Slip surface and bedrock depths (15 m)	Schmitz <i>et al.</i> [2000]
	ρ , 1D horiz. profile and 2D map	Limestone and shale, debris	Active rock fall-debris slides	Location of saturated areas	Mauritsch <i>et al.</i> [2000]
Gravimetry	ρ , 1D horiz. profile and 2D map	Black marl	Complex mudslide ($\alpha=26^\circ$)	Differences in water content	Caris and Van Asch [1991]
	ρ , 1D horiz. profile and 2D map	Soft sediments (sand to clay)	Earth slide-debris flow ($\alpha=25^\circ$)	Geological boundary and slip surface depth	Bichler <i>et al.</i> [2004]
Borehole radar	ρ , 2D vertical sections	Limestone	Rock slide	Geometry of the moving mass (5m)	Petinelli <i>et al.</i> [1996]
	ρ , 2D vertical sections	Gneiss	Rock slide	Location of fractures (15 m)	Jeamin <i>et al.</i> [2006]
Gravimetry	γ , 1D horiz. profile and 2D map	Flysch		Location of fractures (49 m)	Willenberg <i>et al.</i> [2004]
	γ , 1D horiz. profile and 2D map	Flysch		Hollow in bedrock near headscarp	Del Gaudio <i>et al.</i> [2000]

Tabla 1
 Recopilación realizada por Jongmans y Garambois de autores que utilizan los métodos geofísicos en el estudio de la estabilidad de laderas. Tomado de (Jongmans and Garambois, 2007)

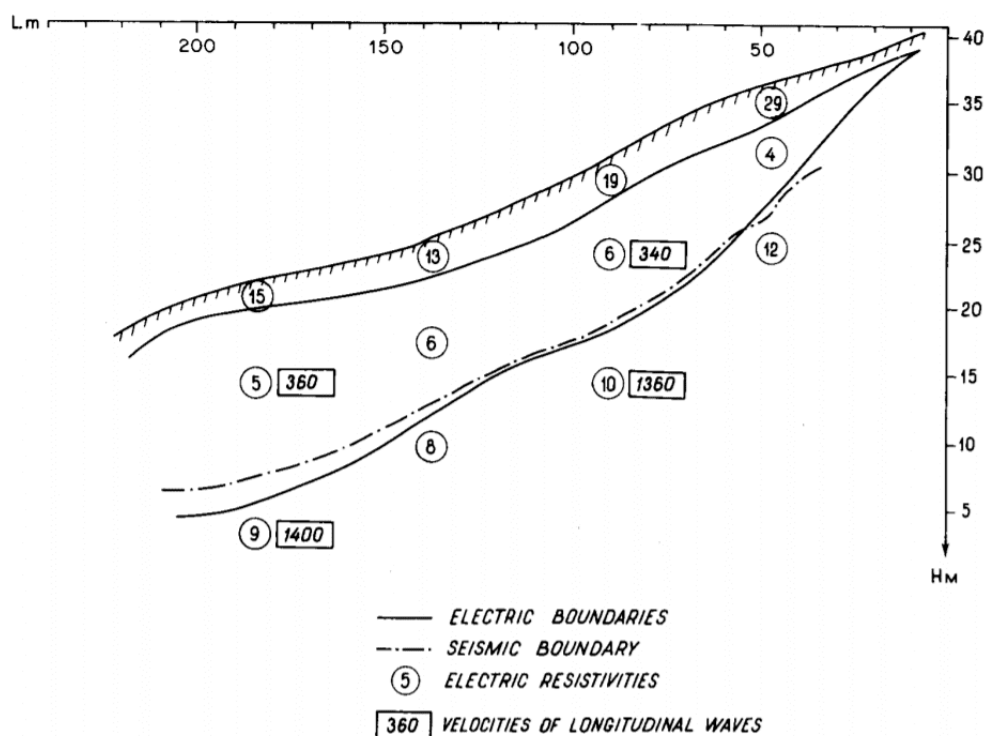


Figura 4. Interpretación y correlación de los datos de sísmica de refracción, SEV y SP, en donde se muestra tres capas diferenciadas en el cuerpo del deslizamiento (material deslizado, zona de falla y argilita fresca), la velocidad de onda longitudinal se encuentra en m/s y la resistividad eléctrica en $ohm \times m$. Tomado de (Bogoslovsky and Ogilvy, 1977; Pulido Gonzáles, 1979)

El uso de métodos geofísicos como herramienta para la caracterización geotécnica de laderas puede remontarse a las investigaciones realizadas por Bogoslovsky y Ogilvy en 1977, donde a través de Sondeos Eléctricos Verticales y la medición de Potencial Espontáneo (SEV y SP) en configuración Schlumberger y sísmica de refracción, se identificó la estructura y saturación de agua de deslizamientos complejos en cercanías a la ciudad de Sochi (clima subtropical), Rusia (figura 4).

Otro caso es el desarrollado en el Valle Riou-Bourdoux en los Alpes Franceses (Submediterráneo), el cual utiliza métodos geoelectrónicos (seis SEV en configuración Schlumberger), electromagnéticos (*ground conductivity meter* en configuración dipolo), sísmicos (sismógrafo de

12 canales con líneas de 120 a 180 metros) y ensayos geotécnicos e hidrogeológicos con el fin de examinar la profundidad de la superficie de deslizamiento y las relativas diferencias en el contenido de agua. Geológicamente, en el área estudiada afloran arcillolitas negras de edad Jurásico, muy susceptibles a la erosión. Junto a la información geofísica adquirida, se usaron parámetros geotécnicos de cohesión y ángulo interno de fricción para hacer el análisis de estabilidad. El análisis de los datos revela que la base del deslizamiento varía entre 4 m y 9 m de profundidad (Caris and Van Asch, 1991).

El trabajo realizado por (Júnior et al., 2012) utiliza la técnica de MASW en el estudio de áreas susceptibles a deslizamientos, en cercanía a la ciudad de Ubatuba en Brasil (clima tropical), sobre una ladera de suelos no saturados donde históricamente han ocurrido diversos deslizamientos. La comparación entre los valores de velocidad de onda S en época de lluvia y tiempo seco mostró un aumento, atribuido a la alta cohesión de la estructura del suelo en el tiempo seco. La investigación realizada por los autores sugiere que esta variación de la velocidad de onda S en diferentes temporadas (seco y lluvias) presenta una conexión con la variación de la humedad del suelo y alienta a realizar correlaciones empíricas entre las variaciones de velocidad de onda S y del módulo de corte G , determinado a través del método MASW y parámetros de resistencia del suelo que permitan un monitoreo continuo de las áreas inestables.

Se tienen los aportes realizados por los profesores de la Universidad Nacional de Colombia Luis Alberto Briceño Guarupe y Ramiro León Díaz Campos, quienes muestran los resultados encontrados en la definición de parámetros electrodinámicos a partir de la medición de ondas P y S en areniscas del Terciario (Formación Guadalupe), con velocidades de 3023m/s y 1772m/s para V_p

y V_s , respectivamente; estos datos permitieron deducir los valores de módulos elásticos típicos en rocas sedimentarias de buena resistencia mecánica, con módulo de Young de 2.11×10^{10} dyn/cm y Coeficiente de Poisson de 0.23 (Guarupe and Campos, 1995).

Otro trabajo que aplicó métodos geofísicos a la exploración geotécnica en Colombia es el desarrollado por (Arias et al., 2012) sobre suelos residuales derivados de roca cristalina del altiplano central de Antioquia (Valles de San Nicolás y La Unión), usando sondeos eléctricos verticales (SEV). Se relacionaron los resultados de la geoelectrica con características geotécnicas que permitieron la diferenciación de geomateriales con una razonable certeza, la cual fue validada por los autores con observación y medición directa de las propiedades de cada geomaterial identificado (Tabla 2).

Geomaterial	Resistividad (Ohm/m)		
	medios	maximos	minimos
Andosol (ceniza volcánica)	670	2500	30
Arcilla no saturada	20	30	10
Arcilla saturada	15	30	5
Arena aluvial no saturada	230	360	150
Arena aluvial saturada	140	180	20
Suelo residual maduro	90	200	15
Saprolito no saturado	300	570	80
Saprolito saturado	90	200	30
Gruss no saturado	900	2200	150
Gruss saturado	250	650	40
Basamento cristalino > 10000	> 10000		

Tabla 2
Valores de resistividad de geomateriales en los Valles de San Nicolás y La Unión. Tomado de (Arias et al., 2012)

En la década de los setenta se realizaron diversas investigaciones experimentales y teóricas entre geofísicos e ingenieros civiles en organizaciones gubernamentales de la antigua Unión

Soviética URSS. Estas investigaciones arrojaron diversas ecuaciones para relacionar los valores conocidos de velocidad de onda P y S con el coeficiente de Poisson (ν), módulo de Young (E) y módulo de corte o de cizallamiento (G) (Naranjo Aguay and Dranichnikov, 2013). Estas ecuaciones se desarrollan en la sección 3.3.1.

Como se evidencia en cada uno de los trabajos realizados, se usan varios métodos geofísicos para caracterizar el subsuelo y determinar diversos parámetros útiles, como el tipo de material, espesor, forma, contenido de agua y estabilidad. Con la revisión de los trabajos referenciados anteriormente (Jongmans and Garambois, 2007; Glade et al., 2005; Bogoslovsky and Ogilvy, 1977), se concluye que los métodos geofísicos más usados y recomendados para la caracterización de zonas inestables y el cálculo de parámetros geotécnicos son los métodos sísmicos, especialmente la sísmica de refracción y el Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW), y los métodos eléctricos, como la tomografía de resistividad eléctrica. Por lo cual, en este trabajo de investigación, se usarán estos métodos geofísicos para la caracterización de los dos sectores a estudiar.

3. Marco Teórico

3.1. Marco Geológico

Los municipios de Mogotes y San Joaquín se localizan al este del departamento de Santander, donde geológicamente se localiza el Macizo de Santander y formaciones sedimentarias Jurásicas y Cretácicas, asociadas a la cuenca de la Cordillera Oriental (González, 1980; Vargas et al., 1981).

Las formaciones geológicas que afloran en la región son descritas en la tabla 3 (González, 1980)

Tabla 3

Formaciones geológicas presentes en los municipios de Mogotes y San Joaquín. Modificado de (González, 1980).

Formación	Descripción
ROCAS METAMORFICAS	
Formación Neis de Bucaramanga (PDb)	Incluye rocas metasedimentarias de alto grado de metamorfismo, la cual se compone principalmente de paraneis pelítico, neis horblendico y anfibolitas, localmente presenta zonas de migmatitas. La formación es reportada de edad Proterozoica. Sin embargo estudios recientes indican que esta formación presenta edades correspondientes al Ordovícico.

Sigue en la página siguiente.

Formación	Descripción
Formación Silgará (PDs)	<p>Esta compuesta rocas metamórficas de grado bajo y medio como esquistos, filitas, metalodolitas, meta-areniscas, ortoanfibolitas y mármoles, las cuales fueron metamorfoseadas en la facies esquistos verdes a anfibolita baja. Esta formación aflora sobre la parte noroccidental del área cartografiada en el cuadrángulo I-13 y se extiende desde Cepitá al sur, hasta los alrededores de Mogotes. Está limitada al este por el Batolito de Mogotes y al oeste desaparece bajo los sedimentos Cretácicos de la zona de mesas. En esta zona la secuencia metamórfica consiste esencialmente de esquistos cuarzosomcovíticos con alternancias de metagrauvas, está atravesado por algunos diques pegmatíticos posiblemente relacionados con la intrusión del Batolito de Mogotes.</p>
Formación Floresta (Dfm)	<p>corresponde con rocas ligeramente metamorfoseadas que afloran en la zona de Mogotes y San Joaquín. Limita al oriente con el Batolito de Mogotes y la Formación Silgará, al occidente la Formación Floresta infrayace discordantemente estratos Jurásicos y Cretácicos.</p>
Rocas Ígneas	

Sigue en la página siguiente.

Formación	Descripción
Batolito de Mogotes (JTRcs, JTRcm y JTRgp)	Es uno de los cuerpos ígneos mas grandes del Macizo de Santander, se ubica al oeste de la falla de Bucaramanga. Tiene 40 Km de largo y 20 Km de ancho en su parte mas amplia, y un promedio de 10 Km. Principalmente consta de una cuarzomonzonita biotítica equigranular de grano medio. También se reportan granodioritas y cuerpos menores de sienogranitos granófidios. El batolito se encuentra cortado por diques de composiciones máficas hasta félsicas, predominando los monzogranitos y en poca proporción rocas subvolcánicas
Riolitas del Alto de los Cacaos	Aflora al noroccidente de la cabecera municipal del Municipio de San Joaquín, donde ocupa un área aproximada de 22 km ² . Está compuesta por riolitas y traquitas finogranulares y porfídicas de tonalidades rosa y naranja, con variaciones graduales entre una y otra, que desarrollan saprolitos de color rosa muy claro a naranja, arcillosos. Las riolitas y traquitas están intruidas localmente por diques de pocos centímetros de fenodacita e intruyen los esquistos de la Formación Silgará.
Rocas sedimentarias	

Sigue en la página siguiente.

Formación	Descripción
Formación Girón (Jg)	Esta compuesta de un conjunto grueso de areniscas arcillosas rojas, conglomerados y limolitas rojas pardo-moradas que se encuentran expuestas al oeste de la Ciudad de Bucaramanga. La formación en la zona de las planchas 135 y 136 se limita a sectores con orientación norte-sur bordeando generalmente rocas metamórficas de la formación Floresta. Presenta espesores de aproximadamente 800 metros
Formación Arca-buco (Jar)	Corresponde con un conjunto de areniscas cuarzosas de color claro a rojo, de grano fino hasta medio, con presencia de algunos conglomerados y un espesor de aproximadamente 800 metros. En el área de los municipios de estudio ocupa una franja delgada en dirección nor-noreste. Afloran capas de areniscas blancas a gris claro, ocasionalmente amarillentos, de grano medio a fino, subangulares, compactas en estratificación planar y en bancos de espesor variable
Formación Tam-bor (Kita)	Se encuentra formada por capas muy gruesas de areniscas cuarcíticas blancas, conglomeradas con algunas intercalaciones arcillosas y se considera de edad Neocomiano Aptiano.

Sigue en la página siguiente.

Formación	Descripción
Formación Rosa-blanca (Kir)	Corresponde con capas de caliza masiva dura, gris azulosa, fosilifera, de textura gruesa, con muchas capas margosas que pasa a caliza de textura muy fina, negra y arcillosa en el tope. Aflora al suroeste de Mogotes y sobre las laderas del Río Yama con calizas, arcillas negras laminadas y bancos arenosos. De acuerdo con los fósiles encontrados, su edad ha sido considerada como Barremiano hacia el norte y Hauteriviana en la zona de Mesas

En la figura 5 se muestra el mapa de unidades geológicas presentes en los municipios de Mogotes y San Joaquín. Este fue construido a partir de la información geológica de las planchas 135, 136, 151 y 152 del Servicio Geológico Colombiano.

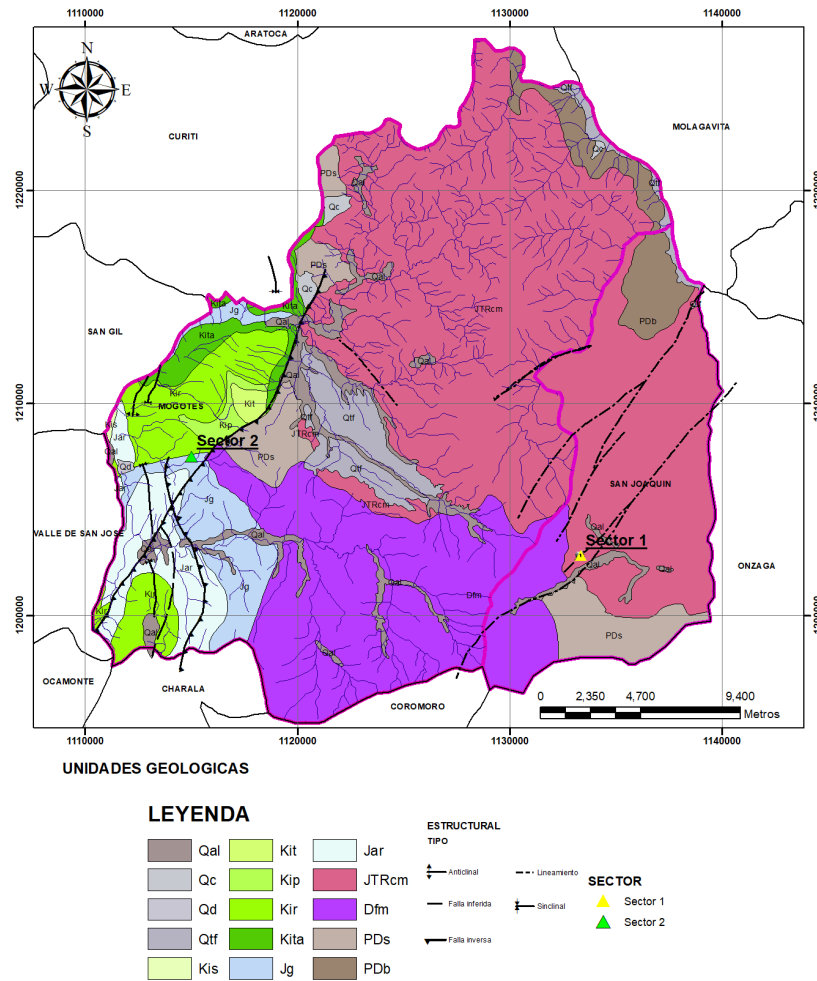


Figura 5. Mapa geológico de los municipios de Mogotes y San Joaquín Santander, escala 1:100.000. Modificado de (Vargas et al., 1981; Pulido Gonzáles, 1979). El polígono rosado corresponde a los límites municipales y los triángulos las ubicaciones del sector uno y dos como se muestra en las convenciones

3.2. Métodos geofísicos

Los métodos geofísicos evalúan las características del terreno basándose en la medida de ciertas magnitudes físicas como la elasticidad de las rocas, la conductividad eléctrica, la variación de las corrientes naturales en la tierra, los tiempos de decaimiento de diferentes potenciales artificiales introducidos en el subsuelo, entre otros. Estas mediciones son tomadas con instrumentos especializados generalmente en la superficie del terreno, sin embargo también pueden ser aplicadas dentro de pozos perforados, sobre el agua en embarcaciones o en el aire sobre aeronaves (Telford et al., 1990).

3.2.1. Método Sísmico. El método sísmico es uno más usados en la exploración del subsuelo, debido a que cuenta con una gran precisión, alta resolución y gran penetración (Telford et al., 1990). Las ondas sísmicas para el uso de este método se generan a través de un impacto o una pequeña carga explosiva que se coloca en la superficie. Mediante geófonos dispuestos a distintas distancias del punto de impacto, se registra la información de las ondas mientras se transmiten por el subsuelo. La velocidad de propagación de las ondas sísmicas en el terreno depende de sus características de deformabilidad. Su propagación se describe por la ecuación de onda y la velocidad de la onda sísmica depende de los parámetros elásticos del medio en que se propaga, en función del módulo elástico y del coeficiente de Poisson (Dobrin and Savit, 1960). La información necesaria para este método se obtiene de dos fenómenos principales: ondas refractadas o headwave, en la cual la trayectoria de la onda se da principalmente a lo largo de la interfaz entre dos capas de diferentes velocidades, suponiendo que la capa inferior tiene una velocidad mayor que la capa superior

y las ondas reflejadas, en el cual la propagación y trayectoria de las ondas es hacia el subsuelo y posteriormente es reflejada de vuelta a la superficie (Telford et al., 1990). Para el desarrollo de este trabajo se describe la base teórica del método de sísmica de refracción y el método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW).

3.2.1.1. Sísmica de refracción. En la sísmica de refracción se mide el tiempo de propagación de las ondas elásticas refractadas (headwave), transcurrido entre un sitio donde se generan ondas sísmicas y la llegada de éstas a diferentes puntos de observación. La velocidad de onda sísmica está relacionada con las propiedades mecánicas del material, por lo cual se utiliza para caracterizar las condiciones geológicas, como el tipo de material (suelo o roca), la profundidad de las capas de suelo o roca, el nivel freático, la estratigrafía, la litología, la estructura y las fracturas presentes en la roca (ASTM, 2011). En la figura 6 se muestra un esquema explicativo de los principios de la sísmica de refracción.

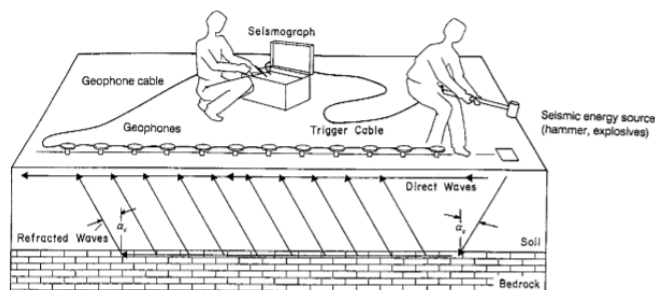


Figura 6. Arreglo de adquisición de sísmica de refracción en campo con un sismógrafo de veinte canales, donde se muestra la trayectoria de los rayos que provienen de la onda directa y la refractada. Modificado de (ASTM, 2011)

El principio básico del método se muestra en la figura 7, donde se tiene una capa de espesor h_0 con velocidad v_0 sobre una capa con velocidad mayor v_1 . En esta figura se muestran las tres

diferentes ondas que se generan desde la fuente: onda directa, onda reflejada y onda refractada.

Los tiempos de arribo para cada onda pueden ser calculados usando las leyes de Snell (Stein and Wysession, 2009).

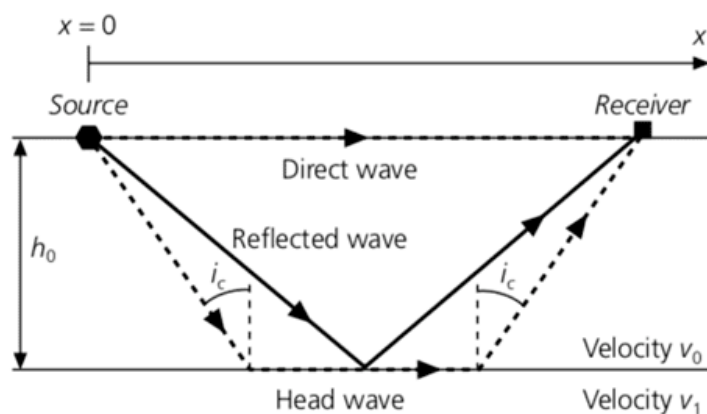


Figura 7. Modelo de rayos para sismología de refracción, para un medio de capas donde se observa la onda directa, onda reflejada y onda headwave. Modificado de (Stein and Wysession, 2009)

La onda directa se propaga en la capa con velocidad v_0 . El tiempo de propagación en relación a la distancia se relaciona con una línea con una pendiente de $1/v_0$. El segundo rayo corresponde a la onda reflejada desde la interfaz entre la capa con velocidad v_0 y v_1 . Dado que el ángulo de incidencia y reflexión son iguales, el tiempo de propagación de la onda reflejada puede calcularse utilizando los triángulos formados por los segmentos del rayo incidente y reflejado, que se encuentran a $x/2$ entre sí y a una profundidad h_0 . Esta curva representa una hipérbola. Finalmente, la refracción, cuando v_1 es mayor que v_0 , hace que la onda refractada incida sobre la interfaz con un ángulo crítico en el que la onda viaja entre la interfaz v_0 y v_1 , para posteriormente ser recibida por los geófonos. La relación entre el tiempo de propagación y la distancia corresponde a una línea con un intercepto en t_1 , que está relacionado con la aparición de la onda refractada en una distancia

crítica (Stein and Wysession, 2009).

En la figura 8 se muestra la forma de las funciones de cada tipo de onda registrada por los geófonos, el objetivo de la sismica de refracción es identificar los arribos de la onda directa y la onda refractada, para observar el cambio de pendiente entre estas y así determinar las velocidades de los medios (ASTM, 2011).

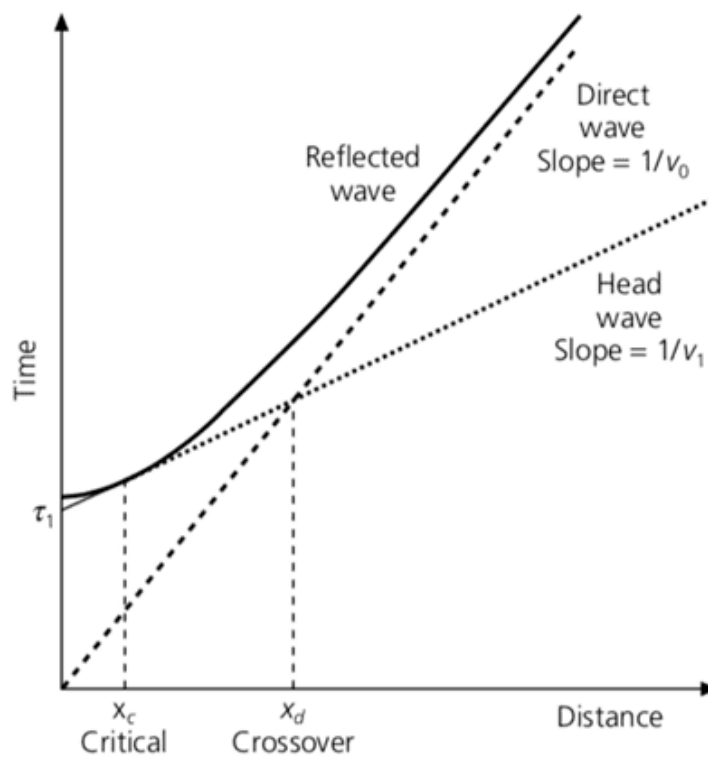


Figura 8. Tiempos de propagación con respecto a la distancia fuente-receptor. Modificado de (Stein and Wysession, 2009)

La sismica de refracción provee la velocidad de onda compresional P en materiales superficiales. Aunque esta velocidad es un buen indicador del tipo de suelo o roca, los materiales no poseen una única velocidad, en la tabla 4 se asocian rangos de velocidad de onda p para diversos

Materials	Velocity	
	ft/s	m/s
Natural Soil and Rock		
Weathered surface material	800 to 2000	240 to 610
Gravel or dry sand	1500 to 3000	460 to 915
Sand (saturated)	4000 to 6000	1220 to 1830
Clay (saturated)	3000 to 9000	915 to 2750
Water ^A	4700 to 5500	1430 to 1665
Sea water ^A	4800 to 5000	1460 to 1525
Sandstone	6000 to 13 000	1830 to 3960
Shale	9000 to 14 000	2750 to 4270
Chalk	6000 to 13 000	1830 to 3960
Limestone	7000 to 20 000	2134 to 6100
Granite	15 000 to 19 000	4575 to 5800
Metamorphic rock	10 000 to 23 000	3050 to 7000

^ADepending on temperature and salt content.

Tabla 4

Rango de velocidades para ondas compresionales en suelo y roca. Tomado de (Stein and Wysession, 2009)

materiales geológicos. (ASTM, 2011).

3.2.1.2. Análisis multicanal de ondas superficiales - Multichannel Analysis Wave

(MASW). El método MASW fue desarrollado para estimar la velocidad de onda *S* a partir de datos de ondas superficiales de Rayleigh de baja frecuencia (3 Hz a 30 Hz), aprovechando la propiedad de la dispersión que presenta este tipo de ondas cuando atraviesan un medio estratificado. Este método ha sido ampliamente utilizado para resolver problemas como la caracterización de pavimentos, estudios del coeficiente de Poisson, mapeo de zonas de falla, detección de zonas de disolución y la medición de la onda *S* en función de la profundidad. Combinado con la sísmica de refracción, también se utiliza para obtener los módulos de elasticidad dinámicos del terreno (Park et al., 2007).

Este método geofísico utiliza fuentes sísmicas tradicionales como vibradores o martillos y geófonos con una sensibilidad de hasta 5 Hz. Estos datos se procesan para exponer la relación

velocidad de fase-frecuencia de la dispersión de ondas superficiales. La configuración de adquisición para este método es la usada convencionalmente para el Common Mid Point (CMP) de adquisiciones de sismica de reflexión (Park et al., 1999).

La curva de dispersión (figura 9) muestra la velocidad de fase en función de la frecuencia, y se obtiene calculando la pendiente de cada componente del registro de barrido de frecuencias. Este proceso es crítico en la estimación de la velocidad de onda S, ya que es la base del proceso de inversión (Park et al., 1999).

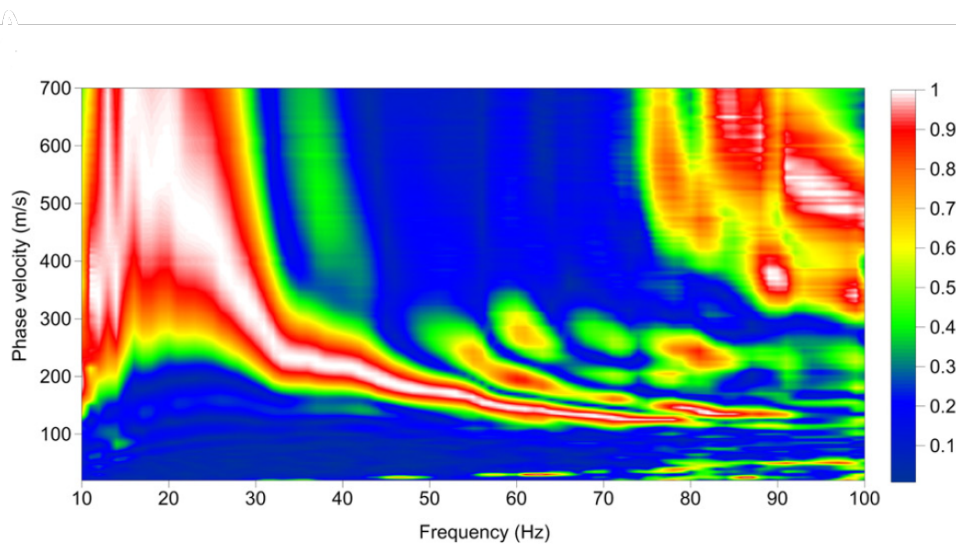


Figura 9. Ejemplo de curva de dispersión. Fuente:(Xia, 2014)

El perfil de velocidades V_s se calcula utilizando un proceso iterativo de inversión, el cual utiliza los datos de dispersión, la estimación de la densidad y el coeficiente de Poisson. Como resultado, se obtiene una curva de dispersión teórica (Park et al., 1999).

Los perfiles 2D de velocidad de onda S son construidos a partir de la interpolación de sucesivos modelos 1D. La adquisición de estos modelos en 2D utiliza una configuración de receptores

fijos como arreglo de adquisición (Park, 2005; Geometrics, 2009). Este arreglo fue el usado en la adquisición de datos del presente trabajo, en el cual se hacen sucesivos disparos en medio de cada uno de los geófonos, cubriendo cada espacio hasta llegar al otro lado de la línea, como se observa en la figura 10.

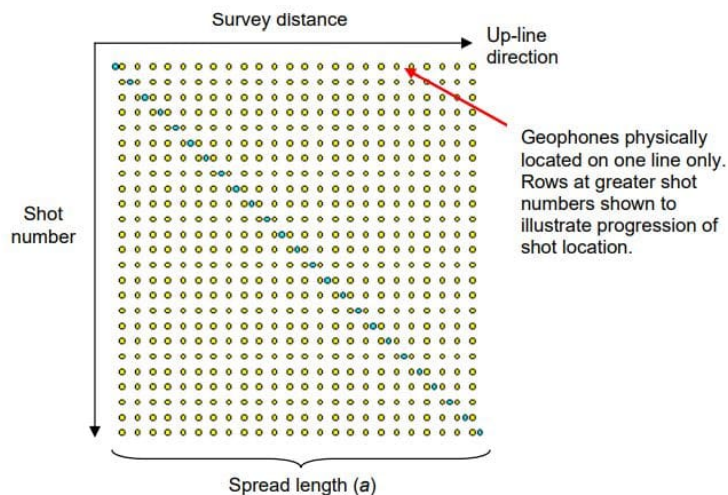


Figura 10. Arreglo de adquisición con receptores fijos para MASW 2D. Fuente:(Georys, 2016).

3.2.2. Método de resistividad eléctrica. Los métodos de resistividad eléctrica se basan en aplicar una corriente eléctrica al subsuelo a través de electrodos, conociendo que el flujo de corriente es afectado por las estructuras que se encuentran en profundidad y esto afecta la distribución del potencial eléctrico, el cual se mide en superficie. Las distintas formas, localización y tamaño de las estructuras definen este comportamiento del potencial eléctrico (Griffiths and Barker, 1993).

Una corriente eléctrica I [amperios, A] se inyecta directamente en el suelo a través de un par de electrodos y el voltaje resultante V [voltios, V] se mide entre otro par de electrodos. La

impedancia eléctrica $Z = V/I$ [V/A], que es la relación del voltaje V medido en los electrodos de potencial entre la corriente eléctrica I de entrada, se transforma posteriormente en una resistividad aparente ρ_a [Ohm-metro, $\Omega \times m$], que contiene información del subsuelo (Everett, 2013).

3.2.2.1. Propiedades eléctricas de las rocas. En general, las rocas pueden conducir electricidad a través de tres formas distintas: conducción electrolítica, electrónica (óhmica) y dieléctrica. La primera ocurre con el movimiento de iones en un electrolito y depende del tipo de iones disueltos en él, su concentración y movilidad. La segunda es el proceso por el cual los metales permiten el movimiento de electrones rápidamente. La tercera ocurre en materiales con conductividad muy débil, cuando una corriente externa es aplicada, provocando que los electrones atómicos se desplacen ligeramente con respecto a sus núcleos (Reynolds, 2011).

Con excepción de las arcillas y los minerales metálicos, el paso de la electricidad a través de las rocas se produce por el agua subterránea contenida en sus poros y fisuras, actuando como un electrolito. La concentración de sales disueltas en el agua subterránea define la resistividad de los materiales que la contienen. La matriz rocosa normalmente no es conductora o es un material dieléctrico (Griffiths and Barker, 1993).

La resistividad de los materiales geológicos tiene uno de los rangos más variables de todas las propiedades físicas en las rocas como puede verse en la figura 11. Esta va desde $1.6 \times 10^{-8} \Omega \times m$ para la plata nativa hasta $10^{16} \Omega \times m$ para sulfuros puros. Las rocas ígneas tienden a presentar las resistividades más altas, mientras que las sedimentarias tienden a ser más conductivas debido a su porosidad y contenido de fluidos. Las rocas metamórficas tienden a presentar una resistividad intermedia, en algunos casos solapando los rangos de resistividad de los otros tipos de rocas. Los

depósitos cuaternarios y rocas volcánicas pueden presentar resistividades muy bajas que van desde $10 \Omega \times m$ hasta $200 \Omega \times m$ (Reynolds, 2011).

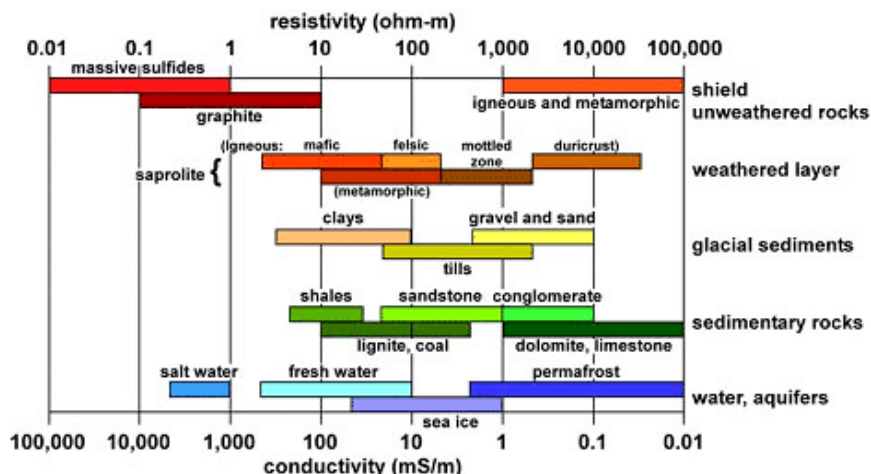


Figura 11. Rangos típicos de resistividad eléctrica ($\Omega \times m$) o conductividad eléctrica (mS/m) para materiales geológicos. Fuente:(Ley-Cooper et al., 2015)

3.2.2.2. Tomografía de Resistividad Eléctrica.

La Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) es un tipo de imagen del subsuelo en la que se colocan aproximadamente 50 electrodos conectados a dos cables de varios núcleos a una caja de conmutación y medidor de resistencia, o un solo cable de conexión de 72 o más electrodos. Todo el procedimiento de adquisición de datos está controlado por un software desde una computadora portátil. Existen diversos sistemas producidos, como el sistema automático de imágenes LUND (ABEM) y MacOhm 21 (DAP-21) Sistema de imágenes (OYO), y el Sting/Swift (Advanced Geosciences Inc.), Campus Tigre, el sistema IRIS (Syscal) y el sistema Full Channel desarrollado por ZZ Geophysics, entre otros (Reynolds, 2011).

El método de TRE mide el potencial eléctrico entre un par de electrodos causado por la inyección de corriente directa a través de un segundo par de electrodos, los cuales son controlados

por un módulo maestro que realiza la medición cambiando el espaciamiento entre los electrodos que son usados, como se muestra en la figura 12. Con los datos adquiridos se construye un modelo en dos dimensiones (2D) de resistividad eléctrica que se asocia a una primera aproximación de lo encontrado en el subsuelo. Posteriormente, se aplica un algoritmo de inversión para obtener la distribución real de resistividades. Esto genera una imagen interpretable desde un punto de vista físico-geológico y que proporciona información sobre las características físicas del subsuelo (Yamakawa et al., 2012).

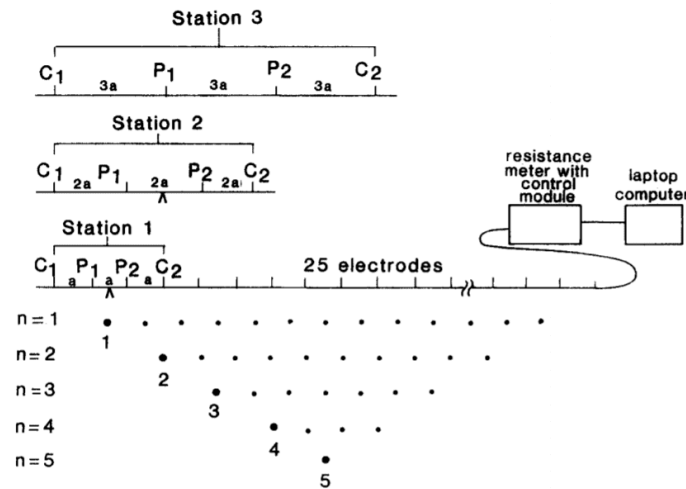


Figura 12. Secuencia de medición para la adquisición de los datos de resistividad eléctrica. C1 y C2 corresponde con los electrodos de inyección de corriente, P1 y P2 corresponden con los electrodos de medición de potencial y n corresponde con las capas o niveles a medir.

Fuente:(Griffiths and Barker, 1993)

La obtención de imágenes TRE (ver figura 13) se realiza haciendo coincidir la pseudosección de resistividad aparente medida con una pseudosección calculada que se obtiene resolviendo, para una resistividad terrestre dada $\rho(r)$, la ecuación de Laplace. La distribución del potencial eléctrico ϕ_r se evalúa en las ubicaciones de los electrodos de potencial y luego se transforma en

una resistividad aparente calculada. Finalmente, se ajusta el modelo $\rho(r)$ y la resistividad aparente es recalculada idealmente hasta que coincida con la resistividad aparente medida dentro de una tolerancia aceptable predefinida (Everett, 2013).

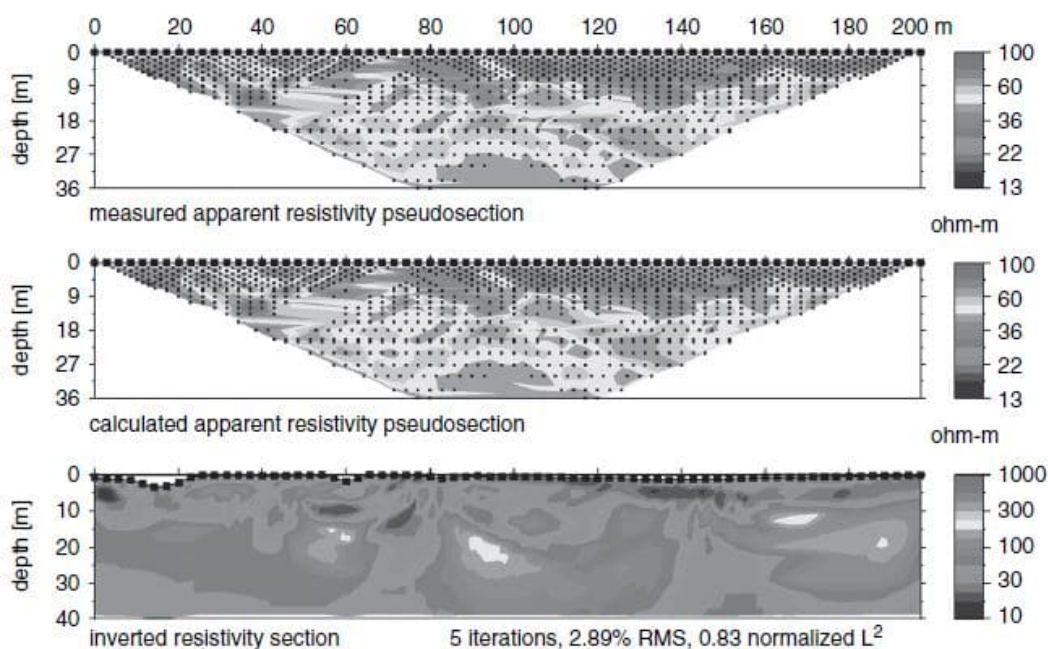


Figura 13. Pseudosección de resistividad aparente medida para una configuración Schlumberger-DD (arriba), con su imagen de resistividad invertida (abajo). Fuente:(Everett, 2013)

3.2.2.3. Arreglos de adquisición. De acuerdo con Loke (2002) y Geotomo (2010), para la adquisición de datos geoelectricos es posible disponer los electrodos principalmente en dos tipos de arreglos, como se puede ver en la figura 14. En ellos, el valor de la resistividad depende de cuatro distancias variables: C1P1, C1P2, C2P1 y C2P2.

Los arreglos convencionales:

- Schlumberger: Los electrodos son puestos a lo largo de una línea recta sobre la superficie de la tierra, en el orden C1P1P2C2, igual que como en el arreglo Wenner pero con la distancia

$$C1C2 \geq 5P1P2.$$

- Wenner: Los cuatro electrodos C1, P1, P2, y C2 son puestos en una superficie del suelo a lo largo de una línea recta de manera que el espaciamiento entre ellos es constante.
- Dipolo-dipolo: la distancia entre los electrodos de corriente C1 y C2 y la distancia medida entre los de potencial P1 y P2 es más pequeña que la distancia entre el centro de los dos dipolos.
- Polo-dipolo: Es un arreglo asimétrico y consta de un electrodo de corriente y dos de potencial. La distancia entre los electrodos P1 y P2 es menor que la de C2 a los dos últimos.

Los arreglos no convencionales:

- ZZ: Se considera de tipo mixto, pues es una combinación entre los arreglos Wenner-Schlumberger y dipolo-dipolo y es capaz de tomar datos utilizando todos los electrodos simultáneamente. Puede tomar 256 pares C1-C2 para 61 canales y adquirir 15616 datos en poco tiempo.

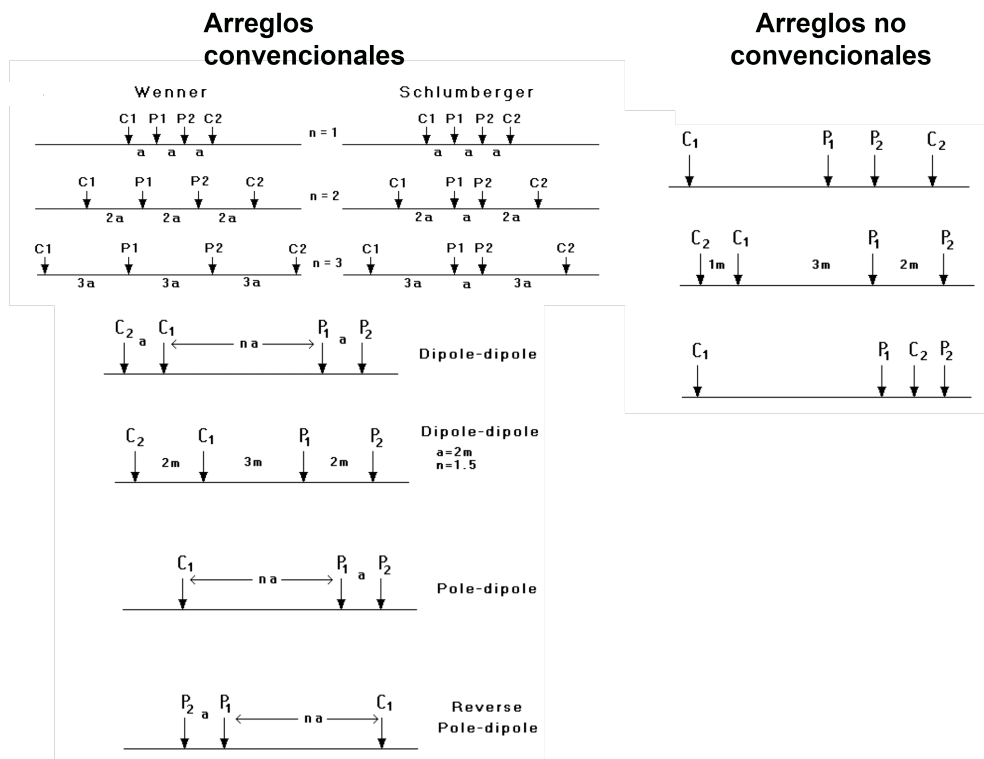


Figura 14. Tipos de arreglos para la adquisición de datos geoelectricos

3.3. Marco Geotécnico

La caracterización geotécnica es de muy importante en los estudios realizados para determinar la estabilidad de laderas. Normalmente se lleva a cabo a través de la exploración directa del subsuelo por medio de apiques, perforaciones, pruebas de campo, ensayos de laboratorio, etc. Adicionalmente, los métodos de sísmica de refracción, análisis de onda superficial y tomografía de resistividad eléctrica permiten la caracterización geotécnica indirecta del subsuelo a través del cálculo de parámetros geotécnicos con base en las relaciones con los parámetros geofísicos medidos (Velocidad de onda P, Velocidad de onda S) y propiedades físicas de los materiales (Khalil and Hanafy, 2008).

3.3.1. Parámetros geotécnicos o geomecánicos. Estos parámetros, que definen el comportamiento del suelo, son conocidos también como constantes elásticas, las cuales tienen concordancia con la densidad de los materiales propios del sitio estudiado y con la velocidad de las ondas sísmicas de cada material. A continuación, se describe cada uno de estos parámetros y sus respectivas ecuaciones de correlación con propiedades geofísicas.

3.3.1.1. Coeficiente de Poisson (η). La relación de Poisson es una constante elástica que relaciona la deformación transversal (E_{yy}) y la deformación longitudinal (E_{xx}) como se muestra en la figura 15. Cuando un cuerpo se somete a compresión, se acorta en una dirección y se alarga en la dirección perpendicular. Por otro lado, cuando un cuerpo se somete a tracción, se alarga en una dirección y se acorta en la dirección perpendicular. En condiciones drenadas, el valor típico de este parámetro en suelos es 0.3, mientras que en condiciones no drenadas toma el valor de

0.5. Según varios autores, como Raper y otros, la relación de Poisson puede variar de cero en suelos blandos hasta alrededor de 0.5 en suelos densos y estructurados (Mullins et al., 1990; Gazetas, 1991; Raper et al., 1994; Nelson et al., 1997; Luna and Jadi, 2000; Briaud, 2001; García, 2014). Esta constante indica la maleabilidad de los materiales geológicos a deformarse y generalmente los materiales más rígidos tendrán una relación de Poisson más alta que los materiales más suaves (Smith, 1982).

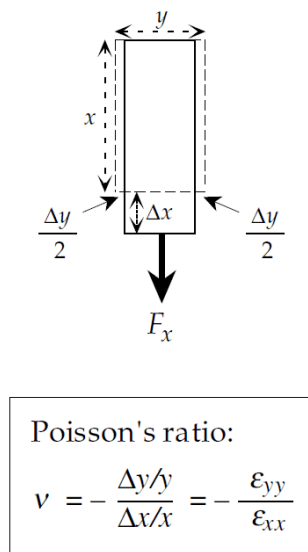


Figura 15. Cambios en la forma de una barra rectangular bajo extensión, cuando el estiramiento es paralelo al eje x , el cuerpo se adelgaza paralelo al eje y y al eje z . Fuente: (Lowrie and Fichtner, 2019)

Esta constante de proporcionalidad varía entre cero (sin contracción lateral) y un máximo valor de 0.5 (sin cambios de volumen) para un fluido incompresible. En rocas muy rígidas como el granito, la constante η es aproximadamente 0.4, mientras que en materiales suaves y sedimentos poco consolidados es 0.1 (Lowrie and Fichtner, 2019).

En función de las velocidades V_p y V_s en (Sheehan et al., 2004) el coeficiente de Poisson

esta descrito por la fórmula (1):

$$\eta = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}. \quad (1)$$

3.3.1.2. Módulo de Young (E). El módulo de Young define la deformación longitudinal generada por una tensión (ver fórmula (2)) (Lowrie and Fichtner, 2019). Este módulo suele usarse para predecir el estiramiento o la compresión de un objeto, siempre que la fuerza no sobrepase el límite elástico del material. Puede considerarse la tendencia del suelo a deformarse axialmente bajo cargas. El módulo de Young de un suelo es el parámetro elástico más comúnmente utilizado en estudios geotécnicos para la estimación del asentamiento, estiramiento y deformaciones elásticas por cargas estáticas (García, 2014):

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}. \quad (2)$$

En términos de la velocidad V_p y V_s , el módulo de Young puede escribirse como se muestra en la fórmula (3) ((Naranjo Aguay and Dranichnikov, 2013)):

$$E = \delta V_s^2 \left(\frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right), \quad (3)$$

donde δ es la densidad del material del terreno.

3.3.1.3. Módulo de rigidez o de cizallamiento (μ o G). Este módulo se define como una constante elástica que describe el cambio de forma que experimenta un material elástico

cuando le aplican esfuerzos cortantes o de tensión en dirección paralela al área, dando origen a una deformación por fractura, ver fórmula (4). Se expresa por el ángulo de deformación que se forma entre la superficie original del área y la superficie deformada por la tensión ejercida paralelamente al área (Naranjo Aguay and Dranichnikov, 2013). El cizallamiento se refiere a una tendencia a separarse de repente, como en un deslizamiento de tierra (García, 2014).

$$\sigma_{xy} = 2\mu\epsilon_{xx}\sigma_{yy} = 2\mu\epsilon_{yy}\sigma_{zz} = 2\mu\epsilon_{zz}, \quad (4)$$

donde la constante de proporcionalidad μ es el módulo de rigidez (G) (Lowrie and Fichtner, 2019).

En función de la velocidad V_s , este módulo puede ser escrito como se muestra en (fórmula 5) (Naranjo Aguay and Dranichnikov, 2013).

$$G = \frac{E}{2(1 + \eta)} = \delta V_s, \quad (5)$$

donde δ es la densidad del material del terreno y η el Coeficiente de Poisson.

3.3.1.4. Parámetros relacionados a la resistencia al corte. Los modelamientos necesarios para describir los fenómenos físicos durante un deslizamiento se realizan utilizando las teorías de la resistencia de materiales. Las rocas y suelos durante un deslizamiento fallan siguiendo el comportamiento de las teorías tradicionales de fricción y cohesión, según la ecuación de Coulomb (Suarez, 2009).

$$\tau = c' + (\sigma - \mu)Tan\phi', \quad (6)$$

donde τ es el esfuerzo de resistencia al corte, C' la cohesión o cementación efectiva, σ el esfuerzo normal total y μ la presión del agua intersticial o de poros.

El análisis de la ecuación de Coulomb requiere conocer los parámetros, el ángulo de fricción y cohesión, los cuales se consideran como propiedades intrínsecas del suelo.

3.3.1.4.1. Ángulo de fricción El ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física.

$$F_r = \text{Tan}\phi. \quad (7)$$

Para obtener el ángulo de fricción de suelos granulares según la información de sísmica de refracción se han propuesto algunos métodos. En suelos saprolíticos, el ángulo de fricción interna se puede calcular usando las siguientes formulas.

$$\phi = 46.4 - 9.65 \frac{V_p}{V_s}, \quad (8)$$

$$\phi = \frac{9.17}{\sqrt{\frac{V_p}{V_s} - 1.41}} + 16. \quad (9)$$

3.3.1.4.2. Cohesión La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. En la mecánica de suelos, se utiliza para representar la resistencia al cortante producida por la cementación entre las partículas, mientras que en la física, este término se utiliza

para representar la resistencia a la tensión (Suarez, 2009).

Existe una correlación entre la cohesión y el módulo elástico de corte (G). Con menor exactitud, la cohesión de estos suelos en condiciones de laboratorio se puede determinar directamente a partir de la velocidad de propagación de las ondas longitudinales de ultrasonido (Naranjo Aguay and Dranichnikov, 2013).

$$C = 24 * 10^{-4} V_p - 0.63. \quad (10)$$

4. Metodología

El procedimiento metodológico para la realización de este trabajo se dividió en cuatro fases distintas: pre-campo, exploración de campo y adquisición geofísica, procesamiento e interpretación de los datos.

4.1. Pre-campo

Como etapa preliminar de la presente investigación, se realizó una revisión bibliográfica detallada sobre la geología, geomorfología e información sobre trabajos previos similares a este, realizados en los municipios de Mogotes y San Joaquín, Santander. También se realizó una salida de campo exploratoria corta (14 al 16 de febrero de 2019), en la cual se recorrieron los dos municipios y se identificaron los dos sitios críticos objeto de estudio (figura 16).

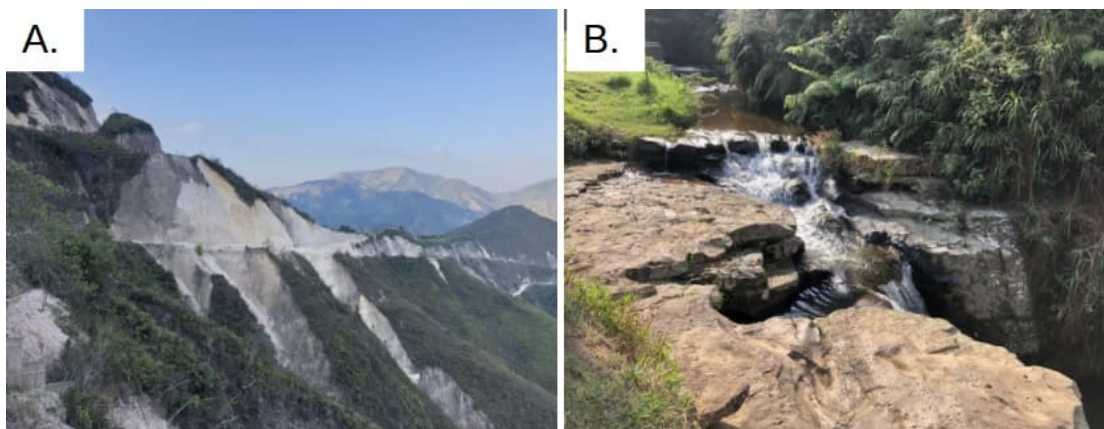


Figura 16. A. Fotografía del sector uno vía a San Joaquín. B. Quebrada Pepe en el sector dos vereda El Hoyo municipio de Mogotes

El diseño de la adquisición de los métodos geofísicos (Tabla 5) tuvo en cuenta la información analizada en la investigación bibliográfica, complementada con la salida de campo explora-

toria. La localización de las líneas geofísicas fue identificada con ayuda de imágenes satelitales obtenidas de Google Earth, observando las limitantes de las zonas priorizadas para el estudio, tales como el espaciamiento y pendiente del terreno, además de la curvatura de las vías paralelas a las líneas geofísicas. En la siguiente figura se muestran los sectores usando Google Earth (figura 17).

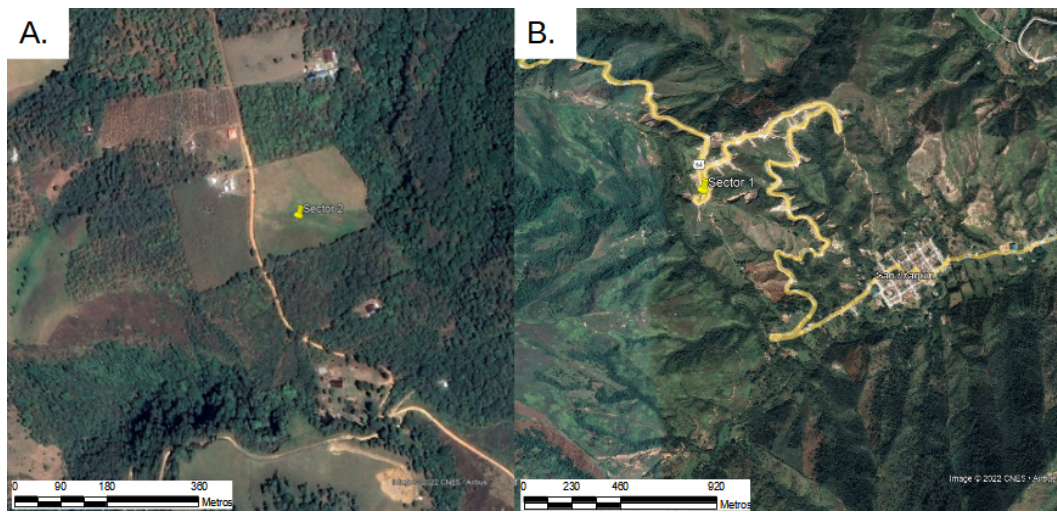


Figura 17. Imagen satelital de google earth de los sectores a estudiar A. Sector dos vía a la Quebrada Pepe en la vereda El Hoyo municipio de Mogotes. B. Sector 1 vía que comunica al municipio de San Joaquín desde Mogotes. Fuente: Google Earth 2022

4.2. Exploración de campo y adquisición geofísica

El trabajo de campo se realizó entre el 19 y 27 de marzo de 2019. En este tiempo se caracterizaron los dos sectores estudiados, con una descripción local de los afloramientos disponibles para construir una base geológica con la cual hacer las posteriores interpretaciones de las líneas geofísicas. En la tabla 5 se describe cada uno de los perfiles geofísicos adquiridos.

Cada una de las líneas fue adquirida en los sectores a estudiar de acuerdo con el diseño establecido y corroborando su calidad. En el sector uno, las líneas geofísicas S6, MW6, T6, S8, M8 y T8 se realizaron paralelas a la vía que conduce al municipio de San Joaquín, sobre las cunetas

SITIO	LINEA	DESCRIPCION DE LA ADQUISICIÓN	ESPACIAMIENTO DE GEOFONOS/ ELECTRODOS
SECTOR 1 (San Joaquín)	S6	Línea de sísmica de refracción con 24 geófonos dirección 200 Azimut	4 m
	S8	Línea de sísmica de refracción con 24 geófonos y dirección 195 Azimut	2 m
	T6	Línea de tomografía eléctrica arreglo dipolo-dipolo con 64 electrodos y dirección 200 Azimut	1.5 m
	T8	Línea de tomografía eléctrica arreglo dipolo-dipolo con 64 electrodos y dirección 195 Azimut	1.1 m
	MW6	Línea de MASW adquirida con 24 geófonos de 4.5 hz y 29 disparos, 23 entre cada geófono y seis fuera de la línea.	4 m
	MW8	Línea de MASW adquirida con 24 geófonos de 4.5 hz y 29 disparos, 23 entre cada geófono y seis fuera de la línea	1.5 m
SECTOR 2 (El Hoyo-Mogotes)	S7	Línea de sísmica de refracción con 24 geófonos dirección 140 Azimut	4 m
	S9	Línea de sísmica de refracción con 24 geófonos dirección 80 Azimut	4 m
	T7	Línea de tomografía eléctrica arreglo dipolo-dipolo con 59 electrodos y dirección 140 Azimut	2 m
	MW7	Línea de MASW adquirida con 24 geófonos de 4.5 hz y 29 disparos, 23 entre cada geófono y seis fuera de la línea	4 m

Tabla 5
Perfiles geofísicos adquiridos en la fase de campo.

internas, próximas a los taludes (ver figura 18A). Para el sector dos, las líneas geofísicas T7, S7, MW7 y S9 se realizaron sobre un potrero, al este de la vía que conduce al Pozo del Ahogado en la vereda El Hoyo del municipio de Mogotes (ver figura 18B).

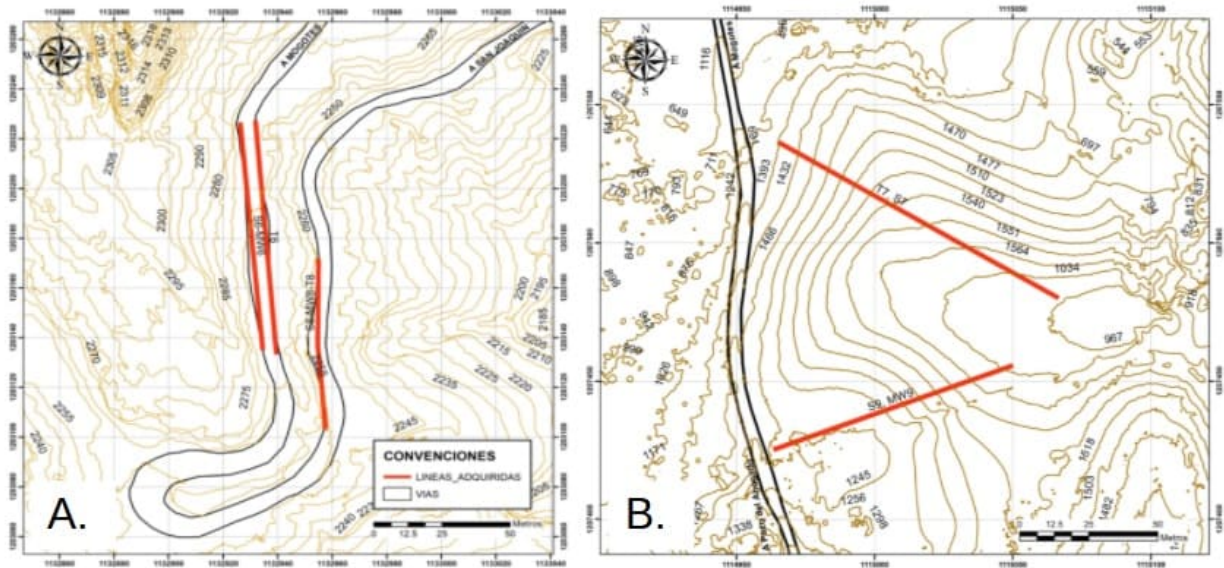


Figura 18. Distribución de las líneas adquiridas en el sector 1 (figura A.) y el sector dos (figura B.)

4.2.1. Instrumentación. Todos los equipos utilizados en este trabajo pertenecen al

Laboratorio de Geofísica de la Escuela de Física de la Universidad Industrial de Santander.

Los datos obtenidos para los métodos sísmicos utilizados (sísmica de refracción y MASW 2D) fueron adquiridos con un sismógrafo ABEM Terraloc Pro 2 de 12, 24 o 48 canales (figura 19), que cuenta con un sampling rate de 100 sps -50 ksp/s (20 ms a 10 ms), y tiempo de grabación de más de 480.000 muestras que equivalen a 5.1 ms a 80 min (Guideline, 2018). En las adquisiciones de este trabajo se utilizaron 24 geófonos de 10 Hz para sísmica de refracción y 24 geófonos de 4.5 Hz para el método MASW 2D. En este trabajo se utilizó como fuente sísmica un martillo de 7 Kg y una placa metálica.



Figura 19. Sismógrafo ABEM Terraloc Pro 2 y sus accesorios. Fuente: (Guideline, 2018)

Para la adquisición de datos para las Tomografías de resistividad eléctrica (TRE) se utilizó el equipo FlashRES-UNIVERSAL96 de ZZ Resistivity Imaging Pty Ltd (figura 20), el cual es un sistema de inversión y recopilación de datos eléctricos de forma de onda completa con 32, 64 o 96 electrodos. El equipo de adquisición es de tipo full channel, lo cual permite el uso de todos los canales de electrodos al mismo tiempo con una eficiencia de hasta 80,000 datos por hora en la configuración de 96 electrodos. El equipo cuenta con una salida de voltaje y corriente máximo de 350 V y 3.5 A. El equipo incluye tres carretes de cable con 150 m de longitud y 96 electrodos de acero inoxidable (ZZgeo, 2020).



Figura 20. Equipo de tomografía eléctrica FlashRES-UNIVERSAL96 de ZZgeo.

4.3. Procesamiento e interpretación de los datos

4.3.1. Sísmica de refracción. El procesamiento e interpretación de la sísmica de refracción fue realizado con el software SeisImager 2D, el cual contiene cuatro módulos para el análisis de datos de refracción y ondas superficiales. Los módulos son Pickwin, Plotrefa, WaveEq y GeoPlot. Pickwin y Plotrefa son los módulos usados para el análisis de refracción. El primero corresponde con el módulo de picado de primeros arribos, el cual permite realizar un procesamiento inicial a los datos crudos, aplicar filtros, recortar trazas, etc. En la figura 21 se presenta el flujo de trabajo en la herramienta (Geometrics, 2009).

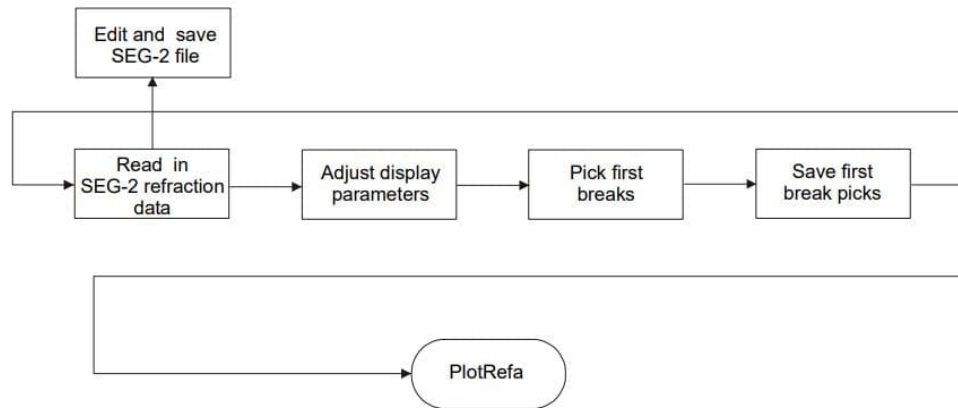


Figura 21. Flujo de procesamiento en el Módulo Pickwin para sismica de refracción. Fuente: (Geometrics, 2009).

El módulo Plotrefa permite utilizar tres técnicas de inversión distintas: el método de tiempo intercepto, el método recíproco y la tomografía. En este proyecto de investigación se utilizó el método de tiempo intercepto y posteriormente la tomografía. El procedimiento puede incluir la topografía del terreno al perfil, para obtener un mejor resultado (Geometrics, 2009).

El método de tomografía utilizado en el Módulo Plotrefa (figura 22) implica la creación de un modelo de velocidad inicial, que corresponde al modelo de capas resultante del método de tiempo intercepto previamente realizado. Este modelo se introduce posteriormente en un bucle de iteraciones en el que se simula el trazado de los rayos y se comparan en cada iteración los tiempos de arribo medidos con los calculados, modificando el modelo para minimizar las diferencias entre ellos y obtener un modelo de velocidades con el menor error posible.

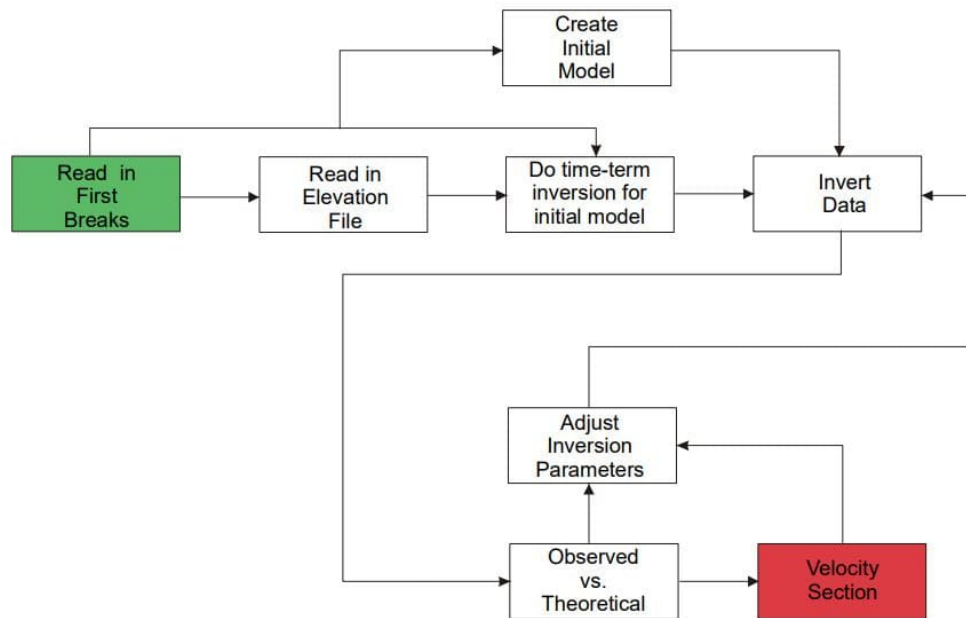


Figura 22. Flujo de trabajo en el Módulo Plotrefa para inversión por tomografía. Fuente: (Geometrics, 2009).

Finalmente, se obtiene un perfil de velocidades de onda P que se ajusta a la información medida por los geófonos y que muestra un modelo del comportamiento de los materiales geológicos en el subsuelo. Con base en la información geológica observada en el campo y los resultados obtenidos en el software de procesamiento, se realizó la interpretación de cada uno de los perfiles de sísmica de refracción.

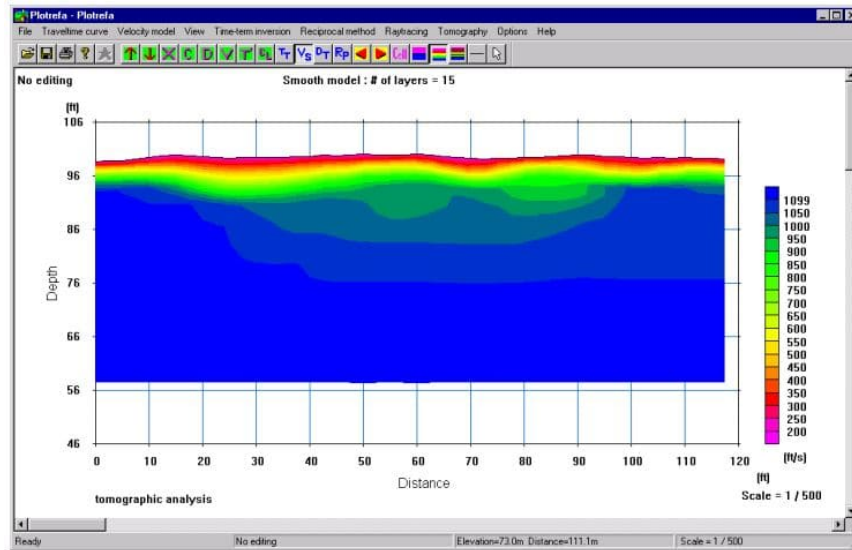


Figura 23. Fundamento del método de tomografía sísmica. Fuente: (Geometrics, 2009).

4.3.2. Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW). El procesamiento de datos de MASW fue realizado con el software Seisimager/SW, el cual contiene módulos para el análisis de datos de ondas superficiales multicanal con fuente pasiva o activa. El software contiene, además de los módulos ya descritos para sísmica de refracción, una rutina de trabajo denominada The Surfer Wave Analysis Wizard, que permite automatizar el flujo de trabajo para el análisis de ondas superficiales (Geometrics, 2009).

En forma general, el proceso realizado por la herramienta The Surfer Wave Analysis Wizard para diversos análisis de ondas superficiales (1D MASW, MAM y 2D MASW) se puede resumir en la figura 24, la cual contiene cuatro pasos principales: la lectura de la información, el cálculo de la curva de dispersión, la creación del modelo inicial de V_s basado en los datos observados y, finalmente, la inversión para crear un modelo de velocidad que se ajuste a la curva de dispersión de los datos observados.

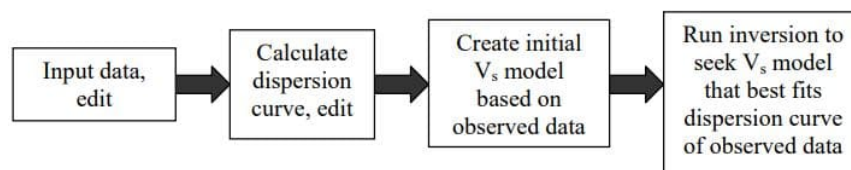


Figura 24. Metodología para el calculo de modelos de V_s en Seisimager/sw. Fuente: (Geometrics, 2009).

El resultado final de la inversión de estos datos de onda superficial corresponde a perfiles de velocidad de onda S (V_s) para cada una de las líneas adquiridas en la fase de campo. Los resultados pueden verse como se muestran en la figura 25. Estos perfiles, junto con la información geológica de cada uno de los sitios, sirvieron para realizar la interpretación de estos resultados.

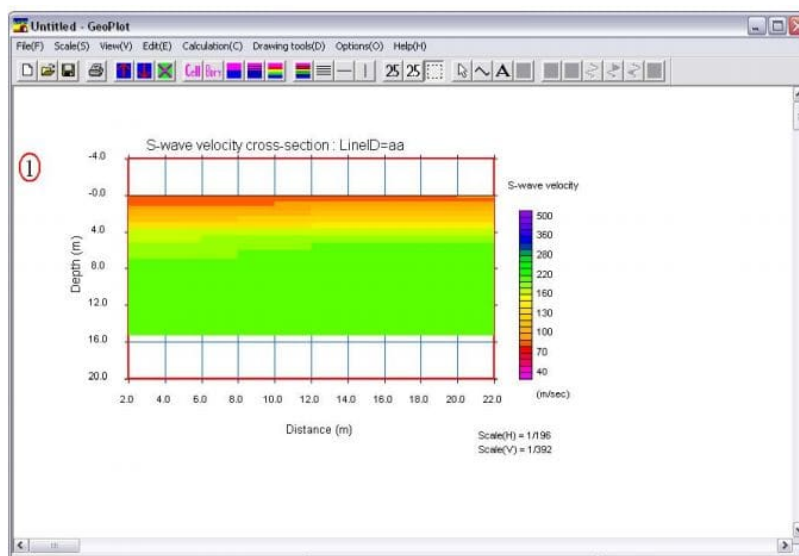


Figura 25. Modelo de velocidad de onda S invertido, visualizado con GeoPlot. Fuente: (Geometrics, 2009).

4.3.3. Tomografía de Resistividad Eléctrica. Para procesar e interpretar los datos de tomografía de resistividad eléctrica adquiridos en campo se usó la versión libre del software Res2dInv de Geosoftware. Este utiliza el método de inversión Gauss-Newton para producir un

modelo en dos dimensiones del subsuelo a partir de los datos de resistividad aparente medidos en campo (Geotomo, 2010). En forma general, el proceso de inversión de este software se resume en la preparación de los datos adquiridos, haciendo un filtro para eliminar datos anómalos, la configuración de los parámetros de inversión, teniendo en cuenta el contexto geológico y la forma de adquisición de los datos, y finalmente la ejecución de la inversión y posterior análisis de resultados y error para decidir si es necesario repetir el proceso con parámetros o filtrado de datos distintos.

En la figura 26, se observa la pseudosección de resistividad aparente medida en la parte superior, seguida de la pseudosección de resistividad aparente calculada en el proceso de inversión en la parte media de la figura, y finalmente la imagen inferior muestra el modelo de resistividad resultado de la iteración del proceso de inversión.

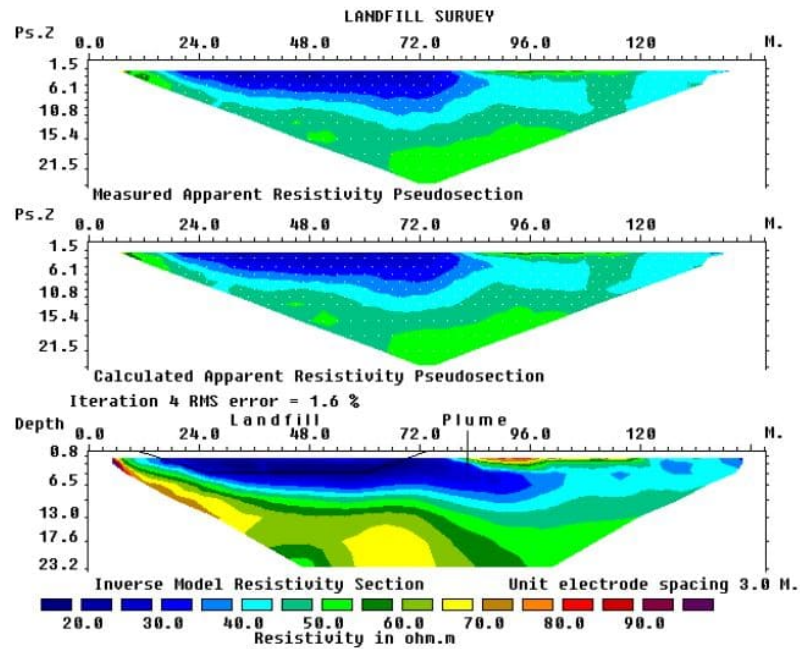


Figura 26. Resultado del proceso de inversión de un dato de tomografía de resistividad eléctrica. (superior) Pseudosección de resistividad aparente medida. (Medio) Pseudosección de resistividad aparente calculada. (Inferior) Modelo de resistividades resultante. Fuente: Modificado de (Geotomo, 2010).

4.4. Calculo de parámetros geotécnicos

Una vez obtenido el perfil de velocidades de las ondas compresionales y de las transversales se estimaron los parámetros geotécnicos expuestos en la sección 3.3.1 a partir de las expresiones matemáticas que allí se exponen.

5. Resultados, análisis y discusión

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los sectores estudiados. Se describe la geología local identificada en los alrededores del área de toma de datos, los perfiles geofísicos obtenidos durante la campaña de adquisición y los valores de parámetros geotécnicos calculados. Junto a cada uno de los resultados se realiza un análisis de la información y una discusión enfocada en el uso de estos resultados como insumo para la evaluación de la estabilidad de las laderas.

5.1. Geología local

En el sector uno afloran riolitas y traquitas finogranulares porfiríticas de tonalidad rosa y naranja. Se desarrolla saprolito con textura arcillosa de color rosa muy claro a naranja. Estas rocas se encuentran aflorando en un costado de la vía hacia el casco urbano del municipio de San Joaquín. El Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia (Rodríguez, G and Arango, MI and Correa, AM and Zapata, G, 2018) describe esta unidad como una roca masiva de color rosado moteada de blanco y negro, porfirítica, constituida por fenocristales de plagioclasa de hasta 5 mm, feldespatos alcalinos en cristales euhedrales rosados, cuarzo bipiramidal y biotita de 1 a 3 mm, flotando en una matriz afanítica de color naranja claro a gris.

A nivel local se observan perfiles de suelo saprolítico de espesor variable (2 m a 3 m) que son propensos a presentar procesos erosivos, los cuales generan surcos y cárcavas (figura 27). Se presentan numerosos movimientos en masa de tipo deslizamiento y flujo de detritos, que afectan parcialmente la vía. El catálogo litoestratigráfico describe estos suelos como saprolito de

color naranjado con parches de tonalidades blancas y verdosas y textura arenosa, con espesores de alteración de hasta 10 m. Localmente desarrolla meteorización esferoidal con bolos métricos sobre la superficie del suelo y está atravesado por diques aplíticos con textura granular fina sacaroidal (Rodríguez, G and Arango, MI and Correa, AM and Zapata, G, 2018).

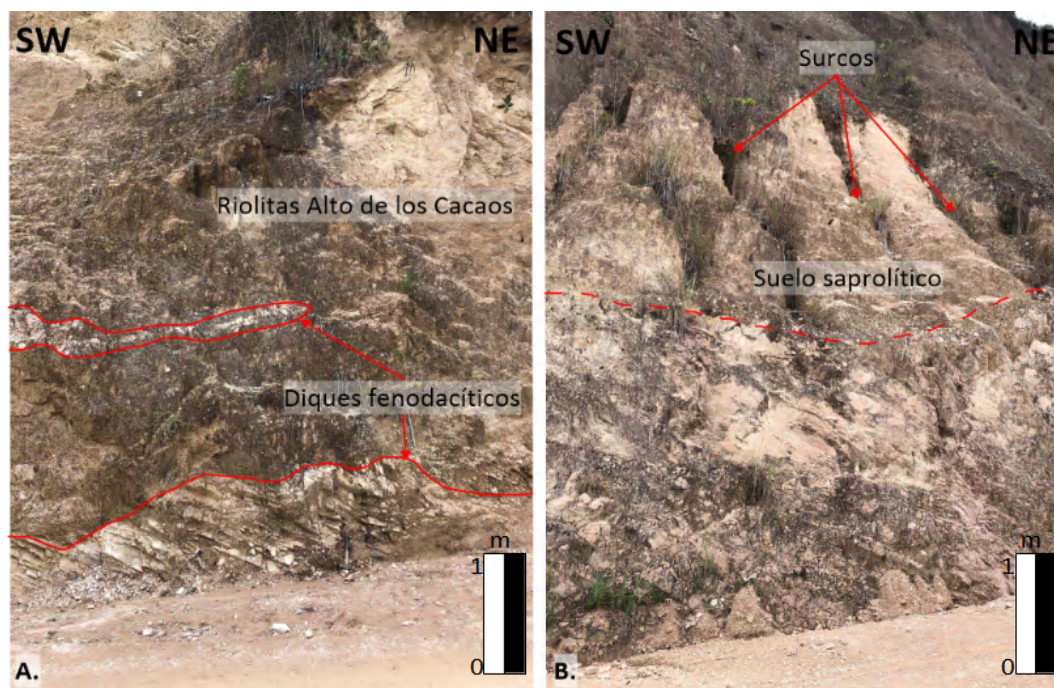


Figura 27. Afloramiento rocoso de riolitas y traquitas en el sector uno sobre la vía a San Joaquín
A. Riolitas del Alto de los Cacaos intruido por diques fenodacíticos. B. Formación de suelo saprolítico y erosión en surcos

Geológicamente, el sector dos está compuesto por calizas masivas de color gris oscuro, fosilíferas, alternadas con capas de arenisca de espesor variable (20 a 60 cm) pertenecientes a la Formación Rosablanca. Esta formación se encuentra al este del área estudiada, sobre el lecho de la Quebrada El Pepe, donde las capas presentan un rumbo de 220/16 (ver figura 28A). En la mayoría del predio se observa suelo saprolítico de textura areno-limosa de color amarillo pardo, con un

espesor que varía de más de 50 cm en la parte alta del predio (medido sobre las áreas afectadas por las terracetas), hasta desaparecer en la zona baja del predio, en el lecho de la quebrada donde aflora la caliza con muy poca meteorización. Además, se observan laderas poco inclinadas con desarrollo de terracetas generadas por el sobrepastoreo.

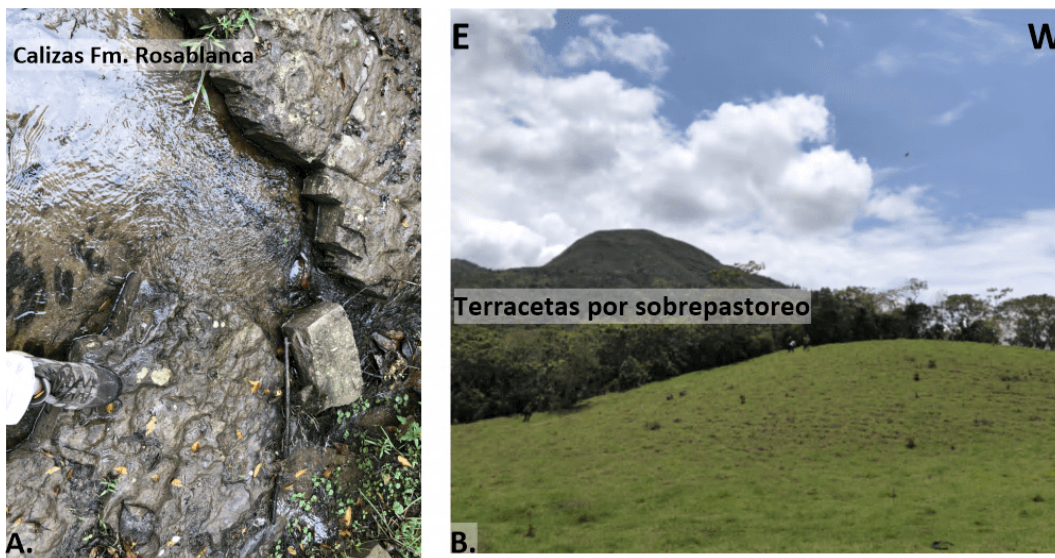


Figura 28. Geología del sector dos, vereda el Hoyo, municipio de Mogotes. A. Afloramiento rocoso de la Formación Rosablanca, sobre el lecho de la Quebrada El Pepe en la parte baja de la ladera estudiada. B. Laderas poco inclinadas con desarrollo de terracetas generadas por el sobrepastoreo.

La presencia de perfiles de suelos residuales y saprolíticos en los dos sectores estudiados muestra una importante predisposición a que estos se comporten de manera inestable en épocas de lluvias, donde por sus propiedades hidrogeológicas, estos materiales pueden retener mayor humedad y generar superficies de falla en los contactos suelo residual-suelo saprolítico. La acumulación de agua en la interfaz suelo residual-saprolito es llamada por algunos autores como "nivel de agua colgado", el cual puede generar un aumento en la presión de poros y desencadenar deslizamientos

(Brand, 1985). Este comportamiento puede evidenciarse en los movimientos en masa identificados en el campo.

5.2. Resultados de la adquisición de datos Geofísicos

En la fase de adquisición de datos geofísicos para los dos sectores estudiados, se levantaron tres líneas de tomografía de resistividad eléctrica (T6, T7 y T8), cuatro líneas de sísmica de refracción (S6, S7, S8 y S9) y tres líneas de MASW 2D (MW6, MW8 y MW9). La ubicación de cada una de las líneas en el área de estudio se puede observar en la figura 18.

5.2.1. Sector uno. En el sector de San Joaquín, la línea de tomografía de resistividad eléctrica T6 se adquirió con un tendido de 96 metros de longitud, 200 de azimut y un espaciamiento entre electrodos de 1.5 m (figura 29). El modelo muestra valores de resistividad desde $70.7 \Omega \times m$ hasta $6772 \Omega \times m$. Describiendo el perfil desde la zona más profunda hasta la superficie, se observa una capa de baja resistividad ($70.7 \Omega \times m$ a $260 \Omega \times m$) con forma regular alargada de aproximadamente 7 metros de espesor. Sobre la zona descrita anteriormente se identifica una capa de aproximadamente 5 metros de espesor, la cual presenta resistividades entre $500 \Omega \times m$ y $1800 \Omega \times m$. En la zona superficial del modelo de resistividad se encuentran áreas de resistividad baja ($260 \Omega \times m$ a $500 \Omega \times m$) las cuales se ubican en los cinco metros más someros del modelo. La línea de tomografía de resistividad eléctrica T8 (195 azimut), se localiza al este del sector uno y se adquirió con un tendido de 70.4 metros de longitud con un espaciamiento entre electrodos de 1.1 m. El modelo invertido de tomografía de resistividad eléctrica muestra resistividades entre $70 \Omega \times m$ y $1800 \Omega \times m$. En este perfil se observa en la zona superficial una capa de poco espesor con resistividad menor a $136 \Omega \times m$. El resto del perfil muestra una resistividad que aumenta de sur a

norte desde $500 \Omega \times m$ hasta $1800 \Omega \times m$. Los gráficos de error relativo, distribución de puntos de resistividad aparente y resultado final se encuentran en el Apéndice C (3).

La línea sísmica S6 (200 azimut) contenida en la línea T6, se levantó con un tendido de 92 metros de longitud (sísmica de refracción y MASW), con un espaciamiento entre geófonos de cuatro metros. El perfil sísmico muestra un rango de velocidades entre 300 m/s y 2800 m/s, donde se observan en forma general tres capas: una somera de menos de 800 m/s que llega a presentar una profundidad que varía de NW a SE de 3 m a 7 m, una capa intermedia que va de 800 m/s hasta 1900 m/s, que se extiende hasta los 15 metros de profundidad y finalmente la capa inferior con velocidad de hasta 3000 m/s. Para la línea de sísmica de refracción S8 (195 azimut), contenida en la línea T8, se levantó un tendido de 69 metros de longitud, con un espaciamiento entre geófonos de 3 metros. El modelo generado muestra un rango de velocidades entre 350 m/s y 1800 m/s, y se pueden diferenciar dos capas: una superior con espesor variable de hasta 9 metros al sur con velocidad menor a 800 m/s y una segunda capa con velocidad entre 800 m/s hasta 1800 m/s. Los datos adquiridos y las imágenes se encuentran en el Apéndice A (1).

El modelo obtenido con el método de ondas superficiales MASW para la línea MW6 (figura 29), cuya longitud es de 88 metros, muestra una distribución de velocidad onda S (V_s) creciente a profundidad, que va de 280 a 600 m/s, en donde se destaca la zona somera del modelo cuya velocidad se encuentra entre 380 m/s y 480 m/s, con un espesor de 8 metros. La línea MW8 (200 azimut) contenida en la línea T6 y S6, tiene una longitud de 58 metros, con velocidad de onda S (V_s) que va de 320 a 740 m/s, se observa un comportamiento similar al registrado en S8, con una zona de baja velocidad al sur del perfil, con una profundidad de hasta 4 metros que se adelgaza

hacia el costado norte del modelo con una velocidad entre 320 m/s y 500 m/s. La capa inferior muestra una velocidad de onda S entre 500 m/s a 740 m/s. Las curvas de dispersión construidas se encuentran en el apéndice B (2).

En general, todos los métodos geofísicos utilizados muestran un perfil de suelo típico, en el que a profundidad se encuentran materiales inalterados. En la parte somera y aflorando se evidencia un suelo residual, definido por bajas velocidades de onda P y onda S, que a profundidad se convierten en materiales competentes como saprolitos y roca meteorizada. Sin embargo, hasta el límite de profundidad de exploración no se evidencian propiedades geofísicas asociadas a roca ígnea, las cuales están por encima de 3600 m/s (Everett, 2013). Esto va en concordancia con lo reportado en (Correa-Martínez et al., 2016), donde se describe para esta formación ígnea espesores de suelo de más de 15 metros. La tomografía de resistividad eléctrica (T6) y la observación del perfil sobre la vía en campo permiten identificar un gran fracturamiento en la roca, lo que se traduce en zonas concéntricas de resistividad, en donde la zona externa, más expuesta a los procesos erosivos provenientes del exterior, es baja y el núcleo de estas anomalías normalmente muestra resistividades más altas. Ninguno de los métodos geofísicos usados muestra indicios de nivel freático.

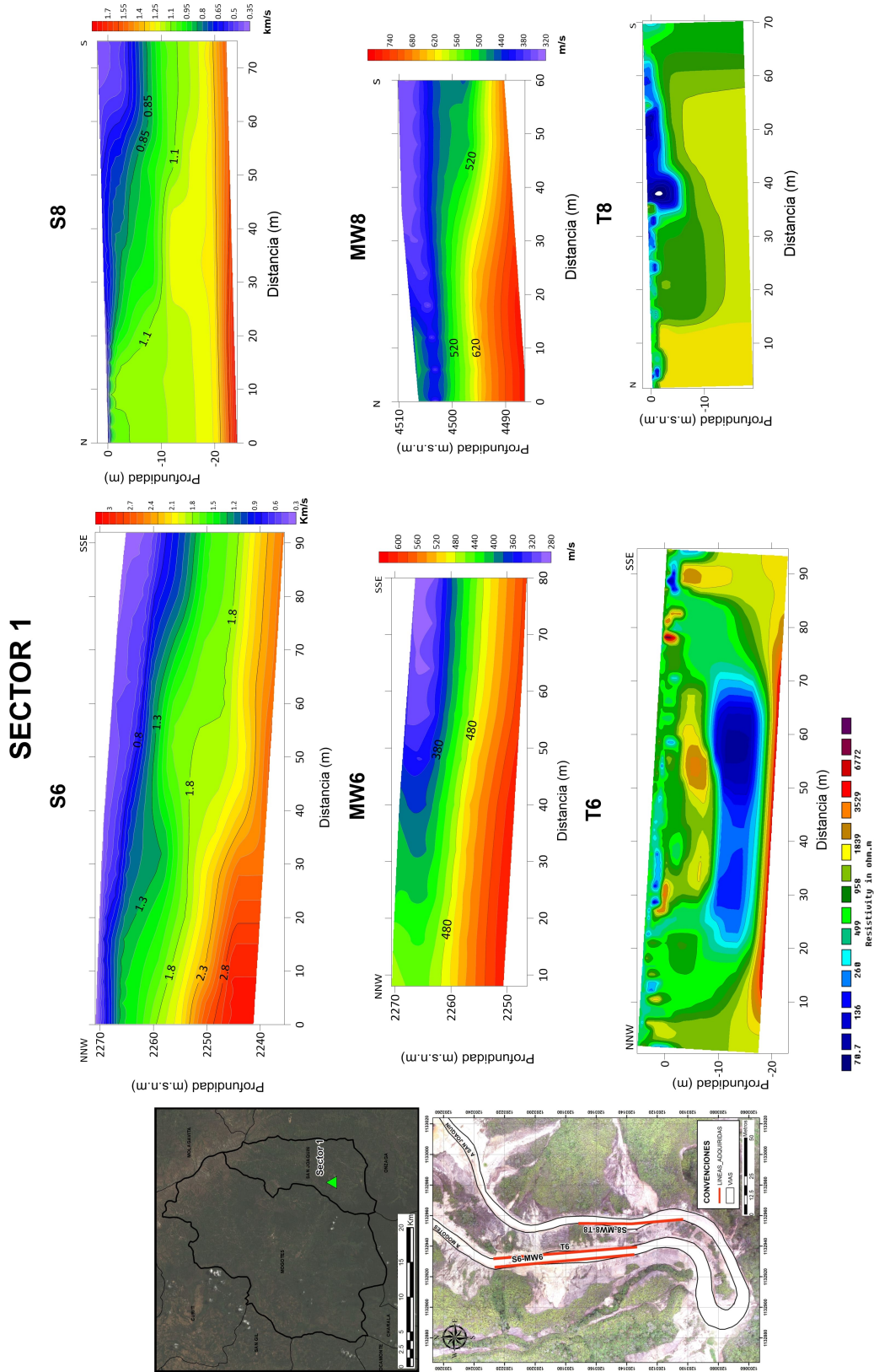


Figura 29. Perfiles de sísmica de refracción, MASW y tomografía eléctrica resultado de la adquisición geofísica realizada en el sector uno vía San Joaquín

5.2.2. Sector dos. La línea de tomografía de resistividad eléctrica T7 (140 azimut) se adquirió con un tendido de 116 metros de longitud y un espaciado entre electrodos de 2 m. El modelo resultante muestra un perfil de resistividad eléctrica con un rango que varía entre $1 \Omega \times m$ y $3200 \Omega \times m$ (ver figura 30). Se observa una zona de gran tamaño de alta resistividad que se extiende casi en la totalidad de la longitud de la línea, con una resistividad de $1800 \Omega \times m$ hasta $3200 \Omega \times m$. Esta zona se localiza a 20 metros de profundidad en el sector norte y se vuelve más somera en el costado sur, llegando a encontrarse hasta a 4 metros de la superficie del terreno. Al costado norte del modelo se encuentra una zona somera de alta resistividad similar a la reportada anteriormente, la cual está entre 2 y 5 metros de profundidad. Los gráficos de error relativo, distribución de puntos de resistividad aparente y resultado final se encuentran en el Apéndice C (3).

El modelo de velocidad de onda P (V_p) resultante de la inversión de la tomografía sísmica se expone en la figura 30 y presenta un rango de velocidades para S7 entre 300 y 3100 m/s. Se observa una distribución ascendente de la velocidad a profundidad con velocidad de onda P por debajo de 800 m/s en la parte somera, con una profundidad que es mayor en el norte y centro del modelo, la cual tiene entre 4 m a casi 10 m, adelgazando hasta desaparecer en la parte sur del perfil. El modelo de velocidades de la sísmica de refracción de la línea S9 (figura 3) tiene velocidades de onda P entre 300 m/s y 3100 m/s, donde se observan capas de mayor espesor al SW del modelo y se adelgaza al NE. Las zonas más someras del modelo presentan velocidades de aproximadamente 500 m/s. Los datos adquiridos y las domocromas se encuentran en el apéndice A (1).

El modelo obtenido para el método de ondas superficiales MASW en la línea MW7 (140 azimut) contenida en la línea T7 (figura 30) muestra un modelo de velocidad de onda S (V_s) que va de 150 m/s a 1300 m/s. Se observa una distribución ascendente de la velocidad de onda S en profundidad, con zonas de baja velocidad más gruesas al SW del perfil, que se van adelgazando hacia el NE. Las curvas de dispersión construidas se encuentran en el apéndice B (2).

Para este sector, al igual que en el sector uno, se observa en los perfiles geofísicos un comportamiento de perfil de suelo normal, en el que las propiedades físicas aumentan en magnitud a medida que se profundiza. Al analizar las velocidades encontradas en los perfiles medidos, se observa que para la zona más profunda de la adquisición se reportan velocidades de onda P de hasta 3100 m/s, lo que puede estar asociado a calizas, las cuales en la literatura se reportan entre 2500 m/s y 6500 m/s (Everett, 2013). Estos resultados se corroboran con lo observado en campo, donde en el lecho de la Quebrada El Pepe afloran calizas de la formación Rosablanca. El espesor de suelo encontrado en los resultados de las líneas sísmicas permite concluir que la topografía acompaña el espesor de suelo. Sobre las áreas bajas, el espesor de suelo es menor en relación a las partes altas de las laderas, como puede verse en la figura 30. En este sector, ninguno de los métodos geofísicos muestra el nivel freático.

SECTOR 2

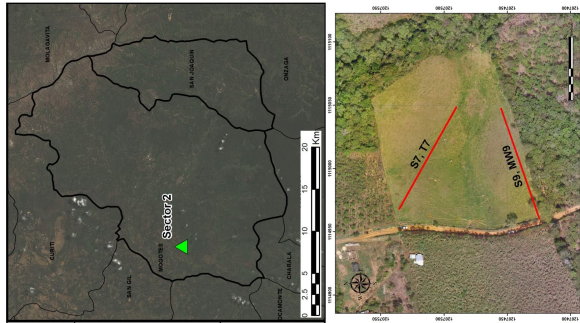
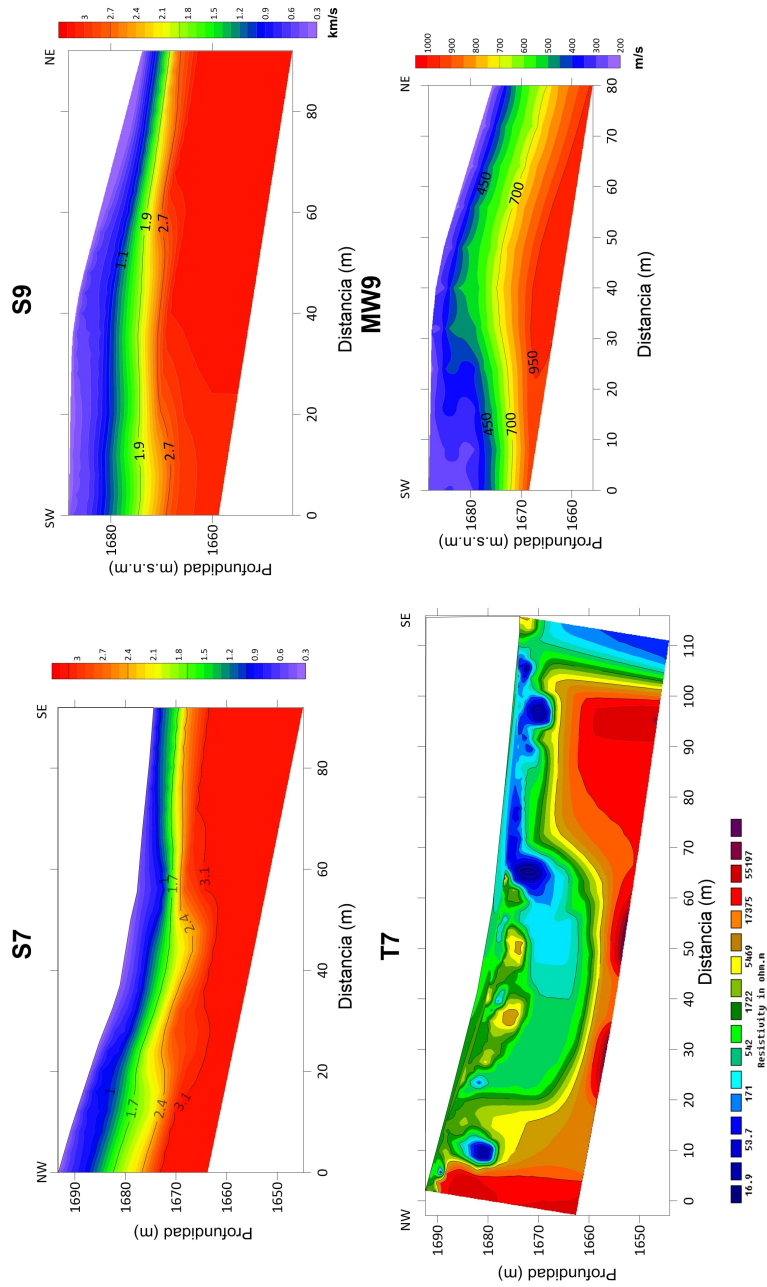


Figura 30. Perfiles de sísmica de refracción, MASW y tomografía eléctrica resultado de la adquisición geofísica realizada en el sector dos, vereda El Hoyo

5.3. Cálculo de parámetros geotécnicos

El cálculo de los parámetros geotécnicos para los sectores estudiados se realizó para la línea S6 del Sector 1 y la línea S7 del Sector dos. Estos se calcularon usando las relaciones expuestas en la sección (3.3) para el cálculo de Coeficiente de Poisson (η), Módulo de Young (E) y Módulo de Cizalla (G). Las velocidades de onda P y S presentan unidades de m/s y el resultado para el caso de Módulo de Young y Módulo de Cizalla se encuentran en kPa. También se calcularon los parámetros de cohesión y ángulo de fricción, como un único valor usando los valores promedio de velocidad de onda P y onda S. En la siguiente tabla se identifican los valores obtenidos.

	VP (m/s)	VS (m/s)	COHESION (kgf/cm2)	FRICCION (°)
SECTOR 1	1646.18	468.56	0.318	12.50
SECTOR2	2284	629.37	0.298	11.38

Tabla 6

Cálculo de cohesión y fricción para los sectores de estudio.

Los cálculos de los parámetros geotécnicos de Coeficiente de Poisson (η), Módulo de Young (E) y Módulo de Cizalla (G) se realizaron usando los perfiles de velocidades obtenidos en la fase de procesamiento de datos geofísicos, dando como resultado los perfiles que se muestran en la figura 31 y la figura 32. Los rangos de colores para cada parámetro geotécnico son iguales para los dos sectores, con el propósito de compararlos. Los valores en blanco de estos perfiles corresponden a datos anómalos que no se tuvieron en cuenta para la visualización y posterior análisis de los resultados. El valor de la densidad de cada material fue estimado a partir de información secundaria.

5.3.1. Sector 1. Como se pudo observar en el Sector 1, el Coeficiente de Poisson aumenta su valor a medida que se profundiza, mostrando un comportamiento de dos capas. La capa superior de aproximadamente 2 metros presenta valores inferiores a 0.25, lo cual corresponde con suelos inestables que presentan poca resistencia a la deformación, correspondiendo a suelos duros arcilloso-limosos (García, 2014). La capa inferior presenta valores de 0.4 a 0.45, lo cual la identifica como un material muy resistente a la tensión, asociado a suelos muy poco meteorizados y roca con poca o nula compresibilidad.

El Módulo de rigidez o cizalla (G) muestra valores entre 50 kPa y 1000 kPa, aumentando

con la profundidad. Este perfil no muestra un comportamiento en capas, posiblemente debido al poco espesor de la primera capa en los perfiles de velocidad de onda P. En la parte superficial del perfil se presentan valores de 100 kPa, lo cual puede estar asociado a suelos muy sueltos. En este tipo de suelos, donde las tensiones cortantes o de cizallamiento son pequeñas (tensiones <100 kPa), la presencia de la tensión de cizallamiento tiende a disminuir la relación de Poisson (García, 2014). Esto se puede evidenciar en los resultados de Coeficiente de Poisson asociados a la parte superficial del perfil en el área de estudio. Los valores bajos de resistencia al corte implican una alta susceptibilidad a presentar deslizamientos, ya que el comportamiento del material a fuerzas de cizalla se asocia comúnmente con las fuerzas que generan los deslizamientos (García, 2014).

El Módulo de Young (E) para este sector está entre 100 kPa y 2200 kPa. Al igual que el Módulo de cizalla, no muestra un comportamiento de dos capas, pero aumenta a medida que se profundiza en el suelo. Los suelos más sueltos, como los identificados en los primeros dos metros del área de estudio, presentan poca capacidad de recuperación, pero esta aumenta para los suelos más compactos debido a que estos soportan mayores cargas en el tramo elástico de deformación por tener un mayor Módulo de Young (González-Cueto et al., 2009). Por lo tanto, al igual que con el Módulo de cizalla, las zonas con bajo Módulo de Young se consideran suelo suelto y, por consiguiente, se asocian a una alta susceptibilidad a la erosión y a deslizamientos.

5.3.2. Sector 2. En el Sector 2 la capa superior presenta un espesor variable, en la cual se calcularon valores de Coeficiente de Poisson entre 0.2 y 0.35. Estos según García (García, 2014) corresponden normalmente a suelos drenados de textura limo-arenosa muy blandos. La capa inferior muestra valores entre 0.4 y 0.5 correspondiente a material rocoso con poca o nula compresibilidad.

Para este sector, los valores de Módulo de Cizalla (G) están en un rango de 150 kPa a 3000 kPa, lo cual los pone en un nivel intermedio en el que los suelos son duros y presentan resistencia a las tensiones de cizalla. La capa superior es de espesor variable y se encuentra entre 150 kPa y 500 kPa. Esta capa en el campo presenta movimientos en masa de tipo reptación, lo cual puede estar asociado a los valores relativamente altos de Módulo de cizallamiento y a la pendiente moderada del terreno, lo que imposibilita la generación de deslizamientos de mayor tamaño. La capa inferior muestra valores de 500 kPa a 3000 kPa, los cuales corresponden a materiales con alta resistencia al cizallamiento, asociándolo a calizas de la Formación Rosablanca, la cual aflora en el área del Sector 2. Estos suelos soportan mayores cargas en el tramo elástico de deformación por tener mayor módulo de Young (García, 2014) en comparación con los materiales encontrados en el Sector 1.

El Módulo de Young (E) para este sector se encuentra entre 150 kPa y 4000 kPa. El perfil muestra dos capas definidas, la capa superficial presenta un rango entre 150 kPa y 700 kPa con un espesor variable que se adelgaza hacia el este del área de estudio. En la capa inferior, los valores de Módulo de Young están entre 700 kPa y 4000 kPa, lo que indica que se trata de suelos muy rígidos o rocas. Como resultado, estos suelos pueden soportar cargas mayores en el tramo elástico

de deformación, lo que se refleja en la falta de procesos morfodinámicos significativos en el área de estudio, limitándose a repletaciones (García, 2014).

5.4. Modelo geológico-geotécnico preliminar

Integrando toda la información adquirida en campo (geología, geofísica) y los parámetros geotécnicos calculados, se construyeron los modelos geológico-geotécnicos preliminares de cada uno de los sectores estudiados. El Sector 1 (figura 33) presenta dos materiales geológicos, el más somero corresponde con suelo residual de origen ígneo asociado a la meteorización de la Riolita de San Joaquín. Este material presenta un espesor variable de 2 m a 5 m. La velocidad de onda P se encuentra entre 380 m/s a 800 m/s y onda S entre 290 m/s a 450 m/s. De acuerdo a estas velocidades, el material puede clasificarse como perfil de suelo tipo D, el cual corresponde con suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de corte. En la figura 33, se observa este material sobre la vía que comunica con el municipio de San Joaquín, además de importantes procesos erosivos que generan surcos y depósito de material sobre la vía. Esta capa muestra valores de Coeficiente de Poisson entre 0.1 a 0.25, Módulo de rigidez entre 50 kPa y 100 kPa y Módulo de Young menor a 100 kPa.

La capa inferior corresponde a roca ígnea asociada a Riolitas e intrusivos, los cuales presentan velocidad de onda P de 800 m/s a 3000 m/s y velocidad de onda S de 450 m/s a 600 m/s. De acuerdo a esta información, el material corresponde con suelo tipo C, el cual se caracteriza por un perfil de suelo muy denso o roca blanda, que cumple con el criterio de onda de corte. El material muestra resistividad variable, entre $70.7 \Omega \times m$ a $3500 \Omega \times m$, debido a que el material se encuentra altamente fracturado y muestra una meteorización asociada a la distribución de familias de diaclasas, las cuales facilitan la infiltración del agua al subsuelo. Esta capa muestra valores de

coeficiente de Poisson entre 0.4 a 0.5, módulo de rigidez entre 100 kPa y 1000 kPa y módulo de Young entre 100 kPa y 2200 kPa.

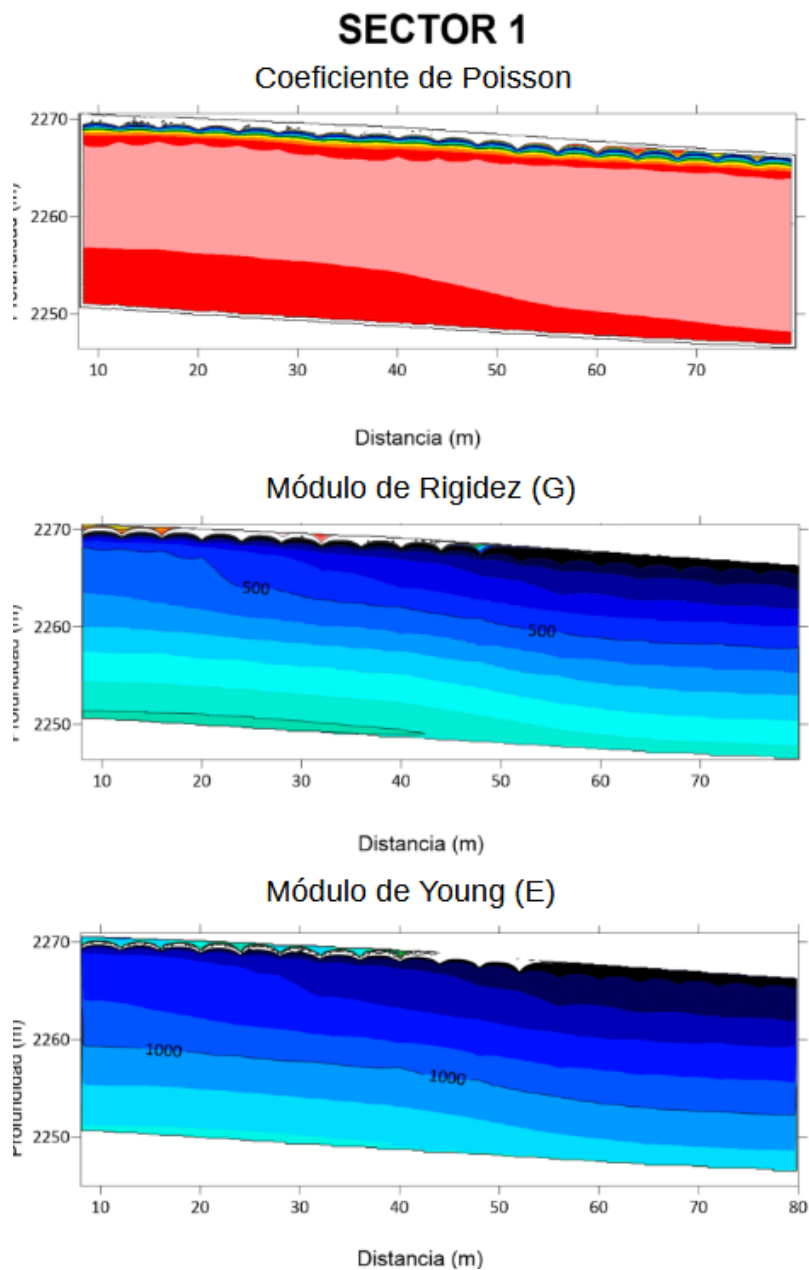


Figura 31. Parámetros geotécnicos calculados a partir de los resultados de velocidad de onda P y onda S para el Sector 1

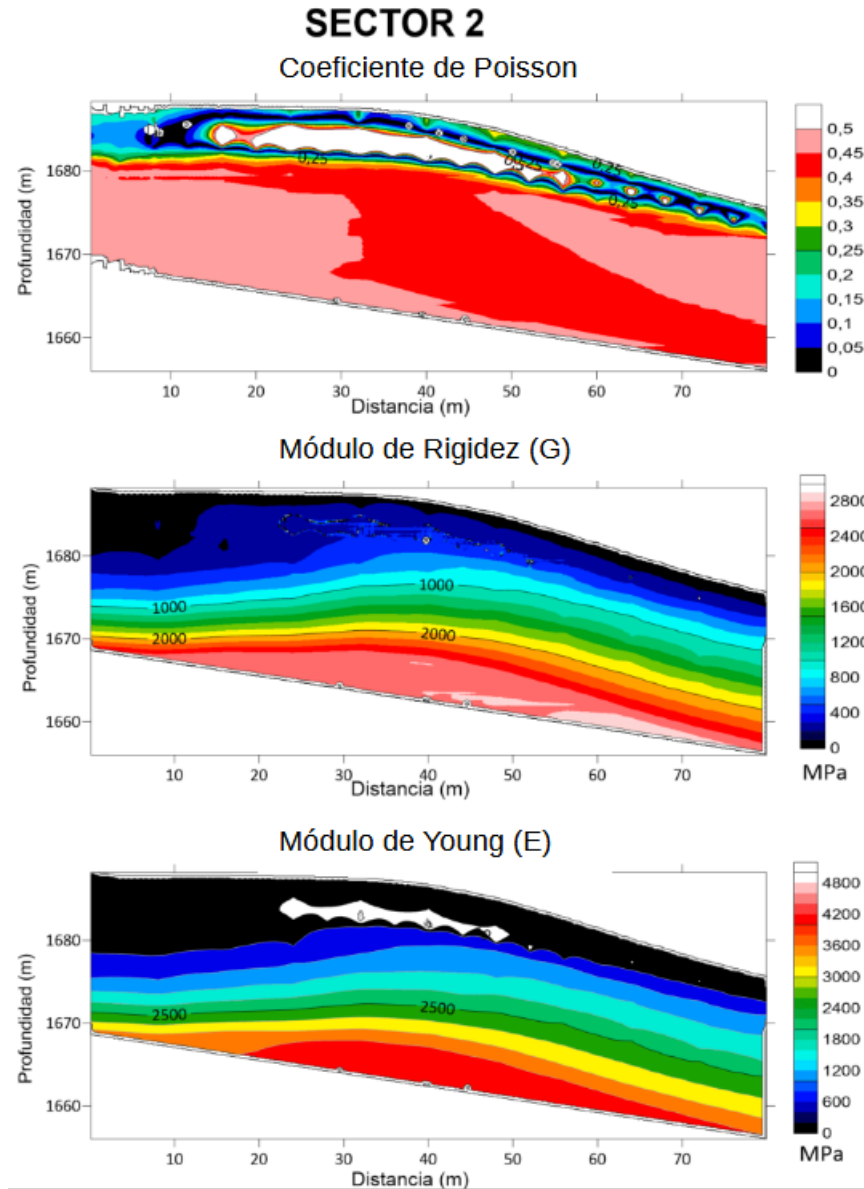


Figura 32. Parámetros geotécnicos calculados a partir de los resultados de velocidad de onda P y onda S para el Sector 2

SECTOR 1

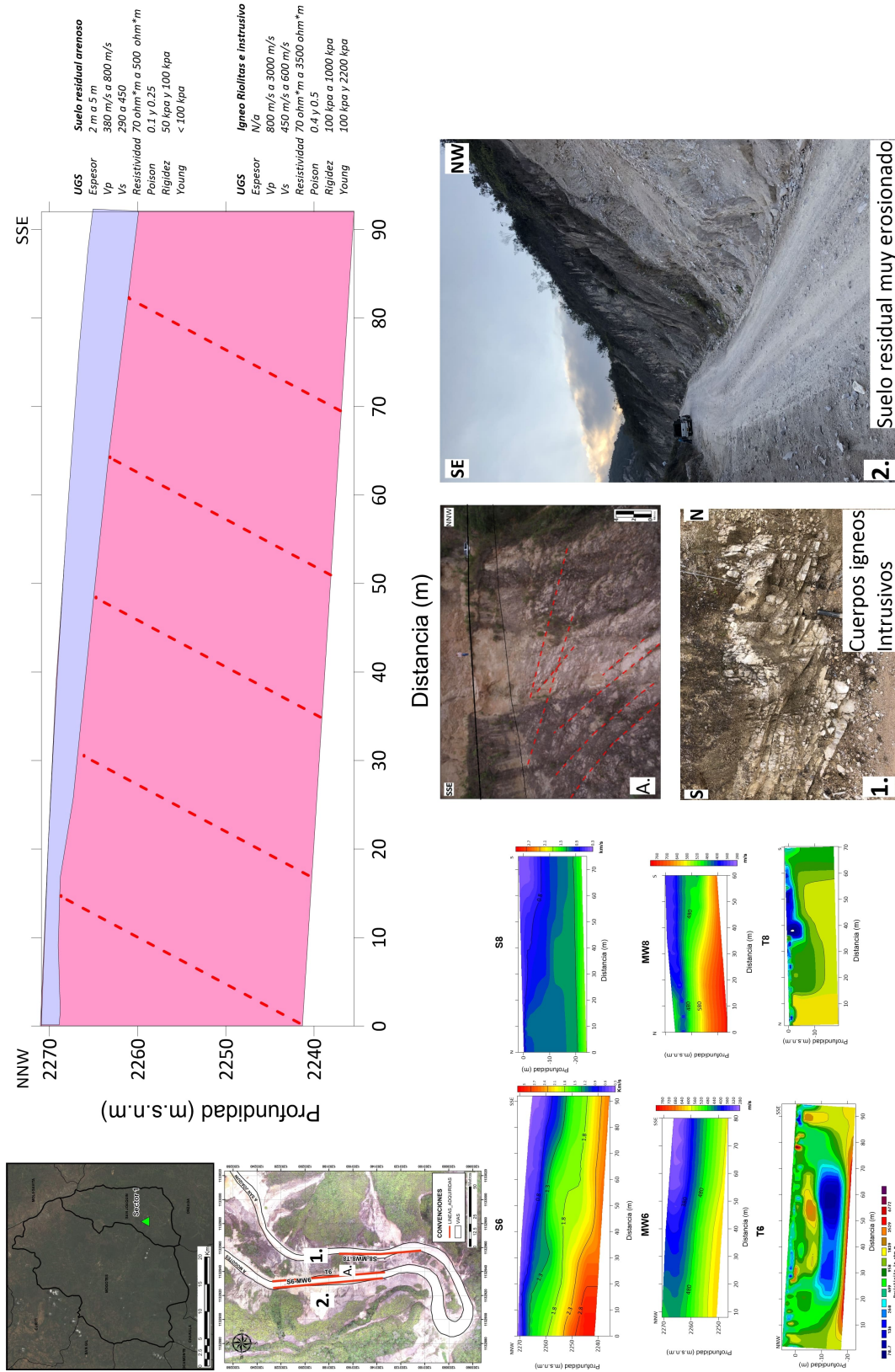


Figura 33. Modelo geológico-geotécnico preliminar del Sector 1 Vía Mogotes San Joaquín Santander

El Sector 2 (figura 34) presenta dos materiales geológicos, el más somero corresponde a suelo residual de origen sedimentario asociado a calizas y lodolitas de la formación Rosablanca. En la figura 34 se muestra la superficie del terreno afectado por procesos de reptación y erosión leve. Este material presenta un espesor variable de 3 m a 10 m de NE a SW. La velocidad de onda P se encuentra entre 300 m/s y 800 m/s y la onda S entre 281 m/s y 450 m/s. De acuerdo a estas velocidades, el material puede clasificarse como perfil de suelo tipo D, el cual corresponde con suelos rígidos que cumplen con el criterio de velocidad de la onda de corte. Esta capa muestra valores de Coeficiente de Poisson entre 0.2 y 0.35, Módulo de rigidez entre 150 kPa y 500 kPa y Módulo de Young entre 150 kPa y 700 kPa. Estos valores pueden ser asociados a materiales estables.

La capa inferior se asocia a calizas y lodolitas de la Formación Rosablanca, los cuales presentan una velocidad de onda P de 800 m/s a 3200 m/s y una velocidad de onda S de 450 m/s a 900 m/s. De acuerdo a esta información, el material corresponde con suelo tipo C o tipo B, el cual se caracteriza por un perfil de suelo muy denso o roca blanda o roca de rigidez media, que cumple con el criterio de onda de corte. El material muestra una resistividad mayor a $1700 \Omega \times m$, lo que indica una anomalía homogénea de alta resistividad que se asocia con material rocoso, el cual se puede observar aflorando al NE del área de estudio en la Quebrada. Esta capa muestra valores de coeficiente de Poisson entre 0.4 a 0.5, módulo de rigidez entre 500 kPa y 3000 kPa, y módulo de Young entre 700 kPa y 4000 kPa.

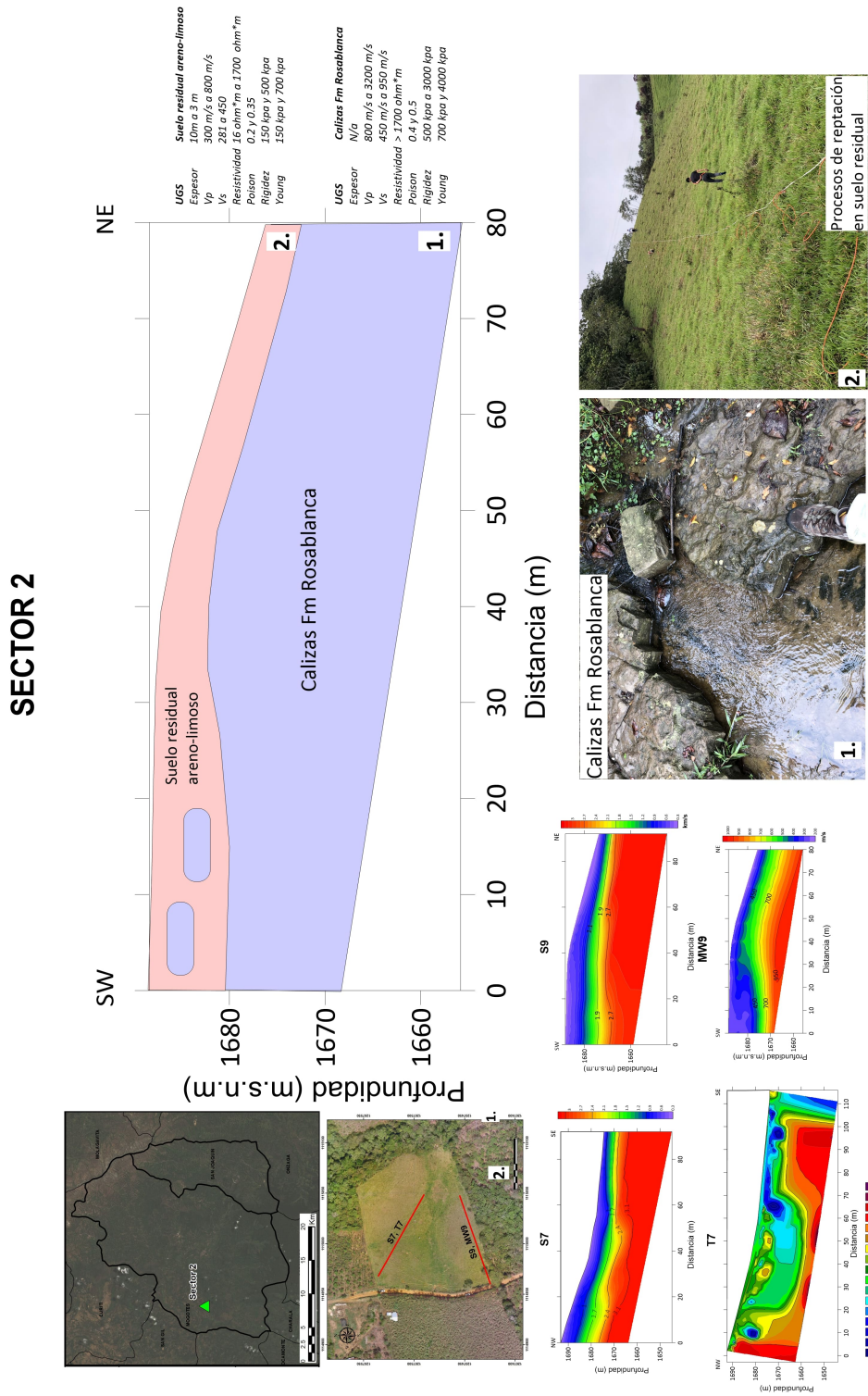


Figura 34. Modelo geológico-geotécnico preliminar del Sector 2 Vereda El Hoyo - Mogotes Santander

6. Conclusiones

1. El Sector uno, de acuerdo a la caracterización geofísica, presenta un perfil de suelo residual de rocas ígneas a suelo saprolítico o roca muy meteorizada en la parte profunda de la adquisición de la formación Riolitas de San Joaquín. Con un espesor entre 2 m a 5 m, los suelos residuales, de acuerdo a los parámetros geotécnicos calculados, se clasifican como suelos tipo D. Estos suelos presentan poca resistencia y son erosionados fácilmente generando grandes cárcavas que posteriormente generan los movimientos en masa identificados en campo. También se observan caídas de rocas debido a su gran fracturamiento y alta pendiente. La capa inferior de suelo saprolítico o roca muy meteorizada, se clasifica como suelo tipo C.
2. En el Sector dos aflora suelo residual de la formación Rosablanca, compuesto de calizas y lodolitas principalmente con un espesor variable entre 3 m y 10 m, los cuales se clasifican como suelo tipo C, estos suelos muestran velocidad de onda P y S baja, que se asocia a este tipo de material. A nivel somero se observan procesos de reptación, donde no existe mayor cantidad de arrastre de material. El material identificado a profundidad presenta velocidades asociadas a roca perteneciente a calizas (>2500 m/s), lo cual se corrobora en campo, al este de la línea adquirida, sobre el lecho de la quebrada El Pepe aflora la caliza de esta formación. Estos materiales se clasificaron como suelos tipo C a B por su alta velocidad de onda P.
3. La tomografía de resistividad eléctrica mostró en los dos sectores las zonas compuestas por

suelo residual, que para el caso del sector 1 se asocia a resistividades entre 260 Ωm a 500 Ωm y para el sector 2 resistividades inferiores a 1800 Ωm . La tomografía permitió identificar en el sector 1 una zona de baja resistividad (70.7 Ωm a 260 Ωm) la cual puede corresponder a material arcilloso producto de la meteorización de los cuerpos ígneos que afloran en el área de estudio. También se observan anomalías de resistividad de 500 Ωm a 1800 Ωm . Las formas de estas anomalías muestran una distribución de bloques con resistividad alta en el centro que decrece hacia los bordes. Esto debido a que los bloques están delimitados por diaclasas, en donde la meteorización actúa desde la superficie de las diaclasas hacia el centro, por lo que normalmente estos bloques corresponden a roca inalterada con meteorización superficial. En el sector dos, también se observan dos capas predominantes, la capa superior de suelo residual, presenta una resistividad inferior a 1800 Ωm , la cual es más gruesa al costado norte y se adelgaza al sur, como se muestra en los perfiles de los demás métodos geofísicos. No se identificó nivel freático en ninguna de las áreas estudiadas.

4. El módulo de cizalla o rigidez (G) muestra grandes diferencias entre los dos sectores estudiados. A nivel general, el sector 2 expone módulos mayores en comparación con el sector 1, esto debido principalmente a las diferencias litológicas de cada zona, siendo más rígidos los suelos y rocas calcáreas que los cuerpos ígneos aflorantes en el sector 1.
5. El coeficiente de Poisson se comporta de manera similar en los dos sectores estudiados, mostrando valores entre 0.2 y 0.4 para las capas de suelo y 0.4 a 0.5 para las capas asociadas a roca. Los suelos presentes en los dos sectores corresponden a suelos sueltos de baja densidad

y posiblemente asociados a texturas areno-limosas, como se observa en las descripciones de campo realizadas. Los materiales incompresibles como las arcillas provenientes de la meteorización de los cuerpos ígneos en el sector 1 pueden explicar los valores de coeficiente de Poisson altos a pocos metros de profundidad que muestra el perfil.

6. Los valores de ángulo de fricción y cohesión obtenidos se asocian con valores promedio de suelo residual. Los ángulos de fricción reportados (11 a 13 grados) corresponden a arena-limosa fina, limo no plástico, los cuales se reportan en las descripciones litológicas presentes en (Rodríguez, G and Arango, MI and Correa, AM and Zapata, G, 2018). Los valores de cohesión lo identifican como suelos cohesivos, especialmente materiales areno-arcillosos; sin embargo, los resultados obtenidos deben considerarse una aproximación preliminar para analizar la estabilidad de laderas y es necesario adelantar ensayos de laboratorio para corroborar y, si es el caso, ajustar estos valores.

7. Recomendaciones

Para mejorar los resultados obtenidos en el cálculo de parámetros geotécnicos asociados a cada uno de los materiales es necesario realizar sondeos geotécnicos como lo establece el Título H del Reglamento Colombiano de Construcción Sismoresistente (NSR10) y ensayos de laboratorios para caracterizar propiedades básicas del suelo, especialmente la determinación de la densidad relativa de los sólidos (ASTM D854), para disminuir la incertidumbre en los datos obtenidos por los métodos indirectos.

Referencias Bibliográficas

- Arias, D. E., Echeverri Ramírez, O., and Hoyos Patiño, F. (2012). Relaciones geoelectricas en la exploración geotécnica. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 1(31):39–50.
- ASTM, I. (2011). *Standard guide for using the seismic refraction method for subsurface investigation*. ASTM International.
- Bogoslovsky, V. and Ogilvy, A. (1977). Geophysical methods for the investigation of landslides. *Geophysics*, 42(3):562–571.
- Brand, E. (1985). Geotechnical engineering in tropical residual soils. In *Special Lecture), Proceedings 1st International Conference on Geomechanics in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils, Brasilia*, volume 3, pages 23–91.
- Briaud, J. (2001). Introduction to soil moduli. department of civil engineering (briaud@ tamu.edu), texas a & m university, college station, texas, 77843-3136, usa. *Geotechnical News*, page 8.
- Caris, J. and Van Asch, T. W. (1991). Geophysical, geotechnical and hydrological investigations of a small landslide in the french alps. *Engineering Geology*, 31(3-4):249–276.
- Correa-Martínez, A., Rodríguez, G., Arango, M., Zapata, G., and Bermúdez, J. (2016). Catálogo de unidades litoestratigráficas de colombia: Batolito de mogotes, cordillera oriental, departamento de santander.

- Dobrin, M. B. and Savit, C. H. (1960). *Introduction to geophysical prospecting*, volume 4. McGraw-hill New York.
- Everett, M. E. (2013). *Near-surface applied geophysics*. Cambridge University Press.
- García, A. H. (2014). Elastoplasticidad de un suelo franco arenoso de sabana. *SABER. Revista Multidisciplinaria del Consejo de Investigación de la Universidad de Oriente*, 26(2):153–167.
- Gazetas, G. (1991). Foundation vibrations, foundation engineering handbook. *New York-Van Nostrand Reinhold*, pages 553–593.
- Geometrics, I. S. (2009). *SeisImager/SW manual*. SeisImager.
- Georys, I. S. (2016). *Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)*. Georys.
- Geotomo, S. (2010). *Geoelectrical Imaging 2D & 3D*. Geometrics.
- Glade, T., Stark, P., and Dikau, R. (2005). Determination of potential landslide shear plane depth using seismic refractiona case study in rheinhessen, germany. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 64(2):151–158.
- González, O. P. (1980). Geología de las planchas 135 san gil y 151 charalá: Departamento de santander. *Boletín Geológico*, 23(2):41–78.
- González-Cueto, O., Iglesias-Coronel, C. E., Herrera-Suárez, M., Urriolagoitia-Sosa, G., Urriolagoitia-Calderón, G., and Hernández-Gómez, L. H. (2009). Parámetros de estado crítico

empleados para la simulación de la respuesta mecánica de un suelo rhodic ferralsol (mediante el mef). *Científica*, 13(4):199–204.

Griffiths, D. and Barker, R. (1993). Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *Journal of applied Geophysics*, 29(3-4):211–226.

Guarupe, L. A. B. and Campos, R. L. D. (1995). Medida de propiedades dinámicas de rocas in situ computo de parámetros elastomecánicos. *Earth Sciences Research Journal*, 1(3):73–79.

Guideline, G. A. (2018). *User Manual. Terraloc Pro 2*. ABEM.

Hack, R. (2000). Geophysics for slope stability. *Surveys in geophysics*, 21(4):423–448.

Jongmans, D. and Garambois, S. (2007). Geophysical investigation of landslides: A review. *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 178.

Júnior, S. B. L., Prado, R. L., and Mendes, R. M. (2012). Application of multichannel analysis of surface waves method (masw) in an area susceptible to landslide at ubatuba city, brazil. *Revista Brasileira de Geoisica*, 30(2):213–224.

Khalil, M. H. and Hanafy, S. M. (2008). Engineering applications of seismic refraction method: A field example at wadi wardan, northeast gulf of suez, sinai, egypt. *Journal of Applied Geophysics*, 65(3-4):132–141.

Ley-Cooper, A., Munday, T., Gilfedder, M., Ibrahimi, T., Annetts, D., and Cahill, K. (2015). Inversion of legacy airborne electromagnetic datasets to inform the hydrogeological understanding

of the northern eyre peninsula, south australia. *Goyder Institute for Water Research Technical Report Series*, 15:50.

Lowrie, W. and Fichtner, A. (2019). *Fundamentals of geophysics*. Cambridge university press.

Luna, R. and Jadi, H. (2000). Determination of dynamic soil properties using geophysical methods. *Proceedings of the first international conference on the application of geophysical and NDT methodologies to transportation facilities and infrastructure, St. Louis, MO*, pages 1–15.

Mullins, C., MacLeod, D., Northcote, K., Tisdall, J., and Young, I. (1990). Hardsetting soils: behavior, occurrence, and management. In *Advances in soil science*, pages 37–108. Springer.

Naranjo Aguay, H. and Dranichnikov, T. (2013). *Cálculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional*. Abya-Yala/UPS.

Nelson, R. G., Summers, J. D., and Solie, J. B. (1997). Frequency and moisture content effects on the visco-elastic characteristics of soil. *Soil technology*, 10(1):21–33.

Park, C. B. (2005). Masw horizontal resolution in 2d shear-velocity (vs) mapping. *Open-File Report, Lawrence: Kansas Geologic Survey*.

Park, C. B., Miller, R. D., and Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3):800–808.

Park, C. B., Miller, R. D., Xia, J., and Ivanov, J. (2007). Multichannel analysis of surface waves (masw) active and passive methods. *The Leading Edge*, 26(1):60–64.

Pulido Gonzáles, O. (1979). Geología de las planchas 135 (san gil) y 151 (charalá) cuadrángulo i-12. *Bogotá: Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas)*.

Raper, R. L., Johnson, C. E., and Bailey, A. C. (1994). Coupling normal and shearing stresses to use in finite element analysis of soil compaction. *Transactions of the ASAE*, 37(5):1417–1422.

Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley & Sons.

Rodríguez, G and Arango, MI and Correa, AM and Zapata, G (2018). *Catálogo de unidades litoestratigráficas de Colombia riolitas del alto los cacaos Cordillera Oriental Departamento de Santander*. Servicio Geológico Colombiano.

Ruiz, G., Medina, E., Alvarado, C., Trejos, G., Sandoval, J., Montero, J., López, S., and Ortegón, C. (2012). *Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en masa (escala 1:500.000)*. SGC.

Ruiz Peña, G. L., Navarro Alarcón, S. d. R., Chaparro Cordón, J. L., Gamboa Rodríguez, C. A., Ramírez Hernández, K. C., Camargo Holguín, B. L., Trejos González, G. A., and Pérez Cerón, R. E. (2017). *Las amenazas por movimientos en masa de Colombia, una visión a escala 1:100.000*. Libros del Servicio Geológico Colombiano.

Servicio Geológico Colombiano, S. (2015). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Servicio Geológico Colombiano-SGC.

Sheehan, J. R., Doll, W. E., and Mandell, W. (2004). *Comparison of MASW and refraction tomography*. European Association of Geoscientists and Engineers.

- Smith, G. N. (1982). *Elements of soil mechanics for civil and mining engineers*. Granada Publishing Limited.
- Stein, S. and Wysession, M. (2009). *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*. John Wiley & Sons.
- Suarez, J. (2009). Deslizamientos: análisis geotécnico. *Colombia. Editorial Universidad Industrial de Santander, UIS*, 340:341pp.
- Telford, W. M., Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R. E., and Sheriff, R. (1990). *Applied geophysics*, volume 1. Cambridge university press.
- Vargas, H., Arias, T., Jaramillo, C., and Téllez, I. (1981). Geología de las planchas 136-málaga y 152-soatá, cuadrángulo i-13. *Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras. Memoria Explicativa*, pages 1–76.
- Xia, J. (2014). Estimation of near-surface shear-wave velocities and quality factors using multi-channel analysis of surface-wave methods. *Journal of applied geophysics*, 103:140–151.
- Yamakawa, Y., Kosugi, K., Masaoka, N., Sumida, J., Tani, M., and Mizuyama, T. (2012). Combined geophysical methods for detecting soil thickness distribution on a weathered granitic hillslope. *Geomorphology*, 145:56–69.
- ZZgeo, R. I. P. L. (2020). *User Manual for FlashRES-UNIVERSAL64/96 The Full-channel Free Configuration Resistivity/IP Exploration System*. ZZgeo.

Apéndices

Apéndice A. Datos sísmica de refracción

Figura 35. Interpretación de primeros arribos para la línea sísmica S6.

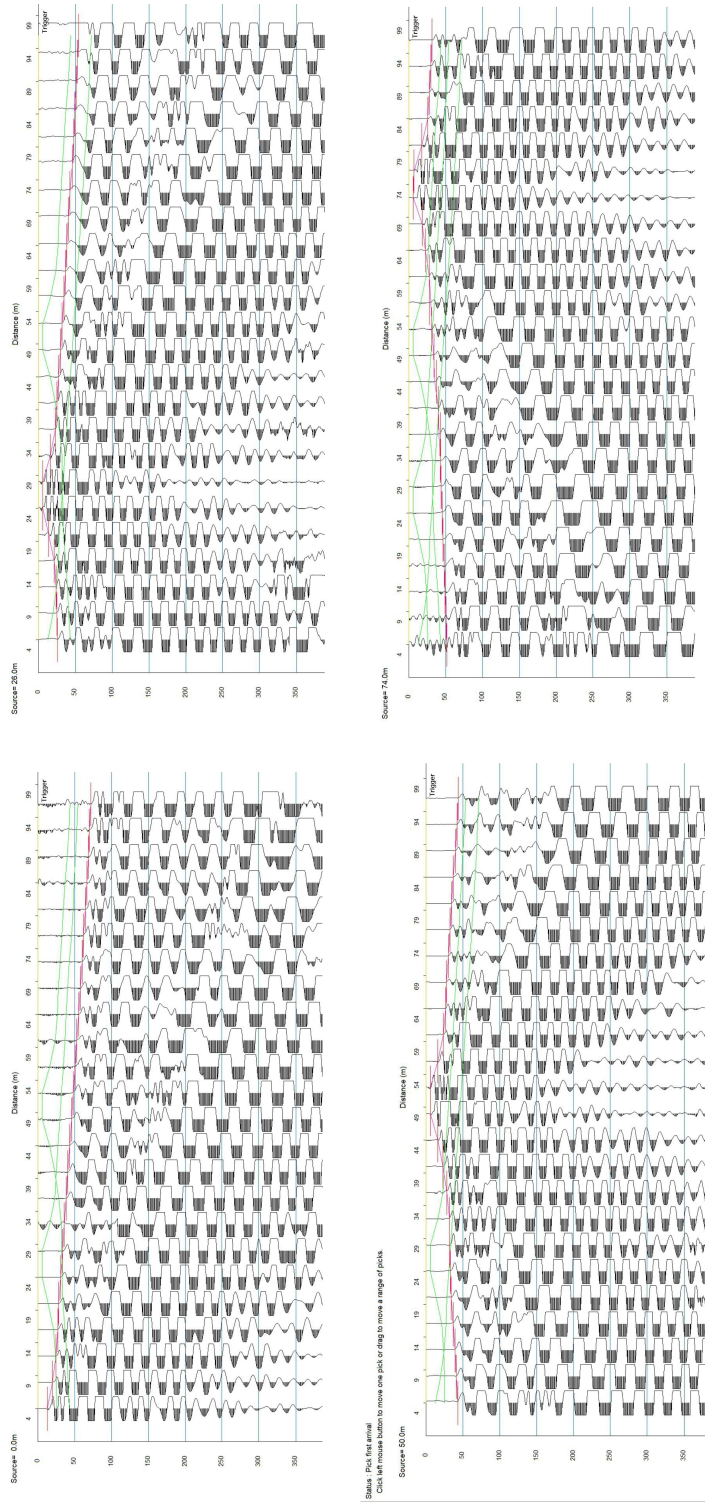


Figura 36. Interpretación de primeros arribos para la línea sísmica S8.

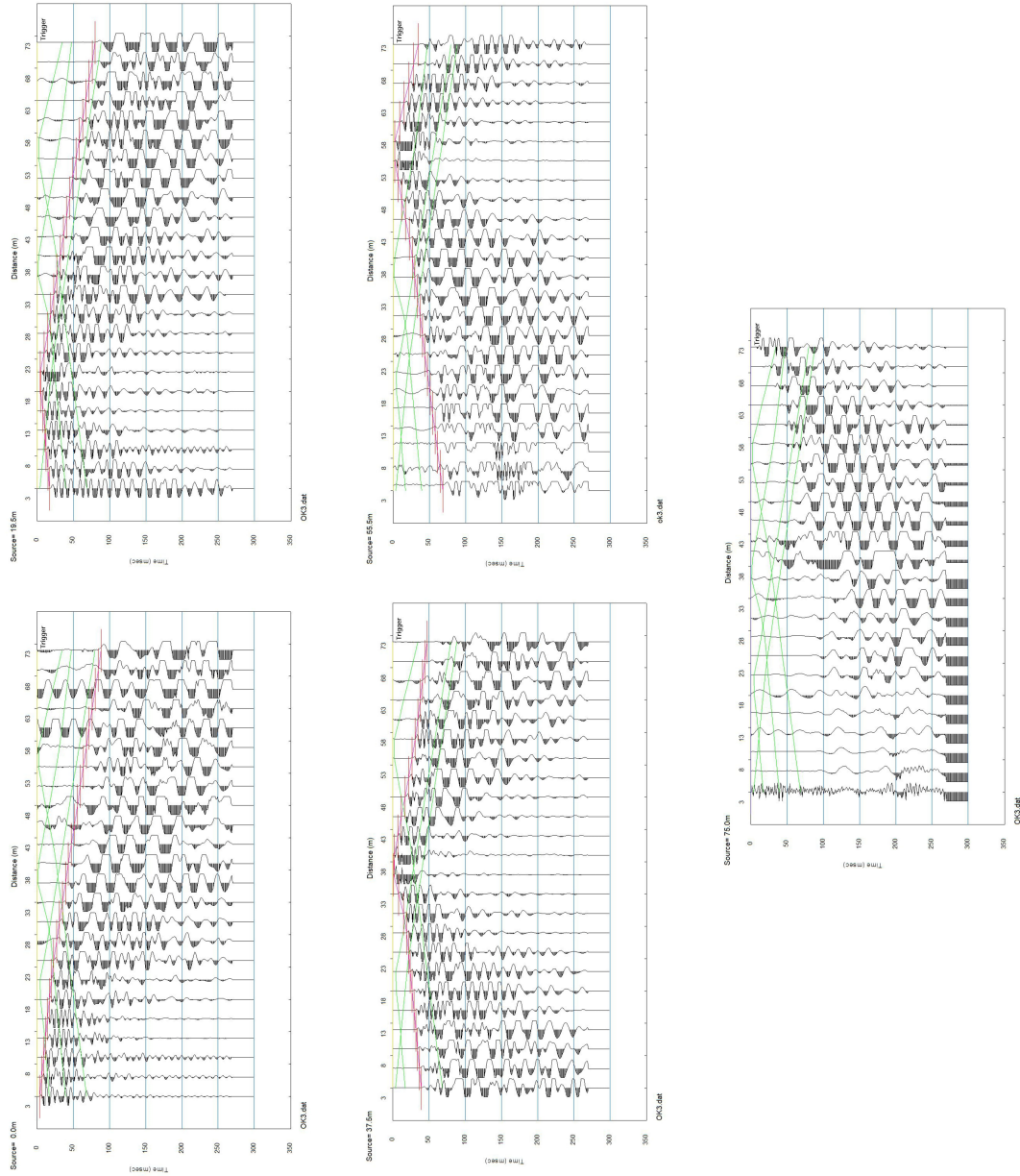


Figura 37. Interpretación de primeros arribos para la línea sísmica S7.

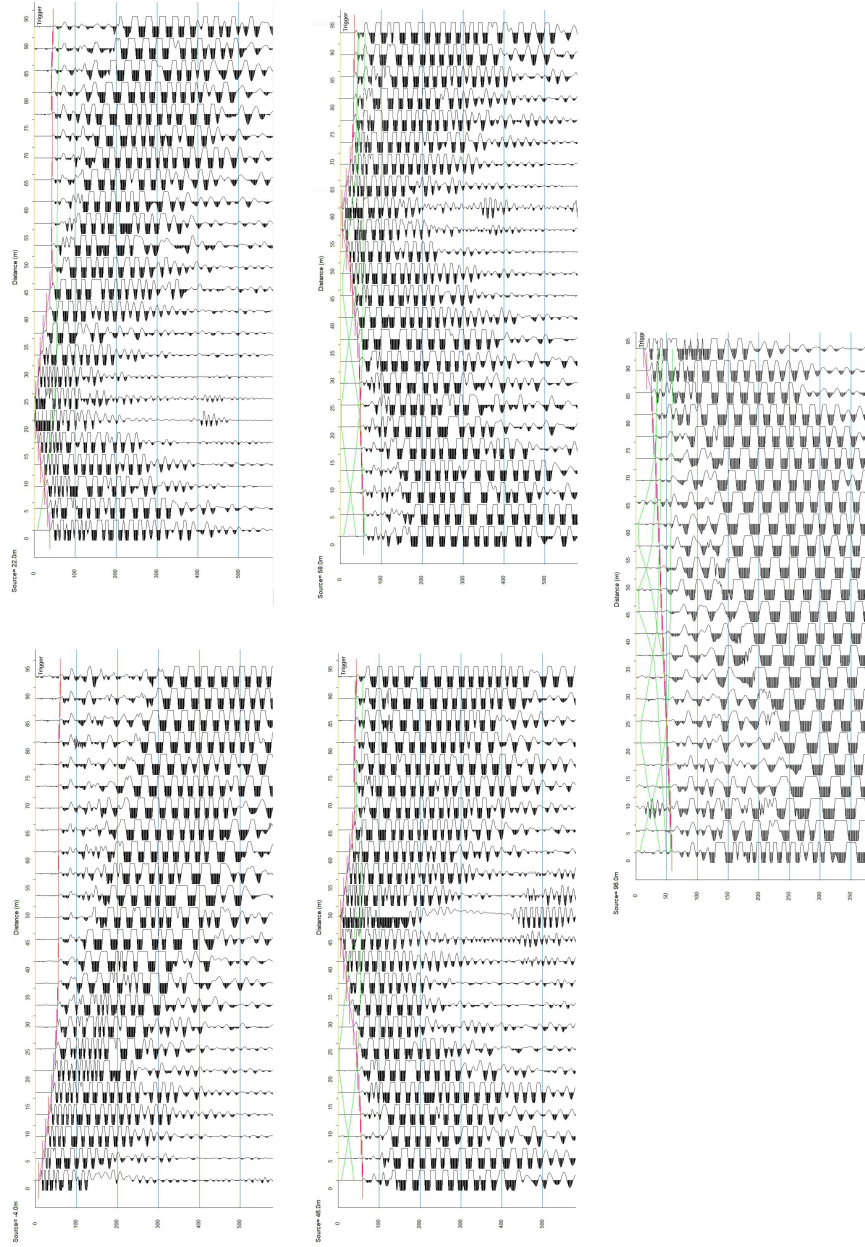
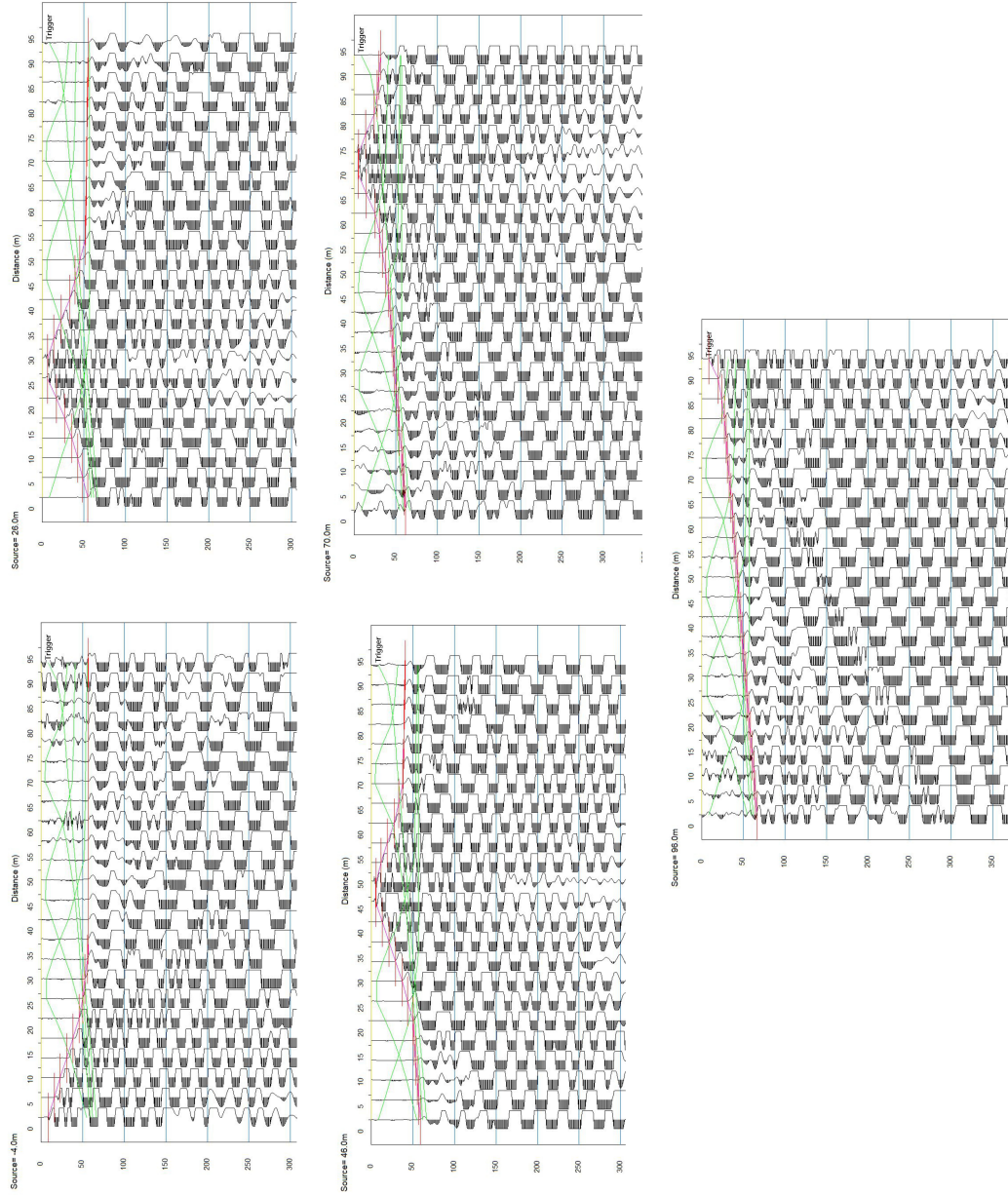
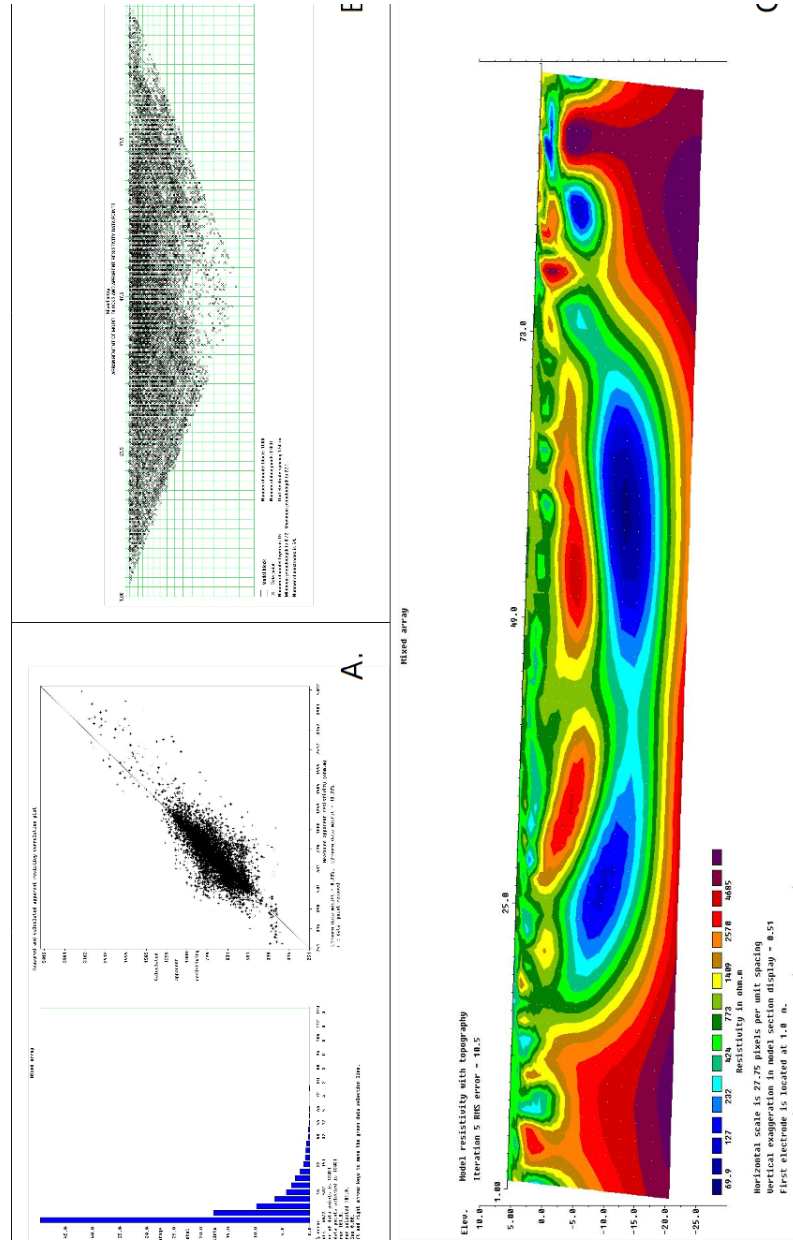


Figura 38. Interpretación de primeros arribos para la línea sísmica S9.



Apéndice B. Datos Tomografía de resistividad eléctrica (TRE)

Figura 39. Datos adquiridos de la tomografía eléctrica T6. A. Histograma de error relativo de los datos. B. Arreglo de modelo de bloques y distribución de datos de resistividad aparente. C. Modelo invertido de resistividad eléctrica para la línea T6.



Apéndice C. Apéndice: Datos análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)

Figura 42. Curvas de dispersión para cada CMP que compone el perfil MW6.

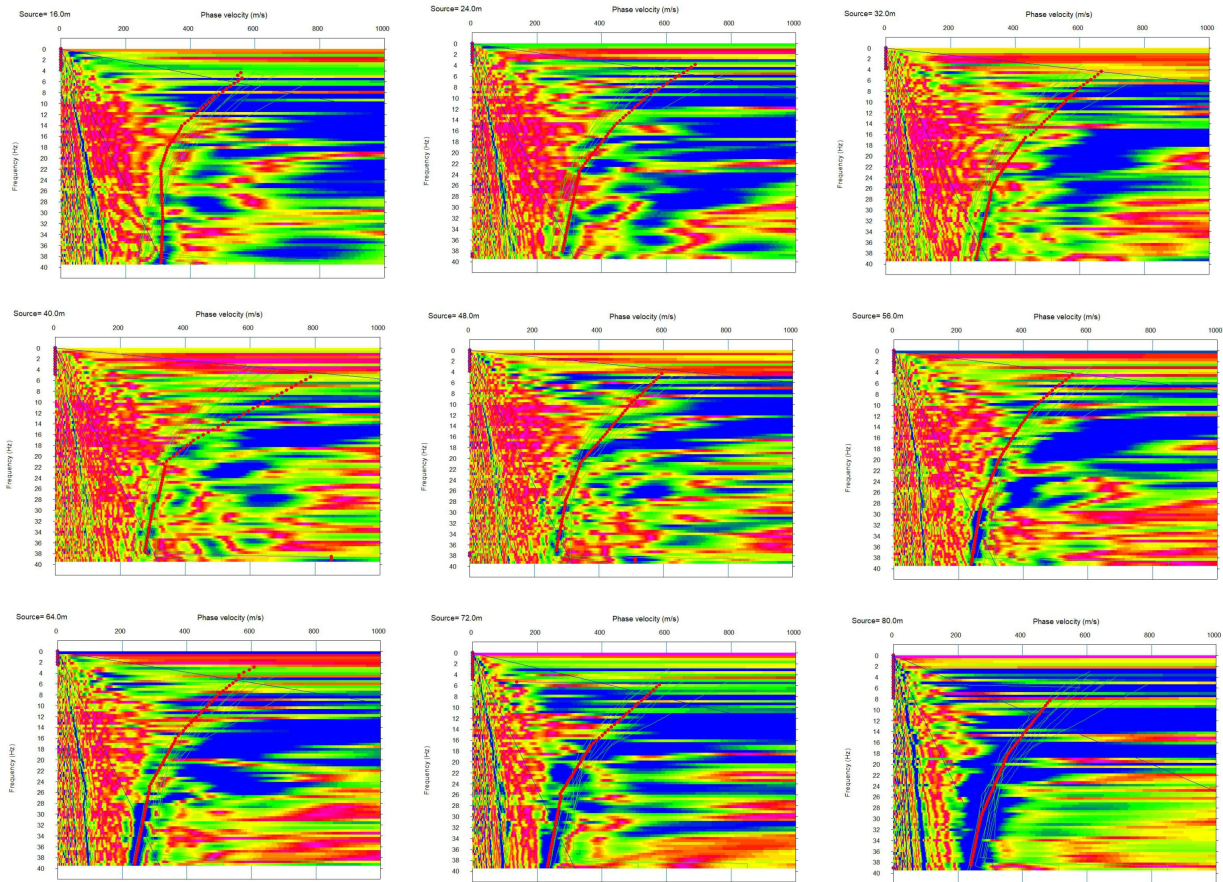


Figura 43. Curvas de dispersión para cada CMP que compone el perfil MW7

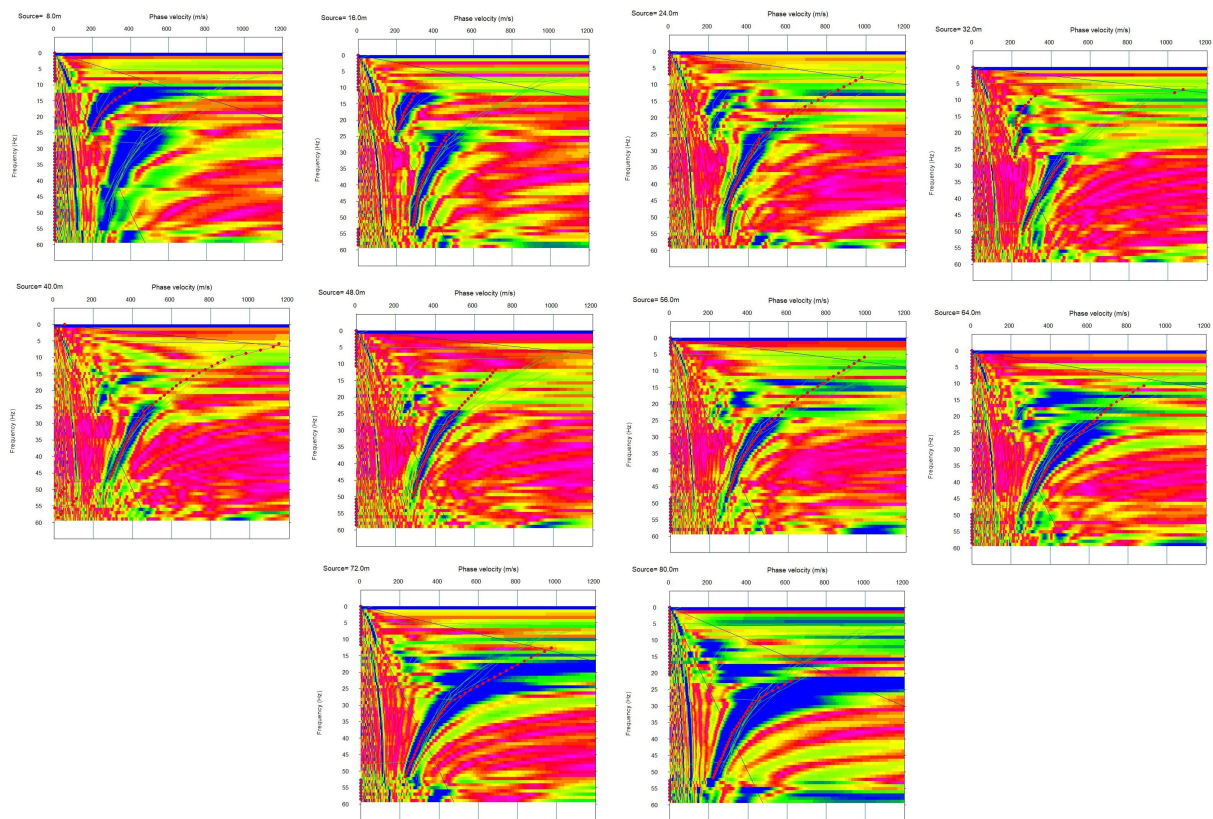


Figura 44. Curvas de dispersión para cada CMP que compone el perfil MW8.

