

Estimación de las propiedades físicas de las rocas aflorantes al sur de la Mesa de Los Santos y su
aplicación en modelos de respuesta geofísica

María Teresa Ulloque Ardila

Trabajo de Investigación para Optar al Título de Magister en Geofísica

Director

Francisco A. Velandia P.

PhD. en Geociencias

Codirector

José D. Sanabria G.

PhD. en Física

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Física

Maestría en Geofísica

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Para mi papá, mi abuelo y mi hermano.

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi alma mater, la Universidad Industrial de Santander, y a mi director de trabajo de grado, Francisco Velandia, quien me guio y me dedico su valioso tiempo.

A la Escuela de Física, en especial a los profesores y colaboradores de la Maestría en Geofísica, quienes se esfuerzan para brindarnos un lugar de excelencia académica.

A la Escuela de Geología, cuyos espacios de laboratorio fueron esenciales para la preparación y análisis de las muestras utilizadas en este trabajo. A mis compañeros y colegas con quienes compartí momentos gratos e inolvidables. Gracias a todos por ser parte de esta experiencia en mi vida.

Tabla de contenido

	Pág.
Introducción	15
1 Objetivos	17
1.1 Objetivo general	17
1.2 Objetivos específicos	17
2 Marco de referencia	18
2.1 Marco geológico regional	18
2.2 Fundamentos métodos geofísicos	24
2.2.1 Magnetotelúrica	24
2.2.2 Tomografías de resistividad eléctrica	25
2.2.3 Sísmica de refracción	27
2.3 Propiedades físicas de la roca	29
2.3.1 Porosidad.....	30
2.3.2 Resistividad y Cargabilidad eléctrica.....	30
2.3.3 Velocidad de onda P	31
2.3.4 Densidad	31
2.4 Estudios previos	32
3 Metodología	45
3.1 Pre-campo	45
3.2 Trabajo de campo.....	45
3.2.1 Magnetotelúrica (MT).....	45
3.2.2 Recolección muestras de roca	45

3.3	Mediciones en laboratorio.....	47
3.4	Modelado sintético e inversión.....	49
3.5	Propuesta de adquisición geofísica.....	50
4	Resultados.....	51
4.1	Mediciones en laboratorio.....	51
4.1.1	Resistividad eléctrica.....	52
4.1.2	Cargabilidad eléctrica.....	54
4.1.3	Velocidad de onda P.....	56
4.1.4	Porosidad.....	57
4.1.5	Densidad.....	58
4.1.6	Agua retenida.....	59
4.2	Modelos sintéticos.....	60
4.2.1	Etapas preliminar.....	62
4.2.2	Modelos finales.....	70
4.2.2.1	Mod 01.....	71
4.2.2.2	Mod 02.....	72
4.2.2.3	Mod 03.....	73
4.3	Perfiles Magnetotelúrica.....	75
4.3.1	Línea MT 1.....	76
4.3.2	Línea MT 2.....	77
5	Discusión.....	79
5.1	Respuesta Modelos Sintéticos Sísmica de Refracción.....	79
5.2	Respuesta Modelos Sintéticos TRE.....	82

5.3	Interpretación perfiles magnetotelúrica	87
5.4	Propuesta de diseño de adquisición geofísica.....	89
5.5	Integración	93
6	Conclusiones	97
	Referencias bibliográficas.....	99
	Apéndices.....	115

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Propiedades físicas de las rocas de la Formación Los Santos.	34
Tabla 2 Propiedades físicas de las rocas de la Formación Rosablanca.....	35
Tabla 3 Propiedades físicas de las rocas de la Formación Paja.	36
Tabla 4 Propiedades físicas de las rocas de la Formación Tablazo.	36
Tabla 5 Propiedades físicas de las rocas de la Formación Jordán.	36
Tabla 6 Propiedades físicas de las rocas de Esquistos de Silgará.....	37
Tabla 7 Distribución de muestras de roca y núcleos según la formación geológica.	51
Tabla 8 Trabajos de referencia para la generación de los tres modelos sintéticos.	62
Tabla 9 Comparación de valores de las propiedades de interés y valores finales para los modelos sintéticos. Se consideraron los resultados de labores en campo realizados por Ariza y Gómez (2023), Vergel y Remolina (2023) y Rojas (2024) como criterio adicional en el valor final.....	69

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Mapa de localización del área de estudio. Recuadro A. Colombia, B. Santander, C. Mesa de Los Santos.	16
Figura 2 Mapa geológico de la zona de estudio en la Mesa de Los Santos. Geología tomada de García-Arias et al. (2024b), los cortes C1-C1', C2-C2' y C3-C3' son tomados de Carrillo y Silva (2024).	19
Figura 3 Columna estratigráfica generalizada de la Mesa de Los Santos (modificada de Vargas, 2008) junto con valores de resistividades esperados para las litologías considerando información de literatura (tomados de Lowrie, 2007; Telford et al., 1990, Arias et al., 2012 y Jackson, 2011).	20
Figura 4 Cortes geológicos C1-C1', C2-C2' y C3-C3' propuestos por Carrillo y Silva (2024). 23	23
Figura 5 Localización de perfiles geoelectricos en la zona sur de la Mesa de Los Santos. Modificado de Ingeominas (2009).	32
Figura 6 Perfil geoelectrico A-A', construido con los sondeos 01 al 08 y su longitud total es de 3030 m (Ingeominas, 2009).	33
Figura 7 Interpretación propuesta por Vergel y Remolina (2023) de la TRE 01 realizada próxima a la Falla Potrereros sobre material del miembro superior de la Fm. Los Santos.	39
Figura 8 Interpretación propuesta por Vergel y Remolina (2023) de la TRS en el perfil sísmico SIS 01 colineal a la TRE 01.	40
Figura 9 Interpretación de los modelos 2D obtenido en La Mojarra A (arriba) La Mojarra B (abajo) próximo a la Falla La Mojarra realizados por Ariza y Gómez (2023).	42

Figura 10 Interpretación de los modelos 2D obtenidos para La Chivatera 1 A (arriba) y La Chivatera 1 B (abajo) próximo a la Falla La Chivatera realizados por Ariza y Gómez (2023). ..	43
Figura 11 Interpretación realizada por Rojas (2024) de la TRS y MASW realizada al suroeste de la Mesa de Los Santos.....	44
Figura 12 Mapa geológico del área de estudio en la Mesa de Los Santos. Los triángulos azules corresponden a las estaciones de MT, las líneas moradas que atraviesan esos puntos corresponden a las líneas MT (línea 1 en sentido este-oeste, línea 2 noroeste-sureste) y los puntos rojos al muestreo de rocas.....	46
Figura 13 Curva de resistividad verdadera vs profundidad. Modelo preliminar invertido desde el equipo para los datos magnetotelúricos de la estación 3.	47
Figura 14 Mapa de resistividad en seco de muestras de roca del sur de la Mesa de Los Santos.	53
Figura 15 Mapa de resistividad en húmedo de muestras de roca del sur de la Mesa de Los Santos.	54
Figura 16 Mapa de cargabilidad en seco de muestras de roca del sur de la Mesa de Los Santos.	55
Figura 17 Mapa de cargabilidad en húmedo de muestras de roca del sur de la Mesa de Los Santos.	56
Figura 18 Mapa de velocidad de onda P de muestras de roca del sur de la Mesa de Los Santos.	57
Figura 19 Mapa de porosidad de muestras de roca del sur de la Mesa de Los Santos.	58
Figura 20 Mapa de densidad de muestras de roca del sur de la Mesa de Los Santos.....	59
Figura 21 Mapa de agua retenida de muestras de roca del sur de la Mesa de Los Santos.....	60
Figura 22 Localización de los tres modelos sintéticos desarrollados en proximidad a la Falla Los Santos. Geología tomada de García et al. (2024b).....	61

Figura 23 Geología y valores de las propiedades físicas estimadas por Redes Neuronales para el Mod 01. Para mayor detalle ver apéndice c.	63
Figura 24 Geología y valores de las propiedades físicas estimadas por Redes Neuronales para el Mod 02. Para mayor detalle ver apéndice c.	64
Figura 25 Geología y valores de las propiedades físicas estimadas por Redes Neuronales para el Mod 03. Para mayor detalle ver apéndice c.	65
Figura 26 Ejemplo de la comparación de los valores de resistividad eléctrica en húmedo estimados por la Red Neuronal, catálogo de plugs y el remuestreo de las formaciones Rosablanca y miembro superior de Los Santos.	67
Figura 27 Ejemplo de la comparación de los valores de velocidades de onda P estimados por la Red Neuronal, catálogo de plugs y el remuestreo de las formaciones Rosablanca y miembro superior de Los Santos.	68
Figura 28 Modelo geológico final para Mod 01 y modelos de resistividad eléctrica y velocidad de onda P. Para mayor detalle ver apéndice d.	72
Figura 29 Modelo geológico final para Mod 02 y modelos de resistividad eléctrica y velocidad de onda P. Para mayor detalle ver apéndice d.	73
Figura 30 Modelo geológico final para Mod 03 y modelos de resistividad eléctrica y velocidad de onda P. Para mayor detalle ver apéndice d.	74
Figura 31 Ajuste de las curvas de resistividad y fase del modelo para la estación 3 con los datos reales, curvas de resistividad (rojo) y curvas de fase (azul). Las curvas más suaves corresponden a las curvas del modelo mientras las otras son las de los datos.	75
Figura 32 Inversión 2D Línea MT 1	76
Figura 33 Inversión 2D Línea MT 2	77

Figura 34 Propagación teórica de rayos en el Mod 01 para la sísmica de refracción.....	80
Figura 35 Propagación teórica de rayos en el Mod 02 para la sísmica de refracción.....	80
Figura 36 Propagación teórica de rayos en el Mod 03 para la sísmica de refracción.....	81
Figura 37 Rangos de velocidad de onda P medidos de los plugs por Garcia (2022) para cada una de las formaciones, agrupadas por litología, aflorantes en la Mesa de Los Santos.	82
Figura 38 Modelo generado de la inversión de los datos de resistividad eléctrica sintéticos de Mod 01. Se superpone el modelo geológico utilizado.	84
Figura 39 Modelo generado de la inversión de los datos de resistividad eléctrica sintéticos de Mod 02. Se superpone el modelo geológico utilizado.	85
Figura 40 Rangos de resistividad eléctrica en húmedo medidos de los plugs por Garcia (2022) para cada una de las formaciones, agrupadas por litología, aflorantes en la Mesa de Los Santos.	86
Figura 41 Modelo generado de la inversión de los datos de resistividad eléctrica sintéticos de Mod 03. Se superpone el modelo geológico utilizado.	87
Figura 42 Mapa de localización del diseño geofísico propuesto para el sur de la Mesa de Los Santos, conformado por nueve perfiles de adquisición de TRE y refracción sísmica y 17 sondeos TEM en un perfil de 8 km cada 500 m.	90
Figura 43 Comparación de los valores de porosidad estimados por la Red Neuronal, catálogo de <i>plugs</i> y el remuestreo de las formaciones Rosablanca y miembro superior de Los Santos.....	95

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A Marco de referencia	115
Apéndice B Diagramas de cajas y bigotes	119
Apéndice C Modelos sintéticos preliminares	123
Apéndice D Modelos sintéticos finales.....	129
Apéndice E Modelos 1D MT	135
Apéndice F Perfiles invertidos de MT	140
Apéndice G Datos medidos en laboratorio	142

Resumen

Título: Estimación de las propiedades físicas de las rocas aflorantes al sur de la Mesa de Los Santos y su aplicación en modelos de respuesta geofísica.

Autor: María Teresa Ulloque Ardila

Palabras clave: propiedades físicas de rocas, tomografía de resistividad eléctrica, sísmica de refracción, magnetotelúrica, modelado geofísico, Mesa de Los Santos, remuestreo estadístico.

Descripción: El sector sur de la Mesa de Los Santos enfrenta escasez de agua, lo que ha motivado estudios geológicos y geofísicos, aunque sigue siendo la zona menos explorada. Este trabajo caracteriza las propiedades físicas de las unidades geológicas aflorantes para evaluar su potencial hidrogeológico y generar modelos geofísicos que orienten futuras campañas de exploración. Se recolectaron 66 muestras de roca, de las cuales se obtuvieron 99 núcleos, y se analizaron propiedades como densidad, porosidad, resistividad eléctrica, cargabilidad y velocidad de onda P. Las formaciones Los Santos y Rosablanca, de mayor interés hídrico, mostraron resistividades máximas de $923 \Omega \cdot m$ y $3394 \Omega \cdot m$, velocidades P de 2573 m/s y 3411 m/s, y porosidades promedio de 7 % y 4 %, respectivamente, reflejando la influencia de la litología, el contenido de agua y el grado de meteorización.

Con base en estos resultados se generaron modelos sintéticos de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) y sísmica de refracción para tres perfiles al oeste de la Falla Los Santos. Los modelos de TRE identificaron zonas de baja resistividad asociadas con posible presencia de agua, mientras que la sísmica de refracción presentó limitaciones para diferenciar capas con velocidades similares, recomendándose como técnica complementaria. Además, se adquirieron nueve estaciones de magnetotelúrica, generando dos perfiles 2D que muestran variaciones laterales significativas y sugieren un control estructural sobre el flujo y almacenamiento del agua subterránea. Se infirió que la Formación Los Santos podría encontrarse desde unos 300 m de profundidad, con sectores de mayor saturación.

Finalmente, se propone un diseño de adquisición que incluye nueve perfiles de TRE y 17 sondeos TEM, priorizando áreas con control estructural y cercanía a drenajes. Este diseño busca mejorar la delimitación de zonas con potencial hidrogeológico en el sur de la Mesa de Los Santos, sirviendo como base para futuras exploraciones de agua subterránea.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ciencias. Escuela de Física. Maestría en geofísica. Director: Francisco Velandia Patiño. PhD. Codirector: Jose David Sanabria. PhD.

Abstract

Title: Estimation of the physical properties of outcropping rocks south of the Mesa de Los Santos and their application in geophysical response models*

Author: Maria Teresa Ulloque Ardila**

Key words: rock physical properties, electrical resistivity tomography, seismic refraction, magnetotellurics, geophysical modeling, Mesa de Los Santos, statistical resampling.

Description: The southern sector of the Mesa de Los Santos faces water scarcity, which has motivated geological and geophysical studies, although it remains the least explored area. This work characterizes the physical properties of the outcropping geological units to evaluate their hydrogeological potential and generate geophysical models to guide future exploration campaigns. A total of 66 rock samples were collected, from which 99 cores were obtained, and properties such as density, porosity, electrical resistivity, chargeability, and P-wave velocity were analyzed. The Los Santos and Rosablanca formations, of greatest hydrogeological interest, showed maximum resistivities of 923 $\Omega\cdot\text{m}$ and 3394 $\Omega\cdot\text{m}$, P-wave velocities of 2573 m/s and 3411 m/s, and average porosities of 7 % and 4 %, respectively, reflecting the influence of lithology, water content, and the degree of weathering.

Based on these results, synthetic models of electrical resistivity tomography (ERT) and seismic refraction were generated for three profiles west of the Los Santos Fault. The ERT models identified low-resistivity zones associated with possible water presence, while seismic refraction showed limitations in differentiating layers with similar velocities, and is thus recommended as a complementary technique. Additionally, nine magnetotelluric stations were acquired, producing two 2D profiles that show significant lateral variations and suggest structural control over the flow and storage of groundwater. It was inferred that the Los Santos Formation may be present from approximately 300 m depth, with sectors of higher saturation.

Finally, a survey design is proposed, including nine ERT profiles and 17 TEM soundings, prioritizing areas with structural control and proximity to drainage. This design aims to improve the delineation of zones with hydrogeological potential in the southern Mesa de Los Santos, providing a basis for future groundwater exploration.

* Degree Work

** Faculty of Sciences. School of Physics. Master's in Geophysics. Director: Francisco Velandia Patiño, PhD. Co-director: Jose David Sanabria, PhD.

Introducción

El área de estudio de esta investigación corresponde a la zona sur de la Mesa de Los Santos, delimitada por los ríos Chicamocha, Sogamoso y Manco, así como por la quebrada Los Montes. A pesar de la presencia de estos cuerpos de agua, la región enfrenta una marcada escasez hídrica (figura 1), que genera serias dificultades en el suministro de agua potable y afecta directamente a la comunidad. Por esta razón, diversos autores y entidades, como Wilches y Corzo (2015), Díaz *et al.* (2019), Gómez *et al.* (2014), García y Gómez (2015), Ingeoexploraciones (2016) e Ingeominas (2007, 2009, 2010), han llevado a cabo estudios geofísicos con el fin de contribuir a la búsqueda de recursos hídricos. Sin embargo, estos estudios se han concentrado principalmente en las zonas norte y centro-sur, lo cual ha ocasionado que el sector sur sea el menos explorado.

Dado que el centro urbano del municipio se encuentra en la zona sur, este sector es de especial interés para la presente investigación. Con el objetivo de contribuir a la exploración de aguas subterráneas que puedan mitigar la escasez hídrica, es fundamental conocer las propiedades físicas de las unidades geológicas aflorantes en la zona. Esto permitirá caracterizar y diferenciar las rocas, proporcionando una base para futuros estudios geofísicos.

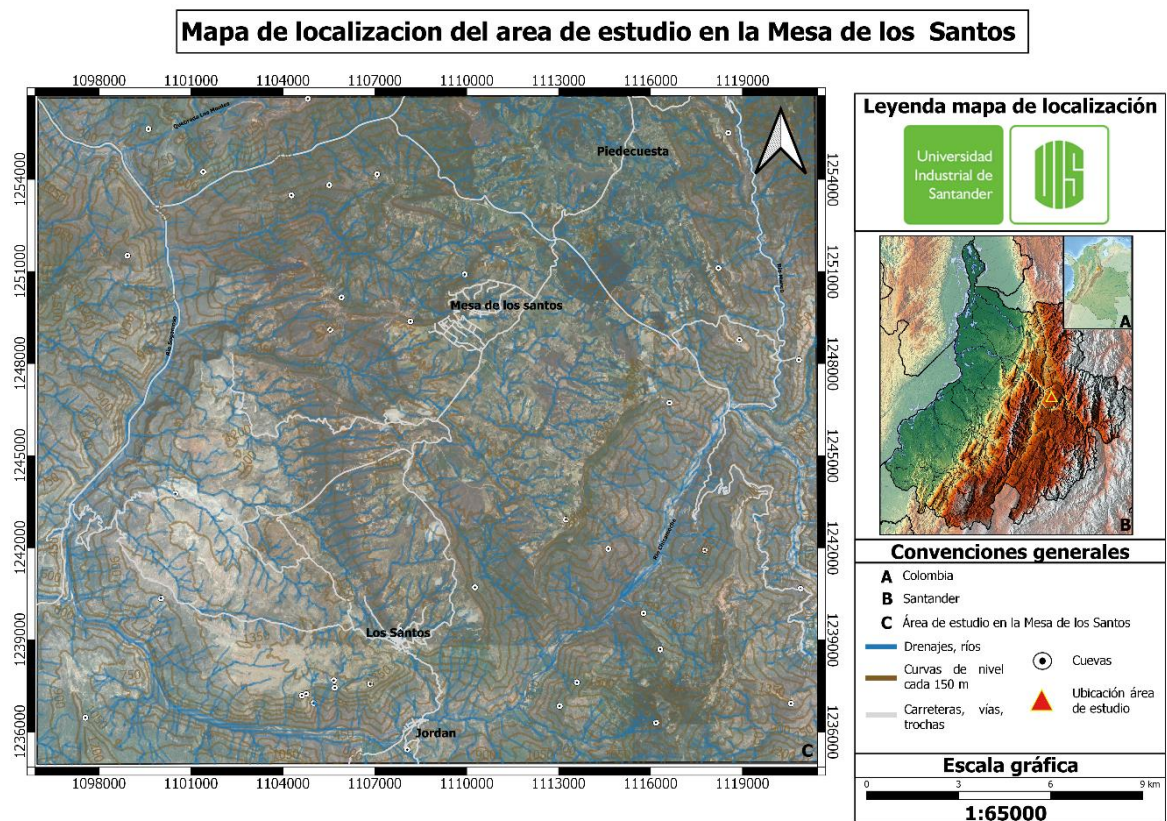
En este contexto, resulta crucial considerar los efectos de los procesos de fallamiento y tectónica en la región, ya que estos generan variaciones en las propiedades físicas de las rocas. Dichas variaciones influyen en la interpretación geofísica y en el modelamiento directo e indirecto. Por ello, es necesario determinar los valores de propiedades como resistividad, cargabilidad, densidad, porosidad y velocidad de onda P, con el fin de evaluar si favorecen o dificultan el flujo de agua subterránea en el sector sur de la Mesa de Los Santos. Con este fin, se analizaron en laboratorio 66 muestras de roca recolectadas en la zona sur de la Mesa de Los Santos, al sur de la Falla Potreros, de las cuales se extrajeron 99 núcleos. Las propiedades medidas, junto con la información disponible en la literatura, fueron empleadas en la generación de modelos sintéticos de respuesta geofísica para los métodos de tomografía de resistividad eléctrica y sísmica de refracción.

Adicionalmente, en la etapa de campo se adquirieron nueve estaciones de magnetotelúrica, generando dos perfiles 2D. A partir de estos perfiles, se infirió la posible profundidad de la Formación Los Santos y se identificaron áreas con potencial hidrogeológico. Finalmente,

considerando los resultados obtenidos de la magnetotelúrica, los modelos sintéticos y los estudios previos, se propone un diseño de adquisición que permita mejorar la comprensión del sector sur de la Mesa de Los Santos y su potencial hidrogeológico.

Figura 1

Mapa de localización del área de estudio. Recuadro A. Colombia, B. Santander, C. Mesa de Los Santos.



1 Objetivos

1.1 Objetivo general

Desarrollar modelos directos de la respuesta geofísica de las formaciones aflorantes al sur de la Mesa de Los Santos basados en las propiedades físicas de las rocas obtenidas en el laboratorio.

1.2 Objetivos específicos

- Estimar las propiedades físicas (densidad, resistividad, cargabilidad, velocidad de la onda y porosidad) de las rocas aflorantes al sur de la Mesa de Los Santos por medio de muestras de roca en el laboratorio.
- Realizar modelos de la respuesta geofísica al sur de la Mesa de los Santos a partir de los antecedentes, las propiedades físicas obtenidas de las muestras de roca y datos adquiridos de magnetotelúrica.
- Elaborar perfiles de resistividad a partir de los datos de magnetotelúrica, ajustándolos con las mediciones registradas en laboratorio.
- Plantear diseños y áreas de adquisición de métodos geofísicos a partir de los antecedentes, la topografía y las propiedades físicas de las muestras de roca.

2 Marco de referencia

2.1 Marco geológico regional

La Mesa de Los Santos es una planicie morfológica perteneciente a los municipios de Los Santos, Piedecuesta y Girón, en la región de mesas y cuestras del departamento de Santander según Julivert *et al.* (1964). Su extensión es de aproximadamente 430 km², su altitud es 1.650 msnm y se encuentra limitada por la quebrada Los Montes al norte, por el río Manco al noreste hasta que desemboca en el río Chicamocha, el cual limita la Mesa de los Santos en la parte sur, y por último por el río Sogamoso al suroeste desde el lugar donde se unen los ríos Chicamocha y Suárez (figura 2).

En la Mesa de Los Santos afloran diversos tipos de rocas, no obstante, predominan las siliciclásticas, lodolitas y carbonatadas (Vargas, 2008). Las rocas más antiguas son de edad Paleozoica (Esquistos de Silgará) y están expuestas en el borde este y sureste, predominan esquistos micáceos cloríticos. Esta formación es intruida por rocas ígneas de edad Mesozoica denominadas Granito de Pescadero, las cuales afloran hacia el este como cuerpos alargados en la dirección N-S. Además, ocurre otra unidad geológica mesozoica llamada Formación Jordán, que se encuentra aflorando en la vertiente norte del río Chicamocha, en la vertiente oeste del río Sogamoso y sobre la carretera de La Punta – Piedecuesta; la unidad está conformada por limolitas intercaladas con areniscas lodosas y conglomerados líticos rojizos. Suprayaciendo a la Formación Jordán se encuentran rocas del Cretácico Inferior: formaciones Los Santos, Cumbre, Rosablanca, Tablazo y Paja (Vargas, 2008) (figura 3). Aunque, algunos mapas del área elaborados por Julivert *et al.* (1964), Ward *et al.* (1973) y Cediél (1968) reportan la presencia de un espesor delgado de la Formación Girón, cuya edad corresponde al Jurásico Superior e infrayace a las unidades del Cretácico Inferior nombradas anteriormente.

Figura 2

Mapa geológico de la zona de estudio en la Mesa de Los Santos. Geología tomada de García-Arias et al. (2024b), los cortes C1-C1', C2-C2' y C3-C3' son tomados de Carrillo y Silva (2024).

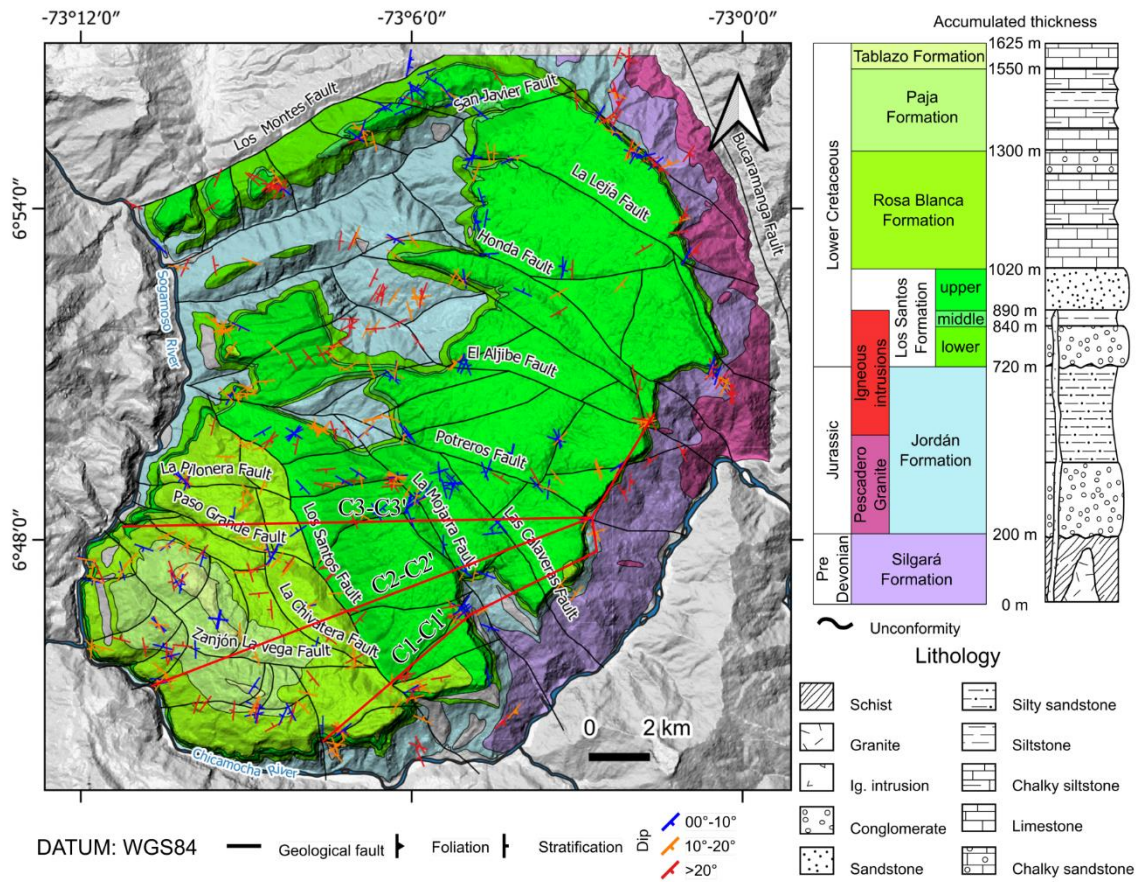
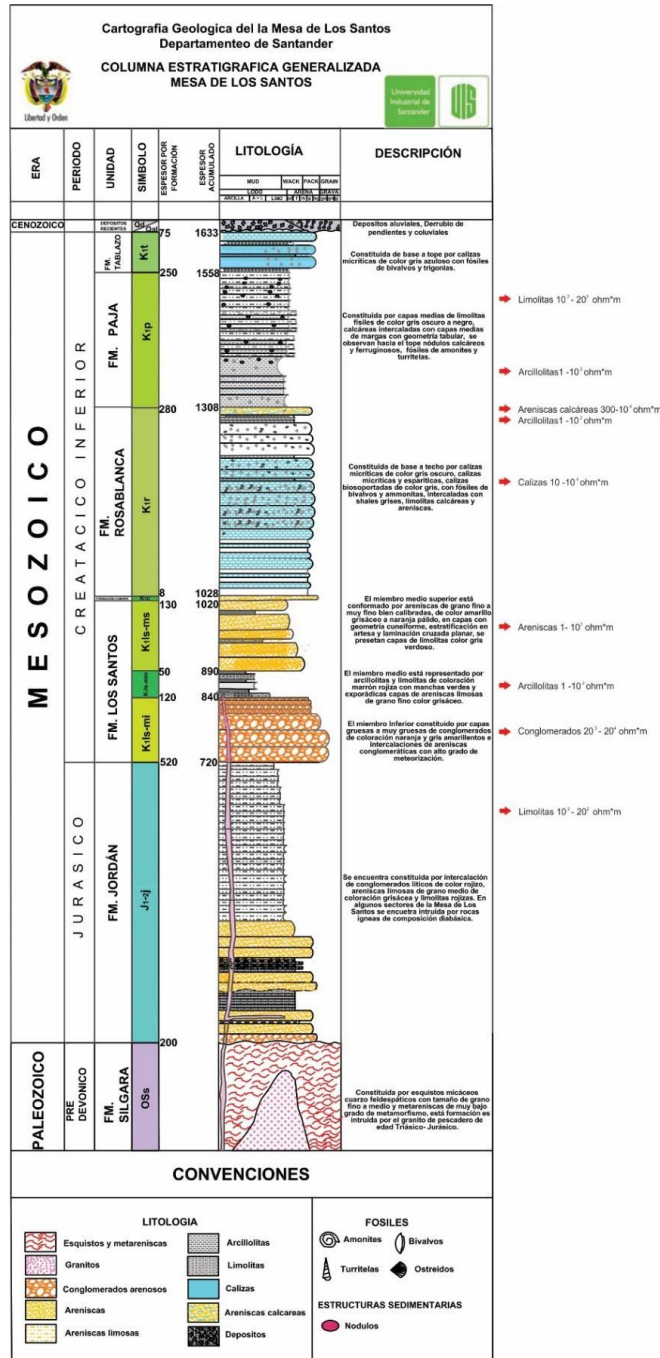


Figura 3

Columna estratigráfica generalizada de la Mesa de Los Santos (modificada de Vargas, 2008) junto con valores de resistividades esperados para las litologías considerando información de literatura (tomados de Lowrie, 2007; Telford et al., 1990, Arias et al., 2012 y Jackson, 2011).



En el trabajo de Vargas (2008) se expone que la Formación Los Santos se encuentra aflorando en el NE y en el SW del área y se presenta en escarpes y en zonas de pendientes suaves a planas. Debido a su heterogeneidad litológica, fue dividida en tres miembros: en su parte basal está compuesta por conglomerados arenosos y areniscas conglomeráticas, seguido por limolitas y arcillolitas intercaladas con areniscas de grano medio a muy fino, y en la parte superior presenta cuarzoarenitas y sublitareniscas. La Formación Cumbre se halla aflorando únicamente hacia el oeste de la zona y está formada por areniscas de grano medio intercaladas con limolitas y areniscas calcáreas. Seguidamente, la Formación Rosablanca aflora en la parte SW de la Mesa de los Santos en un bloque suavemente basculado hacia el suroeste y también hacia el este del municipio Los Santos; está constituida por calizas en capas gruesas tabulares y en su base ocurren lodolitas calcáreas intercaladas y acumulaciones de yeso. La Formación Paja se encuentra expuesta al suroeste de la zona en las pendientes suaves y pequeños escarpes, se caracteriza por presentar limolitas con concreciones de caliza y láminas de yeso hacia la base y por arenisca arcillosa intercalada con limolitas calcáreas hacia el techo. La Formación Tablazo se halla aflorando al suroeste de la Mesa de los Santos con presencia de areniscas calcáreas y calizas fosilíferas con fracturas rellenas de calcita (Vargas, 2008).

Finalmente, se encuentran los depósitos aluviales y de derrubios; los primeros afloran en los valles de los ríos Sogamoso y Chicamocha, y son originados por hidrogravitación, mientras que los depósitos de derrubios se observan en los escarpes de la Mesa de Los Santos, cercanos al cañón del río Chicamocha (Vargas, 2008). La compilación de todas estas unidades geológicas es mostrada en la columna estratigráfica de la figura 3, exhibiendo valores de resistividades en las unidades que se tendrán en cuenta para la adquisición geofísica.

Por medio del análisis de los patrones de fractura y estrías, Tarazona y Vargas (2020) y Tarazona-Lizcano *et al.* (2021) determinan la orientación preferencial de las fracturas en la zona sur es N60-70W. Además, reconocieron que existen dos tensores principales (A y B) asociados a fallas NW-SE y WE, respectivamente, ambos indicando un régimen de esfuerzos transcurrente. El tensor A está relacionado con fallas como Potreros, Las Calaveras, La Mojarra, Los Santos y La Chivatera, y presenta una cinemática sinistral con componente inverso.

Recientemente, García (2022) y García-Arias *et al.* (2024b) profundizó en el estudio estructural e identifica una dirección principal de esfuerzo WNW, asociada a un movimiento

horizontal de los bloques adyacentes (sistema transcurrente) y clasifica las fallas La Lejía, Honda, El Aljibe, Potreros, Paso Grande y La Chivatera como fallas de rumbo sinestrales con componente normal, y como fallas de rumbo dextral con componente normal las fallas Zanjón de La Vega y La Pilonera. Las fallas Los Santos, Las Calaveras y La Mojarra son sinestrales con componente inverso, mientras que las fallas Los Montes y San Javier son dextrales con componente inverso.

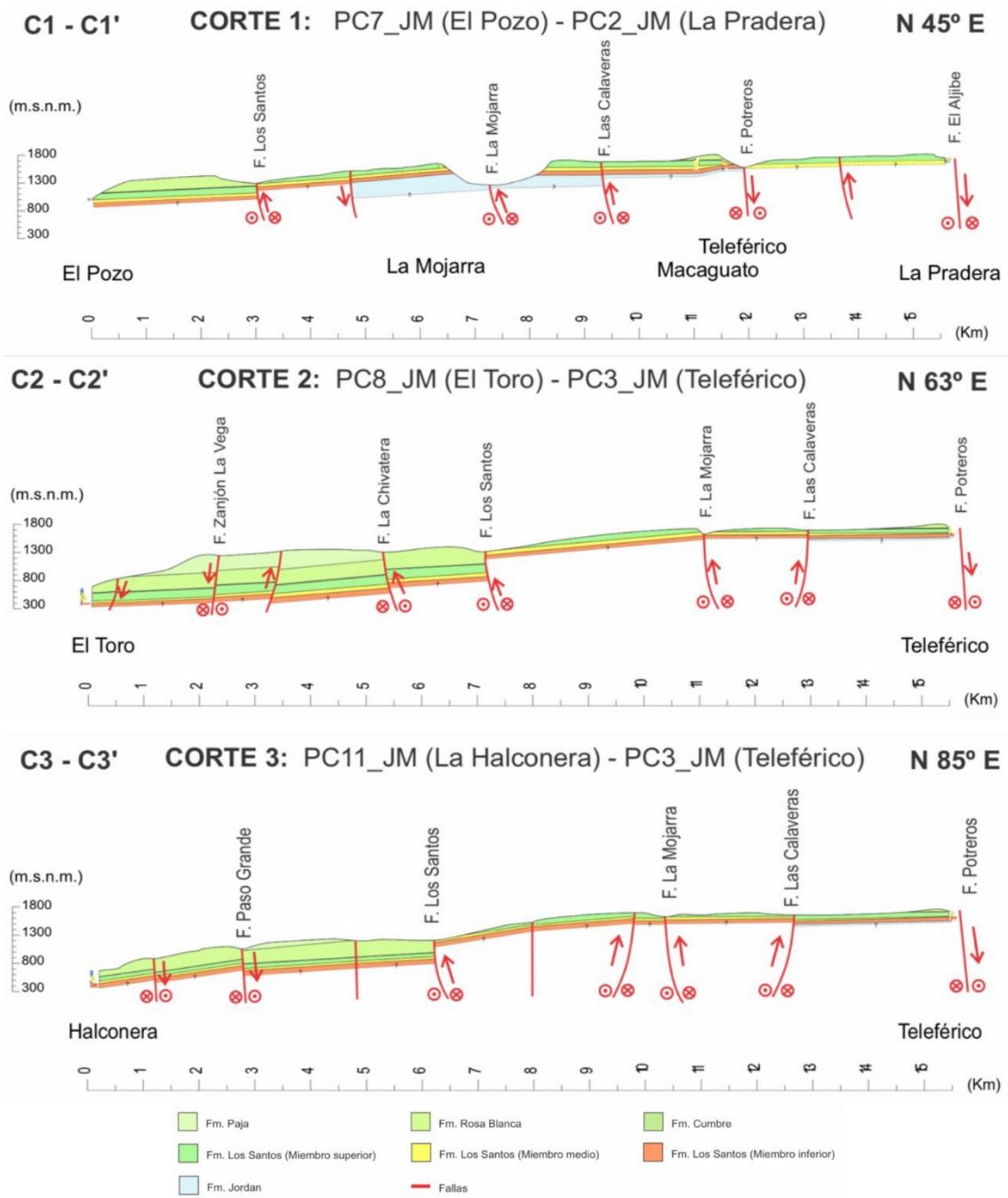
Por otro lado, se ha definido a la Mesa de los Santos como un sistema morfoestructural de bajo ángulo y con buzamiento al occidente (Gómez y Cuervo, 2012) y su fracturamiento presenta dos direcciones preferenciales NW-SE y SW-NE según García (2022).

Carrillo y Silva (2024), mediante el uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV), generaron Modelos Digitales de Afloramiento (MDA) que permitieron realizar correlaciones estratigráficas y la cuantificación de patrones de fractura en las formaciones aflorantes de escarpes y zonas de difícil acceso. En este estudio se construyeron seis cortes geológicos, de los cuales tres corresponden al sector sur de la Mesa de los Santos, donde afloran las formaciones analizadas en el presente trabajo.

En la interpretación de estos tres cortes (Figura 4), los autores destacan que la Falla Los Santos presenta un comportamiento inverso con componente sinistral y vergencia hacia el noreste, cuyo desplazamiento genera una clara discontinuidad en los estratos. A partir del análisis de panorámicas y de la información derivada de los MDA, estiman que la Formación Rosa Blanca alcanza espesores superiores a 300 m. Asimismo, indican que la Formación Los Santos presenta un adelgazamiento hacia el este, pasando de aproximadamente 250 m a cerca de 160 m de espesor.

Figura

Cortes geológicos C1-C1', C2-C2' y C3-C3' propuestos por Carrillo y Silva (2024).



2.2 Fundamentos métodos geofísicos

2.2.1 Magnetotelúrica

La magnetotelúrica es una técnica pasiva que tiene como fuente las variaciones naturales del campo electromagnético de la Tierra en el tiempo, originadas en la ionosfera debido a la actividad solar primordialmente; a este campo se le conoce como campo primario y cuando llega a la superficie provoca distribuciones de cargas y de corrientes, las cuales desencadenan el campo secundario. Gracias a esto, en superficie el método magnetotelúrico logra medir las variaciones temporales de los campos eléctrico y magnético (E y H) resultantes de la superposición de los campos primarios y secundarios. Así, el método MT determina los componentes del campo magnético, que en nuestro caso serán H_x y H_y y las del campo eléctrico E_x y E_y (Piña, 2014), ver apéndice a.

Para aplicar el método MT de manera correcta se deben cumplir las siguientes suposiciones (Pineda, 2018):

- Las ecuaciones de Maxwell son obedecidas.
- Las fuentes de campo electromagnético (EM) natural generadas por sistemas de corrientes ionosféricas a gran escala, localizadas lejos de la superficie de la Tierra, pueden considerarse como ondas uniformes polarizadas en plano que avanzan en la Tierra con una incidencia casi vertical.
- Las corrientes de desplazamiento variables en el tiempo (causados por efectos de polarización) son despreciables comparados con las corrientes de conducción variables en el tiempo.
- Las variaciones en la permeabilidad magnética y en la permitividad eléctrica se asumen como despreciables.

Las variaciones registradas en el tiempo de los campos se deben cambiar al dominio de la frecuencia, existen varias formas de hacerlo, pero el proceso más conocido es por medio de las transformadas de Fourier. De esta manera, se podrá calcular el tensor de impedancias que vincula el campo eléctrico y el campo magnético y por último, se halla la distribución de la resistividad eléctrica de los materiales a profundidad (Piña, 2014). Hay que tener en cuenta que el resultado depende del medio, si es homogéneo e isotrópico, el tensor de impedancia será un escalar. Sin

embargo, como en la mayoría de los casos, si el medio presenta heterogeneidad lateral y anisotropía, el tensor de impedancia será representado por un matriz (Vozoff, 1972).

2.2.2 Tomografías de resistividad eléctrica

Los métodos de prospección geoelectrica en corriente continua se fundamentan en la teoría general del campo eléctrico estacionario y se basan en detectar los efectos superficiales que produce el flujo de una corriente eléctrica, natural o inducida por el subsuelo (Toledo Baca, 2015). La electricidad que pasa a través de un material cualquiera puede ser entendida a través de la Ley de Ohm, la cual establece que la diferencia de potencial (ΔV) medida en dos puntos entre los cuales circula una corriente (I), es proporcional a la resistencia (R) que opone dicho medio al paso de electricidad:

$$\Delta V = I * R \quad (1)$$

La resistencia R está definida por la resistividad (ρ), que es una característica propia del medio, y por la longitud (L) de un cilindro imaginario (trazado con relación a donde fluya la corriente eléctrica) sobre su área transversal (A_t), de forma tal que:

$$R = \rho * (L/A_t) \quad (2)$$

Así pues, la relación entre la diferencia de potencial o voltaje y la resistividad para un material cualquiera está definida como:

$$\Delta V = I * \rho * (L/A_t) \quad (3)$$

Para las rocas, la resistividad eléctrica tiene unidades de Ohmios metro ($\Omega \cdot m$) y está influenciada por propiedades intrínsecas como la porosidad, permeabilidad, contenido de iones disueltos y tipo de fluido presente. El factor condicionante para los contrastes de resistividades eléctricas dentro de una misma roca en la mayoría de los casos es el fluido de poro (Telford *et al.*,

1990). Así pues, se obtienen anomalías eléctricas que, para el caso de fracturas, se dan gracias a la diferencia de resistividad con el entorno circundante debido a presencia de fluidos, mayor porosidad y contenido de iones disueltos.

El método geofísico de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) se basa en la obtención de modelos 2D o 3D del subsuelo. Su principio físico es el mismo que un el SEV (Kearey *et al.*, 2002; Lowrie, 2007). Sin embargo, a diferencia de los SEV, las tomografías cuentan con un mayor número de electrodos, distribuidos a espaciamiento equidistante (Figura 6). La distancia de los electrodos condicionará la resolución y la profundidad máxima a alcanzar por la TRE, de manera que, a menor separación, mayor resolución, pero menor profundidad. De esta forma se irá obteniendo la variación de resistividad del subsuelo tanto en profundidad como lateralmente condicionadas por las características geológicas locales (Berlanga, 2013).

El método de TRE se lleva a cabo a lo largo de líneas en una dirección determinada, donde se introduce una corriente eléctrica y se analiza la respuesta del subsuelo mediante el dispositivo receptor. El resultado de este proceso son datos de resistividades aparentes (apéndice a). Se caracteriza por ser una técnica multielectrónica cuyo arreglo depende de los objetivos de estudio (Ontiveiros, 2003).

A continuación, se muestran los arreglos más utilizados para los estudios de resistividad (apéndice a). La elección del mejor arreglo depende del tipo de estructura que se vaya a cartografiar, la sensibilidad del resistivímetro y el nivel de ruido a fondo. Entre las características que deben tenerse en cuenta se encuentran: la sensibilidad del conjunto a los cambios verticales y horizontales de la resistividad del subsuelo, la profundidad de investigación, la cobertura horizontal de los datos y la intensidad de señal (Loke, 1999).

2.2.3 *Sísmica de refracción*

La exploración sísmica somera considera la emisión y recepción de ondas sísmicas (energía elástica) generadas en la superficie, las cuales se transmiten hacia el interior de la Tierra en forma de ondas sísmicas y regresan a la superficie después de haber sido reflejadas o refractadas por las discontinuidades que se encuentran en el subsuelo. La transmisión de las ondas está influenciada por las características geomecánicas del subsuelo, propiedades físicas del medio por el cual se desplazan, en particular por los contrastes de velocidad de propagación y densidad de los cuerpos rocosos (Lowrie, 2007; Lazcano, 2007). La exploración sísmica somera considera dos tipos principales de ondas sísmicas, las ondas de cuerpo y ondas de superficie (apéndice a).

La energía generada por la fuente genera ondas elásticas, 67% de la energía aplicada se propaga como ondas Rayleigh, 27% como ondas secundarias y 7% como ondas primarias (Woods, 1968). Las ondas de cuerpo se dividen en dos tipos, ondas primarias y ondas secundarias. Las ondas Primarias o también llamadas onda dilatacional, longitudinal, irrotacional, compresional u Ondas P, durante un evento sísmico son las primeras ondas en registrarse en el punto de observación y tienen una amplitud relativamente pequeña y período corto. Estas ondas generalmente viajan a una velocidad entre 70 y 140% mayor que las ondas S (Lazcano, 2007) y generan un movimiento de partículas en la dirección de propagación, comprimiendo y dilatando el medio por el cual se propagan.

En la sísmica de refracción se mide el tiempo de propagación de las ondas mecánicas, transcurrido entre un sitio donde se generan ondas sísmicas y la llegada de éstas a diferentes puntos de medición. Para esto se disponen una serie de sensores (geófonos) de manera colineal a distancias conocidas, formando lo que se conoce como tendido. A una distancia conocida en el tendido, punto de disparo, se generan ondas sísmicas con la ayuda de un martillo o por la detonación de

explosivos, las cuales inducen vibraciones en el terreno que son detectadas por cada uno de los sensores en el tendido. Las ondas P, también conocidas como ondas longitudinales, son las de mayor interés en la refracción sísmica. Las leyes que rigen la propagación y la trayectoria de las ondas sísmicas en la refracción son las mismas que se utilizan en óptica (Lowrie, 2007):

- Principio de Huygens.
- Principio de Fermat
- Ley de refracción (o de Snell)

El método de refracción sísmica utiliza las propiedades de refracción de las ondas de cuerpo con el fin de interpretar la velocidad y la estructura geológica en la cual viajó la onda. La refracción es el fenómeno en el que una onda cambia de dirección debido a un cambio en la densidad del medio por el que esta viaja. El estudio de las ondas refractadas se fundamenta en la Ley de Snell que establece que la relación entre el seno del ángulo de incidencia y el ángulo de refracción es igual a la relación de las velocidades de fase en los dos medios de comunicación (Lowrie, 2007):

$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad 1$$

Si la capa subyacente es más densa que la capa anterior V_1 , la onda refractada incidirá a cierto ángulo a lo largo de la frontera entre las dos capas y se propagará a una velocidad V_2 ; este ángulo se conoce como el ángulo crítico. Las ondas que viajan a lo largo de la frontera se refractarán de nuevo en la capa superior y se conocen como frente de onda. El principio en la refracción es que la onda refractada críticamente tiene una velocidad más rápida que la onda directa debido a las propiedades físicas de la segunda capa. En algún momento el frente de onda alcanzará los geófonos antes que la onda directa (apéndice a).

Debido a la velocidad de la onda refractada, a una cierta distancia conocida de la fuente, el frente de onda llegará a los geófonos antes de que la onda directa. Esto es $V_1 < V_2$. En refracción,

los trenes de ondas se registran y los tiempos de la primera llegada se utilizan para determinar la velocidad de las ondas tipo P (V_P) y ondas tipo S (V_S). Esto se realiza midiendo el tiempo que tarda la onda en propagarse a través de una distancia conocida y se puede calcular mediante el trazado de una línea a través de los puntos de la primera llegada en un gráfico de tiempo de viaje contra espaciamiento entre sensores (Lowrie, 2007).

La pendiente de la línea es la lentitud o la inversa de la velocidad (apéndice a); puesto que la velocidad media en un espacio homogéneo es constante, es así como se puede ver fácilmente múltiples capas basadas en la presencia de líneas consecutivas con mayores pendientes. Sin embargo, la refracción sólo puede detectar capas de sucesivo aumento de la velocidad conforme aumenta la profundidad. Es por eso que adquirir registros a partir de los extremos de la línea de adquisición y de punto a lo largo del interior de la línea (puntos medios), nos permite obtener una imagen más detallada de la estructura del suelo incluyendo la inclinación de las capas y las posibles discontinuidades. Los resultados extraños y confusos en el método de refracción sísmica son un indicador de la presencia de una estructura geológica compleja. Las pruebas de refracción ofrecen generalmente una única solución (pendientes que indican velocidades), mientras que el análisis de dispersión de ondas de superficie puede producir varios modelos y es el ejercicio del geofísico escoger el modelo que mejor represente sus observaciones de campo (Lowrie, 2007). Los espesores de la primera capa se pueden calcular utilizando las dos velocidades y la distancia a la que las dos líneas de velocidad interceptan.

2.3 Propiedades físicas de la roca

Un material de roca puede ser considerado como isotrópico respecto de una propiedad física determinada cuando el valor de esa propiedad no varía al cambiar la dirección de medición

(la propiedad es escalar). Por el contrario, un material es anisotrópico cuando la propiedad varía respecto la dirección de medición (la propiedad es vectorial). En la exploración geológica, geofísica e hidrológica, entre otras, algunas de las propiedades de mayor interés son la porosidad, densidad, velocidad de la onda tipo P, resistividad y cargabilidad eléctrica para la evaluación de áreas de potencial significativo.

2.3.1 Porosidad

La porosidad de un material es el porcentaje del volumen total que está ocupado por poros. Los poros pueden estar rellenos de fluidos si el material está saturado, o de aire y fluidos si no está saturado (Navarro *et al.*, s.f.). La porosidad se expresa así:

$$n = \frac{V - V_s}{V} * 100$$

Donde, n es la porosidad, V es el volumen total que corresponde al volumen de la parte sólida (V_s) más el volumen de los poros.

Se denomina porosidad efectiva si solo se considera el volumen de los poros que están interconectados (Navarro *et al.*, s.f.). Las reservas útiles de un acuífero están condicionadas por esta porosidad, dicho de otro modo, la porosidad efectiva se refiere a la porosidad que permite la circulación del agua (Llamas y Custodio, 1983).

2.3.2 Resistividad y Cargabilidad eléctrica

La resistividad eléctrica indica cuánto se opone ese material al flujo de la corriente eléctrica, se mide en unidades de ohm por metros ($\Omega \cdot m$) y se calcula mediante la siguiente ecuación (Heaney, 2000):

$$\rho = R * \frac{A}{L}$$

Donde, A es el área transversal medida en m^2 , L es la longitud del cilindro de muestra de roca medida en m y R es la resistencia, la cual se expresa en términos de voltaje V (medido en voltios) aplicado a través de los extremos del cilindro y la corriente resultante I (medido en amperios) que fluye a través de él, según la ley de Ohm (Telford *et al.*, 1990):

$$R = \frac{V}{I}$$

La resistencia R puede depender del tamaño y la forma de la muestra, mientras que la resistividad ρ es una propiedad intrínseca puesto que es independiente del tamaño o la forma de la muestra (Heaney, 2000).

Por otro lado, la cargabilidad es la cantidad máxima de potencia eléctrica que se puede enviar a través de una línea de transmisión manteniendo sus condiciones normales de operación (Montoya, 2008).

2.3.3 *Velocidad de onda P*

La onda P genera un esfuerzo de compresión en el material a lo largo de la dirección de propagación del frente de ondas. Por ende, la oscilación se produce en la misma dirección de propagación del material (Hernández, 2017).

Las ondas P o primarias son ondas longitudinales, son las más rápidas de todas las ondas sísmicas. Cuando un terremoto ocurre, estas ondas son las primeras en llegar a la estación de monitoreo sísmico. La siguiente ecuación muestra que la onda P puede viajar a través de sólidos, líquidos y gases, los cuales son comprimibles ($K \neq 0$) (Lowrie, 2007):

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$

Donde α es la velocidad de onda P, K es el módulo bulk, μ y λ son las constantes de Lamé, μ es equivalente al módulo de rigidez.

2.3.4 *Densidad*

La densidad se define como su masa por unidad de volumen. Si una masa m de material homogéneo tiene un volumen V , la densidad ρ es:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

La densidad es una propiedad intensiva del material, es decir que dos objetos constituidos del mismo material tienen igual densidad, aunque tengan masas y volúmenes diferentes; eso se debe a que la razón entre masa y volumen es la misma para ambos objetos (Sears *et al.*, 2009).

2.4 Estudios previos

Varios autores y entidades han realizado estudios geofísicos en la Mesa de Los Santos tales como Ingeominas (2007, 2009, 2010); Gómez *et al.* (2014); García y Gómez (2015); Wilches y Corzo (2015); Ingeoexploraciones (2016) y Díaz *et al.* (2019), entre otros; los cuales han aportado en la búsqueda del recurso hídrico. Sin embargo, estos estudios se han enfocado en las zonas norte y central-sur.

Ingeominas (2009, 2010) realizó 78 sondeos eléctricos verticales (SEV) en la Mesa de Los Santos, con los cuales desarrolló perfiles geoelectrónicos en diferentes partes del área con el fin de analizar el comportamiento de la resistividad en profundidad a lo largo de un plano imaginario formado por varios sondeos (figura 5 y figura 6).

Figura 5

Localización de perfiles geoelectrónicos en la zona sur de la Mesa de Los Santos. Modificado de Ingeominas (2009).

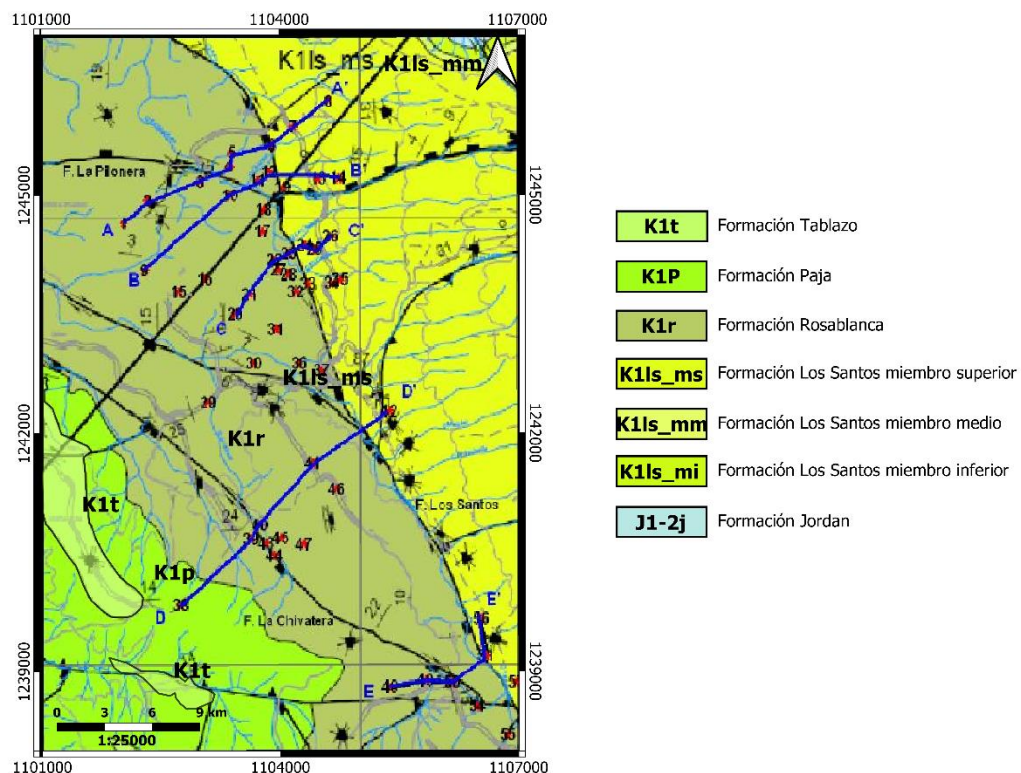
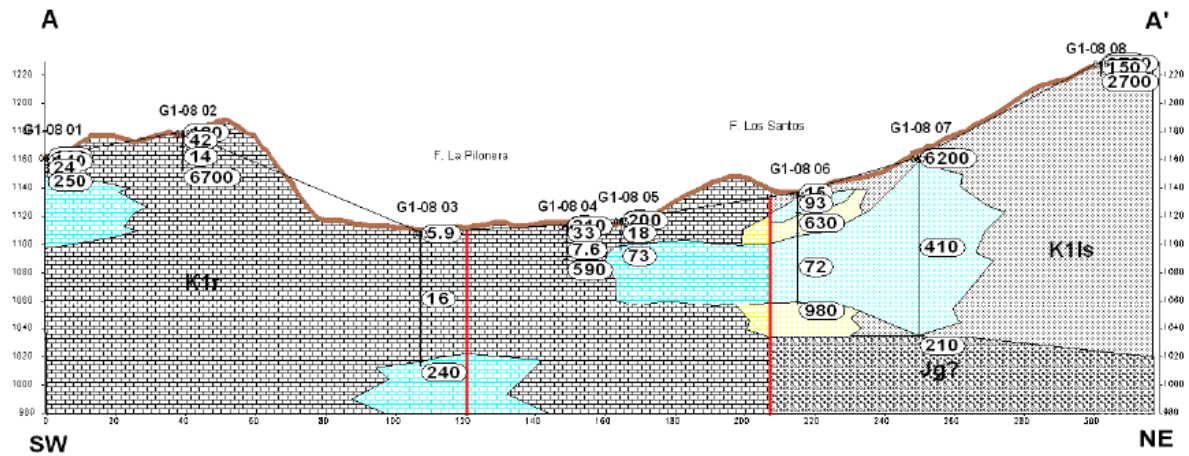


Figura 6

Perfil geoelectrico A-A', construido con los sondeos 01 al 08 y su longitud total es de 3030 m (Ingeominas, 2009).



Gómez *et al.* (2014) realizaron tomografías de resistividad eléctrica (TRE) y relacionaron zonas de bajas resistividad con alto fracturamiento y presencia de agua subterránea en la Formación Los Santos.

Posteriormente, Gómez y García (2015) estimaron espesores y resistividades promedio para los tres miembros de la Formación Los Santos usando sondeos electromagnéticos en dominio del tiempo (SEDT) y TRE, asociando valores de resistividad inferiores a $1000 \Omega \cdot m$ con zonas saturadas de agua subterránea. Wilches y Corzo (2015) desarrollaron SEV, asignaron un rango de resistividad a cada litología e infirieron que la Falla del Duende provoca mayor densidad de fracturamiento en la zona y así mismo afecta a la porosidad secundaria en los materiales.

Ingeoexploraciones (2016) realizaron TRE y dedujeron que las secuencias estratigráficas en la mesa tienen una distribución irregular de permeabilidad por el grado de fracturamiento de las capas. Sanmiguel y Montoya (2017) implementaron refracción sísmica, multichannel analysis of surface waves (MASW) y TRE y calcularon propiedades elásticas a partir de los datos de campo, dando una aproximación de las características estáticas y dinámicas del suelo. Luego, Díaz y Duarte (2019) identificaron tres unidades geoelectricas pertenecientes a la Formación Los Santos, definieron su espesor promedio y rangos de resistividad mediante la aplicación de SEDT y SEV.

Respecto a las propiedades físicas, las unidades geológicas de la zona tienen baja porosidad primaria (Gómez *et al.*, 2014 y Díaz, 2008), pero poseen porosidad secundaria variable de baja a alta según el grado de fracturamiento relacionado con fallas, pliegues y diaclasas, por donde puede circular el agua y recargar el acuífero (Díaz *et al.*, 2009). A continuación, se presentan las tablas de las propiedades físicas de las rocas pertenecientes a las formaciones geológicas Los Santos (tabla 1), Rosablanca (tabla 2), Paja (tabla 3), Tablazo (tabla 4) y Esquisto de Silgará (tabla 6). Estos datos fueron recolectados a partir de los antecedentes de la Mesa de Los Santos y de referencias bibliográficas conocidas de propiedades físicas de las rocas. Cabe destacar que gran parte de estos antecedentes se han enfocado en la parte central y norte de la Mesa y se han concentrado en la Formación Los Santos, puesto que es la formación con mayor interés hidrogeológico. En primera instancia, los espesores fueron tomados de Julivert (1963), Ingeominas (2007), Vargas (2008), Aldana (2008) y Rincón (2008); la porosidad de Díaz (2008) y Díaz *et al.* (2009); rango de resistividades de Lowrie (2007), rango de resistividades entre paréntesis de Ingeominas (2010), promedio de resistividades de Gómez y García (2015); la densidad de Lowrie (2007) y Telford *et al.* (2004) y por último, la velocidad de onda P de Lowrie (2007) y Milsom (2003).

Tabla 1

Propiedades físicas de las rocas de la Formación Los Santos.

Formación geológica	Espesor [m]	Porosidad [%]	Resistividad [$\Omega \cdot m$]		Densidad [$10^3 \text{Kg} \cdot m^{-3}$]		Vel. Onda P [$\text{Km} \cdot s^{-1}$] (Porosidad %)	
			Rango	Promedio	Rango	Promedio	Rango	Promedio
Los Santos	Miembro superior	33 - 95.3		1813.83				
	Miembro medio	21.8 - 41	1 - 10 ³ (30 - 7630)	50.35	1.61 - 2.76	2.32	1.5 (40) - 5.4 (5)	3.0
	Miembro inferior	56 - 152		564.6				
Total	127.8 - 243							

Tabla 2

Propiedades físicas de las rocas de la Formación Rosablanca.

Formación geológica	Espesor [m]	Porosidad [%]	Resistividad [$\Omega \cdot m$]		Densidad [$10^3 \text{Kg} \cdot m^{-3}$]		Vel. Onda P [$\text{Km} \cdot s^{-1}$] (Porosidad %)	
			Rango	Promedio	Rango	Promedio	Rango	Promedio
Rosablanca	Nivel limaquético	44						
	Nivel arenoso	19	Efectiva: 3					
	Nivel margoso superior	52						
	Intercalación caliza	8 a 9						
	Nivel de shales con intercalación de calizas	57	10 - 10^4 (80 - 3050)	1220	1.93 - 2.90	2.54	1.1 (40) - 4.0 (20) - 7.0 (0)	5.4
	Nivel margoso inferior	34						
	Intercalación caliza marrón	10						
	Nivel inferior de calizas y dolomías grises	92						
Total	316 - 317							

Tabla 3

Propiedades físicas de las rocas de la Formación Paja.

Formación geológica	Espesor [m]	Porosidad [%]	Resistividad [$\Omega \cdot m$]	Densidad [$10^3 \text{Kg} \cdot m^{-3}$]		Vel. Onda P [$\text{Km} \cdot s^{-1}$]
				Rango	Promedio	
Paja Lodolitas fisiles negras	200 - 300	Primaria intergranular: 3 - 5 % Eficaz: < 2%	$1 - 10^2$ (18 - 100)	1.7 - 2.5	2.42	1.6 - 5.1

Tabla 4

Propiedades físicas de las rocas de la Formación Tablazo.

Formación geológica	Espesor [m]	Porosidad [%]	Resistividad [$\Omega \cdot m$]	Densidad [$10^3 \text{Kg} \cdot m^{-3}$]		Vel. Onda P [$\text{Km} \cdot s^{-1}$]
				Rango	Promedio	
Tablazo Calizas duras y fossilíferas Calizas arcillosas	30 - 75	Total / Primaria: 2 - 4 %	$10 - 10^4$	1.9 - 2.9	2.54	2.2 - 7

Tabla 5

Propiedades físicas de las rocas de la Formación Jordán.

Formación geológica	Espesor [m]	Porosidad [%]	Resistividad [$\Omega \cdot m$]	Densidad [$10^3 \text{Kg} \cdot m^{-3}$]	Vel. Onda P [$\text{Km} \cdot s^{-1}$]
Jordán Lutitas y limolitas rojizas	15 - 50	5-10	20 - 150	2.20 - 2.40	2.2 - 3.2
Areniscas arcóscas y tobas	30 - 80	8-15	150 - 600	2.35 - 2.55	2.8 - 4.0
Ignimbritas, riolitas y brechas	80 - 200	1-6	500 - 2500	2.45 - 2.70	3.5 - 5.2

Tabla 6

Propiedades físicas de las rocas de Esquistos de Silgará.

Formación geológica	Porosidad [%]	Resistividad [$\Omega \cdot m$]	Densidad [$10^3 \text{Kg} \cdot m^{-3}$]		Vel. Onda P [$\text{Km} \cdot s^{-1}$]
			Rango	Promedio	
Esquistos de Silgará	Primaria intergranular: 0 - 2 %	0 - 500	2.5 - 2.9	2.7	4.9 - 6.2
	No fracturado: 0 - 5 % Fracturado: 5 - 10 %				

Vergel y Remolina (2023) realizaron en una única área de estudio, próximo a la Falla Potrerros, dos perfiles de Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) y tres perfiles sísmicos de los métodos de Tomografía de Refracción Sísmica (TRS) y ensayo Análisis Multicanal de Ondas de Superficie (más conocido como MASW por sus siglas en inglés *Multichannel Analysis of Surface Waves*). En este estudio la TRE 01 y SIS 01 comparten el mismo perfil, en el cual logran identificar de manera indirecta posibles variaciones laterales del nivel freático en el material del miembro superior de la Fm. Los Santos.

Los contrastes de resistividad identificados en la TRE 01 (figura 7) en los primeros 5 m de profundidad se asocian material meteorizado asociado a suelo posiblemente húmedo (valores bajos de resistividad) y material meteorizado asociado a suelo seco (mayores valores de resistividad). A mayores profundidades identifican dos zonas de interés, las cuales se asocian con areniscas de la Fm. Los Santos con presencia de agua (con resistividades $<1530 \Omega \cdot m$), infiriendo dos niveles freáticos a los 15 y 45 m de profundidad. Estos cambios lo asocian con un lineamiento inferido

como fractura. Los valores altos de resistividad ($>2675 \Omega \cdot m$) los asocian al material poroso, fracturado con poca o nula presencia de agua perteneciente al Miembro Superior de la Fm. Los Santos.

El resultado de la TRS de la SIS 01 (figura 8) infieren la presencia de tres capas, asociadas con contrastes o cambios verticales en los valores de velocidad del subsuelo. Para la capa 1 estiman una velocidad promedio de $467,9 \text{ mm/s}$ con un espesor promedio de 5 m, para la capa 2 una velocidad promedio de 2360 mm/s con espesor promedio de 15 m, el último refractor relacionado con la capa 3 se estima una velocidad de 3226 mm/s . Adicional, realizan una diferenciación en profundidad del posible tipo de material considerando el contexto geológico, diferenciando en 4 posibles materiales. El material de la primera capa con un espesor de 2 m corresponde a material superficial meteorizado. La segunda capa de 1 m de espesor se asocia a arena saturada; la tercera capa con un espesor de aproximadamente 14 m correspondería a arenisca que posiblemente se encuentre húmeda, finalmente, la última capa se interpreta como arenisca.

Figura 7

Interpretación propuesta por Vergel y Remolina (2023) de la TRE 01 realizada próxima a la Falla Potreros sobre material del miembro superior de la Fm. Los Santos.

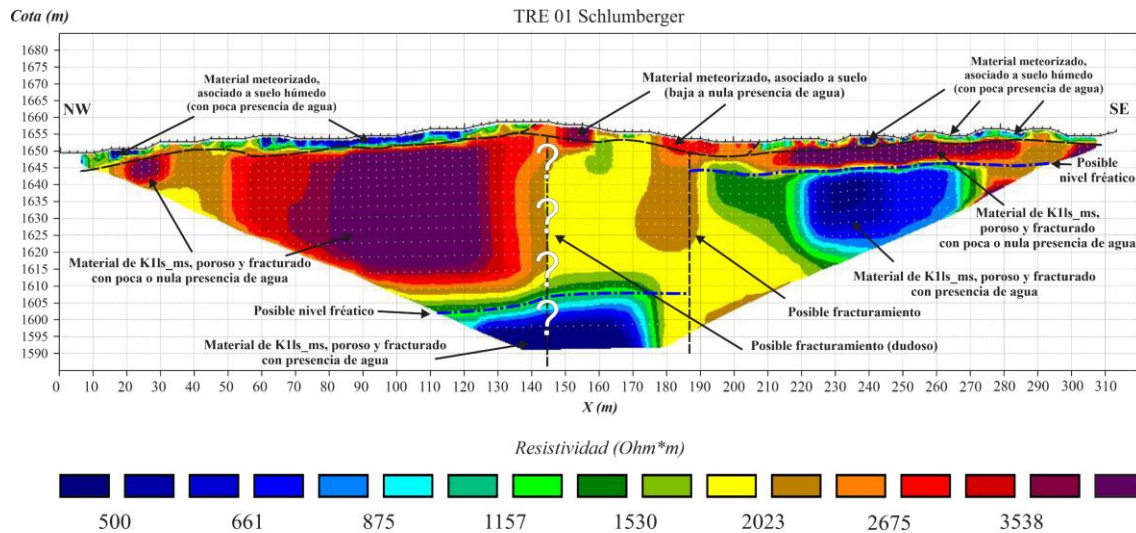
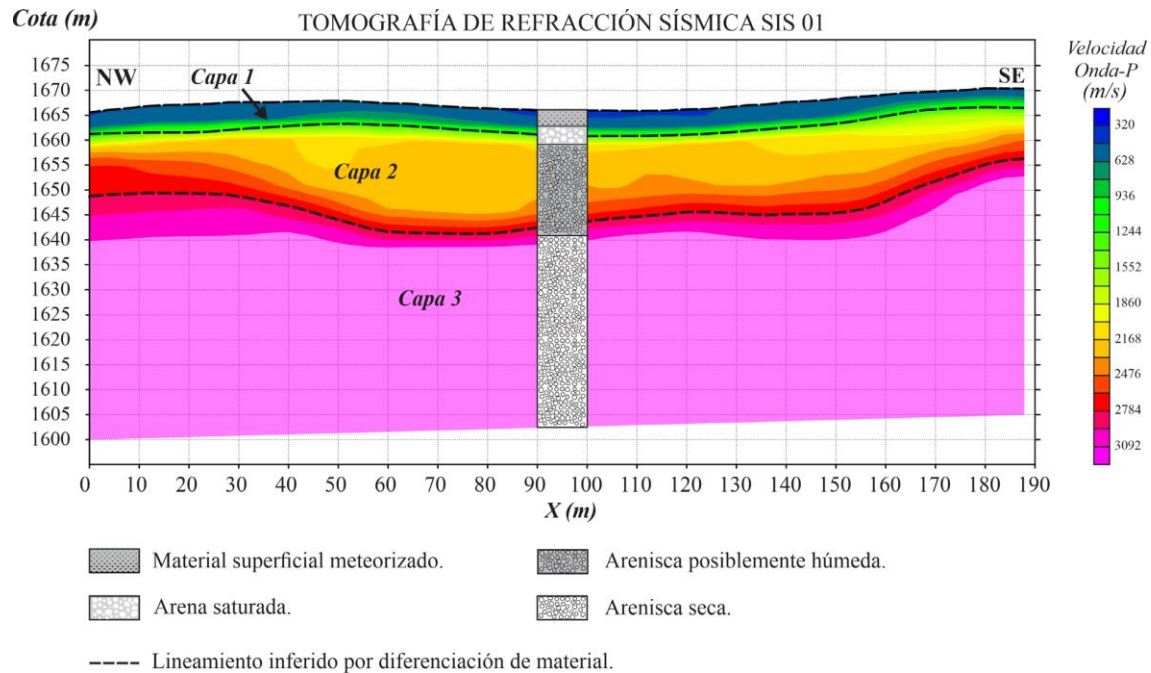


Figura 8

Interpretación propuesta por Vergel y Remolina (2023) de la TRS en el perfil sísmico SIS 01 colineal a la TRE 01.



Ariza y Gómez (2023) correlacionan los contrastes de resistividad eléctrica de Sondeos Eléctricos Verticales Azimutales (SEVA) y TRE con el fracturamiento en cuatro estaciones en la Mesa de Los Santos, dos de ellas localizadas sobre la Formación Rosablanca y las restantes sobre la Formación Los Santos. Próximo a la Falla la Mojarra, donde aflora la Fm. Los Santos, realizan dos TRE denominadas La Mojarra A y La Mojarra B (figura 9). A partir de los resultados generalizan la presencia de tres capas, los valores de resistividad obtenidos para los primeros 5 m de profundidad o primera capa, se asocian con material de suelo meteorizado. Entre los 5 y 15 m de profundidad establecen a la capa dos, caracterizada por valores altos de resistividad eléctrica

(>2675 $\Omega\cdot\text{m}$), interpreta como una zona no saturada del Miembro Superior de la Fm. Los Santos. A profundidades mayores de los 20 m, se localizaría parte de la tercera capa con valores de resistividad bajos (<1157 $\Omega\cdot\text{m}$), la cual consideran como material arenoso del Miembro Superior de la Fm. Los Santos con posible presencia de agua o poco saturada.

Las TRE realizadas próximas a la Falla la Chivatera, donde aflora la Fm. Rosablanca, denominadas La Chivatera 1 A y La Chivatera 1 B (figura 10) generalizan la presencia de dos niveles o capas. La primera capa, con una variación en su espesor entre los 5 a 10 m, se asocia con material de suelo producto de la meteorización del material carbonatado de la Fm. Rosablanca con posibles sectores con presencia de roca fracturada o karstificada. La segunda capa a profundidades mayores de los 5 m con valores bajos de resistividad (<26,8 $\Omega\cdot\text{m}$) se asocia con material carbonatado de la Fm. Rosablanca. Estos valores bajos de resistividad pueden corresponder a la propia naturaleza del material de roca del subsuelo de valores bajos para materiales calcáreos, o a posibles sectores con presencia de agua producto de la karstificación o del fracturamiento, esto último asociado por la presencia de vegetación arbórea en el área de estudio.

Considerando los resultados en conjunto con los SEVA y TRE, Ariza y Gómez (2023) establecen que las variaciones laterales de la resistividad eléctrica evidenciados en los modelos de TRE sería asociados al fracturamiento, soportando el planteamiento de Vergel y Remolina (2023). Este fracturamiento puede servir como canales para el flujo del agua o como límites de sello impidiendo el flujo de agua, dependiendo de la relación con el tensor de esfuerzos.

Figura 9

Interpretación de los modelos 2D obtenido en La Mojarra A (arriba) La Mojarra B (abajo) próximo a la Falla La Mojarra realizados por Ariza y Gómez (2023).

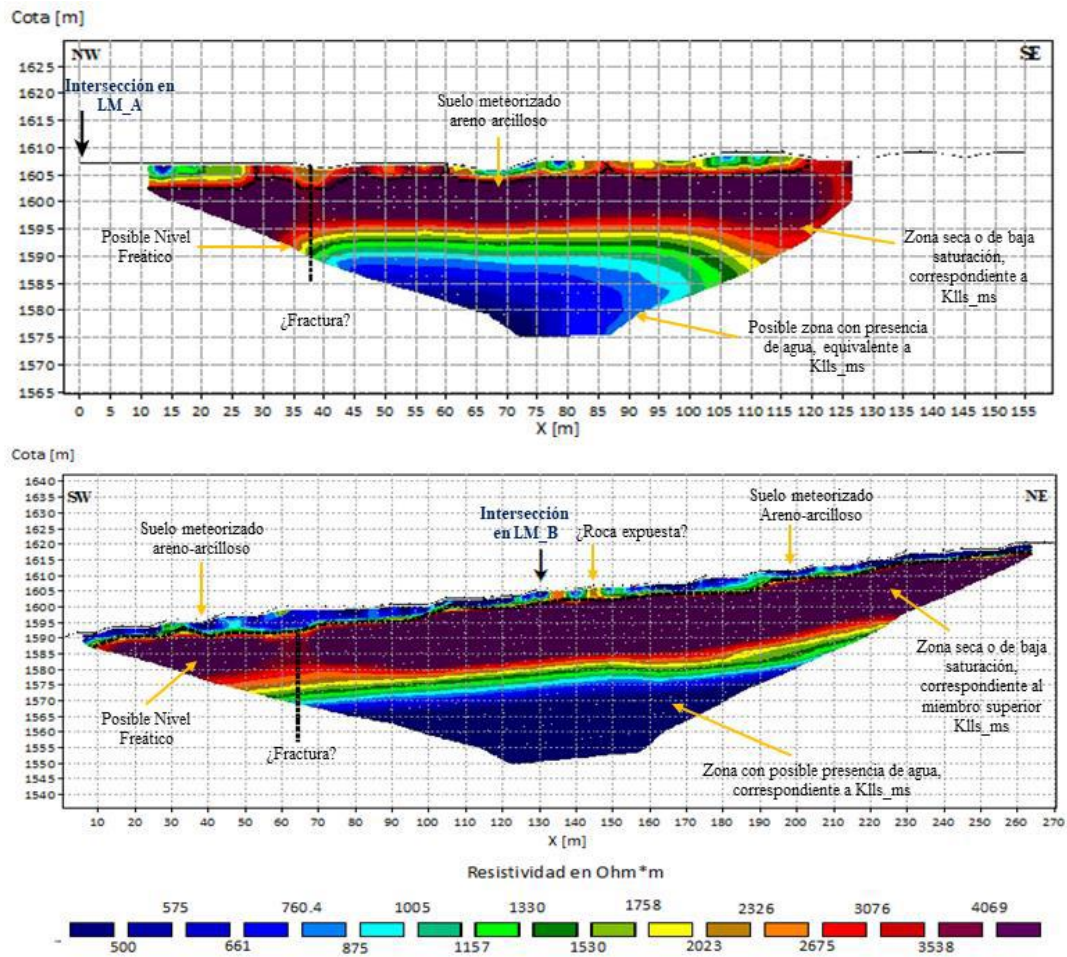
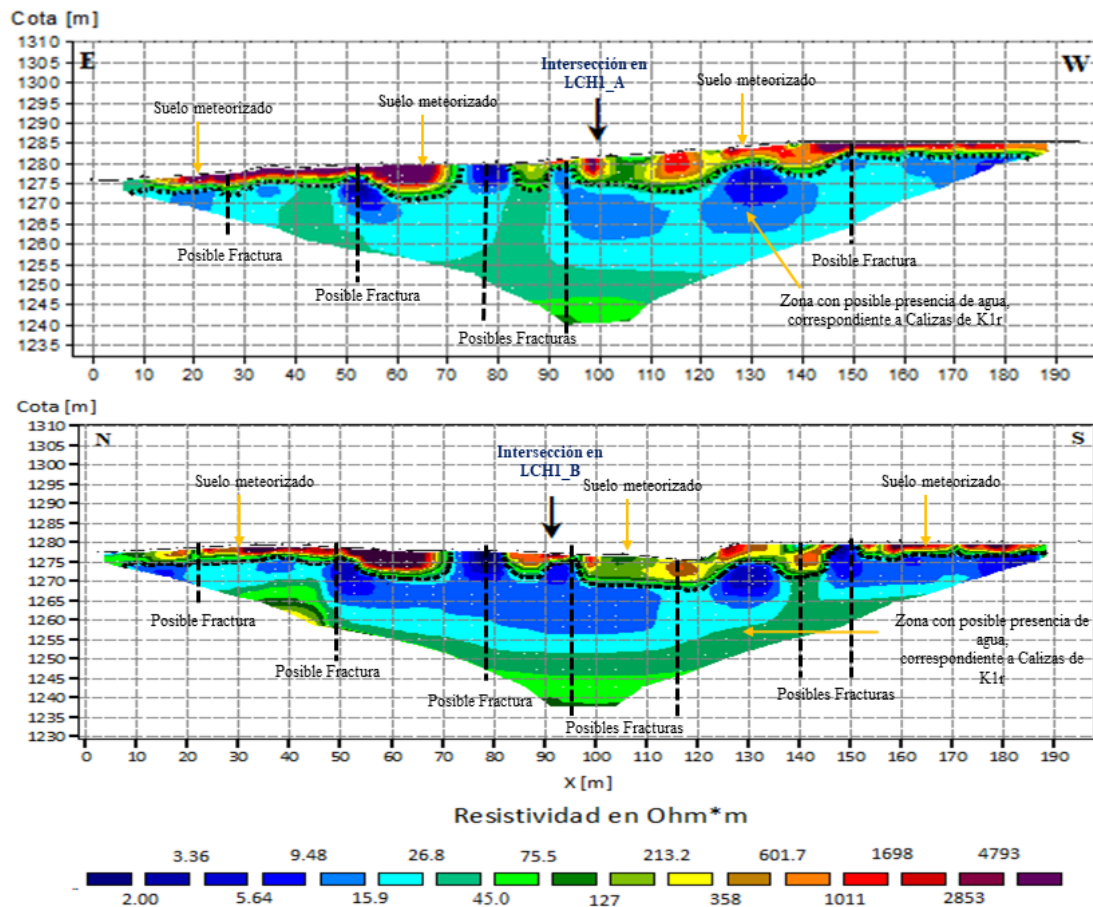


Figura 10

Interpretación de los modelos 2D obtenidos para La Chivatera 1 A (arriba) y La Chivatera 1 B (abajo) próximo a la Falla La Chivatera realizados por Ariza y Gómez (2023).

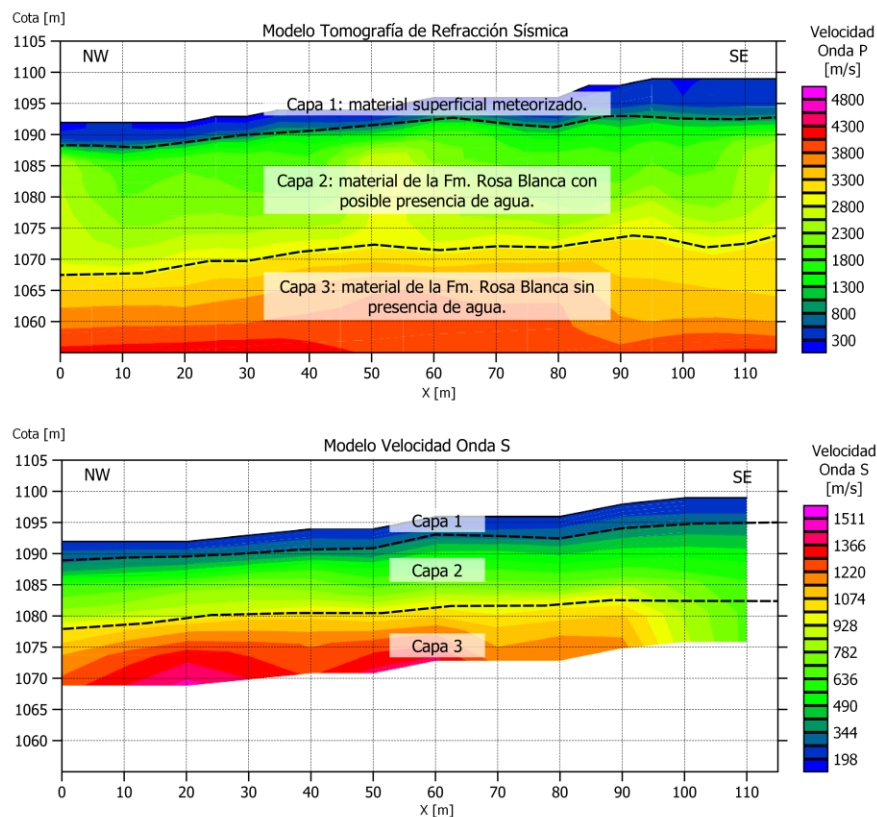


Al suroeste de la Mesa de Los Santos, Rojas (2024) realiza una adquisición sísmica empleando los métodos de TRS y ensayo de MASW (figura 11). A partir del modelo obtenido en la TRS infiere la presencia de 3 capas en el subsuelo. La capa más somera o capa 1 con un espesor promedio de 3 m y velocidades $< 900 \text{ m/s}$ corresponde a material superficial meteorizado; la capa 2 con velocidades entre $900 - 3000 \text{ m/s}$ y espesor promedio de 20 m (profundidades entre los 3 a 23 m) correspondería a arenas o material calcáreos de la Fm. Rosablanca con posible

presencia de agua. La capa 3 se estiman velocidades entre 3000 – 3900 m/s y espesor promedio de 10 m (profundidades entre los 23 a 33 m) correspondiendo a material calcáreo posiblemente fracturado, pero no saturado, y una última capa o refractos (profundidad de 33 m) se estiman una velocidad mayor a 3900 m/s asociados a material de la Fm. Rosablanca menos fracturado o meteorizado posiblemente sin presencia de agua.

Figura 11

Interpretación realizada por Rojas (2024) de la TRS y MASW realizada al suroeste de la Mesa de Los Santos.



Nota: Los modelos obtenidos para la onda P y onda S evidencian contrastes asociados con tres capas correspondientes a la Formación Rosablanca considerando la información geológica de Pinto V. *et al.* (2007). Fuente: Rojas (2024).

3 Metodología

3.1 Pre-campo

Mediante la información bibliográfica recopilada se planificó el trabajo de campo para la adquisición de datos de Magnetotelúrica y recolección de muestras de mano. Se realizó una salida de reconocimiento, para precisar y preparar el equipo técnico y geofísico necesario.

3.2 Trabajo de campo

3.2.1 Magnetotelúrica (MT)

La adquisición de los datos magnetotelúricos fue realizada en el Sur de la Mesa de Los Santos, específicamente en cercanías de la mina El Carrancho con el fin de caracterizar las formaciones de la zona, especialmente la Formación Rosablanca (figura 12). Se llevaron a cabo ocho estaciones para altas y/o bajas frecuencias utilizando el equipo Stratagem EH4 de la empresa Geometrics, ubicadas en puntos geográficos puntuales para poder realizar dos líneas MT. Los datos obtenidos fueron preprocesados internamente por el equipo, el cual verifica cada serie de tiempo depurando los datos que presentaban gran cantidad de ruido. Adicionalmente, el equipo Stratagem proporciona una curva preliminar de resistividad verdadera en cada una de las estaciones; como se observa en la figura 13 para la Estación 3, la cual se empleó como modelo inicial al momento de invertir los datos en el programa ZondMT1D. A partir de las estaciones, se obtuvieron dos líneas de datos magnetotelúricos que fueron procesadas utilizando tres tipos de inversiones: 1D, 1.5D y 2D.

3.2.2 Recolección muestras de roca

En cada estación, se procedió a localizar el punto geográfico en el mapa a través de las coordenadas dadas por el GPS. Después, se identificó la formación sobre la que nos encontramos por medio de las características de las rocas en los afloramientos existentes y por medio del mapa geológico. Además, se realizó el registro fotográfico y el muestreo de las rocas que fueron utilizadas para el estudio de las propiedades físicas en la etapa de laboratorio.

Figura 12

Mapa geológico del área de estudio en la Mesa de Los Santos. Los triángulos azules corresponden a las estaciones de MT, las líneas moradas que atraviesan esos puntos corresponden a las líneas MT (línea 1 en sentido este-oeste, línea 2 noroeste-sureste) y los puntos rojos al muestreo de rocas.

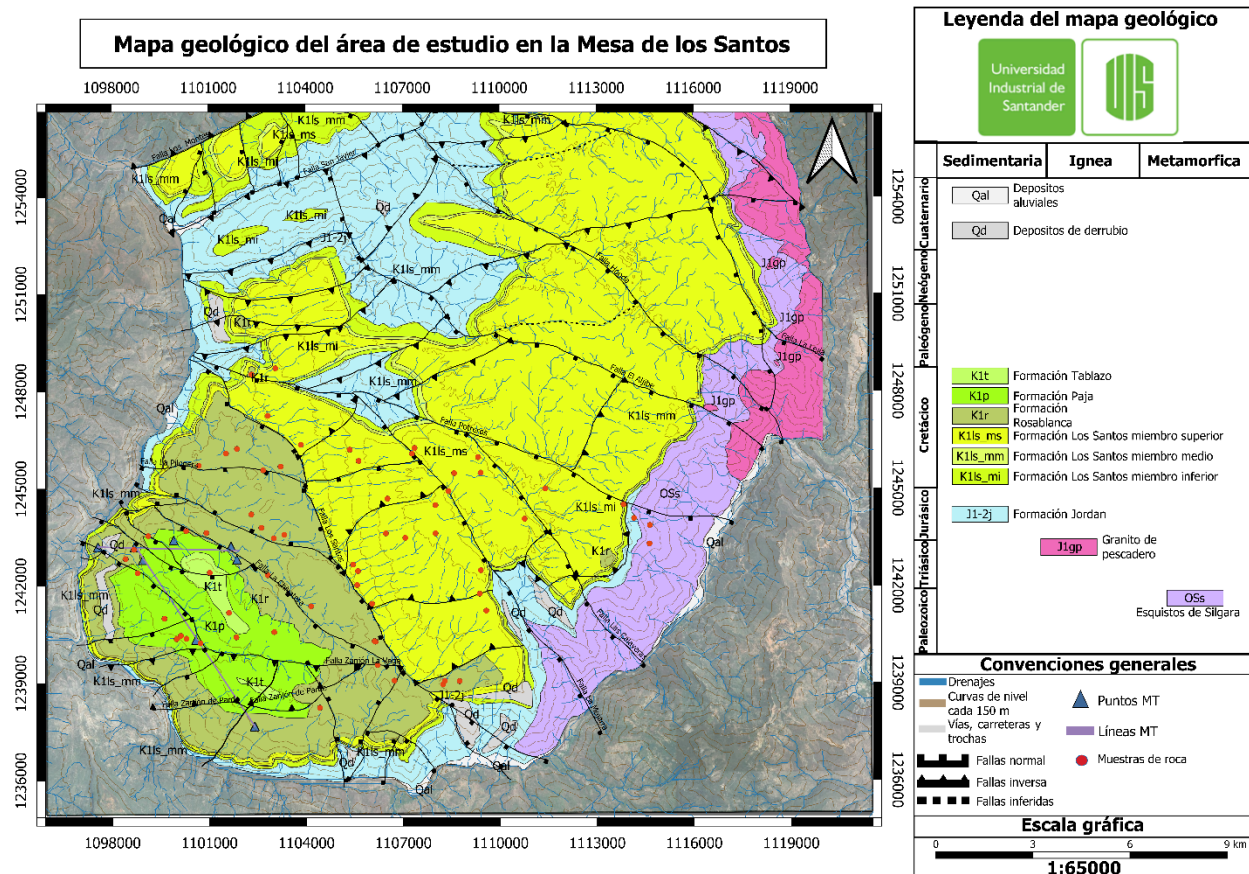
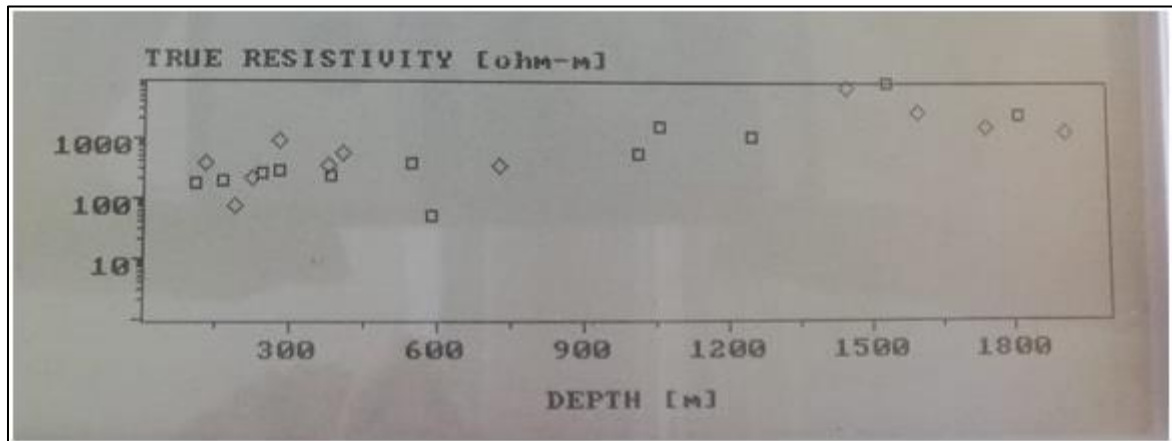


Figura 13

Curva de resistividad verdadera vs profundidad. Modelo preliminar invertido desde el equipo para los datos magnetotelúricos de la estación 3.



3.3 Mediciones en laboratorio

Las muestras de roca que se obtuvieron directamente del afloramiento eran irregulares. Con el fin de que las mediciones de las propiedades físicas fueran comparables entre las muestras, se cortaron núcleos o *plugs* (muestras cilíndricas) de estas rocas. El análisis de laboratorio de estos *plugs* fue compilado en un catálogo que tabula sus propiedades físicas, y el procedimiento es descrito a continuación. La minoría de *plugs* fueron extraídos utilizando el Drilling machine DS-160C perteneciente a la Escuela de Geología y la mayoría de *plugs* por medio del Taladro semiautomático Gincor del Laboratorio de Preparación de Muestras de la Escuela de Geología en el Parque Tecnológico de Guatiguará.

El corte de los núcleos se llevó a cabo considerando que el contenedor de muestras del equipo BLP-630 Automated Gas Porosimeter tiene la capacidad de alojar muestras con medidas máximas de 7.6 cm de longitud y 5 cm de diámetro.

Después de extraer los núcleos de las muestras se dejaron secar por varios días ya que los taladros necesitan agua para cortarlos. En primer lugar, se obtuvieron las mediciones de diámetro, longitud y masa de los *plugs* por medio de un calibrador y una balanza (Professional Digital Table Top Scale I-200 de marca ROHS). Posteriormente, con los *plugs* secos se obtuvieron las

propiedades de densidad, porosidad y por último resistividad y cargabilidad. La resistividad y cargabilidad son las últimas propiedades testeadas ya que el equipo SCIP Tester requiere colocar en contacto la muestra de roca con unas esponjas humedecidas con sulfato de cobre para tomar esta medición.

Seguidamente, los *plugs* fueron sumergidos en un recipiente lleno de agua durante dos días. Aunque algunos de ellos fueron sacados del agua antes de completar el tiempo ya que se disgregaban debido a su grado de meteorización y/o su litología. Al momento de sacar el *plug*, se mide la masa nuevamente y al aplicar la resta entre la masa del *plug* humedecido y la masa del mismo *plug* seco se obtiene la cantidad de agua retenida en gramos. Después, se tomaron de nuevo los datos de resistividad y cargabilidad con los *plugs* húmedos ya que la recomendación del SCIP Tester es realizar las mediciones con las muestras húmedas para conseguir mejores resultados. Sin embargo, las mediciones en seco fueron desarrolladas para poder compararlas y tener el rango de diferencia entre estos valores de resistividad y cargabilidad.

Posteriormente, los *plugs* se secaron por dos días más y luego se realizó la medición de datos de velocidad de onda P y carga puntual, en la cual la roca es fracturada.

Para la medición de la porosidad se utilizó el equipo BLP-630 Automated Gas Porosimeter (OFITE, 2015). Las mediciones de resistividad y cargabilidad se realizó con equipo Sample Core Induced Polarization Tester (SCIP Tester) (Instrumentation GDD, s.f.). Las mediciones de velocidad de onda P se realizarán con el equipo PLT-2W Wireless Point Load Test System (GCTS Testing Systems, 2018).

Existen diferentes formas de calcular la densidad de un sólido. En nuestro caso, determinamos la masa del *plug* con la balanza (Professional Digital Table Top Scale I-2000 de la marca ROHS), la cual mide en gramos. El volumen se puede calcular a partir de las dimensiones (radio y altura) del *plug*, ya que se trata de un cuerpo geométrico conocido como lo es el cilindro.

Para estimar la cantidad de agua retenida se procedió de la siguiente manera: en primer lugar, se procede a la medición de la masa inicial de las muestras en estado seco mediante el uso de una balanza de precisión. Posteriormente, estas muestras son inmersas en un recipiente con agua durante un período de tres días. Una vez concluido este tiempo, las muestras se retiran del recipiente y se secan ligeramente. Finalmente, se procede a la medición de la masa de las muestras

en estado húmedo. La retención de agua se calcula como la diferencia entre la masa de la muestra húmeda y la masa de la muestra seca:

$$\text{Retención de agua (\%)} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100$$

Donde Mh corresponde a la masa de la muestra húmeda y Ms a la masa de la muestra en seco. Una vez obtenidas las mediciones de las propiedades de interés, se generaron gráficos de cajas y bigotes, diferenciando entre muestras húmedas y secas según correspondiera. Adicionalmente, con el fin de visualizar la distribución espacial de las propiedades medidas en laboratorio, se aplicó un método de interpolación por distancia inversa al peso (IDW, por sus siglas en inglés). A partir de esta interpolación, se generaron mapas que permiten representar la variación espacial de dichas propiedades en la Mesa de Los Santos.

3.4 Modelado sintético e inversión

Se generaron modelos indirectos preliminares de Tomografía de Resistividad Eléctrica y Sísmica de Refracción con el propósito de conocer el resultado factible de una adquisición geofísica, considerando los valores de las propiedades obtenidas de las muestras de roca y los antecedentes bibliográficos. Los modelos de TRE se realizaron con el software RES2MOD v3.03.06 (Loke, 1995) y los modelos de sísmica de refracción con el software Plotrefa.

Por otra parte, se realizó la inversión de los datos de magnetotelúrica con el software ZondMT1D. Estos datos fueron organizados en los perfiles definidos (Línea MT 1 y Línea MT 2, como se observa en la figura 11) y posteriormente, fueron procesados de manera conjunta para realizar la construcción del modelo. Previo a la inversión, los datos fueron sometidos a un proceso de control de calidad que incluyó la revisión de las curvas de resistividad aparente y fase, eliminación de ruido y selección de rangos de frecuencia, teniendo en cuenta los resultados de los valores de resistividad obtenidos en el laboratorio para las capas superficiales. Posteriormente, se definió un modelo inicial basado en la información geológica disponible y en los resultados de las inversiones 1D, el cual sirvió como punto de partida para la inversión 2D. La inversión 2D se llevó a cabo mediante un algoritmo iterativo que minimiza la diferencia entre los datos observados y los datos calculados, expresada en términos del error RMS. Este proceso incorpora regularización para garantizar modelos geológicamente plausibles y evitar sobreajustes.

3.5 Propuesta de adquisición geofísica

Para el diseño de la adquisición geofísica, se consideraron los resultados de estudios previos, las mediciones en laboratorio, la simulación mediante modelado directo o sintético y la disponibilidad de equipos de la UIS. Los perfiles de adquisición fueron definidos teniendo en cuenta las variaciones topográficas y las rutas de acceso identificadas durante el reconocimiento en campo y la recolección de muestras de roca. Con base en esta información, se priorizó la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), disponiendo los perfiles de manera perpendicular a las fallas cartografiadas en el modelo estructural de García-Arias *et al.* (2024b). Debido a las limitaciones de tiempo de adquisición de la magnetotelúrica, se incorporó el método de sondeos electromagnéticos transitorios (TEM), utilizando múltiples estaciones para generar un perfil.

4 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la caracterización de las propiedades físicas de las rocas aflorantes al sur de la Mesa de Los Santos, estimadas mediante análisis de laboratorio. Con base en estos datos, junto con antecedentes geológicos, se desarrollaron modelos de respuesta geofísica y se elaboraron perfiles de resistividad ajustados a las condiciones del subsuelo. Asimismo, se definieron áreas y diseños óptimos de adquisición geofísica considerando la topografía y las propiedades físicas de las muestras, con el fin de mejorar la interpretación estructural e hidrogeológica de la zona de estudio.

4.1 Mediciones en laboratorio

El análisis de laboratorio fue realizado a 66 muestras de roca recolectadas en la zona sur de la Mesa de Los Santos, específicamente al sur de la Falla Potreros, de las cuales se extrajeron un total de 99 núcleos. Estas muestras están distribuidas de la siguiente manera:

Tabla 7

Distribución de muestras de roca y núcleos según la formación geológica.

Formación geológica	Número de muestras	Número de núcleos
Formación Tablazo	2	2
Formación Paja	9	13
Formación Rosablanca	26	40
Formación Los Santos	25	40
Formación Jordán	2	2
Esquistos de Silgará	2	2
Total	66	99

Las propiedades físicas que se obtuvieron directamente fueron resistividad en seco y húmedo, cargabilidad en seco y húmedo, velocidad de onda P, porosidad, densidad y agua retenida.

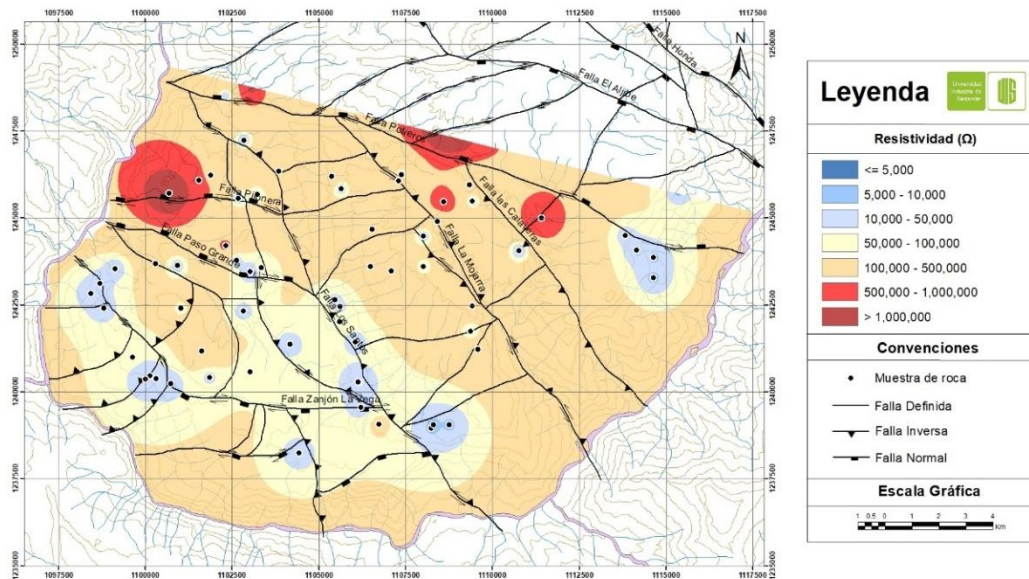
4.1.1 Resistividad eléctrica

En los diagramas de cajas y bigotes se observa que existe un abrupto cambio entre el rango de valores de resistividad en muestras en seco y húmedo (apéndice b). Este contraste tiene relación con la porosidad de las rocas; si la muestra presenta una porosidad alta, tendrá una mayor parte significativa de espacios vacíos que serán rellenados por agua y así disminuirá la resistividad de la roca. Se debe considerar que esta porosidad debe ser efectiva, garantizando que los poros estén interconectados.

En seco (apéndice b) la Formación Los Santos presenta resistividad de 1.000 a 1.000.000 $\Omega \cdot m$ y su mediana es de 120.000 $\Omega \cdot m$. Para la Formación Rosablanca de 500 a 100.000 $\Omega \cdot m$ y su mediana es de 17.000 $\Omega \cdot m$ y para Formación Paja las resistividades son de 1.000 a 70.000 $\Omega \cdot m$ y su mediana es de 9.000 $\Omega \cdot m$. La Fm. Los Santos, constituida por unidades detrítica, presenta valores superiores respecto a las formaciones de rocas carbonatadas, esto es coherente con lo esperado en literatura y también a lo ya mencionado de la presencia de porosidad (figura 14).

Figura 14

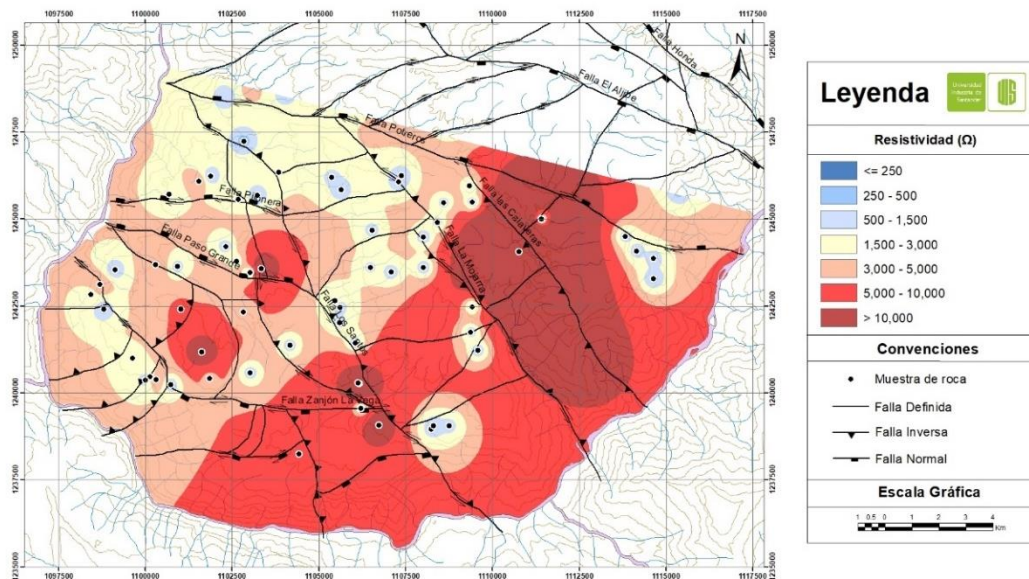
Mapa de resistividad en seco de muestras de roca del sur de la Mesa de Los Santos.



Al evaluar los valores de resistividad de las muestras en húmedo, todos los valores de resistividad se ven disminuidos, ya que el fluido de poro es uno de los factores que influye en la resistividad de la roca. Para la Formación Los Santos tiene resistividad de 70 a $2.200 \Omega \cdot m$ y su mediana es $700 \Omega \cdot m$; la Formación Rosablanca de 100 a $28.000 \Omega \cdot m$ y su mediana es $1.900 \Omega \cdot m$ y la Formación Paja de 200 a $6200 \Omega \cdot m$ y su mediana es $740 \Omega \cdot m$. Debido a su composición detrítica y a la mayor conectividad entre poros, las muestras de la Fm. Los Santos presentan valores inferiores respecto a las unidades carbonatadas. Los valores bajos de resistividad se concentran en su mayoría al oeste del área de estudio, próximos a la Falla Los Santos (figura 15).

Figura 15

Mapa de resistividad en húmedo de muestras de roca del sur de la Mesa de Los Santos.



4.1.2 Cargabilidad eléctrica

En seco (apéndice b), la Formación Los Santos presenta cargabilidad de 2,60 a 31,67 y su mediana es 9,90; la Formación Rosablanca de 1,67 a 47,23 y su mediana es 5,56 y la Formación Paja de 3,02 a 10,81 y su mediana es 5,40. En húmedo (apéndice b), la Formación Los Santos tiene cargabilidad de 3,40 a 22,91 y su mediana es 10,44; la Formación Rosablanca de 2,15 a 14,95 y su mediana es 5,71 y la Formación Paja de 3,36 a 7,77 y su mediana es 4,97. Una manera de diferenciar materiales de semejante resistividad es haciendo uso de la cargabilidad eléctrica, ésta puede ser influenciada por los minerales presentes en el agua, y la litología de las muestras. La Fm. Los Santos presenta valores mayores respecto a las otras muestras, lo que puede ser asociado a la presencia de lodos, los cuales presentan valores de cargabilidad altos (Telford *et al.*, 2004).

Este contraste de litologías se evidencia en los mapas, en el cual se diferencia los límites entre la Fm. Los Santos y Fm. Rosablanca por la Falla Los Santos (figura 16 y figura 17).

Figura 16

Mapa de cargabilidad en seco de muestras de roca del sur de la Mesa de Los Santos.

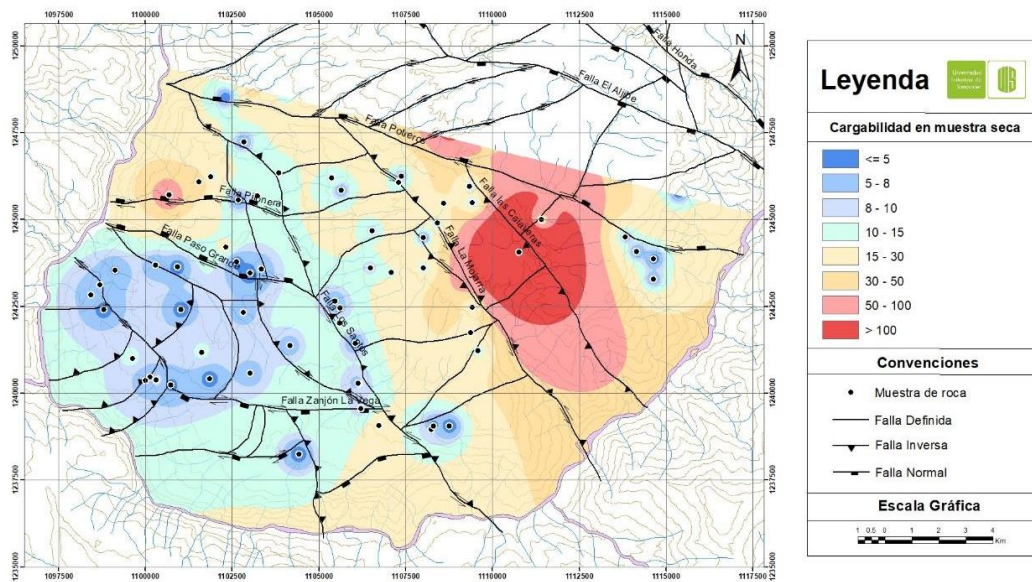
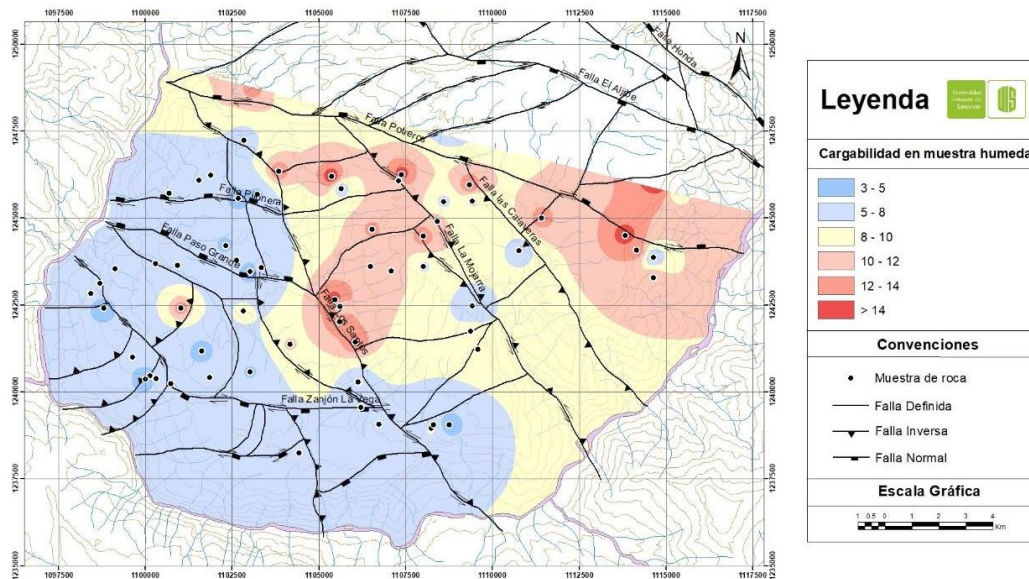


Figura 17

Mapa de cargabilidad en húmedo de muestras de roca del sur de la Mesa de Los Santos.

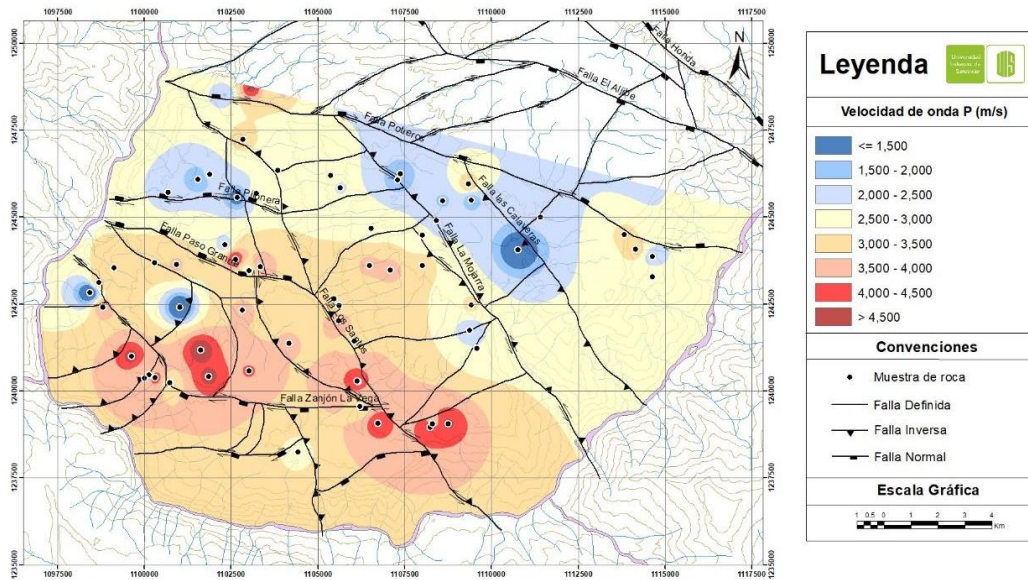


4.1.3 Velocidad de onda P

Los valores de velocidad de onda P (apéndice b), al igual que en otras propiedades, evidencian algunos rangos similares en los valores. Para la Formación Los Santos los valores de la velocidad de onda P es de 1.500 a 4.200 m/s y su mediana es 2.830 m/s; para la Formación Rosablanca de 930 a 5.010 m/s y su mediana es 3.470 m/s y la Formación Paja de 2.780 a 4.810 m/s y su mediana es 4055 m/s. Al evaluar la distribución de estos valores de velocidad (figura 18), se evidencia una diferenciación casi limitada por las fallas geológicas. Específicamente, entre la Falla Potrero y la Falla La Mojarra se estiman valores bajos de velocidad correspondientes a la Fm. Los Santos. Asimismo, la Fm. Rosablanca también presenta valores de velocidad bajos al oeste del área de estudio entre la Falla Los Santos y la Falla Paso Grande. Por otro lado, los valores más altos de velocidad de onda P se localizan al sureste de la Falla Los Santos.

Figura 18

Mapa de velocidad de onda P de muestras de roca del sur de la Mesa de Los Santos.



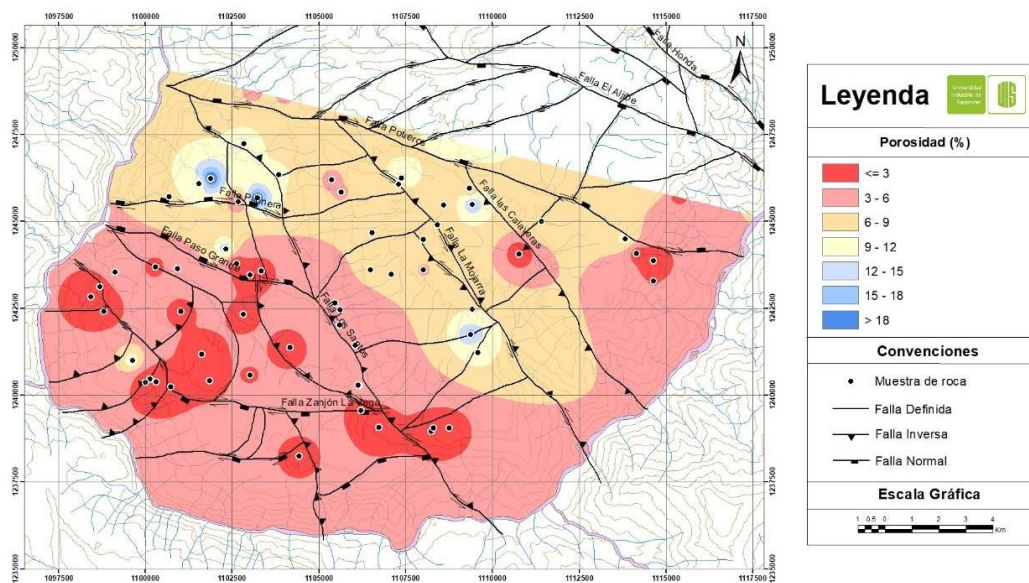
4.1.4 Porosidad

Los valores de porosidad al sur de la Mesa de Los Santos en general son inferiores al 10% (apéndice b). Específicamente, para la Formación Los Santos presenta porosidad de 2,54 a 16,28% y su mediana es 7,20%; para la Formación Rosablanca de 0,25 a 21,76% y su mediana es 1,88% y para la Formación Paja de 1,18 a 11,14% y su mediana es 2,36%. Las variaciones vistas en la resistividad, asociadas con la porosidad, son corroboradas con los rangos amplios de la Fm. Los Santos, la cual presenta los valores más altos de porosidad en comparación con otras formaciones. Cabe mencionar que factores como la meteorización influyen en la porosidad de la roca, rocas con un mayor grado de meteorización tienden a una mayor porosidad respecto a rocas menos meteorizadas y con mayor cementación. Además, la distribución de los valores de porosidad tiene

un comportamiento de relación inversa con la velocidad de onda P, las áreas de baja velocidad corresponden con áreas con porosidades altas (figura 19) próximas a la Falla La Mojarra y al oeste de la Falla Los Santos.

Figura 19

Mapa de porosidad de muestras de roca del sur de la Mesa de Los Santos.



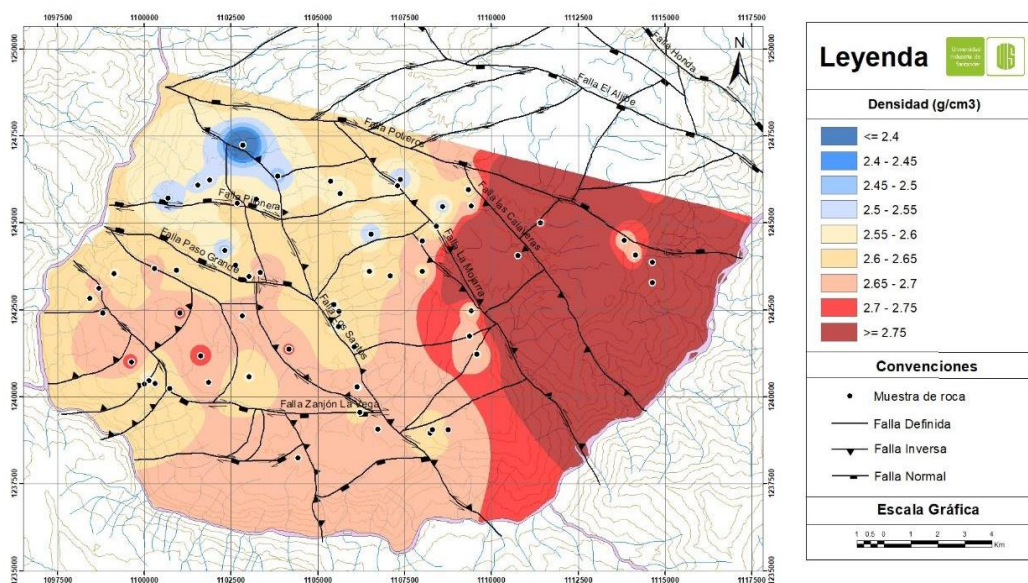
4.1.5 Densidad

La densidad es una propiedad que se ve influenciada por la porosidad, y a su vez se refleja en la velocidad de onda P. Los valores de densidad para la Formación Los Santos son de 2,11 a 2,65 g/cm³ y su mediana es 2,60 g/cm³; la Formación Rosablanca de 2,46 a 2,71 g/cm³ y su mediana es 2,65 g/cm³ y la Formación Paja de 2,48 a 2,73 g/cm³ y su mediana es 2,65 g/cm³ (apéndice b). Las densidades de las rocas de la Fm. Rosablanca son mayores respecto a la Fm. Los Santos, esto se relaciona con la mayor porosidad de esta última. En la distribución de los valores

de densidad al sur de la Mesa de Los Santos (figura 20), el patrón de valores altos y bajos es algo similar a los mapas de porosidad y velocidad de onda P, lo cual es coherente sabiendo que estas propiedades están intrínsecamente relacionadas y se influyen entre sí.

Figura 20

Mapa de densidad de muestras de roca del sur de la Mesa de Los Santos.

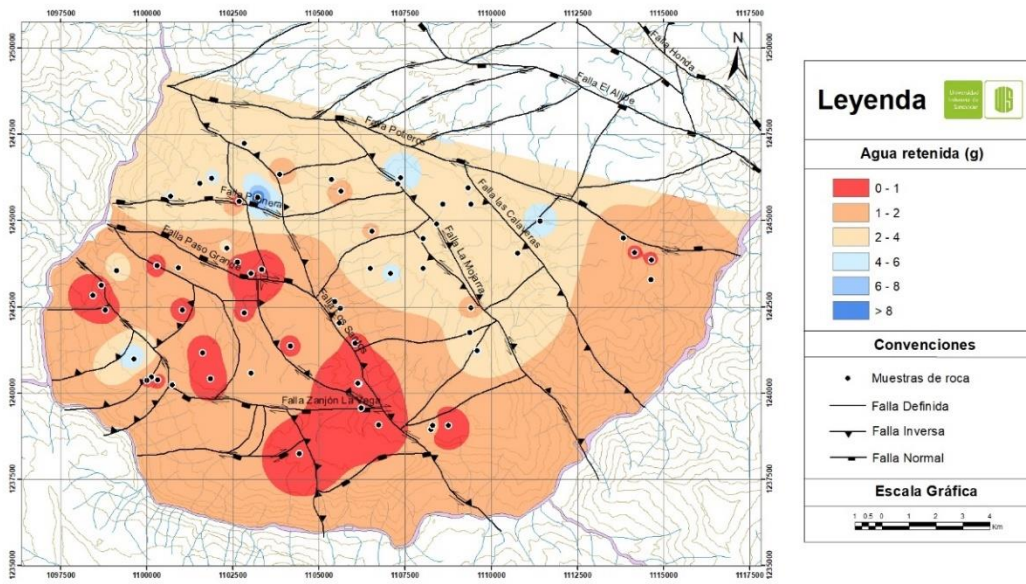


4.1.6 Agua retenida

La estimación del agua retenida para los *plugs*, permite evaluar de manera indirecta como la porosidad efectiva de las muestras aporta en el almacenamiento del agua, este valor fue estimado en gramos (apéndice b). En la Formación Los Santos es de 0,50 a 6,12 g y su mediana es 2,10 g; en la Formación Rosablanca es de 0,02 a 10,11 g y su mediana es 0,44 g y en la Formación Paja es de 0,15 a 5,07 g y su mediana es 1,13 g. La distribución del agua retenida (figura 21) por las muestras es similar a lo obtenido en la porosidad.

Figura 21

Mapa de agua retenida de muestras de roca del sur de la Mesa de Los Santos.



4.2 Modelos sintéticos

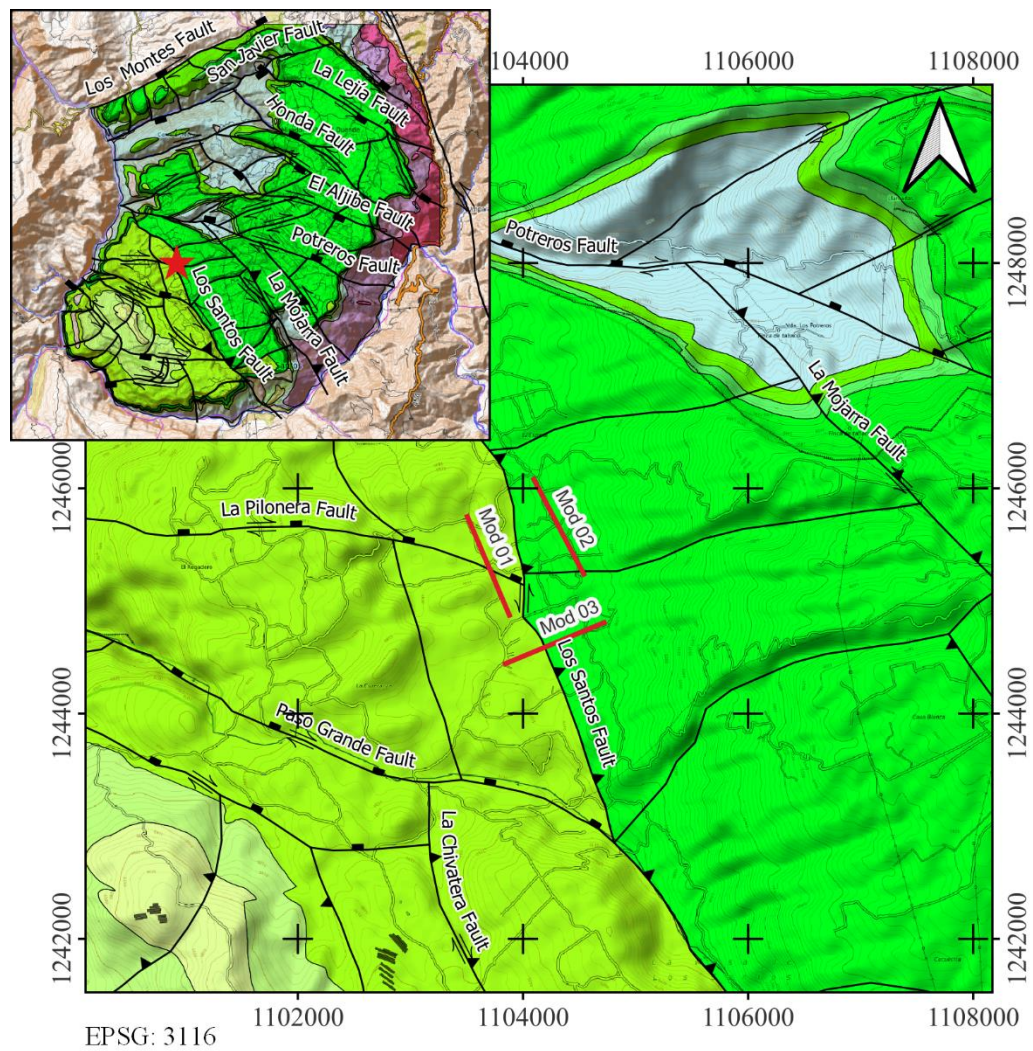
Los estudios previos de mayor cobertura en la Mesa de Los Santos han indicado que el mayor potencial hidrogeológico al sur de la Mesa se localiza posiblemente próximo a la Falla Los Santos (Pinto *et al.*, 2007; Moyano, 2010; Arguello *et al.*, 2018; García, 2022). La mayoría de los estudios geofísicos realizados para evaluar el potencial hidrogeológico o presencia de aguas subterráneas en la Mesa han considerado el método eléctrico de la TRE y el método sísmico de la TRS; debido a su amplia aplicación en la caracterización del subsuelo de la Mesa, estos métodos serán los de interés para evaluar los modelos sintéticos en el presente estudio. Al analizar los cambios topográficos y la accesibilidad al área, se seleccionó un sector al oeste de la Falla Los Santos (figura 22) para la realización de tres modelos sintéticos (Mod 01, Mod 02, Mod 03). El

área seleccionada coincide con una zona de interés hidrogeológico reportada por Pinto *et al.* (2007), así como con los perfiles geoelectricos realizados por Moyano (2010) y con los valores elevados de porosidad identificados en los mapas presentados por García (2022).

Figura 22

Localización de los tres modelos sintéticos desarrollados en proximidad a la Falla Los Santos.

Geología tomada de García *et al.* (2024b).



El Mod 01 se localiza paralelo a la Falla Los Santos sobre la Fm. Rosablanca. El Mod 02 tendría un rumbo similar al Mod 01 pero localizado al otro lado de la falla sobre la Fm. Los Santos. El Mod 03 corta casi perpendicular a la Falla Los Santos, por lo que se inferiría el contacto fallado del material detrítico de la Fm. Los Santos y carbonatado de la Fm. Rosablanca.

4.2.1 Etapa preliminar

Para la selección de los valores de resistividad eléctrica, velocidad de onda P, contexto geológico y posibles aéreas saturadas, se consideraron los trabajos realizados en la Mesa (tabla 8) y las mediciones realizadas en laboratorio propias de este trabajo de investigación.

Tabla 8

Trabajos de referencia para la generación de los tres modelos sintéticos.

Autor	Método geofísico	Uso o referencia
Pinto <i>et al.</i> (2007)	-	Espesores de las formaciones geológicas.
Moyano (2010)	SEV	Valores de resistividad eléctrica y variaciones laterales en las formaciones Los Santos y Rosablanca.
García (2022)	-	Espesores de las formaciones geológicas a partir de Redes Neuronales.
Vergel y Remolina (2023)	TRE TRS	Valores de resistividad eléctrica y velocidades de onda P de la Fm. Los Santos. Variaciones laterales en el nivel freático.
Ariza y Gómez (2023)	SEVA TRE	Valores de resistividad eléctrica y presencia de fracturamiento en las formaciones Los Santos y Rosablanca.
García-Arías <i>et al.</i> (2024a)	-	Valores de las propiedades estimadas por Redes Neuronales
García-Arías <i>et al.</i> (2024b)	-	Modelo estructural actualizado.
Rojas (2024)	TRS	Valores de velocidad onda P Fm. Rosablanca

Las propiedades físicas estimadas por las Redes Neuronales para el Mod 01 (figura 23), Mod 02 (figura 24) y Mod 03 (figura 25) fueron comparadas con el compilado de *plugs* y el remuestreo realizado para la resistividad eléctrica en húmedo (figura 26) y velocidades de onda P (figura 27). Los valores finales (tabla 9) a considerar para el modelado sintético fueron ajustados considerando los resultados de la exploración geofísica de trabajos anteriores (tabla 8) en la Mesa de Los Santos.

Figura 23

Geología y valores de las propiedades físicas estimadas por Redes Neuronales para el Mod 01.

Para mayor detalle ver apéndice c.

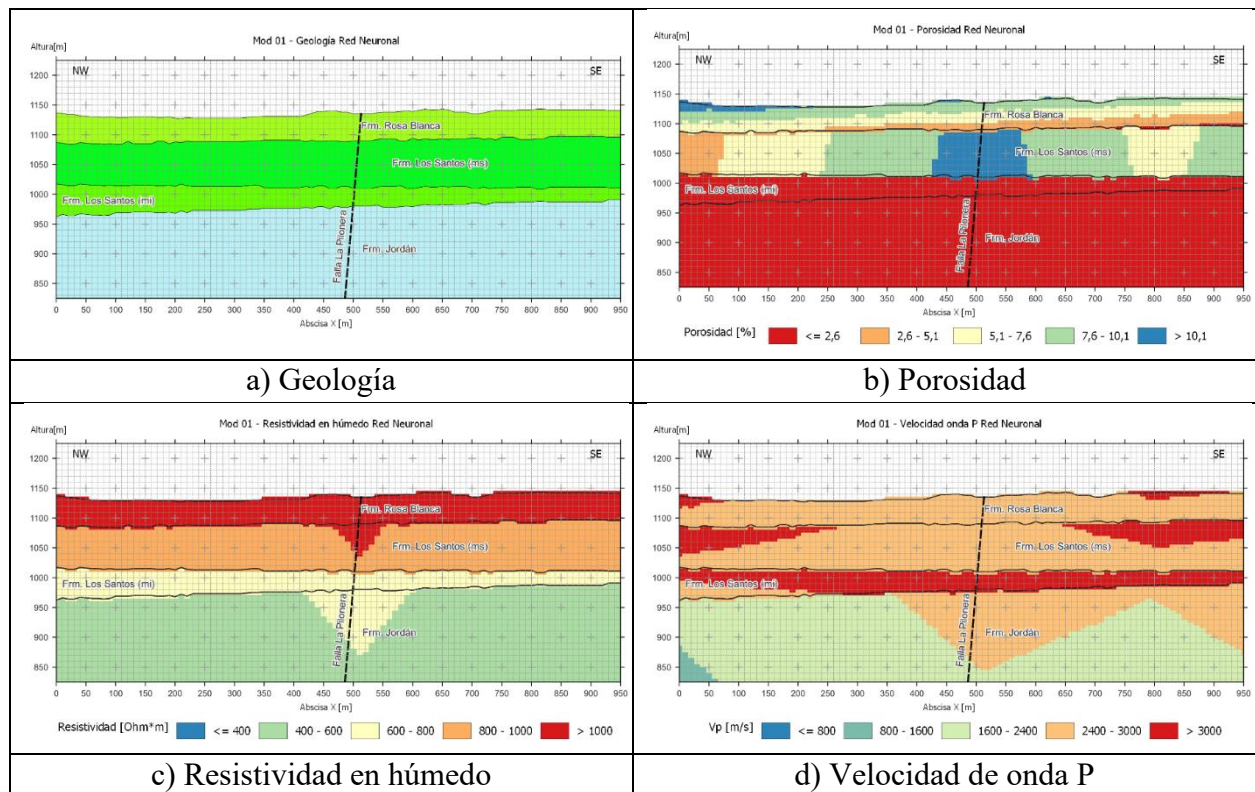


Figura 24

Geología y valores de las propiedades físicas estimadas por Redes Neuronales para el Mod 02.

Para mayor detalle ver apéndice c.

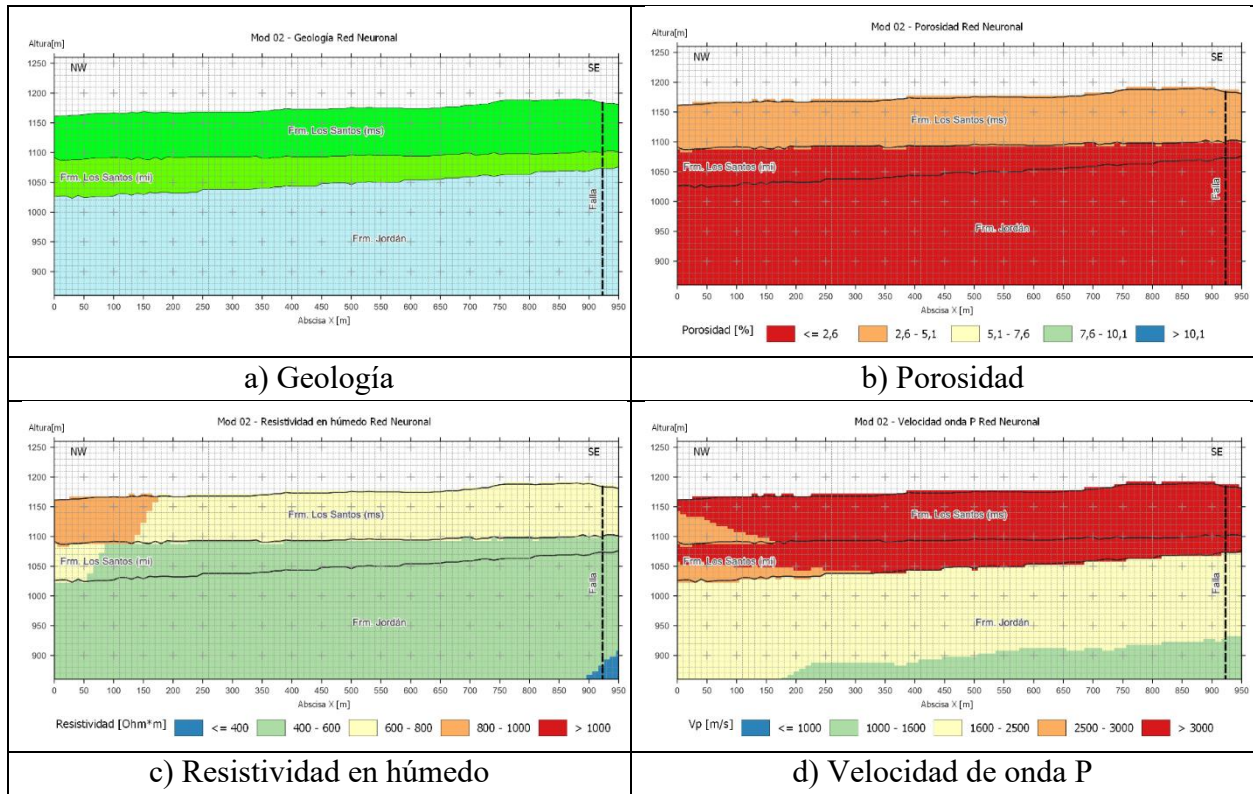
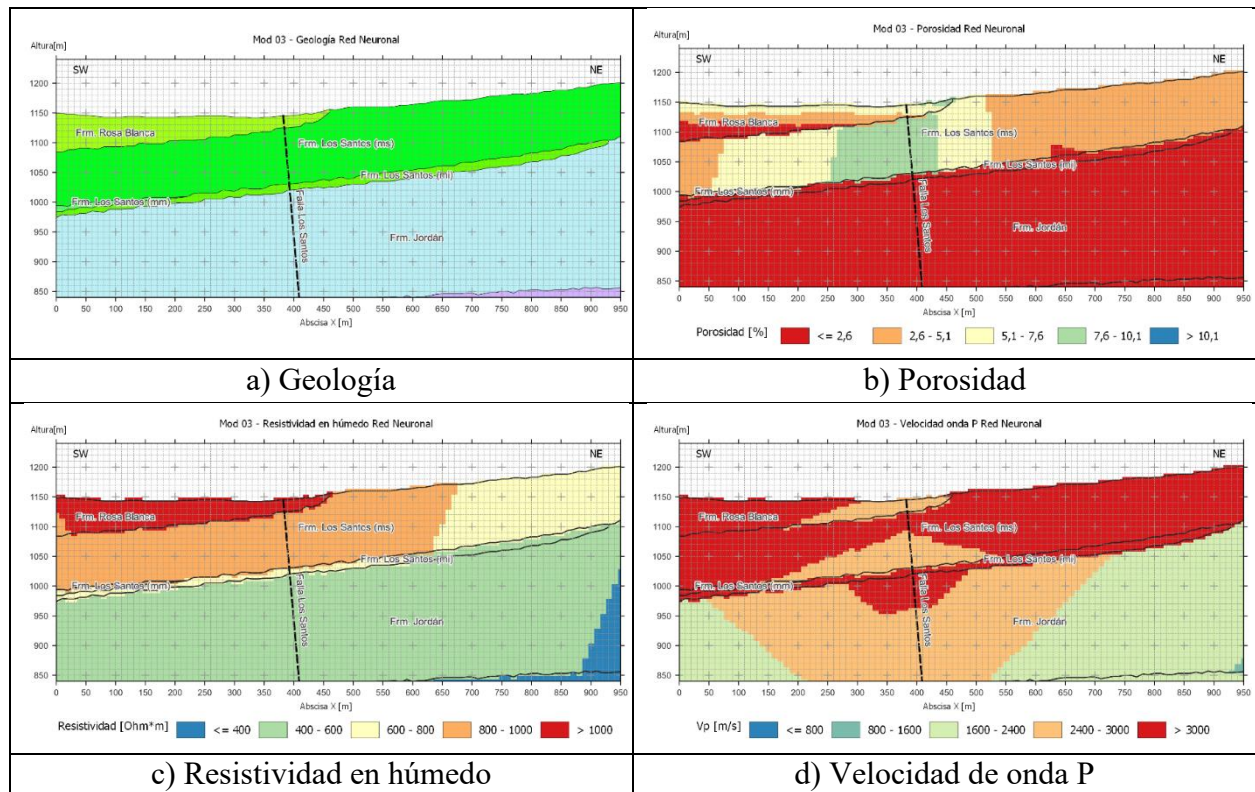


Figura 25

Geología y valores de las propiedades físicas estimadas por Redes Neuronales para el Mod 03.

Para mayor detalle ver apéndice c.



Durante la etapa preliminar de análisis para los modelos propuestos (Mod 01, Mod 02 y Mod 03), las propiedades estimadas mediante la red neuronal evidencian una distribución espacial coherente con el perfil geológico de entrada. En términos generales, se observan valores relativamente bajos de porosidad y mayores resistividades en la Formación Jordán, mientras que la Formación Los Santos presenta una mayor heterogeneidad en sus propiedades. Esta variabilidad podría estar asociada, entre otros factores, a la influencia estructural de las fallas y a la distribución de las muestras utilizadas durante el entrenamiento del modelo. En particular, se identifican zonas con incrementos en la porosidad que sugieren la presencia de niveles potencialmente más

permeables y con mayor capacidad de almacenamiento. Asimismo, la presencia de estructuras como la falla identificada en los perfiles introduce cambios laterales significativos en la distribución de las propiedades estimadas, lo que sugiere que esta podría actuar como un elemento de control en la conectividad hidráulica del sistema, favoreciendo o restringiendo el flujo de agua subterránea dependiendo de las condiciones locales de fracturamiento y relleno.

Por otra parte, los resultados de porosidad, resistividad y velocidad de onda P evidencian relaciones consistentes entre propiedades físicas. En particular, se observa que las zonas con mayores valores de porosidad tienden a asociarse con menores resistividades y menores velocidades sísmicas, lo cual podría ser coherente con la presencia de fluidos en el medio. No obstante, es importante señalar que estos modelos fueron entrenados a partir de muestras superficiales y no incorporan información directa del subsuelo, por lo que las interpretaciones deben considerarse como aproximaciones preliminares sujetas a validación mediante datos geofísicos y de campo.

Figura 26

Ejemplo de la comparación de los valores de resistividad eléctrica en húmedo estimados por la Red Neuronal, catálogo de plugs y el remuestreo de las formaciones Rosablanca y miembro superior de Los Santos.

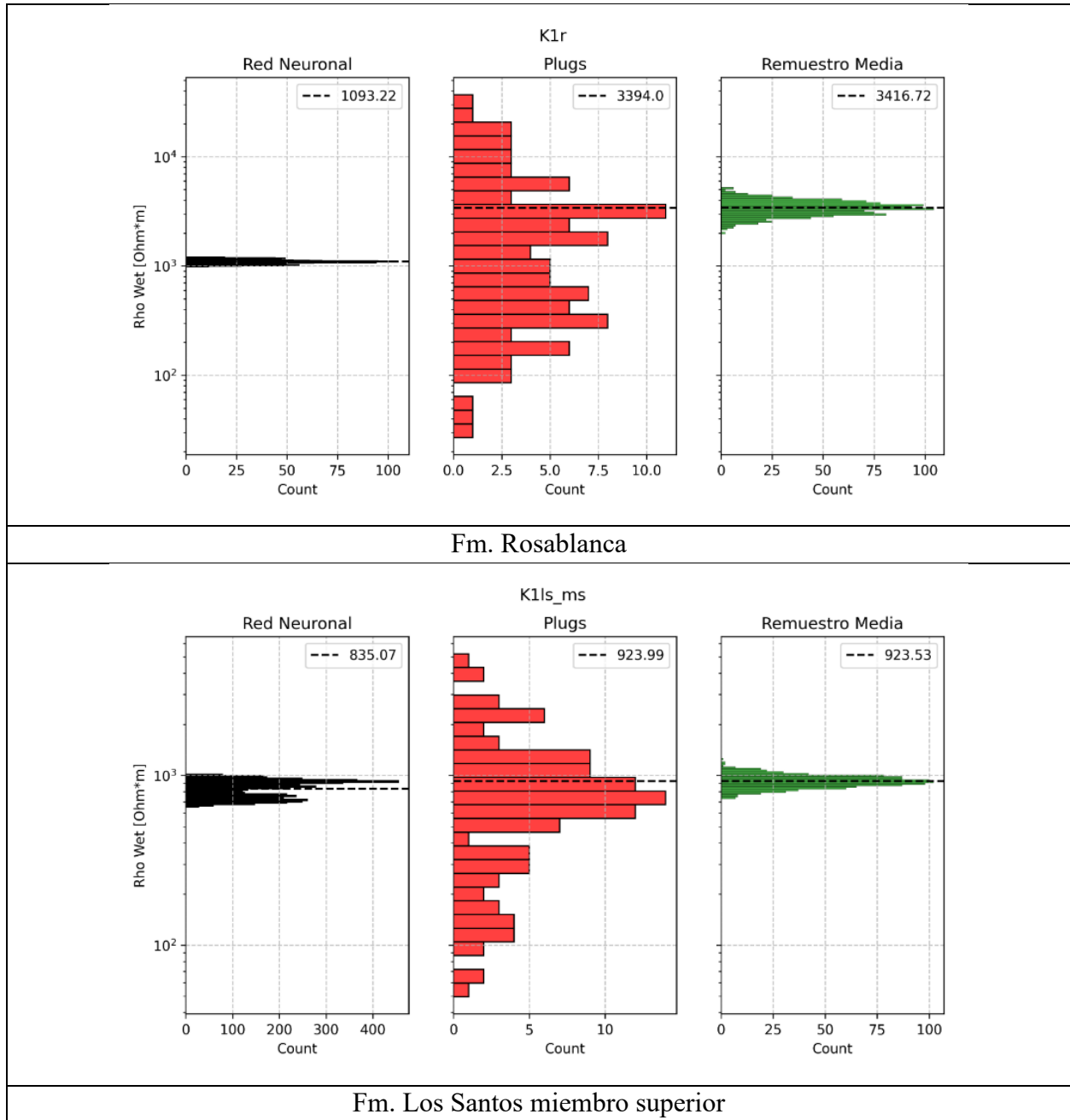
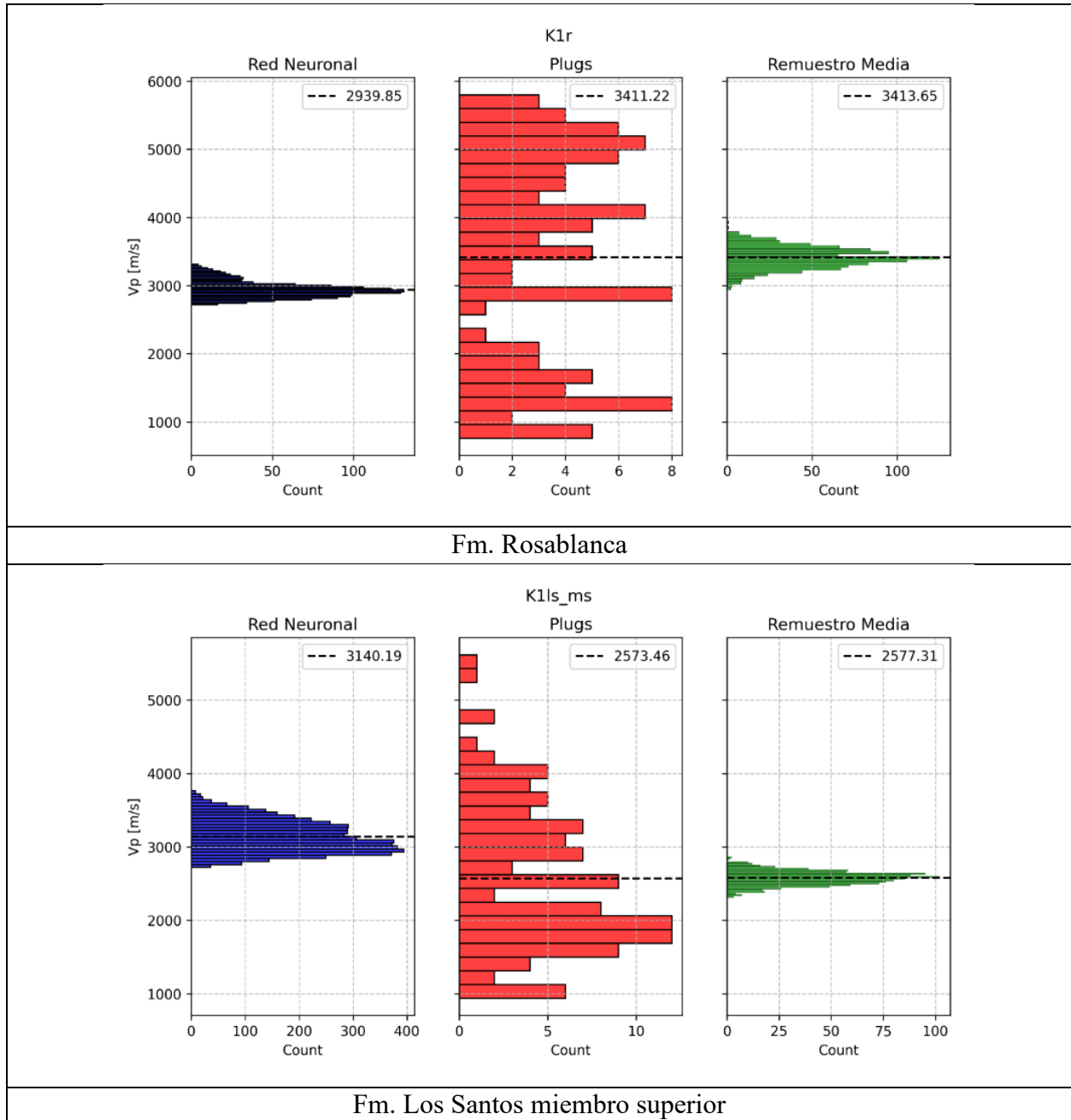


Figura 27

Ejemplo de la comparación de los valores de velocidades de onda P estimados por la Red Neuronal, catálogo de plugs y el remuestreo de las formaciones Rosablanca y miembro superior de Los Santos.



4.2.2 Modelos finales

Las interpretaciones de los modelos 2D del subsuelo obtenidos en los estudios geofísicos previos han evidenciado la simplicidad en el modelo geológico en algunos sectores y una alta complejidad en otros. Este aumento de la complejidad se ha relacionado con el fracturamiento. Los modelos finales son generados considerando contextos medianamente complejos, considerando los resultados de los otros trabajos. La presencia de zonas con acumulación local de agua ha sido mantenida considerando los perfiles geoeléctricos propuestos por Moyano (2010) próximos a la Falla Los Santos. Aunque se plantea que parte del miembro medio de la Formación Los Santos puede estar permitiendo el flujo vertical del agua, esto sería un supuesto considerando una posible presencia de fracturamiento, ya que este miembro se considera más como un medio impermeable que no facilita el flujo del agua.

El equipo de sismica de refracción de la UIS dispone de un máximo de 48 geófonos espaciados cada 20 m y el equipo de TRE tiene un máximo de 96 electrodos con espaciado de 15 m. Se consideró una igualdad en la cantidad de geófonos y electrodos utilizados para las simulaciones, es decir de 48 sensores, con un espaciado de cada 20 m, para una longitud total de 940 m. Para el modelado sísmico se consideraron 47 fuentes localizadas entre geófonos. Para el modelado sísmico se consideraron 47 fuentes localizadas entre geófonos. Para el modelado geoeléctrico se consideró el arreglo Schlumberger, el cual es el arreglo más utilizado en los estudios previos, con un multiplicado de distancia entre electrodos MN de hasta 11 y valor máximo de n de hasta 11 para la distancia entre electrodos AM y NB.

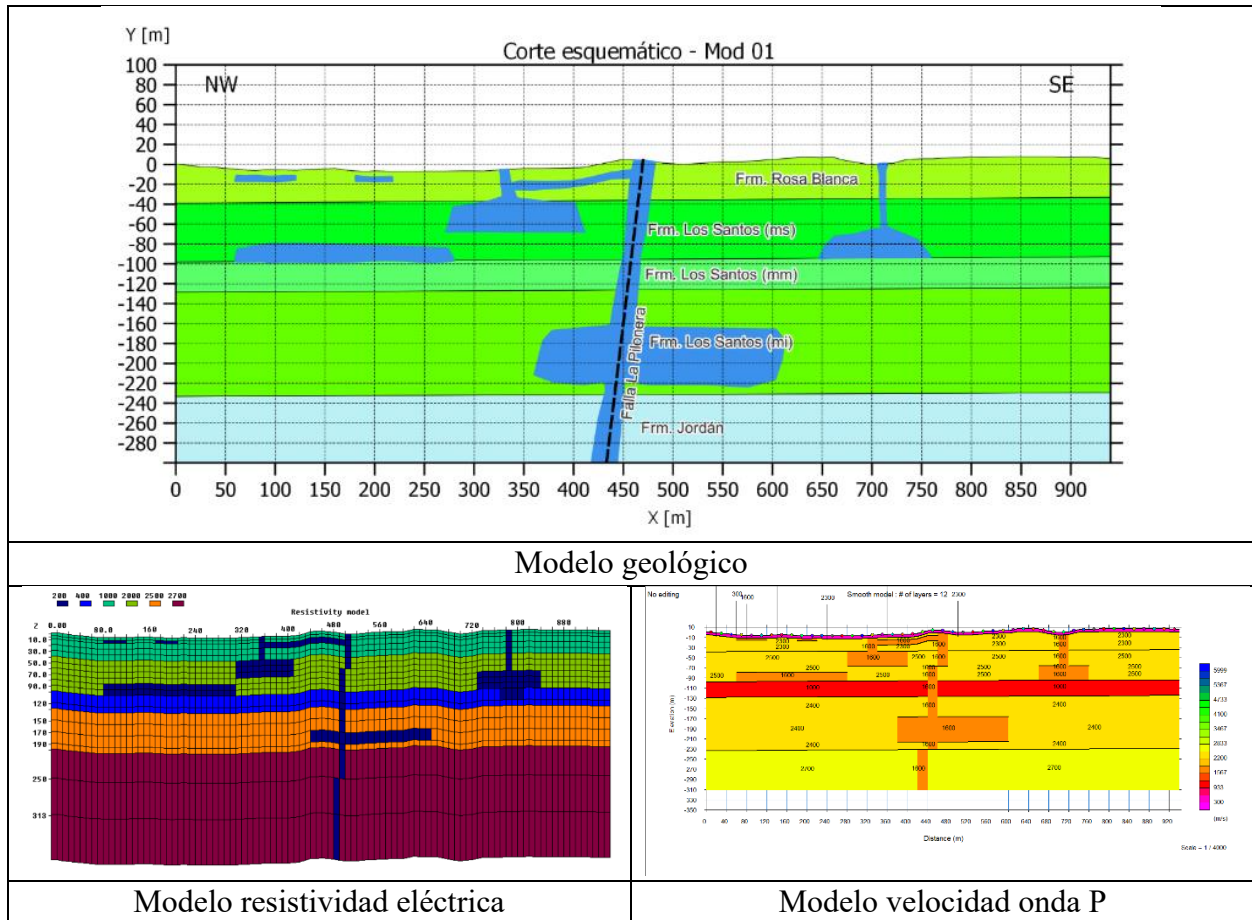
4.2.2.1 Mod 01

El Mod 01 (figura 28) está ubicado sobre la Fm. Rosablanca y su centro concuerda con la Falla la Pilonera, la cual es una falla abierta o normal (García-Arias *et al.*, 2024b) por lo que estaría favoreciendo el flujo de agua sobre su trazo. La imagen satelital del área evidencia la presencia de dos drenajes con evidencia de vegetación, por lo que se asume la infiltración vertical y acumulación en el miembro superior de la Fm. Los Santos. Por la proximidad a la Falla Los Santos y el buzamiento de los estratos al SW, se estima que la Fm. Rosablanca puede tener un espesor inferior a los 40 m. Dos áreas con posible presencia de agua, no conectadas, en los primeros 20 m de profundidad son realizados en la Fm. Rosablanca considerando los resultados de Ariza y Gómez (2023) y Rojas (2024). La continuidad lateral de las áreas con posible presencia de agua se considera limitada debido al fracturamiento y procesos de karstificación.

Figura 28

Modelo geológico final para Mod 01 y modelos de resistividad eléctrica y velocidad de onda P.

Para mayor detalle ver apéndice d.



4.2.2.2 Mod 02

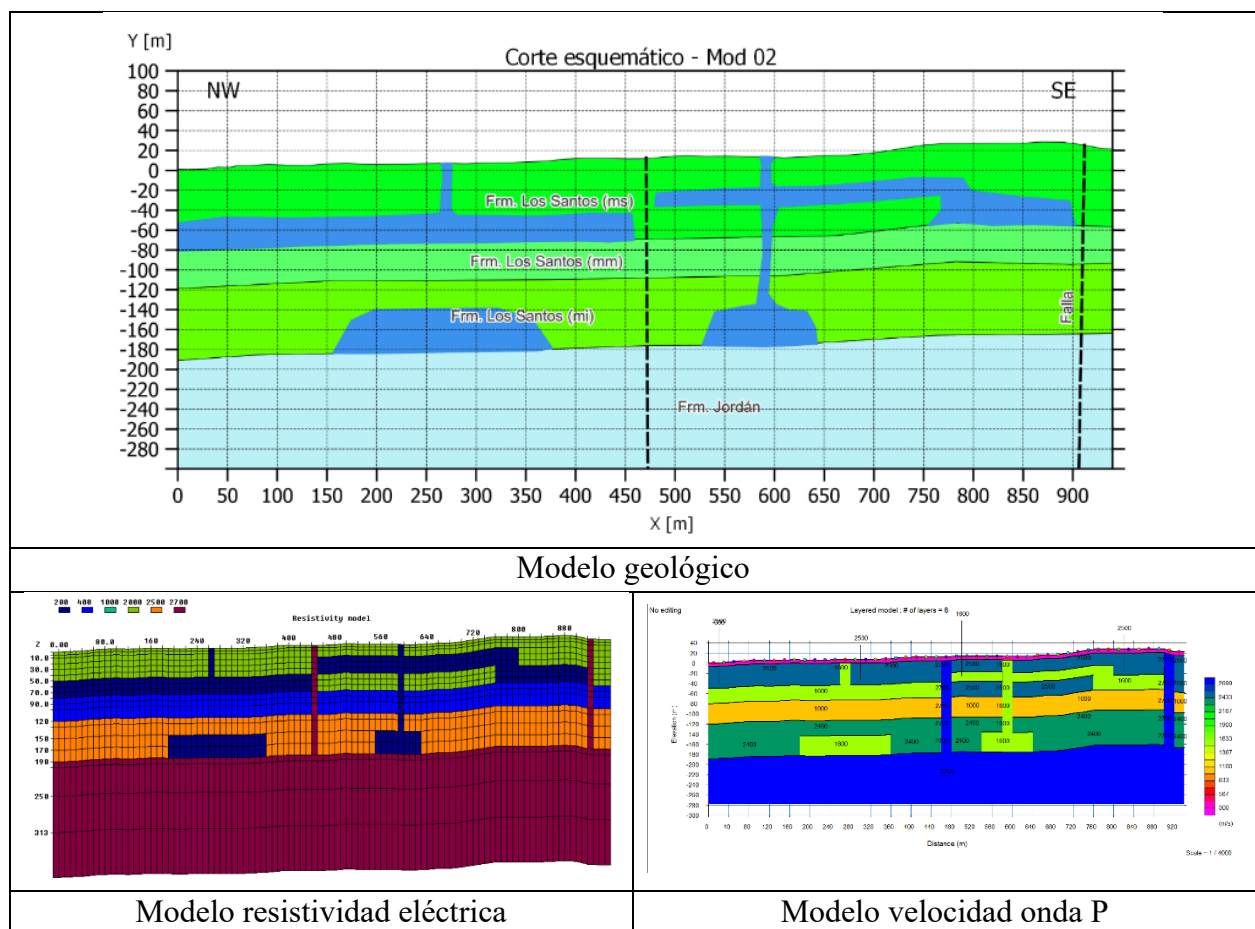
El Mod 02 (figura 29) localizado sobre la Fm. Los Santos al lado NE de la Falla Los Santos y casi paralelo a Mod 01, considera en gran parte los resultados de Vergel y Remolina (2023). En este modelo, próximo a una falla sin definir su cinemática, se interpretan planos de fracturas que pueden hacer de sello, impidiendo el flujo del agua. Este fracturamiento provocaría variaciones

laterales en el posible nivel freático, pero con una continuidad lateral más continua a como se podría presentar en la Fm. Rosablanca.

Figura 29

Modelo geológico final para Mod 02 y modelos de resistividad eléctrica y velocidad de onda P.

Para mayor detalle ver apéndice d.



4.2.2.3 Mod 03

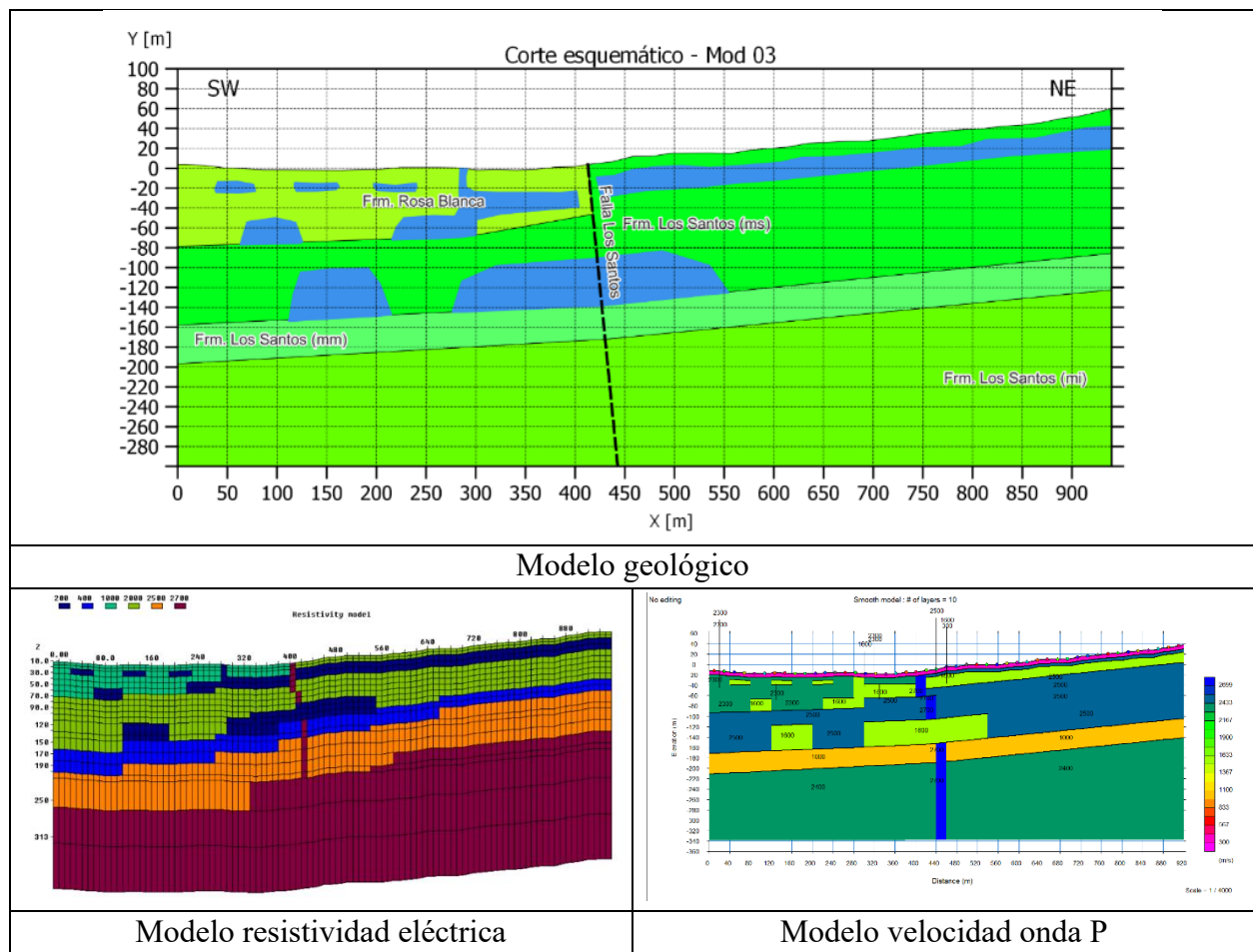
El Mod 03 (figura 30) evidencia el contacto fallado entre las formaciones Los Santos y Rosablanca. Se plantea que la Falla Los Santos, aunque está definida con un componente inverso,

lo que teóricamente la clasificaría como una estructura cerrada y no favorable al flujo del agua, en su entorno se ha identificado la formación de una microcuenca (Arguello *et al.*, 2018). En este sector se considera que el contacto entre las dos formaciones estaría actuando como sello, pero en profundidad por la porosidad de la Fm. Los Santos en el miembro superior se generaría un flujo del agua.

Figura 30

Modelo geológico final para Mod 03 y modelos de resistividad eléctrica y velocidad de onda P.

Para mayor detalle ver apéndice d.

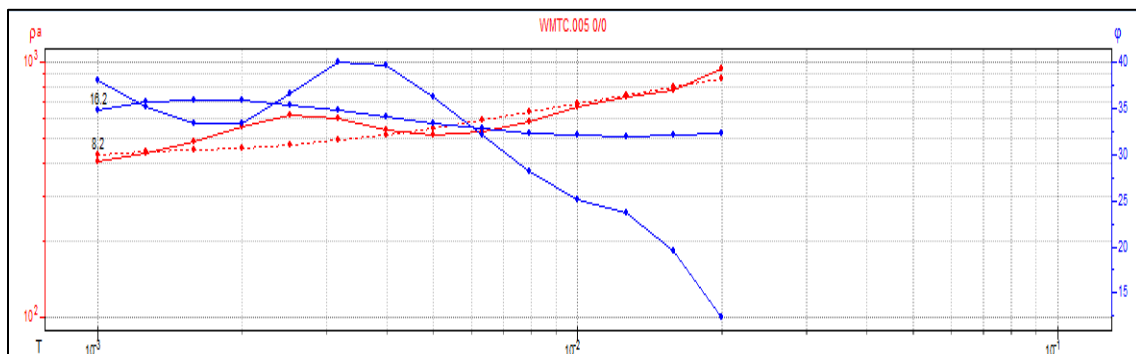


4.3 Perfiles Magnetotelúrica

Como se menciona en el capítulo de metodología, el equipo Stratagem arroja una curva preliminar de resistividad verdadera de cada estación. Con base en este modelo inicial, se reprocesaron los datos para cada estación con el fin de encontrar un modelo coherente con la literatura geológica existente y de reducir el error lo mejor posible sin perjudicar la calidad de los datos. Siguiendo con el ejemplo de la estación 3, el error final obtenido se relaciona al ajuste entre las curvas de fase modeladas y de los datos (curvas azules en la figura 31); por otra parte, la resistividad verdadera (curvas rojas en la figura 31) presentan un buen ajuste. Para mejorar la inversión de esta estación, se podría eliminar algunos picos de la curva de fase, haciéndola más suave. Sin embargo, esto genera la pérdida de información que podría ser relevante, por esta razón antes de realizar una inversión final se debe hacer correlaciones con la información geológica y cartográfica.

Figura 31

Ajuste de las curvas de resistividad y fase del modelo para la estación 3 con los datos reales, curvas de resistividad (rojo) y curvas de fase (azul). Las curvas más suaves corresponden a las curvas del modelo mientras las otras son las de los datos.



La inversión de los datos magnetotelúricos se realizó en 1D, 1.5D y 2D. En las representaciones de datos MT 2D se obtuvo un error promedio de 15% y se logra apreciar el cambio de resistividad en profundidad y en algunas ocasiones lateralmente, lo cual podría delimitar las formaciones geológicas.

4.3.1 Línea MT 1

La línea MT 1 está conformada por las estaciones MT 1, 2, 4, 5 y 6 en sentido este-oeste (figura 32 y apéndice e **modelos 1d mt**

fig. 36

resultados sondeo mt correspondiente a wmtc.005

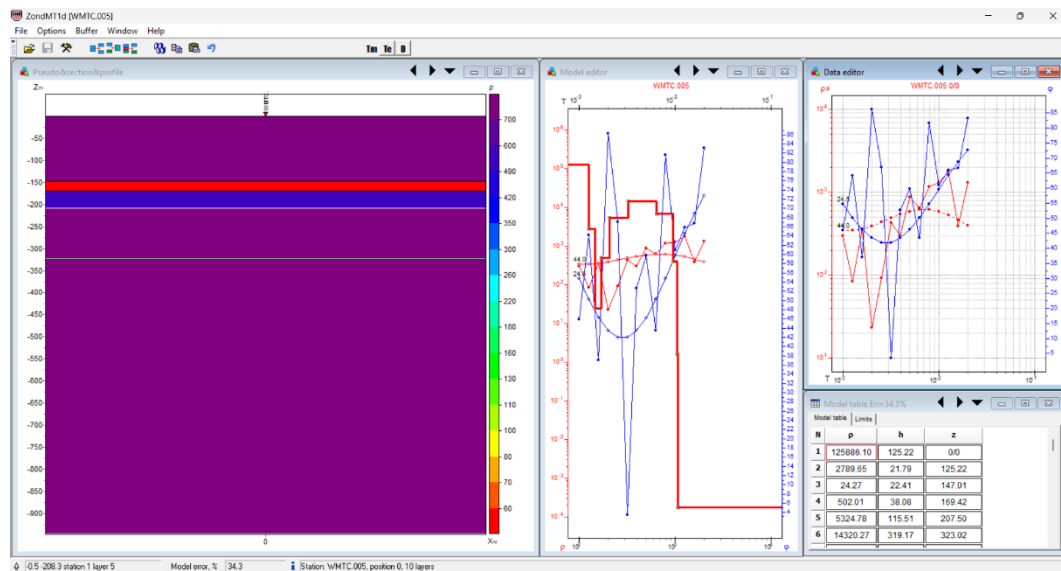


fig. 37

resultados sondeo mt correspondiente a wmtc.006

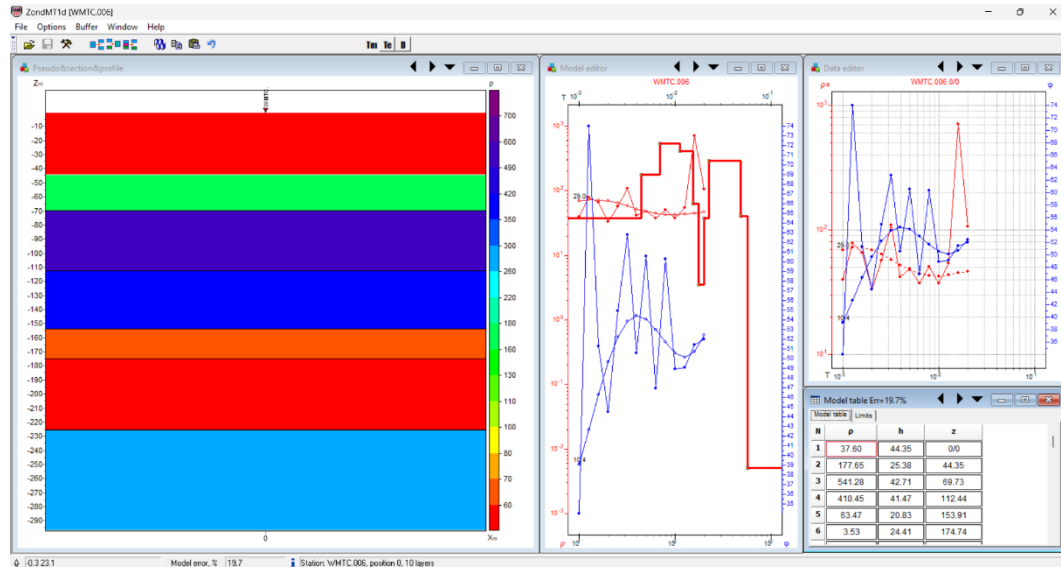


fig. 38

resultados sondeo mt correspondiente a wmtc.007

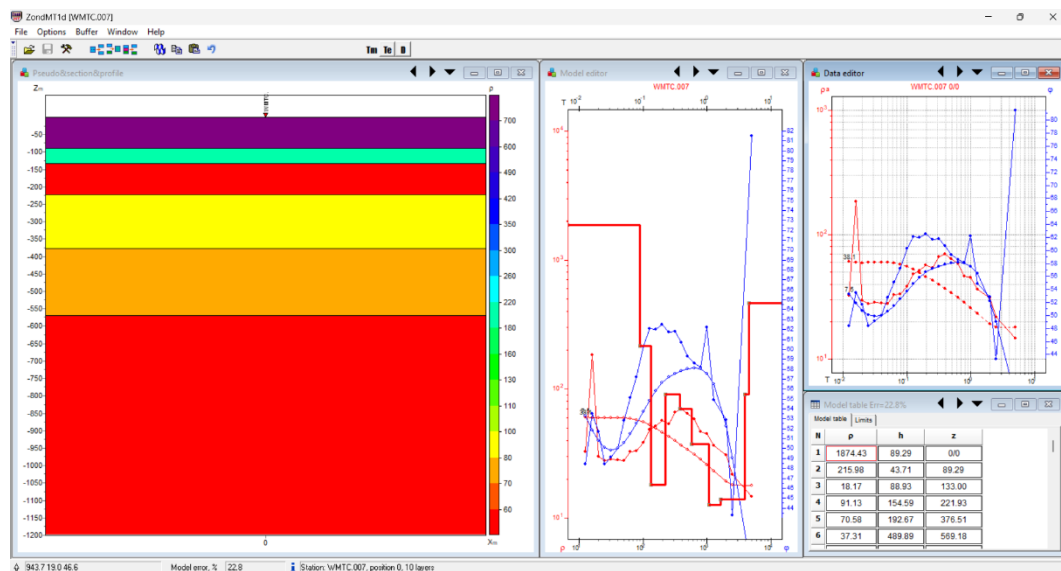


fig. 39

resultados sondeo mt correspondiente a wmtc.008

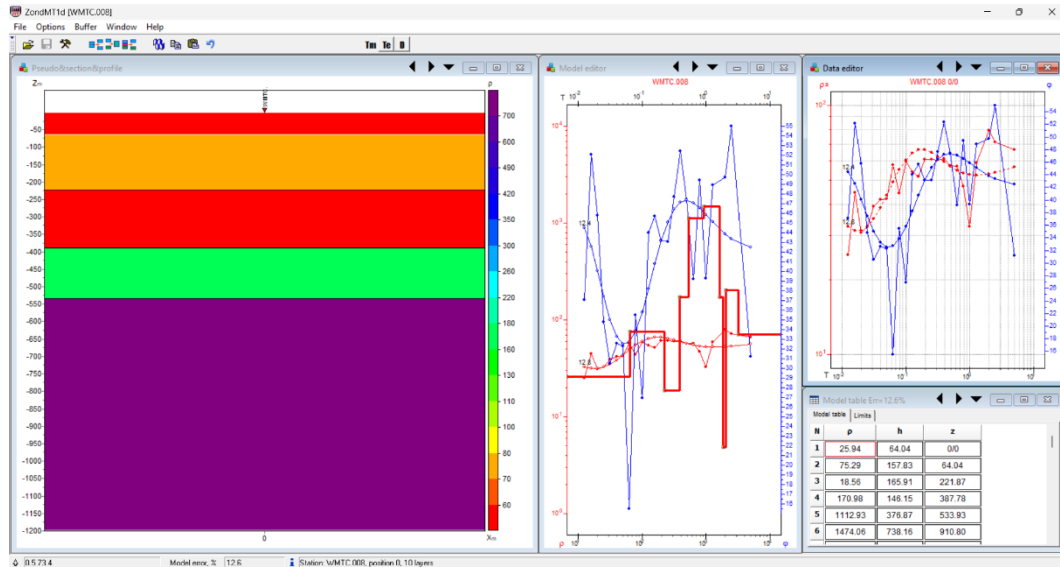


fig. 40

resultados sondeo mt correspondiente a wmtc.009

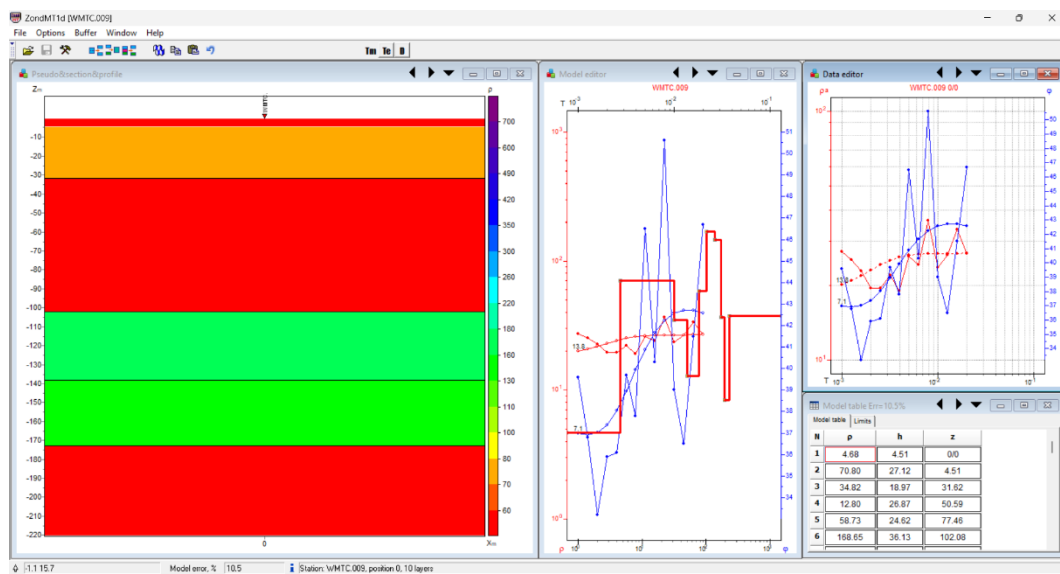


fig. 41

resultados sondeo mt correspondiente a wmtc.010

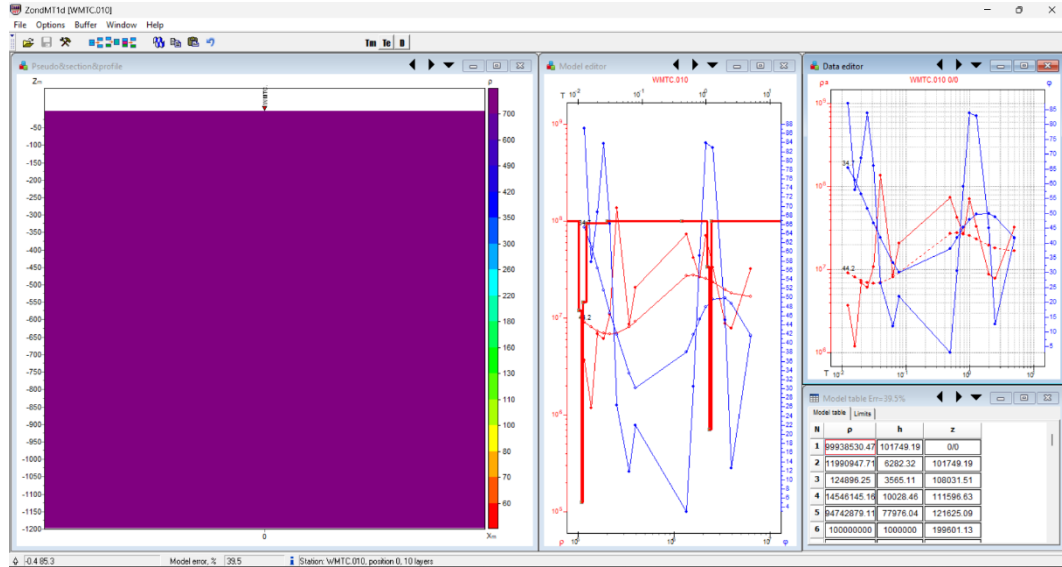


fig. 42

resultados sondeo mt correspondiente a wmtc.011

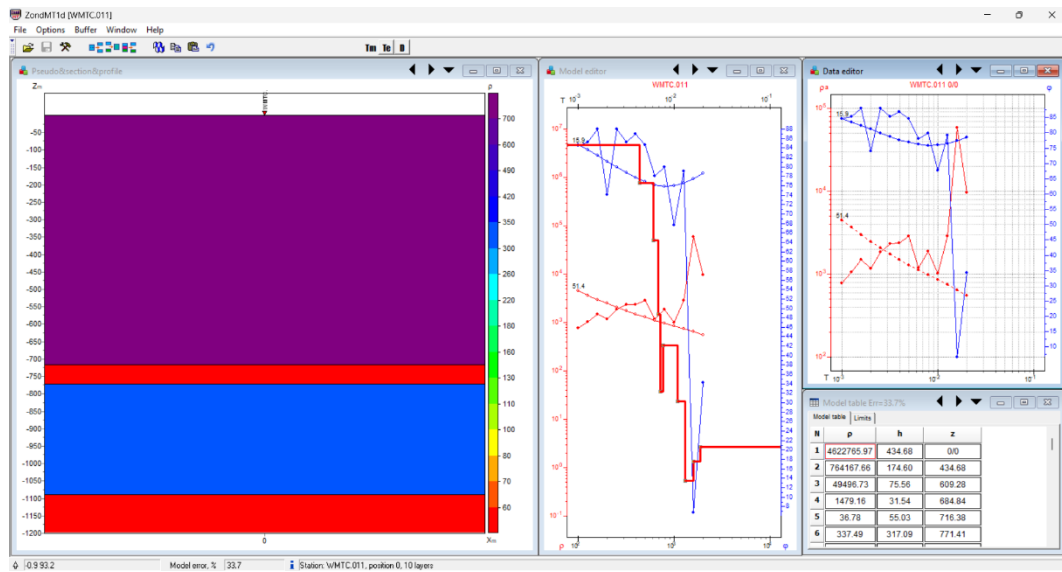


fig. 43

resultados sondeo mt correspondiente a wmtc.012

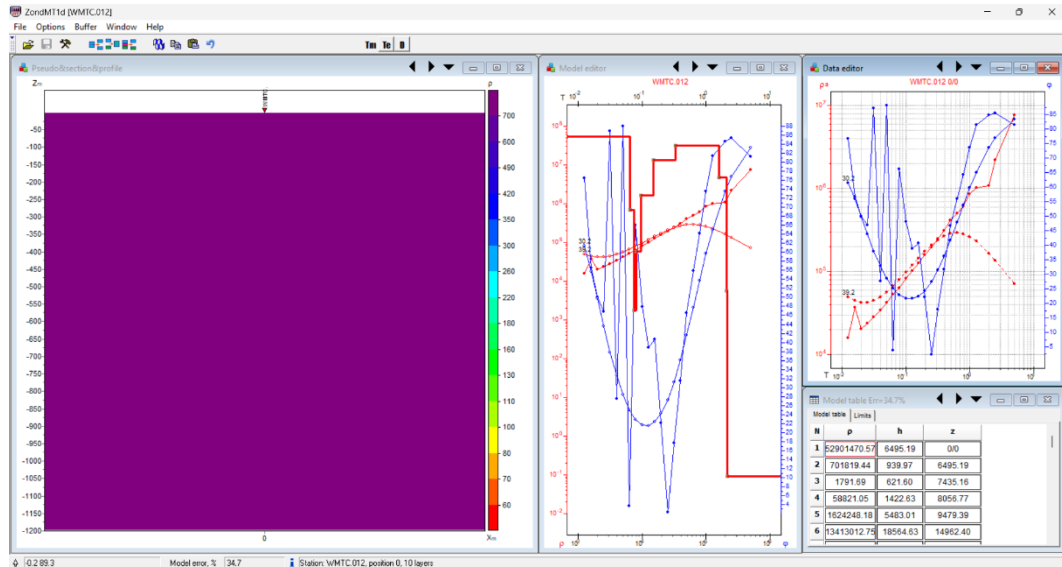


fig. 44

resultados sondeo mt correspondiente a wmtc.013

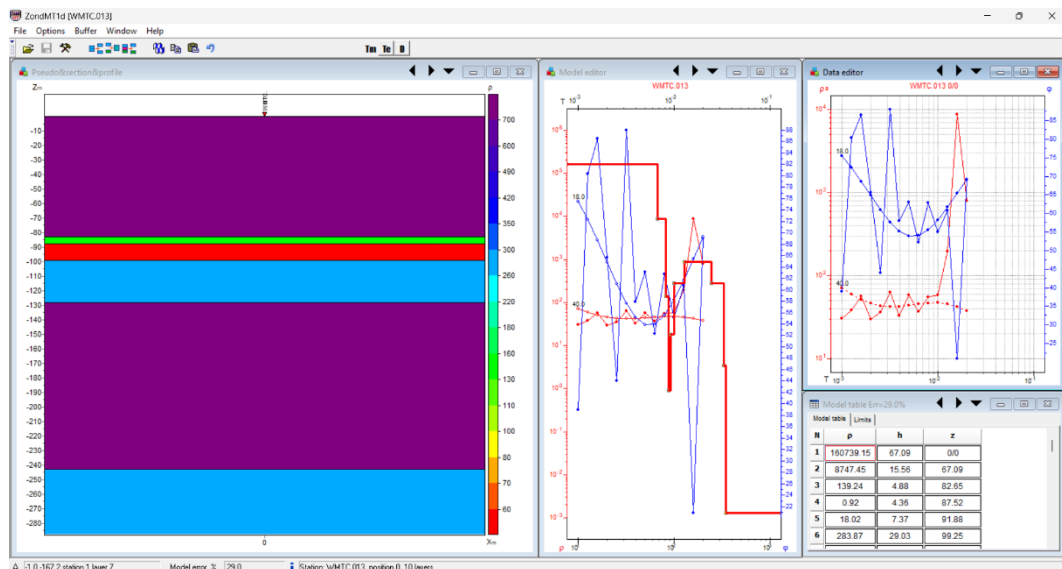
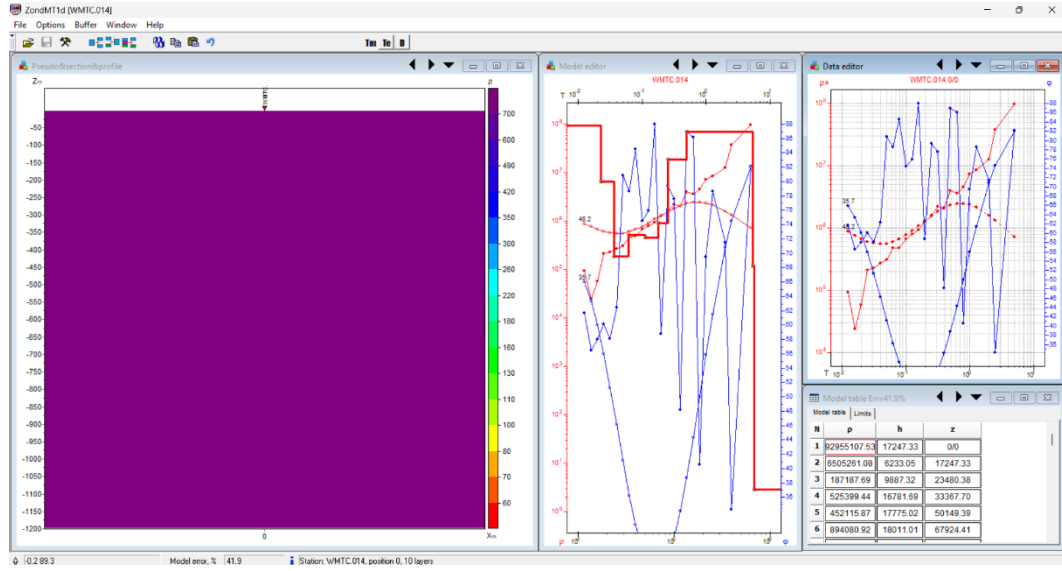


fig. 45

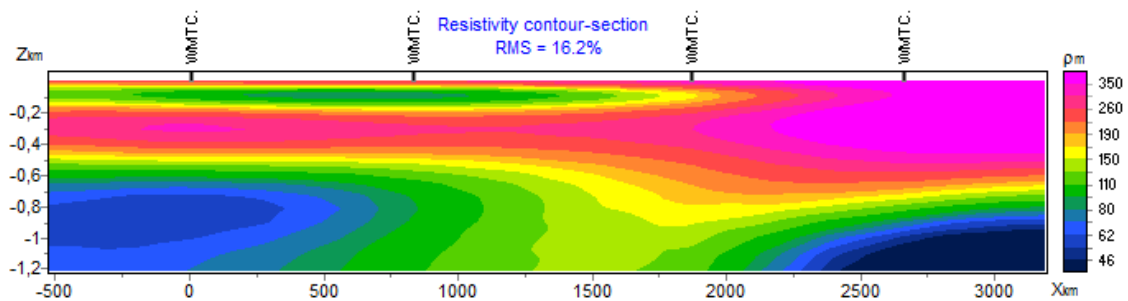
resultados sondeo mt correspondiente a wmtc.014



apéndice f) con una longitud aproximada de 2.600 m. El *skin depth* es de aproximadamente 1.200 m y el menor error RMS es de 16.2% en la inversión 2D. El perfil obtenido mediante la inversión 1D es la simplificación al no considerar posibles variaciones laterales en los valores de resistividad, por el contrario, las inversiones 1.5D y 2D si evidencian dichas variaciones.

Figura 32

Inversión 2D Línea MT 1



Los valores de resistividad obtenidos son inferiores a los $350 \Omega \cdot m$, disminuyendo en profundidad a valores inferiores de los $80 \Omega \cdot m$. A profundidades mayores de los 600 m, se identifica una reducción significativa en los valores de resistividad, lo que puede estar asociado a materiales con posible presencia de agua. Al oeste del perfil se evidencia que esta transición a valores más bajos inicia desde los 400 m de profundidad, y que en los primeros 200 m se estima un posible nivel con resistividades intermedias, colores verdes con valores entre los 80 y $150 \Omega \cdot m$.

4.3.2 Línea MT 2

Esta línea se llevó a cabo en sentido norte sur con las estaciones MT 2, 3, 8 y 7, con una longitud aproximada de 7.200 m. El *skin depth* es de 600 m, ya que la frecuencia registrada más alta es de alrededor de 1000 Hz. El menor error RMS corresponde a 14.4% de la inversión 2D (figura 33 y apéndice e **modelos 1d mt**)

fig. 36

resultados sondeo mt correspondiente a wmtc.005

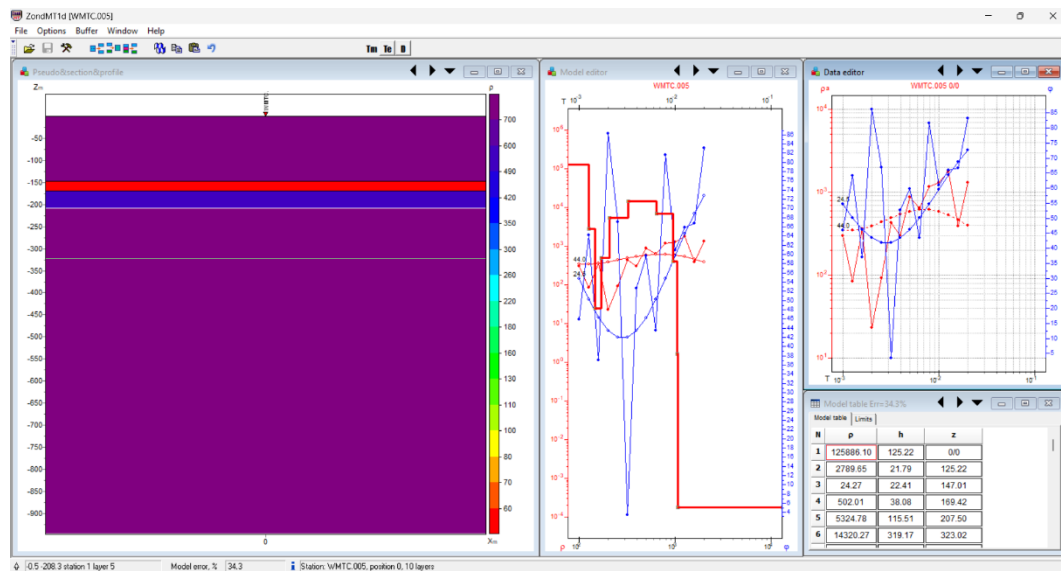


fig. 37

resultados sondeo mt correspondiente a wmtc.006

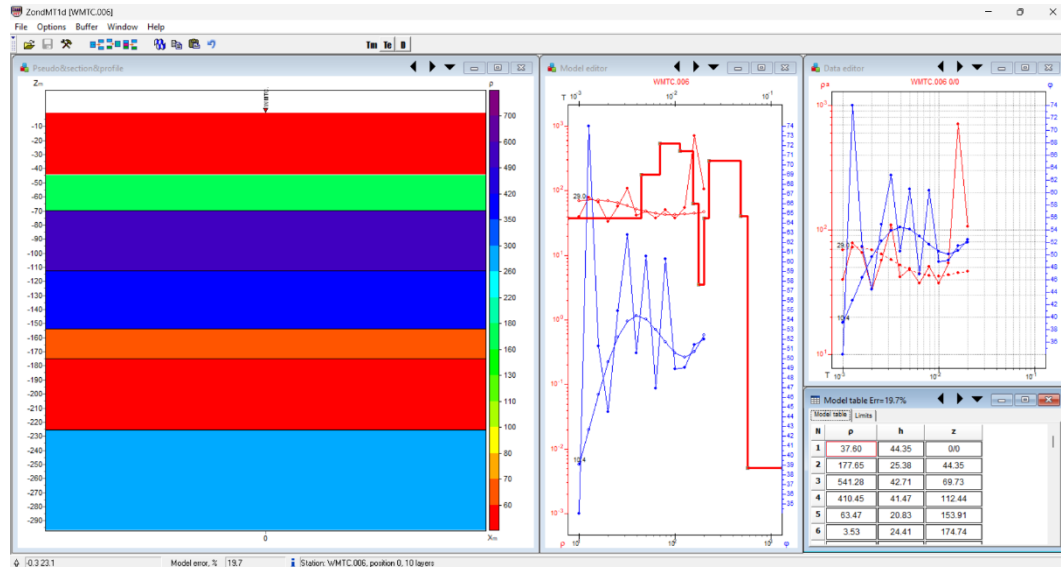


fig. 38

resultados sondeo mt correspondiente a wmtc.007

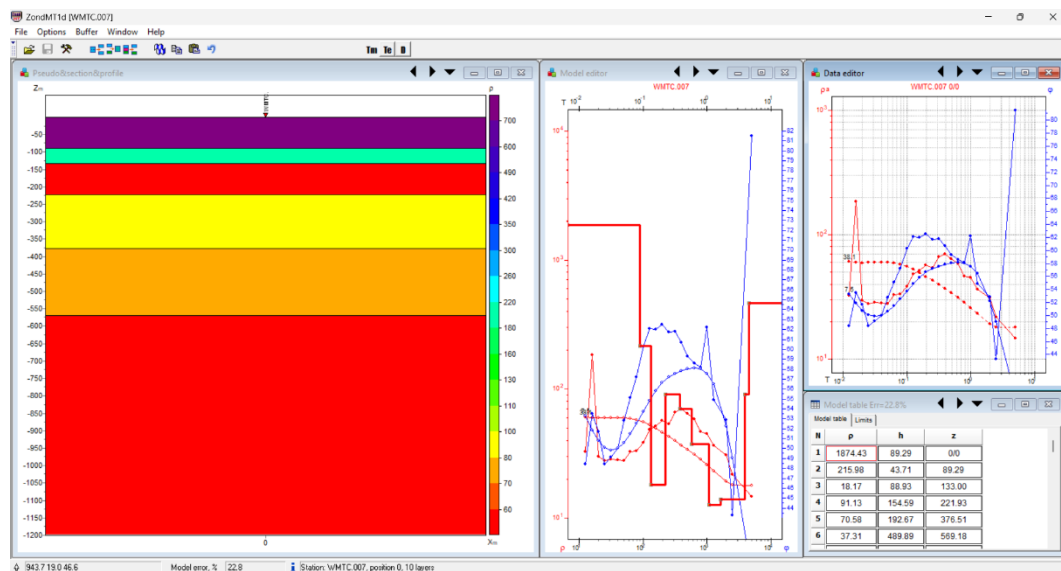


fig. 39

resultados sondeo mt correspondiente a wmtc.008

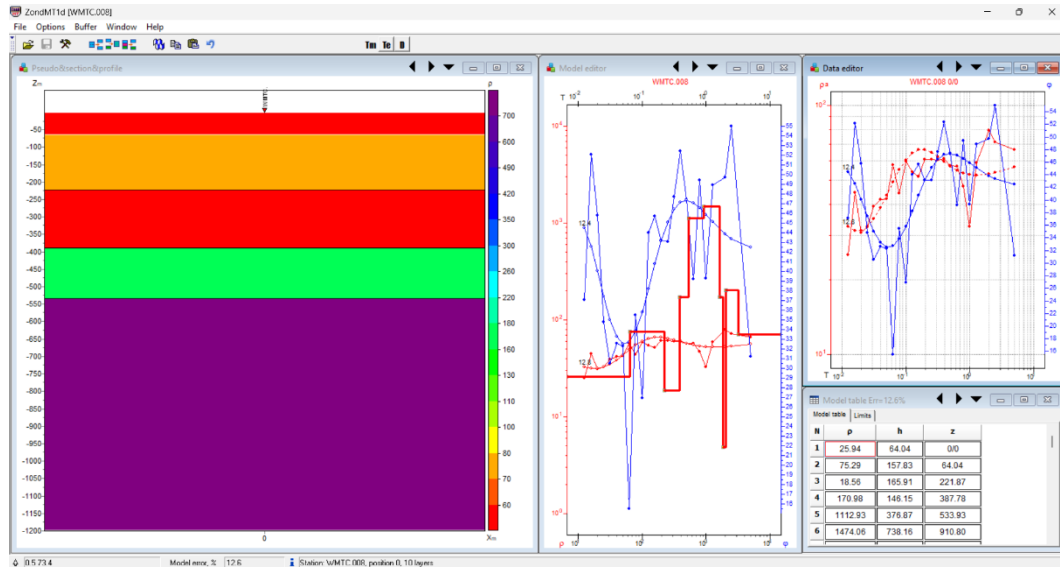


fig. 40

resultados sondeo mt correspondiente a wmtc.009

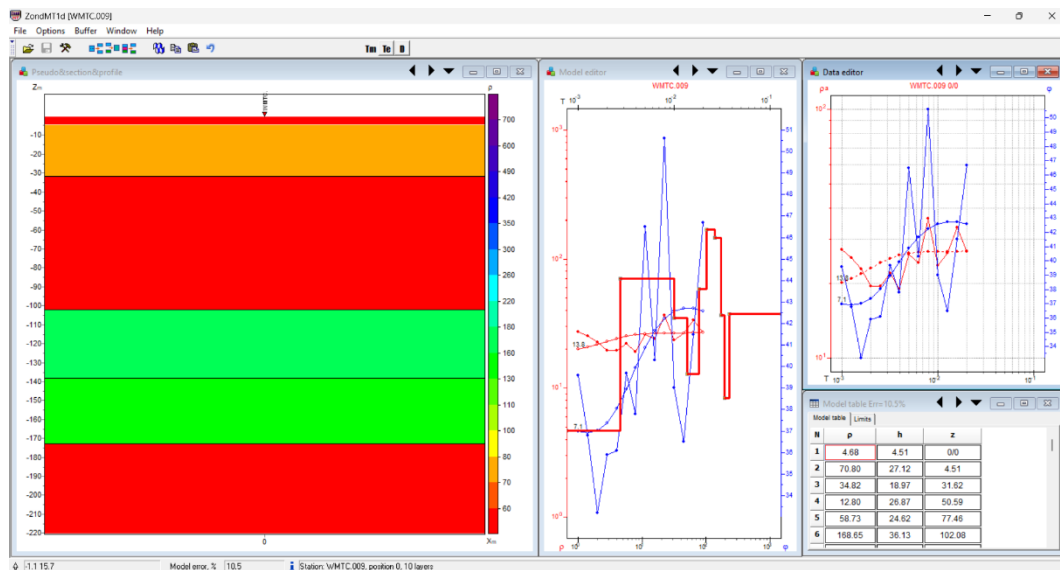


fig. 41

resultados sondeo mt correspondiente a wmtc.010

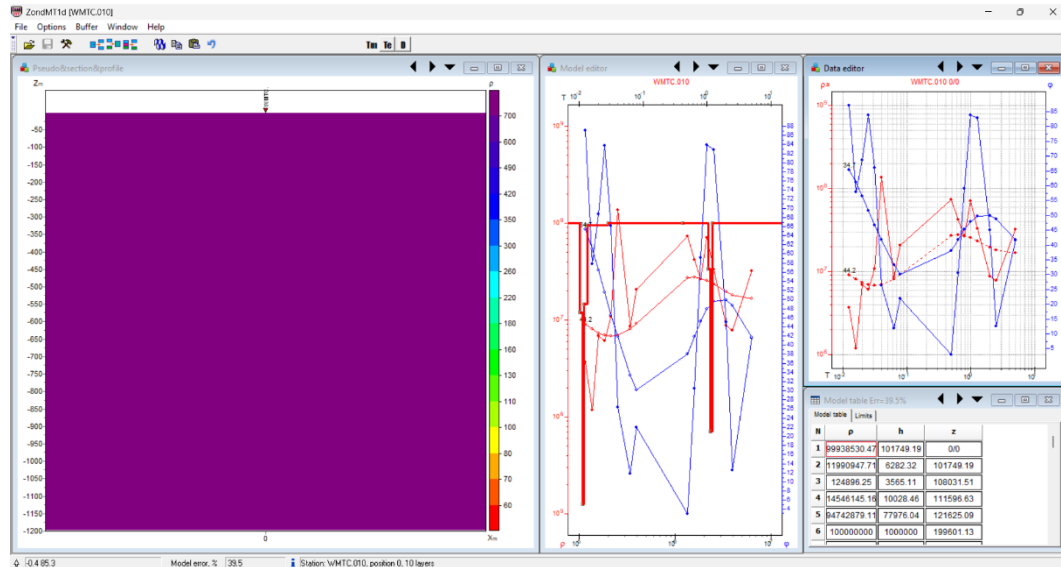


fig. 42

resultados sondeo mt correspondiente a wmtc.011

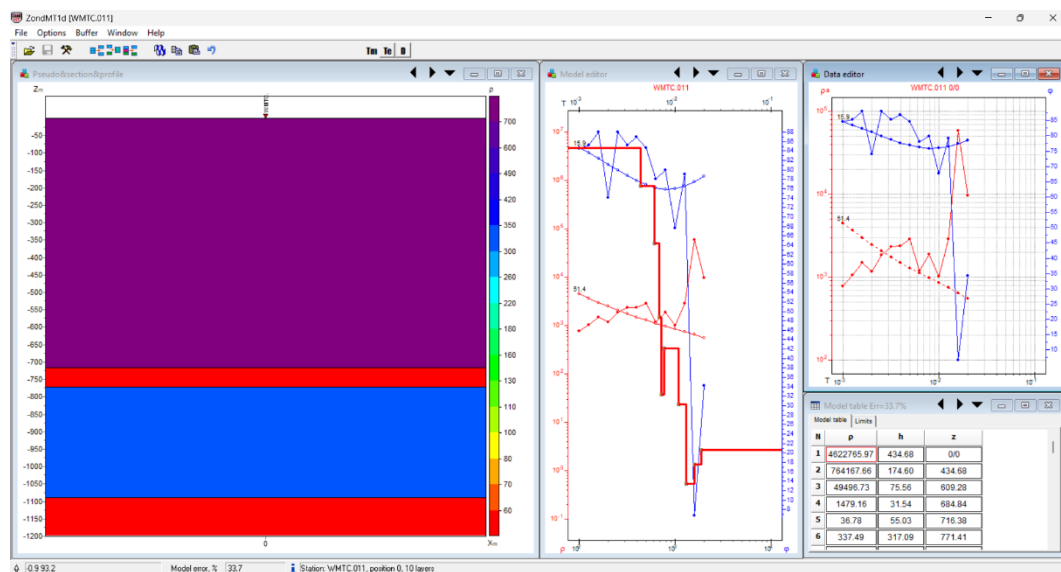


fig. 43

resultados sondeo mt correspondiente a wmtc.012

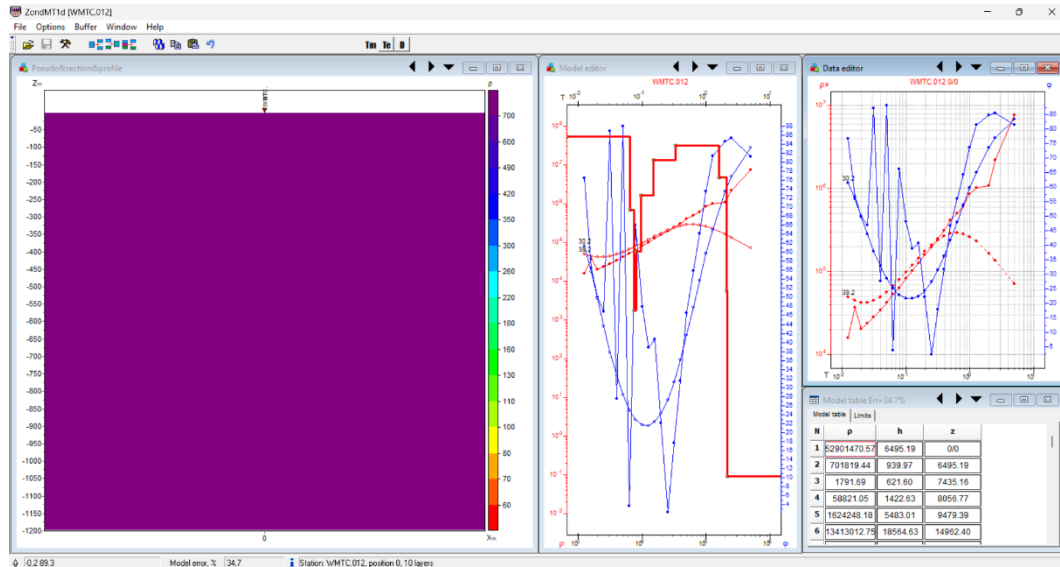


fig. 44

resultados sondeo mt correspondiente a wmtc.013

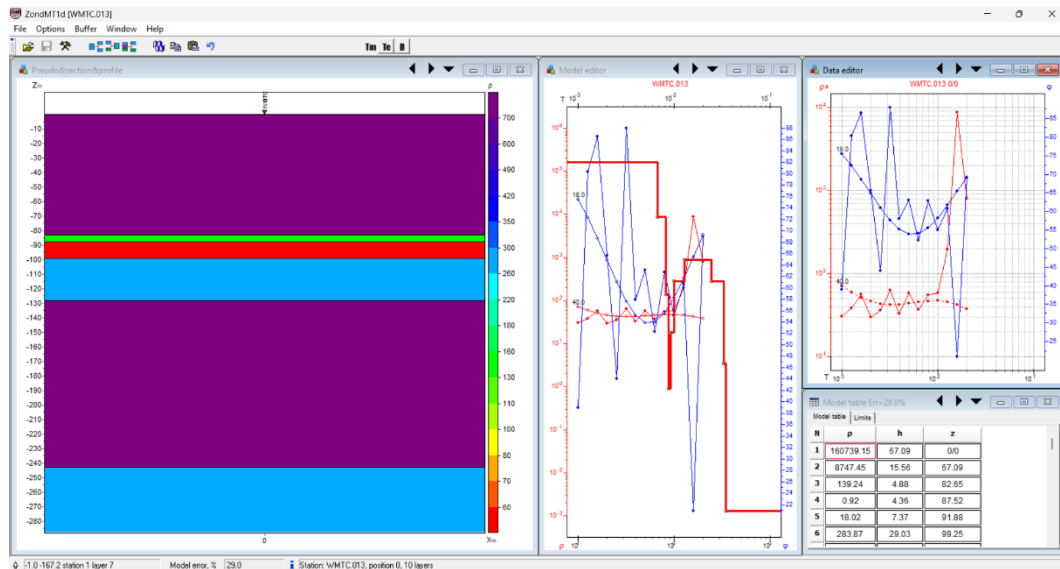
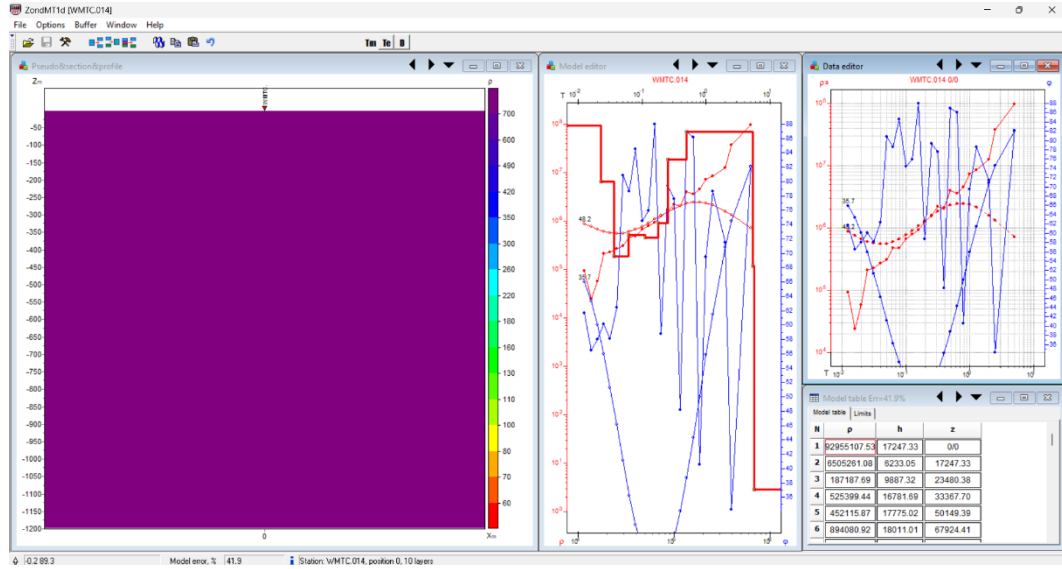


fig. 45

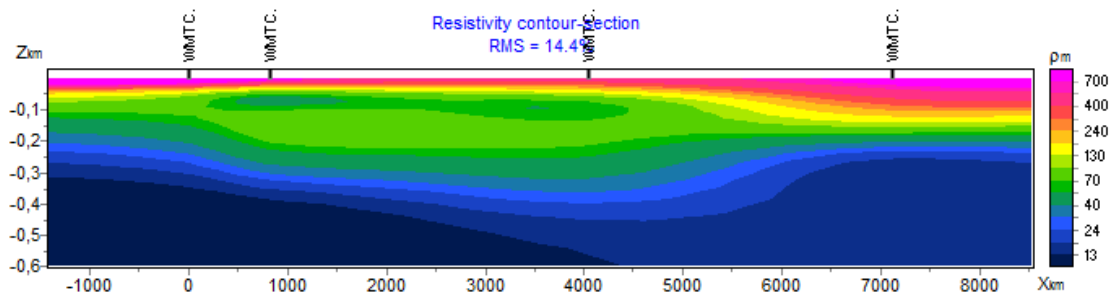
resultados sondeo mt correspondiente a wmtc.014



apéndice f). Similares las inversiones de la línea MT 1, en este perfil se obtiene una variación en la resistividad lateral en los modelos de 1.5D y 2D.

Figura 33

Inversión 2D Línea MT 2



Los valores de resistividad son mayores en este perfil respecto a la línea MT 1, con valores de hasta los $700 \Omega \cdot m$. Estos valores altos de resistividad corresponden a los primeros 100 m en profundidad del perfil, a profundidades mayores la resistividad disminuye hasta los $13 \Omega \cdot m$. Al igual que en la Línea MT 1, en la línea MT 2 resultan valores de resistividad intermedia (colores verdes) entre los 40 y $130 \Omega \cdot m$; este nivel de resistividades intermedias tiene una profundidad variable entre los 200 y 400 m.

Al considerar los resultados de las mediciones de laboratorio, se identificó que los valores relativamente más bajos de resistividad y mayores porosidades se asocian a materiales con mayor contenido de agua. En este sentido, al integrar la información obtenida en laboratorio con los perfiles de MT, se puede inferir que las variaciones observadas responden a un control tanto litológico como hidrogeológico. Así, las franjas de alta resistividad pueden explicarse por una baja

saturación de agua, menor porosidad o menor conectividad de los poros, mientras que las zonas más conductivas sugieren condiciones más favorables para la acumulación de agua.

5 Discusión

Los resultados obtenidos de las mediciones de propiedades físicas de las muestras de roca al sur de la Mesa de Los Santos revelan diferencias significativas entre las formaciones estudiadas, reflejadas en propiedades como resistividad, cargabilidad eléctrica, velocidad de onda P, porosidad, densidad y la estimación del agua retenida. Estos contrastes están fuertemente influenciados por factores como la porosidad y la litología de las rocas, los cuales a su vez afectan la distribución de estas propiedades en el área de estudio. La variabilidad en la resistividad, por ejemplo, muestra una notable disminución en las muestras húmedas, lo cual está relacionado con el contenido de agua en los poros de las rocas. Por otro lado, la cargabilidad eléctrica y la velocidad de onda P se asocian con diferencias litológicas y geológicas, diferenciando las formaciones detríticas de las carbonatadas. La distribución de estos parámetros, especialmente la porosidad y densidad, también refleja la influencia de la meteorización y la interconexión de los poros en las rocas, mientras que el agua retenida se correlaciona con la porosidad efectiva de las muestras.

5.1 Respuesta Modelos Sintéticos Sísmica de Refracción

Al establecer los valores de velocidad de la onda P para los modelos, se procuró respetar el principio geofísico del incremento en los valores de velocidad conforme aumenta la profundidad. En general, la respuesta sísmica de los modelos Mod 01 (figura 34), Mod 02 (figura 35) y Mod 03 (figura 36) ante la complejidad de los modelos no fue satisfactoria, esto se asocia a que la propagación de los rayos requiere un refractor o capa suprayacente de mayor velocidad. La inclusión de áreas con posible presencia de agua sectorizada lateralmente puede estar limitando la ejecución de los modelos. Sin embargo, si se mantiene una continuidad, o contrastes laterales bajos

en los valores de la velocidad, y si se cumple el incremento en la vertical de los valores de velocidad de onda P, si es posible evidenciar los contrastes o posibles capas en el subsuelo, como se ha evidenciado en los resultados de Vergel y Remolina (2023) y Rojas (2024).

Figura 34

Propagación teórica de rayos en el Mod 01 para la sísmica de refracción.

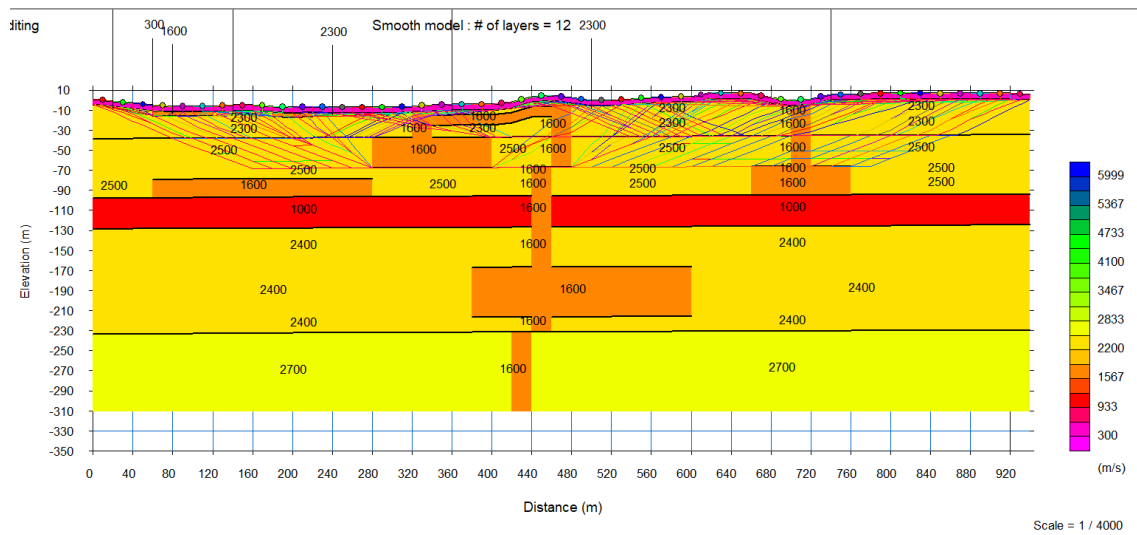


Figura 35

Propagación teórica de rayos en el Mod 02 para la sísmica de refracción.

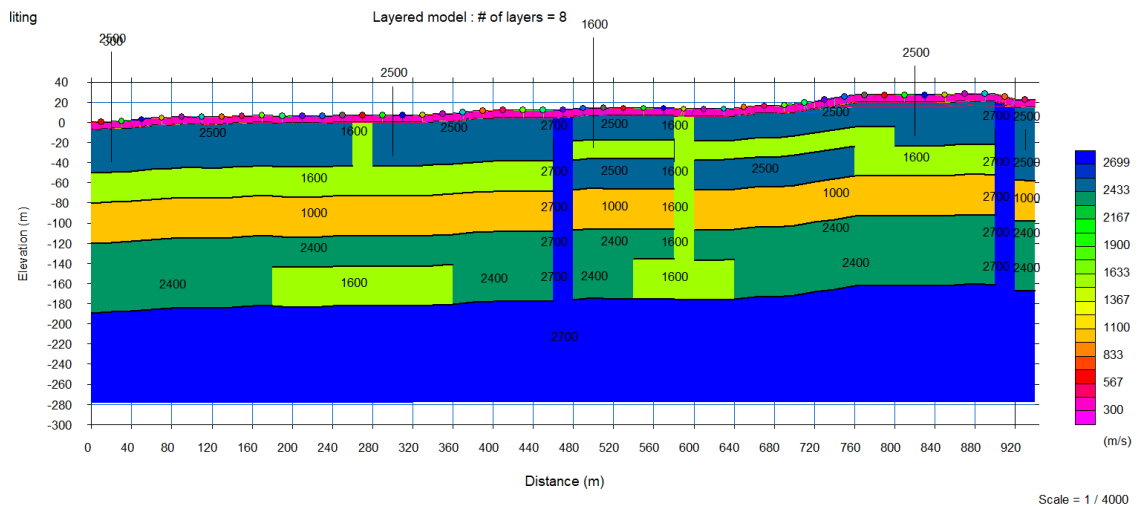
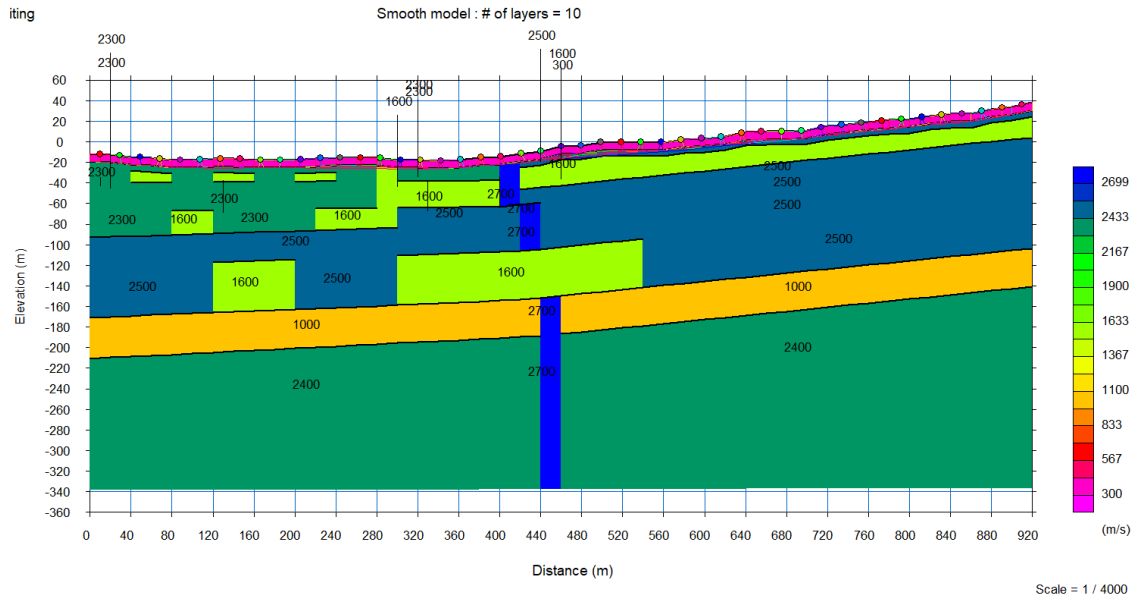


Figura 36

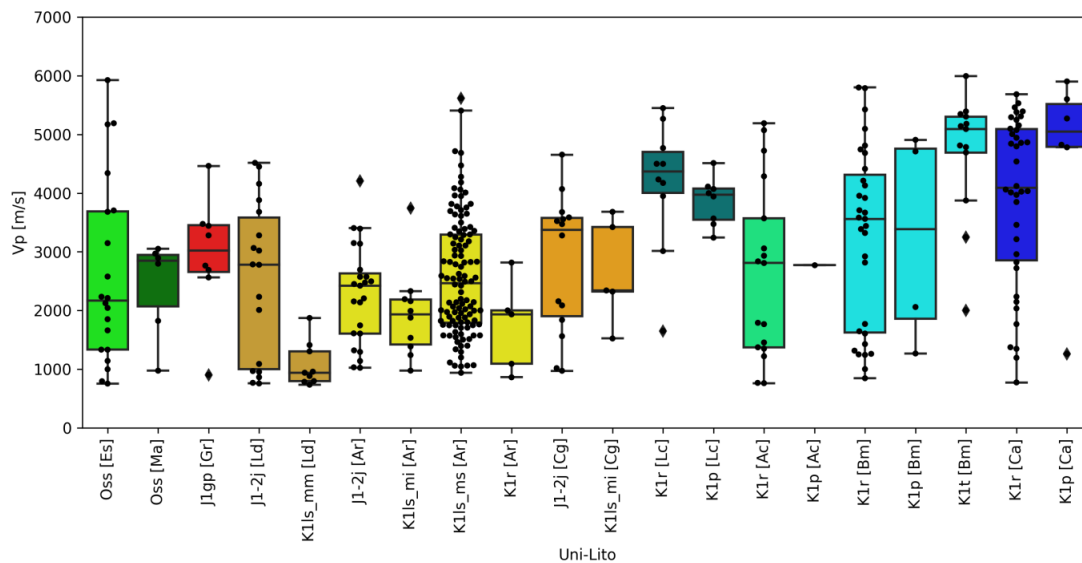
Propagación teórica de rayos en el Mod 03 para la sismica de refracción.



Una consideración de posibles factores adicionales que puede limitar la calidad de los resultados de los modelos sintéticos de sismica de refracción son valores de velocidad de onda P similares para el material de la Fm. Rosablanca y Fm. Los Santos. Los rangos de velocidad de la onda P medida en laboratorio indican que la Fm. Rosablanca en algunas muestras pueden llevar a tener valores mayores a los de la Fm. Los Santos, en el compilado de muestras totales realizado por García (2022) se evidencia que las calizas asociadas a la Fm. Rosablanca puede tener valores tan altos como las areniscas del miembro superior de la Fm. Los Santos (figura 37). El nivel lodoso de la Fm. Los Santos al estar en medio de dos capas con valores de velocidad mayores no podría ser diferenciado al no generarse la refracción.

Figura 37

Rangos de velocidad de onda P medidos de los plugs por Garcia (2022) para cada una de las formaciones, agrupadas por litología, aflorantes en la Mesa de Los Santos.



Nota: Convenciones de las formaciones aflorantes en la Mesa de Los Santos: Esquistos del Silgará (OSs), Granito de Pescadero (J1gp), formación Jordán (J1- 2j), Formación Los Santos miembro inferior (K1ls_mi), Formación Los Santos miembro medio (K1ls_mm), Formación Los Santos miembro superior (K1ls_ms), Formación Rosablanca (K1r), Formación Paja (K1p). Litologías identificadas en las formaciones aflorantes: Ar=areniscas, Ld=lodolitas, Cg=conglomerados, Lc=lodos calcáreos, Ca=calizas, Bm=biomicritas, Ac=areniscas calcáreas, Gr=granito, Ma=meta-arenisca, Es=esquisto.

5.2 Respuesta Modelos Sintéticos TRE

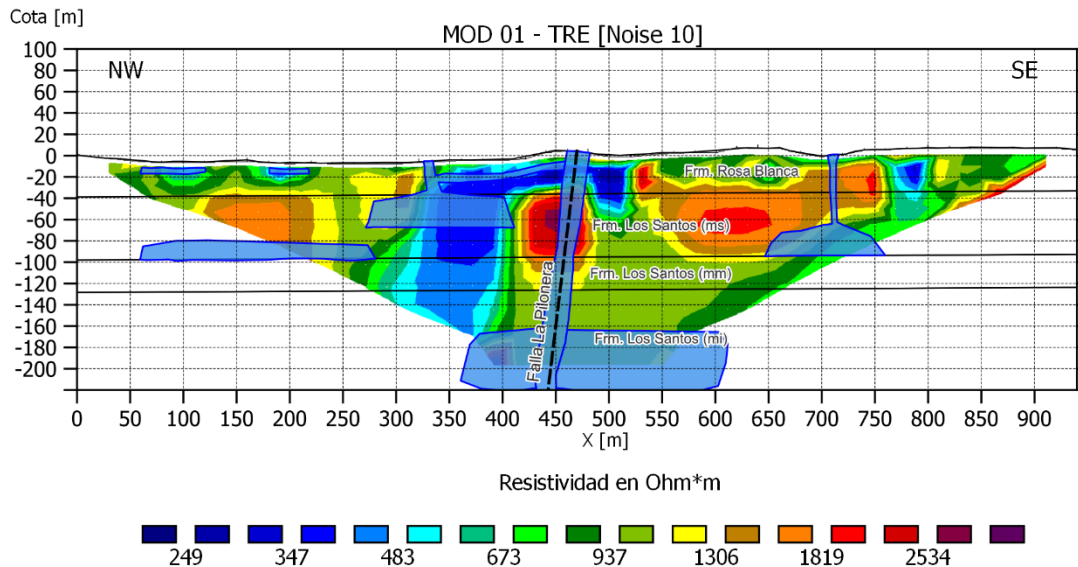
Para los datos de resistividad aparente obtenidos de la simulación de una adquisición de TRE se les añadió un ruido de 10%. Cabe mencionar que no se modificaron o establecieron

parámetros de inversión con el objetivo de ver el modelo obtenido con un proceso de inversión poco minucioso. Los tres modelos generados de la inversión con cuatro iteraciones lograron un error inferior al 8%. En general, los resultados obtenidos fueron satisfactorios y representativos respecto a lo que fueron los modelados sísmicos.

El modelo de TRE obtenido en el Mod 01 (figura 38) permite identificar las áreas inferidas con presencia de agua; las más superficiales, que lateralmente no están conectadas, muestran una distribución que coincide de forma muy similar con lo propuesto por Ariza y Gómez (2023) para la Formación Rosablanca. El comportamiento de la Falla La Pilonera como un canal que permite el flujo del agua no se logra demostrar, posiblemente debido al espesor de dicha área de influencia a la cual se le asignaron valores bajos de resistividad asociados a la presencia de agua. Aun así, el sector saturado próximo a la falla presenta una extensión en profundidad, la cual no es coherente con el modelo inicial. El nivel superior de la Fm. Los Santos se diferencia de los otros niveles y de la Fm. Rosablanca, al presentar valores altos de resistividad; esta respuesta concuerda con lo inferido por Vergel y Remolina (2023). El cuerpo de agua profundo no se evidencia en la TRE, posiblemente por la profundidad de investigación del perfil geoelectrico, lo que genera efectos de borde que no resuelven matemáticamente el modelo, pero que pueden diferir con el contexto geológico. Este planteamiento para la Mesa de Los Santos también es realizado por Ariza y Gómez (2023), indicando que a pesar de evidenciarse posibles contrastes en la parte más profunda del modelo de TRE, estos pueden ser de baja confiabilidad.

Figura 38

Modelo generado de la inversión de los datos de resistividad eléctrica sintéticos de Mod 01. Se superpone el modelo geológico utilizado.

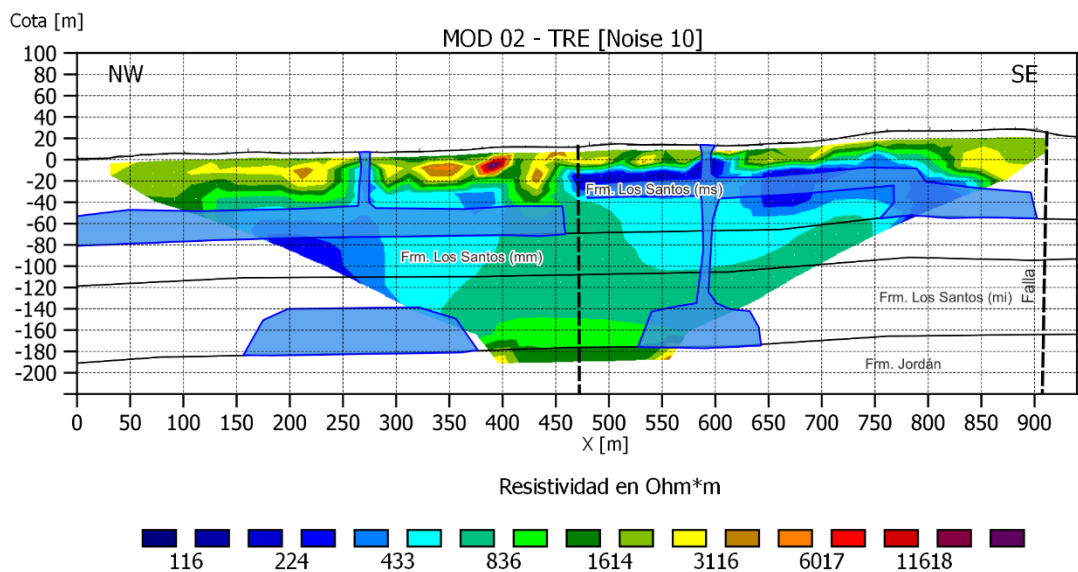


El modelo de TRE obtenido en el Mod 02 (figura 39) resulta con valores de resistividad superiores a los establecidos en el modelo inicial. Estos valores superiores a los $3.000 \Omega \cdot m$ se localizan próximos a la superficie. El plano de fracturamiento que separa a las dos áreas con presencia de agua de la Fm. Los Santos no se evidencia, pero si se aprecia la diferenciación de estos dos sectores saturados, validando en parte la propuesta de Vergel y Remolina (2023), la cual presenta planos de fracturamiento actuando como sellos o planos impermeables. En el sector NW del perfil, se extrapolan a profundidad valores bajos de resistividad, lo que sugiere una aparente presencia de agua en toda esta zona, al SE también se alcanza a evidenciar algo similar pero no tan profundo. La suposición de que el sector NW tenga valores bajos de resistividad similares al agua, correspondería a que para el miembro medio se establecieron valores de $1.000 \Omega \cdot m$ por su

litología lodosa, lo cual estaría provocando la generalización de valores bajos de resistividad en esta parte del perfil.

Figura 39

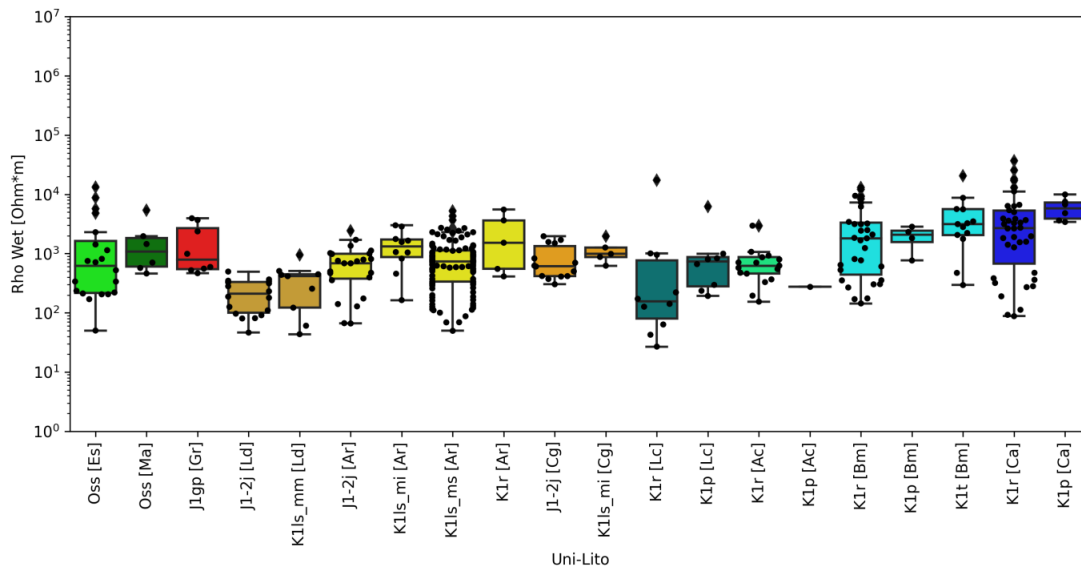
Modelo generado de la inversión de los datos de resistividad eléctrica sintéticos de Mod 02. Se superpone el modelo geológico utilizado.



En el compilado de *plugs* de la Mesa (García, 2022), los valores de resistividad de las litologías en húmedo presentan rangos similares. Para el caso de las areniscas del miembro superior y los lodos del miembro medio, ambos de la Fm. Los Santos, comparten el rango entre 100 – 1.000 $\Omega \cdot m$ (figura 40).

Figura 40

Rangos de resistividad eléctrica en húmedo medidos de los plugs por Garcia (2022) para cada una de las formaciones, agrupadas por litología, aflorantes en la Mesa de Los Santos.



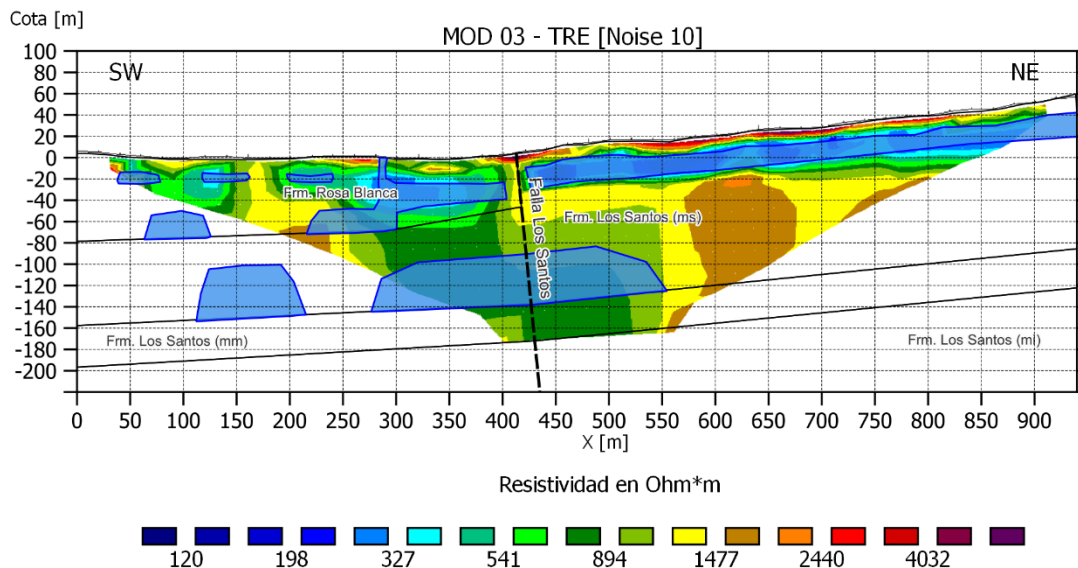
Nota: Convenciones de las formaciones aflorantes en la Mesa de Los Santos: Esquistos del Silgará (OSs), Granito de Pescadero (J1gp), formación Jordán (J1- 2j), Formación Los Santos miembro inferior (K1ls_mi), Formación Los Santos miembro medio (K1ls_mm), Formación Los Santos miembro superior (K1ls_ms), Formación Rosablanca (K1r), Formación Paja (K1p). Litologías identificadas en las formaciones aflorantes: Ar=areniscas, Ld=lodolitas, Cg=conglomerados, Lc=lodos calcáreos, Ca=calizas, Bm=biomicritas, Ac=areniscas calcáreas, Gr=granito, Ma=meta-arenisca, Es=esquisto.

El perfil de TRE obtenido en el Mod 03 (figura 41) correspondiente al contacto fallado entre la Fm. Los Santos y la Fm. Rosablanca no logra distinguir el material asociado a cada formación, ya que generaliza valores promedio de $1.500 \Omega \cdot m$ para ambas formaciones en áreas

no saturadas. Los sectores con presencia de agua son identificados con valores inferiores a los $500 \Omega \cdot m$. El contacto entre las dos formaciones de carácter tipo sello se evidencia, diferenciando los dos sectores con presencia de agua en cada formación. En profundidad, la hipótesis de una conexión entre sectores con presencia de agua por la porosidad de las areniscas del miembro superior de la Fm. Los Santos no es tan marcada como en los otros sectores con presencia de agua, se generaliza a resistividades de unos $894 \Omega \cdot m$.

Figura 41

Modelo generado de la inversión de los datos de resistividad eléctrica sintéticos de Mod 03. Se superpone el modelo geológico utilizado.



5.3 Interpretación perfiles magnetotelúrica

En el sur de la Mesa de Los Santos, la Falla Los Santos separa la Formación Los Santos de las formaciones carbonatadas correspondientes a Rosablanca, Paja y Tablazo. Las estaciones de

MT se dispusieron sobre material de la Fm. Rosablanca y Fm Paja, bajo esta consideración y los espesores indicados por Vargas (2008), 280 m y 250 m respectivamente, se podría considerar que el material correspondiente a estas dos formaciones es de hasta 530 m. Este posible espesor es coherente en la Línea MT 1, en la cual los valores de resistividad altos, de hasta $350 \Omega \cdot m$, corresponderían con estas formaciones carbonatadas. La posible variación de la base de este nivel resistivo puede ser producto al fallamiento local. Los valores de resistividad intermedios, entre los 80 a $150 \Omega \cdot m$, podrían asignarse a la Fm. Los Santos, la cual puede contener agua, teniendo en cuenta que a profundidades mayores en los flancos del perfil se obtienen valores de resistividad inferiores a los $50 \Omega \cdot m$. Estos posibles sectores saturados no evidencian una clara conexión entre ellos, considerando que entre las abscisas de 500 y 2000 m en X del perfil, los valores de resistividad son mayores.

Aunque no se identifica en el perfil de MT una conexión entre los dos posibles sectores saturados, puede existir una conexión producto del fracturamiento y fallamiento en áreas aledañas, estimando que no todas las fallas y fracturas van a actuar como canales para el flujo del agua (García-Arias *et al.*, 2024a). Tomando en cuenta que en el norte de la Mesa de Los Santos la Fm. Los Santos actúa como la principal unidad de almacenamiento de agua debido a sus valores de porosidad más altos en comparación con las unidades carbonatadas adyacentes, puede inferirse que los valores intermedios de resistividad identificados corresponden a material de la Fm. Los Santos con una menor presencia de agua, mas no que esté ausente el líquido.

Los valores de resistividad intermedia registrados en la línea MT 1 en los primeros 200 m de profundidad, y localizados en los primeros 2.000 m en el eje X (abscisas) del perfil, pueden corresponder a áreas con presencia de agua. Esta hipótesis puede respaldarse parcialmente por la

presencia de drenajes cercanos; sin embargo, debido al leve buzamiento de los estratos hacia el SW y la cercanía a los escarpes, el agua no logra infiltrarse significativamente en profundidad.

De acuerdo con la interpretación de la Línea MT 1, los primeros 200 a 300 m de profundidad del perfil corresponderían a las unidades carbonatadas en la Línea MT 2, los cuales presentan valores intermedios de resistividad (colores verdes) que oscilan entre 40 y 130 $\Omega \cdot m$, posiblemente asociados con la presencia de agua. Probablemente, esta disminución en el espesor de las unidades carbonatadas esté relacionada con el posible basculamiento que se tiene de las formaciones al SW, teniendo en cuenta la topografía y que gran parte de la unidad aflorante es la Fm. Rosablanca. Esto permitiría que la Fm. Los Santos se encuentre más próxima a la superficie, la cual tendría una posible presencia de agua al registrar valores de resistividad inferiores a los 40 $\Omega \cdot m$ a profundidades mayores de los 300 m.

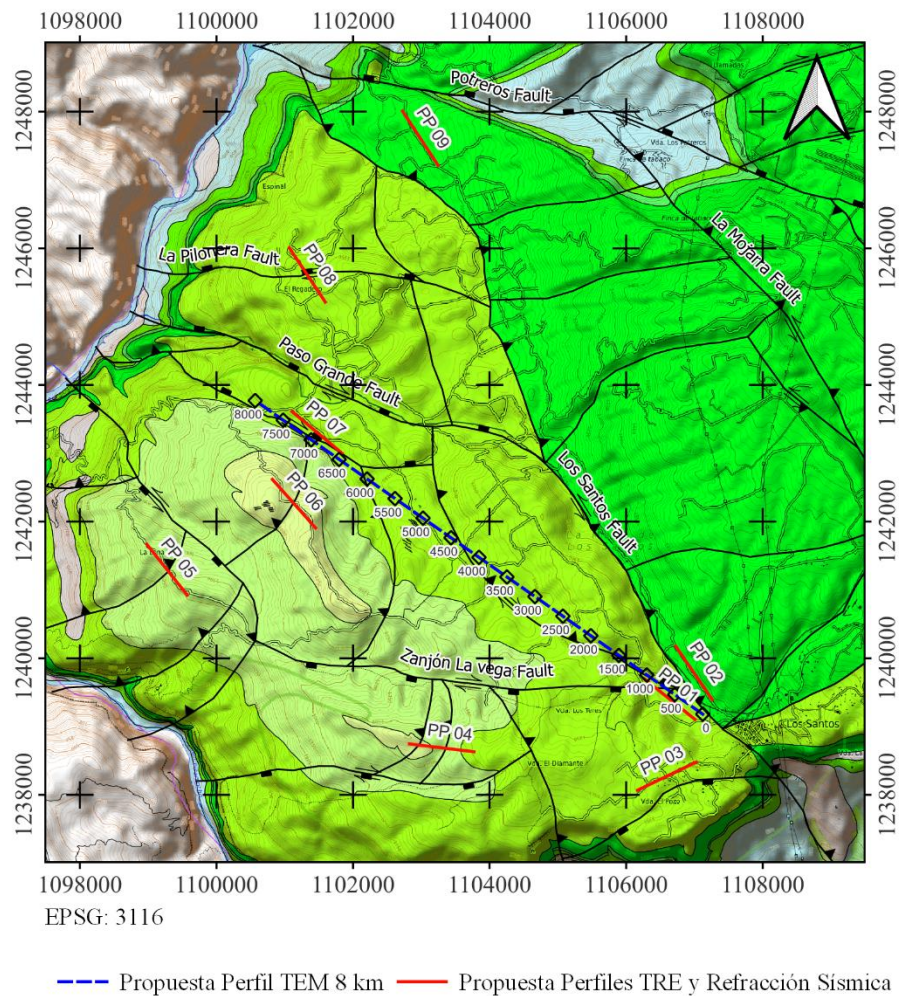
Sin embargo, este perfil tiene mayor longitud y la distancia entre estaciones es mayor, por lo tanto, provoca incertidumbre en la interpretación de los resultados. Cabe mencionar que este perfil también pasa por algunos drenajes, por lo que se puede tener una misma consideración de que puede existir presencia de agua.

5.4 Propuesta de diseño de adquisición geofísica

Teniendo en cuenta los resultados de magnetotelúrica, modelos sintéticos de las propiedades físicas obtenidas de los *plugs*, estudios previos y disponibilidad de equipos de la UIS, se proponen nueve sectores para la realización de perfiles geofísicos y 17 puntos de sondeos electromagnéticos (figura 42) espaciados cada 500 m. Adicionalmente, este diseño geofísico considera el cambio topográfico, la facilidad de acceso y desplazamiento en el sur de la Mesa de Los Santos.

Figura 42

Mapa de localización del diseño geofísico propuesto para el sur de la Mesa de Los Santos, conformado por nueve perfiles de adquisición de TRE y refracción sísmica y 17 sondeos TEM en un perfil de 8 km cada 500 m.



Los nueve perfiles planteados corresponderían a TRE con una longitud de 950 m utilizando 96 electrodos y espaciado entre electrodos de 10 m. Los resultados de los modelos sintéticos de

las TRE permitieron revelar un resultado favorable en identificar posibles discontinuidades asociadas a fracturamiento o fallamiento. Por lo tanto, la localización de las TRE se realizó de forma perpendicular a las fallas del modelo estructural de García-Arias *et al.* (2024b) y se estima una profundidad de investigación de 140 m.

Aunque los perfiles de magnetotelúrica aportaron información relevante para el estudio, este método presenta algunas limitaciones, entre las que se destacan el tiempo requerido para la adquisición y su alta sensibilidad al ruido (principalmente causado por el tránsito frecuente de vehículos pesados en la zona), lo cual puede afectar la calidad de los datos. Asimismo, la resolución lateral depende en gran medida de la densidad de estaciones, por lo que espaciamientos amplios pueden limitar la identificación detallada de estructuras someras o de pequeña escala, como se evidencia en este caso de estudio.

No obstante, se recomienda que futuras investigaciones consideren la adquisición complementaria de datos magnetotelúricos con una mayor densidad de estaciones, con el fin de mejorar la caracterización geológica.

Por esta razón, se propone el uso de otro método electromagnético como los sondeos TEM (Transient Electromagnetic), los cuales tienen un tiempo de montaje y adquisición mucho menor. La profundidad efectiva de investigación de este método es de al menos 300 m, considerando los resultados de García y Gómez (2015). Adicionalmente, García y Gómez (2015) diferencian a los tres miembros de la Fm. Los Santos en el sector norte de la Mesa de Los Santos, en los primeros 200 m del sondeo TEM. Los 17 sondeos TEM propuestos se ubican de manera que se pueda generar un perfil de aproximadamente 8 km, con estaciones espaciadas cada 500 m. El rumbo del perfil considera los resultados de Arguello *et al.* (2018), quienes concluyen que las microcuencas que presentan mejor predisposición para la percolación de agua y mejor captación son las 2 y 5.

A pesar de que se han realizado varios estudios geofísicos en la Mesa de Los Santos, únicamente el trabajo de Moyano (2010) ha abarcado una distribución espacial amplia en un mismo proyecto y teniendo como objetivo al sur de la Mesa. Por esta razón, la propuesta del diseño geofísico busca aportar a la verificación de la cinemática propuesta por García-Arias *et al.* (2024b) mediante la implementación de 9 perfiles de TRE al sur de la Mesa de Los Santos, y además de ratificar las fallas abiertas (favorecen el flujo de agua) y cerradas (limitan la circulación de fluidos). El perfil electromagnético de 17 sondeos TEM analizaría las posibles variaciones laterales y verticales, considerando la dirección de buzamiento generalizado al SW de las unidades carbonatadas y la facilidad de acceso al terreno, diferenciando el contacto entre las formaciones Los Santos y Rosablanca, en las microcuencas de mayor interés propuestas por Arguello *et al.* (2018).

En el diseño no se consideró la sísmica de refracción debido a los resultados obtenidos de los modelos sintéticos. Pero los resultados de Vergel y Remolina (2023) en la Fm. Los Santos y Rojas (2024) evidencian que en la exploración somera de sísmica de refracción junto con MASW aporta en la identificación de capas asociadas (posible estratificación y perfiles de suelo) y áreas con presencia de agua, este último al variar la relación de los valores de velocidad de onda P y S. Al contemplar que al sur de la Mesa las formaciones presentan buzamiento en dirección SW, la aplicación de perfiles sísmicos aportaría en evaluar el buzamiento y espesores de los materiales del subsuelo, diferenciando entre suelos y materiales más consolidados. Para mejorar el resultado de la exploración sísmica y TRE, se puede hacer uso de adquisiciones tipo *Roll-Along*, la cual optimiza la resolución lateral manteniendo la misma profundidad de interés. En la exploración sísmica, el incremento en la cantidad de las fuentes también puede aportar en mejorar la calidad de los resultados.

5.5 Integración

La implementación del método de remuestreo o *Bootstrapping*, o cualquier otro método para el aumento de datos, permite la generación de intervalos de confianza y comprender un poco más la distribución de los datos cuando se cuenta con una cantidad de muestras limitada. Esto resulta especialmente útil en los entrenamientos de modelos de inteligencia artificial, ya que facilita la función de establecer parámetros iniciales para el proceso de simulación o comportamiento de una variable regionalizada. Aun así, el muestreo debe ser representativo o debe mantener una relación entre la cantidad de individuos y la población de interés.

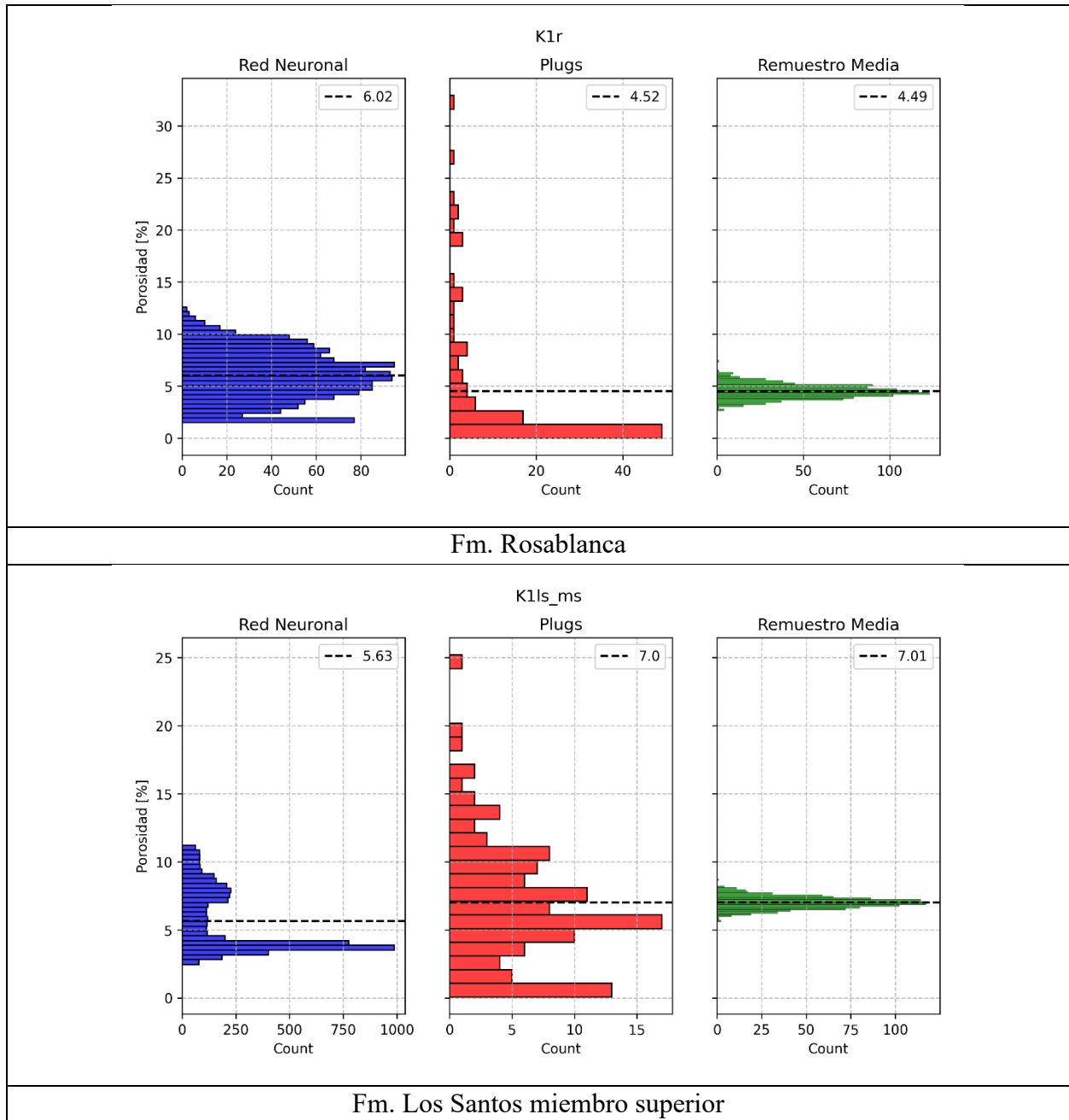
Si se evalúa el remuestreo para el miembro superior de la Fm. Los Santos, al ser el que aflora en la Mesa de Los Santos y del cual se extrae el agua subterránea, se obtiene que la porosidad promedio está entre el 6% y 8%; y para la Fm. Rosablanca entre 4% y 6% (figura 43). Al comparar con la distribución de los *plugs*, mediante el remuestreo es posible conocer un rango o intervalo de confianza adicional para el estadístico calculado. Aunque la desviación estándar es un estadístico que generaliza la dispersión de las muestras, puede que no sea confiable al presentar una distribución que no sea normal, con el remuestreo se llega a una distribución normal del estadístico remuestreado. Estos rangos indican que ambas formaciones tienen potencial para el almacenamiento de recursos hídricos, aun así, se debe considerar la porosidad secundaria producto del fracturamiento, así como los procesos de karstificación en la Formación Rosablanca, los cuales podrían incrementar significativamente su capacidad de almacenamiento y transmisión de agua. García-Arias *et al.* (2024a) resaltan que no todo el fracturamiento de la Mesa de Los Santos es favorable para el flujo del agua, al igual que las fallas. Además, debido al fracturamiento heterogéneo presente en la zona, es posible que se generen áreas con mayor o menor acumulación

de agua, lo que no estaría permitiendo una conexión lateral de los acuíferos; tal como se concluye de la exploración mediante TRE realizadas por Vergel y Remolina (2023) y Ariza y Gómez (2023). Los valores en la resistividad aparente medidos en la Mesa se ven afectados por las fluctuaciones estacionales, localización, equipo utilizado, entre otros. Es importante mencionar que esto requeriría de la realización de un estudio multitemporal, con el fin de hacer un control de los cambios del nivel freático.

Durante la revisión bibliográfica, el único trabajo disponible que hicieran uso de las TRE al sur de la Mesa de Los Santos corresponde al de Ariza y Gómez (2023). Aunque se plantea la posible presencia de fracturas y karstificación, asociada a la naturaleza carbonatada de la Fm. Rosablanca, no se han realizado estudios que permitan evaluar de manera directa la presencia de cavidades en profundidad que estén permitiendo el flujo del agua. Estas estructuras o cavidades pueden ser de un tamaño muy reducido en comparación con las profundidades alcanzadas por el método magnetotelúrico (MT), el cual opera a escalas de kilómetros. Debido a esta limitación en la resolución espacial, el MT no resulta adecuado para identificar posibles áreas vacías o cavidades de pequeña escala, lo que sugiere la necesidad de emplear métodos complementarios con mayor detalle para explorar estas características en profundidad.

Figura 43

Comparación de los valores de porosidad estimados por la Red Neuronal, catálogo de *plugs* y el remuestreo de las formaciones Rosablanca y miembro superior de Los Santos.



Los perfiles de MT obtuvieron valores de resistividad que pueden asociarse a la presencia de agua, respaldada por la presencia de estructuras de tipo drenada. También, se infiere una posible variación en la profundidad de la base de la Fm. Rosablanca, lo cual sugiere que en algunos sectores la Fm. Los Santos se presente más cercana a la superficie. Por otra parte, la Fm. Los Santos, al considerar su potencial de almacenamiento del recurso hídrico, es inferida como la que está almacenando agua en profundidad al sur de la Mesa de Los Santos; sin embargo, por causa del fallamiento local y fracturamiento, la distribución del recurso hídrico no puede ser homogénea, haciendo difícil la consideración de la continuidad lateral o conexión de las posibles áreas con presencia de agua en esta formación.

6 Conclusiones

Los modelos directos desarrollados a partir de las propiedades físicas medidas en laboratorio permitieron evaluar la respuesta esperada de los métodos geofísicos en el sur de la Mesa de Los Santos. Los resultados indican que la tomografía de resistividad eléctrica es el método más adecuado para identificar zonas potencialmente asociadas con agua subterránea y caracterizar el contexto geológico, mientras que la sísmica de refracción actúa principalmente como información complementaria para reducir incertidumbres interpretativas. Asimismo, la exploración de objetivos ubicados a profundidades superiores a 300 m requiere la implementación de métodos de mayor alcance, como los sondeos electromagnéticos en dominio del tiempo o la magnetotelúrica.

La medición de propiedades físicas en laboratorio se llevó a cabo en un total de 99 núcleos o *plugs*, siendo las de mayor interés para la exploración de aguas subterráneas las propiedades de porosidad, resistividad eléctrica y velocidad de onda P. Las dos formaciones de mayor extensión e interés hídrico son las Fm. Los Santos y la Fm. Rosablanca, las cuales presentaron valores de resistividad de hasta $923 \Omega \cdot m$ y $3394 \Omega \cdot m$ respectivamente. Los valores máximos de velocidad de onda P para la Fm. Los Santos fue de 2573 m/s y de 3411 m/s para la Fm. Rosablanca. La porosidad es la propiedad que controla que tanta agua puede almacenar la formación, el valor promedio para el miembro superior de la Fm. Los Santos fue de aproximadamente 7% y de 4% para la Fm. Rosablanca.

Se realizó el modelado para tres perfiles de adquisición, de unos 900 m de longitud, al oeste de la Falla Los Santos, donde se ha identificado un mayor potencial en la presencia de agua, debido a la porosidad observada en los materiales del subsuelo. En estos tres perfiles se modeló la

respuesta de la sísmica de refracción y de tomografías de resistividad eléctrica, reafirmando el potencial del uso de la resistividad eléctrica para identificar áreas con potencial hidrogeológico. En el caso de la sísmica de refracción, se identificó que existe limitación en el modelo invertido, por lo cual no se considera como primer método a seleccionar en la prospección de aguas subterráneas en la Mesa de Los Santos. La sísmica de refracción se puede utilizar como método complementario para entender los primeros metros de profundidad y la posible meteorización de este.

Un total de nueve estaciones de magnetotelúrica fueron realizadas, y dos perfiles 2D fueron generados. Estos perfiles ratifican la variación lateral y el posible control estructural para el flujo y almacenamiento del agua subterránea. Se estima que desde los 300 m de profundidad se localizaría la Fm. Los Santos, la cual podría presentar agua en toda su extensión, con algunos sectores con un mayor contenido de este recurso.

Se proponen nueve sectores para la realización de perfiles geofísicos de tomografías de resistividad eléctrica y 17 puntos de sondeos electromagnéticos espaciados cada 500 m para obtener un perfil de 8.000 m. Este diseño geofísico se centra en el cambio topográfico, la facilidad de acceso y desplazamiento en el sur de la Mesa de Los Santos, priorizando la comprensión de las fallas locales y cercanía a los drenajes.

Referencias bibliográficas

- ABEM Instrument AB. (2018). Instruction Manual Terrameter SAS 4000 / SAS 1000. ABEM Printed Matter. Sundbyberg, Suecia. Recuperado de: https://www.guidelinegeo.com/wp-content/uploads/2018/10/Terrameter-SAS-1000_4000_Manual_Terrameter_GGEO-100049.pdf
- Arguello Diaz, A. S., Becerra Figueredo, N., Herrera Torres, L. Y., y Prada Avellaneda, F. (2018). *Estudio del Recurso Hídrico Subterráneo en la Zona Sur Occidental del Municipio de los Santos, Santander*. Trabajo de grado para optar por el título de geólogo, Universidad Industrial de Santander.
- Ariza Daza, J. C. y Gómez Acuña, M. F. (2023). *Correlación de la resistividad eléctrica y el fracturamiento al sur de la Mesa de Los Santos*. Tesis de pregrado para optar al título de Geólogo. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/15301>
- ASTM International. (2022). *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Rock Cores*. ASTM D2938-19. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Aguilar, R. (2013). Arid groundwater dependent ecosystem response to salinization processes in a coastal aquifer: deriving vegetation indicators of the aquifer condition. University of Algarve. Faro, Portugal. (Doctoral dissertation).
- Alcaldía municipal Los Santos (2016). Plan de Desarrollo 2016-2019: Los Santos Con Agua Crece". Los Santos.

- Aldana, S. (2008). Estratigrafía de la Formación Los Santos en las secciones de La Navarra y El Calicho en la Mesa de Los Santos (Departamento de Santander). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. (Tesis de pregrado).
- Alfaro, P., Santos, P. y Castaño, S. (2006). Fundamentos de hidrogeología. Mundi-Prensa Libros. Madrid, España.
- Arias, D., Ramírez, O., y Patiño, F. (2012). Relaciones geoelectricas en la exploración geotécnica. Boletín de Ciencias de la Tierra, núm. 31, 2012, pp. 39-50. Universidad Nacional de Colombia Medellín, Colombia.
- Auge, M (2008). Métodos geoelectricos para la prospección de agua subterránea. Área de Hidrogeología. Departamento de Ciencias Geológicas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Apuntes de cátedra.
- Becerra, N. y Parra, C. (2016). Balance Hídrico Para Estimar Recarga Potencial En La Mesa De Los Santos Y Dirección De Flujo Del Agua Subterránea. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander (Tesis de pregrado).
- Benevides, A., Fontes, S. y La Terra, E. (2020). Magnetotelluric imaging of the Iguatu Basin in NE Brazil: From shallow aquifers to mid-crustal conductors. Journal of South American Earth Sciences, 97, 102396. Rio de Janeiro, Brazil.
- Berlanga, Á. R. Q. (2013). Aplicación de la tomografía eléctrica en la caracterización del deslizamiento de Doña Mencía. Universidad de Granada.
- Carbajo, M., Pera, G. y Lexow, C. (2017). Hidrocarburos en fase libre sobre la capa freática en la ciudad de Bahía Blanca. Universidad Nacional del Sur, Argentina.

- Cardozo, L. y Vargas, P. (2015). Estudio geoelectrico a partir de método SEV para la modelación de acuíferos en los sectores de Iza, Cuítiva, Firavitoba - Departamento de Boyacá. Sogamoso: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. (Tesis de pregrado).
- Carrillo Hernández, Y. M. y Silva Gómez, J. F. (2024). Correlación estratigráfica y cuantificación de fracturas a partir de imágenes de UAV en los escarpes de La Mesa de Los Santos (Santander). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. (Tesis de pregrado).
- Cediel, F. (1968). El Grupo Girón, una molasa mesozoica de la Cordillera Oriental. *Boletín Geológico*, 16(1-3), 5-96. Servicio Geológico Nacional, Bogotá.
- Chelotti, L., Acosta, N., Foster, M., Ledesma, M., Constantino, D., Cid de la Paz, M. and Guerra, G. (2018). Glosas de geofísica. Tema 2: Prospección Gravimétrica. Catedra de Geofísica Aplicada. Chubut, Argentina: Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.
- Chitea, F., Ioane, D., y Serban, A. (2014). Integrated methods for analyzing an area affected by oil and waste water pollution. In 14th GeoConference on Science and Technology exploration and mining-Conference Proceedings (Vol. 1, pp. 497-504).
- Chung, K.-L. (2005). *Fundamentals of Acoustics* (4th ed.). New York, NY: John Wiley & Sons.
- Clavijo, J., Pinto, J., Gutierrez, D., Mora, J., Rojas, N., Adarme, I., Aldana, S., Contreras, N., Diaz, E., Melo, L., Reátiga, G., Rincon, M. y Vargas, C. (2007). Mapas de zonas de interés hidrogeológico de la Mesa de Los Santos y borde occidental del Macizo de Santander. INGEOMINAS – UIS.
- Contreras, N. (2008). Análisis del fracturamiento presente en la Formación Los Santos al noreste y centro de la Mesa de los Santos, Departamento de Santander. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. (Tesis de pregrado).

- Díaz, E. (2008). Análisis preliminar del potencial hidrogeológico en la Mesa de Los Santos, región central del departamento de Santander. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. (Tesis de pregrado).
- Díaz, A y Duarte, A (2009). Evaluación geofísica en rocas cretácicas sedimentarias de los municipios de Barichara, Mogotes y el sector conocido como la Mesa de Los Santos en el departamento de Santander, mediante sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT) y sondeos eléctricos verticales (SEV). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. (Tesis de pregrado).
- Díaz, E., Contreras, N., Pinto, J., Velandia, F., Morales, C., y Hincapie, G. (2009). Evaluación hidrogeológica preliminar de las unidades geológicas de la mesa de Los Santos, Santander. *Boletín de Geología*, 31(1), 61-70.
- Estrada, L. (2012). Apuntes de sismología para alumnos de ingeniería geodésica y geofísica de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad de Tucuman. Tucuman, Argentina: Universidad Nacional de Tucuman.
- Flórez, L (2019). Optimización de la Cobertura y Abastecimiento del Servicio Público de Agua Potable en el Municipio de los Santos, Santander. Universidad de Santander. Bucaramanga, Colombia. (Tesis de maestría).
- Galvis, L. V., Ochoa, C. A., Fuentes, H. A., Jiménez, J. M. C., y Carrillo, Z. H. C. (2011). Estimación de propiedades mecánicas de roca utilizando inteligencia artificial. *Ingeniería y Ciencia*, 7(14), 83-103.
- Gan, F., Han, K., Lan, F., Chen, Y. y Zhang, W. (2017). Multi-geophysical approaches to detect karst channels underground—A case study in Mengzi of Yunnan Province, China. *Journal of Applied Geophysics*, 136, 91-98. Guangxi, China.

- García, S. y Gómez, E. (2015). Modelo conceptual hidrogeofísico para evaluar el potencial hidrogeológico de la Formación Los Santos en la Mesa de los Santos - Santander, Colombia. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander (Tesis de pregrado).
- García, S. (2022). *Análisis Estructural De La Mesa De Los Santos Y Redes Neuronales Para La Estimación Local De Las Propiedades Físicas De La Roca*. Trabajo de grado para optar por el título de Magister en Geofísica, Universidad Industrial de Santander.
- García-Arias, S., Velandia Patiño, F. A., Sanabria Gómez, J. D., y Ulloque Ardila, M. T. (2024a). Mapas predictivos con redes neuronales a partir de propiedades físicas de las rocas: caso de estudio en la Mesa de Los Santos (Santander). *Revista EIA*, 21(41), 4112 pp. 1–33. <https://doi.org/10.24050/reia.v21i41.1731>
- García-Arias, S., Velandia, F., Alvarez, A., Sanabria-Gómez, J. D., Tarazona, Y. and Vargas, M. C. (2024b). Stress tensors and quantification of fracture patterns to analyze connectivity and potential fluid flow in a mesa landform of the Northern Andes. *Journal of Mountain Science*, 21, 271–291. <https://doi.org/10.1007/s11629-023-8338-5>
- García Arias, S. A. y Gómez García, E. A. (2015). *Modelo Conceptual Hidrogeofísico para evaluar el Potencial Hidrogeológico de la Formación Los Santos en la Mesa de Los Santos-Santander, Colombia*. Trabajo de grado para optar por el título de geólogo, Universidad Industrial de Santander.
- GCTS Testing Systems, (2018). PLT-2W Wireless Point Load Test System. Recuperado de: https://www.gcts.com/?s=prod_ver&p=products&ID=226
- Geometrics, INC. (2011). Operation manual for Stratagem systems running IMAGEM (Ver. 2.21h). San José, California, USA.

- Giménez, M., Menta, A., Flaquer, A., Musso, M. and Ramos, J., (2019). Aplicación De Métodos Geofísicos Al Estudio Del Sistema Hidrogeológico Libertad Raigón. XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología. Universidad de la República de Uruguay.
- Gobernación de Santander (2014). Lineamientos y directrices de ordenamiento territorial del departamento de Santander. Bucaramanga, Colombia. Recuperado de: <http://historico.santander.gov.co/index.php/gobernacion/documentacion/viewcategory/359-lineamientos-y-directrices-del-ordenamiento-territorial>
- Gómez, C., Wandurraga, L., Molina, M. and Sarmiento, M. (2014). Análisis de la situación hidrológica de la Mesa de Los Santos, Departamento de Santander. Bogotá, D.C: Universidad Católica de Colombia (Tesis de especialización).
- Gómez, J. y Cuervo, R. (2012). Estudio geológico enfocado en la caracterización paisajística de la Mesa de los Santos, Santander, Colombia. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander (Tesis de pregrado).
- González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., y Oteo, C. (2002). Ingeniería geológica. Pearson Educación.
- Heaney, M. (2000). Electrical conductivity and resistivity. The measurement, instrumentation and sensors handbook, p. 1332-1345. CRC Press.
- Hernández, M. (2017). Caracterización geofísica y geológica de la estación sísmica ROA-UCM. Universidad Complutense de Madrid. Tesis de Maestría en Ingeniería geológica.
- IDEAM (2013). Zonificación y codificación de unidades hidrográficas e hidrogeológicas de Colombia. Bogotá, D. C., Colombia.
- IDEAM (2015). Principios básicos para el conocimiento y monitoreo de las aguas subterráneas - Contenidos del Taller de Formación. 180 págs. Diciembre 2015. Bogotá, D. C., Colombia.

- IDEAM (2018). Reporte de avance del Estudio Nacional del Agua ENA 2018. Bogotá, D.C., Colombia.
- IDEAM (2019). Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá: Ideam: 452 pp.
- Ingeoexploraciones S.A.S. (2016). Elaboración del plan de manejo de aguas subterráneas en el sector de la Mesa, Municipio Los Santos. Fase II. Original Tomo I. Bucaramanga, Colombia.
- INGEOMINAS (2007). Inventario de puntos de agua subterránea de la Mesa de los Santos. Escala 1: 75.000. Universidad Industrial de Santander.
- INGEOMINAS (2007). Mapa de zonas de interés hidrogeológico en la Mesa de los Santos y borde occidental del Macizo de Santander. Escala 1: 75.000. Universidad Industrial de Santander.
- INGEOMINAS (2007). Proyecto de Investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de los Santos, sector nordeste de Curití y borde occidental del Macizo de Santander, Departamento de Santander - Memoria explicativa Investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de los Santos y sector nordeste de Curití. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- INGEOMINAS (2009). Informe hidrogeológico de la Mesa de los Santos. Bogotá, D.C., Colombia.
- INGEOMINAS (2010). Proyecto Sub09-21: Aguas subterráneas. Prospección geoelectrica en la Mesa de Los Santos (Santander). Procesamiento e interpretación de sondeos eléctricos verticales. Bogotá, D.C., Colombia.
- Instrumentation GDD, Inc. (s.f.). Probador SCIP. Modelo TDLV. Manual del usuario. Québec, Canadá. Recuperado de: https://www.gddinstrumentation.com/pdf/es-ES/Manual_Probador SCIP.pdf

- Inverarity, K., Heinson, G. y Hatch, M. (2016). Groundwater flow underneath mound spring tufas from geophysical surveys in the southwestern Great Artesian Basin, Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 63(7), 857-872.
- Ioane, D., Georgescu, P., Chitea, F., Diaconu, A., Niculescu, B. M., y Mezincescu, M. (2008). Geophysical detection and monitoring of underground pollution with hydrocarbon contaminants. In *Abstracts Volume, GEO 2008 National Geological and Geophysical Symposium*.
- Jackson, J. (2011). Interpretación avanzada 3D de datos de resistividad y polarización inducida para la exploración de oro en la República Cooperativa de Guayana. Informe de pasantía. Sartenejas, Venezuela: Universidad Simón Bolívar.
- Jaimes, C. (2019). Análisis de la política pública de agua potable para el sector rural en el municipio Los Santos-Santander, periodo 2014-2017. Universidad de Santander (Tesis de maestría).
- Julivert, M., Barrero, D., y Navas, J. (1964). Geología de la mesa de Los Santos. *Boletín de Geología*, (18), 5-11.
- Julivert, Z. (1963). Estudio petrográfico de las calizas de la Formación Rosablanca de la región de la Mesa de Los Santos (Cordillera Oriental, Colombia). *Boletín de Geología*, (15), 5-34. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Kearey, P., Brooks, M., y Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration Third Edition (3rd Edition)*.
- Lazcano, S. (2007). Caracterización De Suelos Arenosos Mediante Análisis De Ondas De Superficie. Academia de Ingeniería de México.

- Lin, C., Hung, Y., Wu, P., y Yu, Z. (2014). Performance of 2-D ERT in investigation of abnormal seepage: a case study at the Hsin-Shan earth dam in Taiwan. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 19(2), 101-112.
- Llamas, M., y Custodio, E. (1983). *Hidrología subterránea*. Tomo I. (2.a ed.). Barcelona, España: Ediciones Omega, S. A.
- Llamas, M., y Custodio, E. (1999). Aguas subterráneas. *Revista cidob d'afers internacionals*; núm.: 45-46, pp. 35-57; *Agua y Desarrollo*.
- Loke, M. H. (1999). *A Practical Guide to 2D and 3D Surveys*. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies.
- Loke, M. (1995). RES2DMOD (3.03.06) [Software]. Recuperado de: <https://www.geotomosoft.com/downloads.php>
- Loke, M. y Barker, R. (1995). Least-squares deconvolution of apparent resistivity pseudosections. *Geophysics*, 60(6), 1682-1690.
- Losinno, B., Sainato, C., Malleville, H. and Galindo, G. (2008). Tomografía de resistividad eléctrica aplicada a la caracterización de sitios contaminados en Tambos. *Ciencia del suelo*, 26(2), 141-152. Buenos aires, Argentina.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*, Cambridge University Press. New York, USA.
- Martínez, J., Benavente, J., García, J., Hidalgo, M. y Rey, J. (2009). Contribution of electrical resistivity tomography to the study of detrital aquifers affected by seawater intrusion—extrusion effects: the river Vélez delta (Vélez-Málaga, southern Spain). *Engineering geology*, 108(3-4), 161-168.
- Milsom, J. (2003). *Field Geophysics*. 3rd edition. University College of London.

- Montoya, E. (2008). Estudio estocástico de cargabilidad en líneas de transmisión. Instituto Politécnico Nacional. México D.F. (Tesis de maestría). Recuperado de: <https://pdfs.semanticscholar.org/eb9d/69a56a03a2d6a915c48171ac45fada66f74d.pdf>
- Moussaoui, E., Mhamdi, A., Gouasmia, M., Dhahri, F., y Soussi, M. (2019). Contribution of Hydrochemical and Geoelectrical (ERT and VES) Approaches to Investigate Salinization Process of Phreatic Aquifer and Climate Change Adaptation Strategy in Arid Area: Example of Garaat Douza and Its Proximities (Mediterranean Basin). In *Advances in Sustainable and Environmental Hydrology, Hydrogeology, Hydrochemistry and Water Resources* (pp. 189-193). Springer, Cham.
- Moyano Nieto, I. E. (2010). *Prospección Geoeléctrica en La Mesa de Los Santos (Santander). Procesamiento e Interpretación de Sondeos Eléctricos Verticales*. Reporte técnico, Instituto Colombiano de Geología y Minería - INGEOMINAS, Bogotá, Colombia.
- Naranjo, J., Montero, Germán y Núñez, Gerardo (2007). Parámetros elásticos y acústicos para la predicción de fluidos y litología en el lago de Maracaibo. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 22(2), 21-28. Recuperado de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652007000200003&lng=es&tlng=es
- Navarro, A., Alfageme, F., Eraso, A. y Laguna, L., (s.f.). La hidrogeología como tecnología de apoyo en la ingeniería civil. Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
- Niño, L., Valencia, R., Alexander, J., Valencia, R. y Lenin, J. (2016). Contaminación fisicoquímica de acuíferos por los lixiviados generados del relleno sanitario El Carrasco, de Bucaramanga. *Producción + limpia*, 11(1), 66-74.

- Nolan, B., Campbell, D. y Senterfit, R. (1998). Depth of the base of the Jackson aquifer, based on geophysical exploration, southern Jackson Hole, Wyoming, USA. *Hydrogeology Journal*, 6(3), 374-382.
- Nguimbous, J., Ndougssa T., and Manguelle, E. (2018) Audio-Frequency Magnetotelluric Prospecting in the Mamfe Sedimentary Basin of Southwestern Cameroon. *International Journal Earth Sci Geophys* 4:020.
- Norton, J.D. (1999). *Engineering Mechanics: Statics and Dynamics* (2nd ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- OFI Testing Equipment. (2015). BLP-630 Automated Gas Porosimeter. Part No. 127-25. Instruction Manual. Houston, Texas, USA. Recuperado de: <http://www.ofite.com/sds-forms/brochures/769-127-25-brochure/file>
- Ontiveros, J. (2003). Caracterización geofísica de filtraciones de agua en el subsuelo. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Patzelt, A., Kottmann, A., y Waldhör, M. (2007). Prospección geoelectrica en la ciudad colonial de Panamá Viejo: Técnicas, mediciones y primeros resultados de las excavaciones. *Canto Rodado: Revista especializada en patrimonio*, (2), 23-43.
- Pineda, E. (2018). Electrical Resistivity Structure of Eyjafjallajökull Volcanic System based on Electromagnetic Data. Reykjavik, Iceland: University of Iceland (Thesis of Magister).
- Pinto V., J. E., Clavijo Torres, J., Gómez Isidro, S., Gutiérrez Toledo, D., Mora Ortiz, J. P., Rojas Parra, N. R., Adarme, I. R., Aldana, S. C., Contreras, N. M., Díaz, E. J., Melo, L. F., Tarazona, G. R., Rincón, M. A., Vargas J., C. Y., Morales A., C. J., Velandia P., F., Hincapié V., G., Forero O., H., Duarte, R., Consuelo Vargas, M., y de Bermoudes, O. (2007). *Proyecto de investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de Los Santos*,

- sector noreste de Curití y borde occidental del Macizo de Santander, departamento de Santander. Memoria explicativa de la investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de Los Santos. Reporte tecnico, INGEOMINAS-UIS, Bucaramanga.*
- Piña, P. (2014). Aplicación del método magnetotelúrico a la caracterización de reservorios: Anticlinal El Hito (Cuenca) y Sistema Geotérmico de Tenerife. Universidad de Barcelona. Barcelona, España (Tesis doctoral).
- Price, A. (2016). FastGrav (0.9.0). [Software]. Recuperado de: <http://fastgrav.com>
- Porres, J. (2003). Caracterización de cavidades en el subsuelo mediante la interpretación de perfiles de tomografía eléctrica. Aplicación al yacimiento arqueológico de Clunia. Servicio de Publicaciones, Universidad de Burgos. Burgos, España (Tesis doctoral).
- Quintana, A. and Teixidó, M. (2005). Aplicación de la tomografía eléctrica en la caracterización de deslizamiento de Doña Mencía (Córdoba). Universidad de Granada. Granada, España (Tesis de maestría).
- Raut, S., Panda, D. y Kannan, K. (2011). Geoelectrical Investigations for Shallow Ground Water at Few Villages Located in a Canal Command Area of Odisha. *Journal of Agricultural Physics*, 11, 26-34.
- Rivera, H., Palacio, D. y Rangel, F. (2013). Impacto de los escenarios de cambio climático en los recursos naturales renovables en jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Santander. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, D.C., Colombia.
- Romo, A. (2010). Exploración geofísica aplicada a hidrogeología en la cuenca de Santo Tomás, BC. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. México (Tesis de maestría).

- Rojas Mendoza, J. A. (2024). *Pirotecnia Recreativa y Pólvora Comercial en la Exploración Sísmica Somera No Invasiva*. Trabajo de grado para optar por el título de Magister en Geofísica. Universidad de Nariño. Pasto, Colombia.
- Sánchez, J. (s.f.). Prospección geofísica: Sondeos eléctricos verticales. Universidad de Salamanca. España. Recuperado de: <http://hidrologia.usal.es/temas/SEV.pdf>
- Sanmiguel, S. y Montoya, J. P. (2017). *Caracterización estática y dinámica del suelo. Caso de estudio: cabecera del municipio de Los Santos* (trabajo de pregrado). Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. Recuperado de: <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/35963>
- Scapozza, C., y Laigre, L. (2014). The contribution of Electrical Resistivity Tomography (ERT) in Alpine dynamics geomorphology: case studies from the Swiss Alps. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 20(1), 27-42.
- Sears, Z., Young, H. y Freedman, R (2009). Física universitaria volumen 1. Decimosegunda edición. Pearson educación, México.
- Suárez, J. (2009). Deslizamientos. Tomo I: Análisis Geotécnico. Geotecnología S.A.S. Recuperado de: <https://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-analisis-geotecnico.html>
- Tapia, A., Almeida, G., da Silva Jr, G. y Waterloo, M. (2010). Coastal aquifers of Barra de Maricá, Brazil: contamination and saline wedge behavior. In 21st Salt Water Intrusion Meeting. Azores, Portugal. Proceedings of the 21th SWIM (pp. 39-42).
- Tarazona, Y. y Vargas, M. (2020). Análisis Cuantitativo de Sistemas de Fracturas como Aporte al Conocimiento Hidrogeológico de la zona Sur de la Mesa de Los Santos, Santander – Colombia. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander.

- Tarazona-Lizcano, Y., Vargas-López, M. C., y Velandia, F. (2021). Análisis cuantitativo de sistemas de fracturas y sus implicaciones hidrogeológicas en la zona sur de la Mesa de Los Santos, Santander - Colombia. *Boletín De Geología*, 43(3), 107–123. <https://doi.org/10.18273/revbol.v43n3-2021005>
- Tarback, E. and Lutgens, F. y Tasa, D. (2005). *Ciencias De La Tierra: Una Introducción A La Geología Física*. 8th ed. Pearson Prentice Hall. Universidad Autónoma de Madrid. Madrid, España.
- Teatini, P., Comerlati, A., Carvalho, T., Gütz, A., Affatato, A., Baradello, L., Accaino, F., Nieto, D., Martelli, G., Granati, G. y Paiero, G. (2015). Artificial recharge of the phreatic aquifer in the upper Friuli plain, Italy, by a large infiltration basin. *Environmental Earth Sciences*, 73(6), 2579-2593.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. (1990) *Applied Geophysics*, 2nd Edition, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 353-358. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139167932.012>
- Tizro, A., Voudouris, K., Salehzade, M. y Mashayekhi, H. (2010). Hydrogeological framework and estimation of aquifer hydraulic parameters using geoelectrical data: a case study from West Iran. *Hydrogeology journal*, 18(4), 917-929.
- Toledo Baca, J. C. (2015). *Aplicación de los métodos geoelectricos en la prospección geofísica*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Vargas, C. (2008). *Cartografía geológica a escala 1:25.000 de la Mesa de los Santos*, Departamento de Santander. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia (Tesis de pregrado).

- Velandia, F. (2010). Análisis de fracturas para exploración de aguas subterráneas en el centro de Santander. Hidrogeología para la gestión del recurso hídrico. 149-158. Universidad de Antioquia. ISBN 978-958-714-453-6.
- Vergel Navarro, S., y Remolina Rivero, B. Y. (2023). *Estudio del nivel freático de la unidad acuífera del Miembro Superior de la Formación Los Santos, vereda La Fuente, municipio Los Santos del departamento de Santander, mediante los métodos geofísicos de Tomografía de Resistividad Eléctrica y Sísmica de Refracción*. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
<https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/14433>
- Vozoff, K. (1972). The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins. *Geophysics*, 37(1), 98-141.
- Ward, D.; Goldsmith, R.; Cruz, J. y Restrepo, A. (1973): Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, Departamento de Santander. Ingeominas, Boletín Geológico 21 (1-3): 1- 134. Bogotá, D.C., Colombia.
- Weinzettel, P., Varni, M., y Dietrich, S. (2011). Exploración hidrogeológica mediante métodos de resistividad eléctrica en una zona de geología compleja. In VII Congreso Argentino de Hidrogeología. Hidrogeología regional y exploración hidrogeológica. Salta, Argentina (pp. 300-307).
- Wilches, L. and Corzo, A. (2015). Caracterización geoelectrica en la vereda "La Esperanza" sector de la Mesa de los Santos, municipio de Piedecuesta, Santander. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia (Tesis de pregrado).
- Woods, R. D. (1968). Screening of surface waves in soils.

Yañez, M. (2019). Caracterización del acuífero Río verde, San Luis Potosí con el método magnetotelúrico. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. San Luis Potosí, México (Tesis de maestría).

ZZ Resistivity Imaging Pty Ltd. (s.f.). User Manual for FlashRES-UNIVERSAL64/96 The Full-channel Free Configuration Resistivity/IP Exploration System. Australia. Recuperado de: www.zzgeo.com

Apéndices

Apéndice A Marco de referencia

Fig. 1 Configuración de un sondeo magnetoteléurico (Bastani, 2001, en Nguimbous-Kouoh et al., 2018)

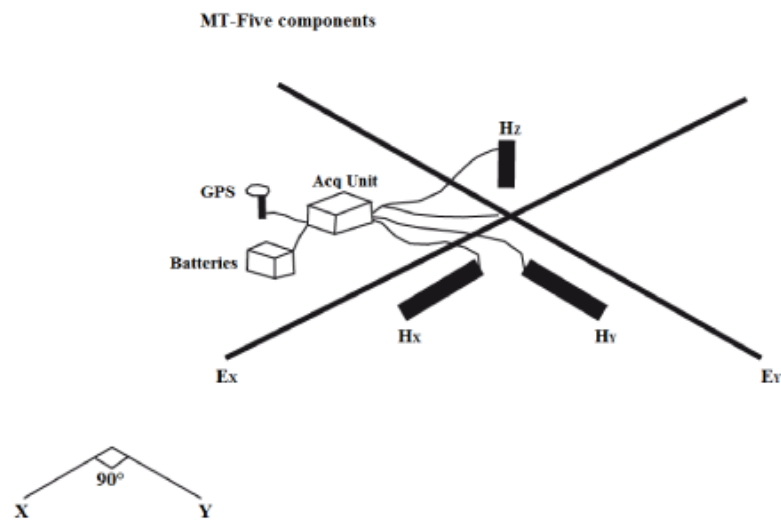


Fig. 2 Adquisición de Tomografías de Resistividad Eléctrica. Tomado de Scapozza y Laigre (2013)

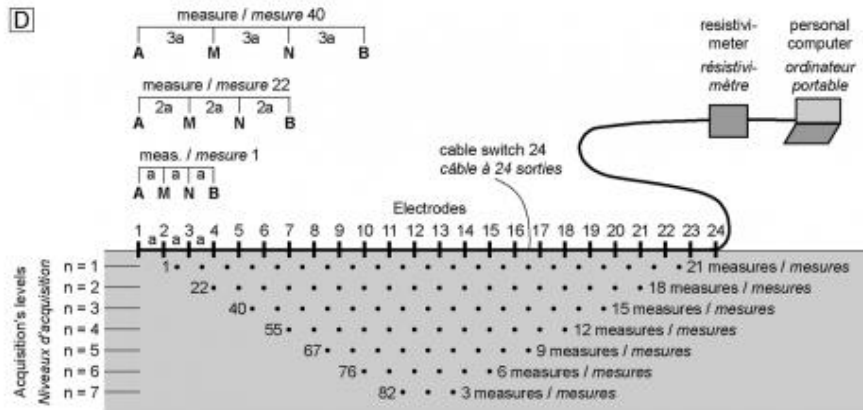


Fig. 3 Matrices utilizadas según el arreglo de electrodos. Tomado de Loke, 1999.

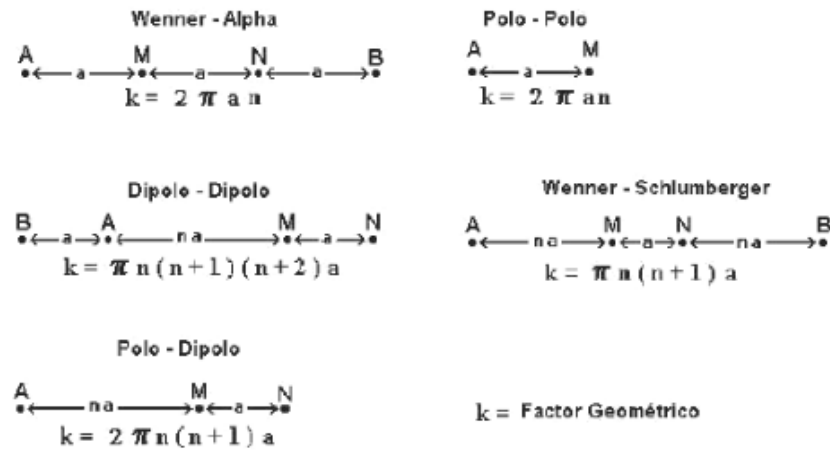
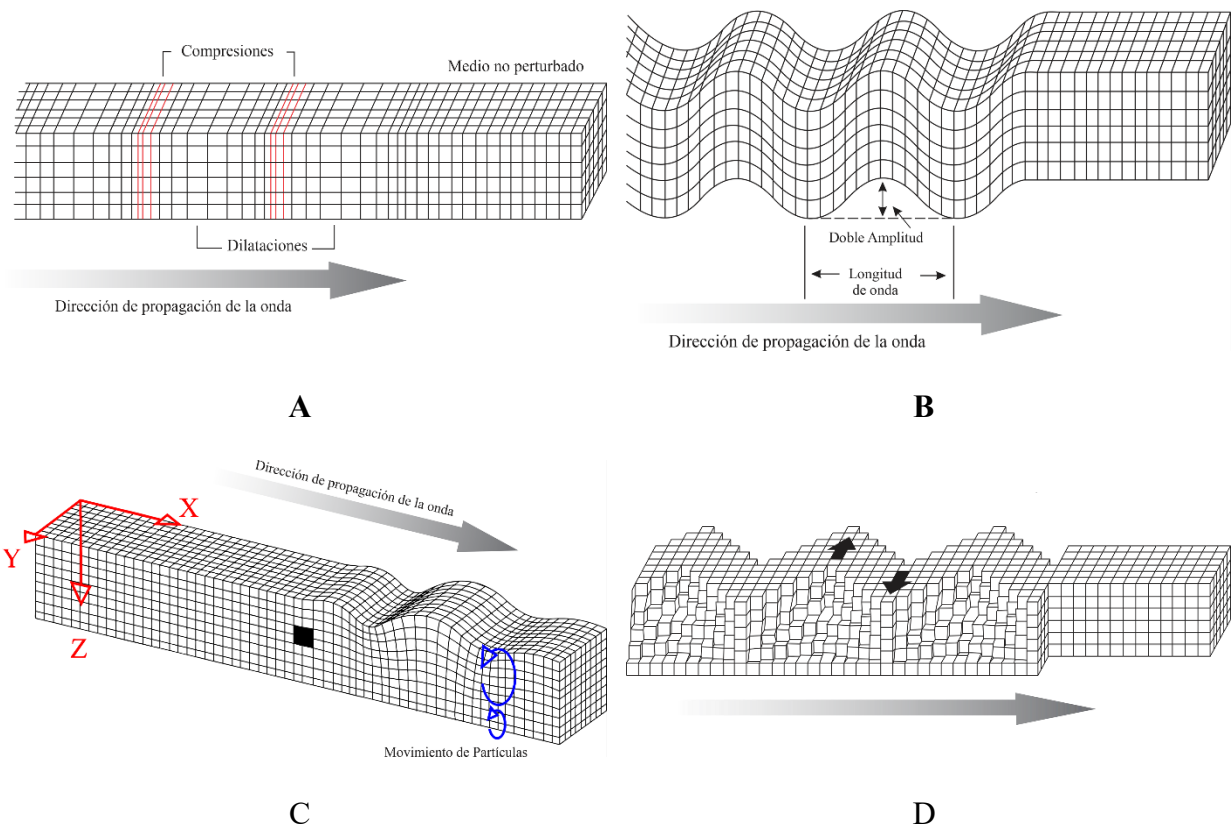


Fig. 4 Esquema de propagación de las ondas en la exploración sísmica.



Nota: Esquema de propagación de las A) ondas P, B) ondas S, C) ondas Rayleigh y D) ondas Love. Fuente: Adaptado de Lowrie, 2007.

Fig. 5 Diagrama que muestra trayectorias de los rayos de onda directa, onda refractada y el frente de onda en un modelo de dos capas.

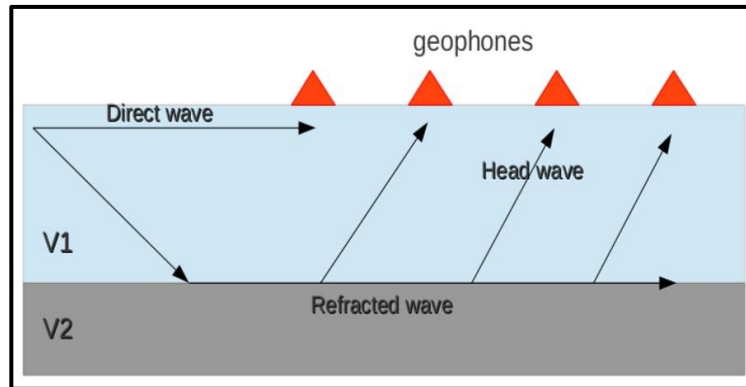
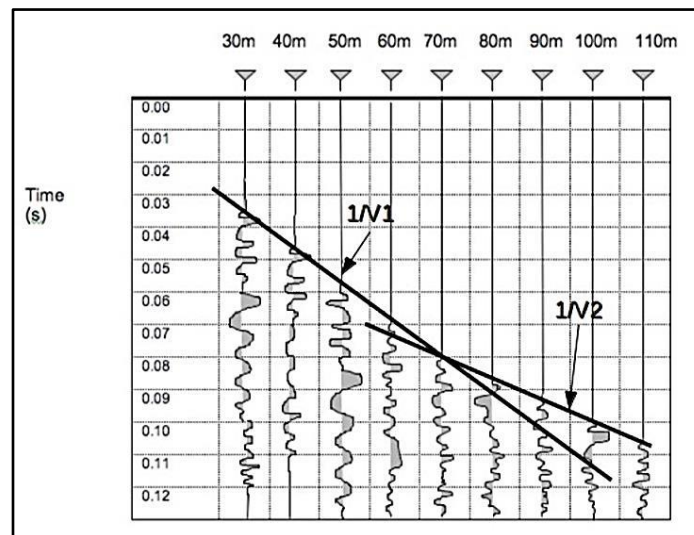


Fig. 6 Registro de adquisición multicanal de un disparo en el que se ilustran las primeras llegadas del frente de onda y las líneas que los conectan.



Modificado de:

http://www.iris.edu/hq/resource/how_shallow_earth_structure_is_determined

Apéndice B Diagramas de cajas y bigotes

Fig. 7 Grafica de cajas y bigotes de la resistividad en seco y húmedo de las formaciones geológicas.

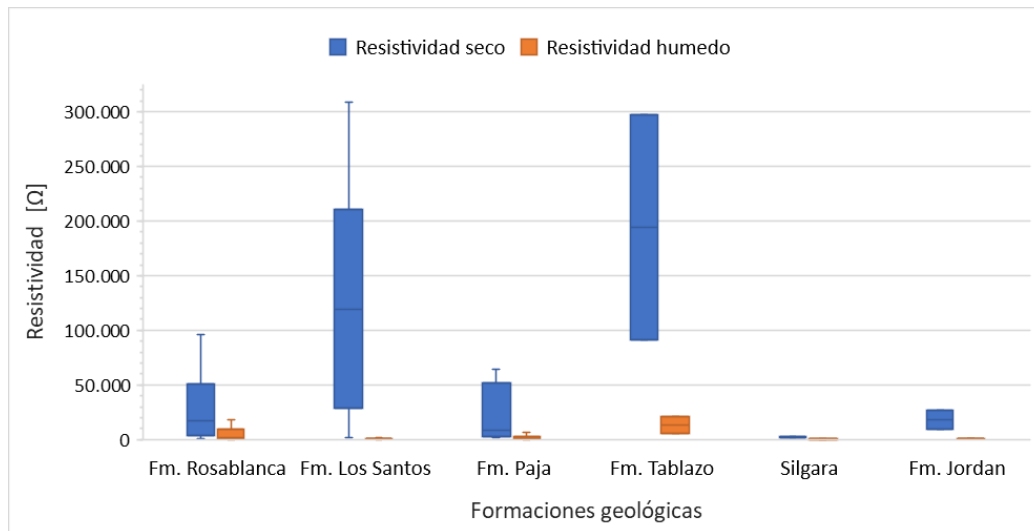


Fig. 8 Gráfica de cajas y bigotes de la resistividad en seco de las formaciones geológicas.

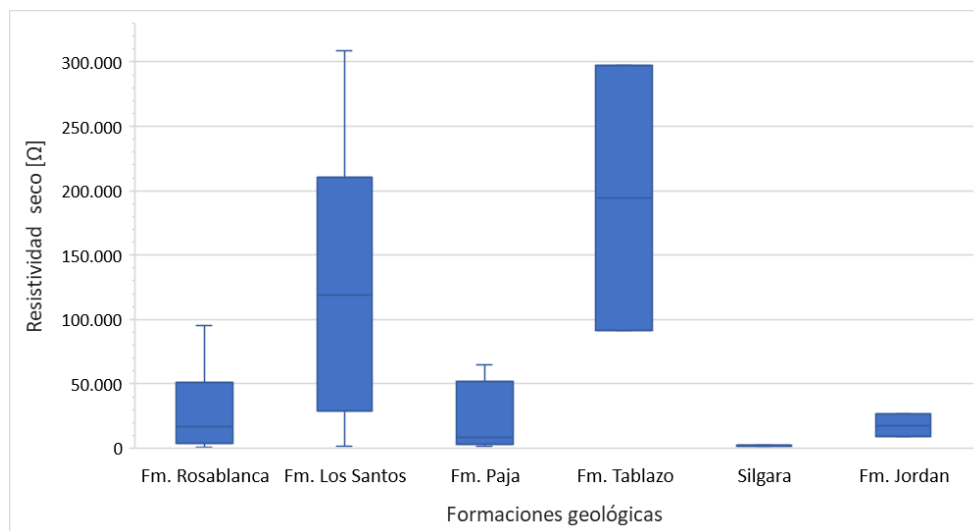


Fig. 9 Gráfica de cajas y bigotes de la resistividad en húmedo de las formaciones geológicas.

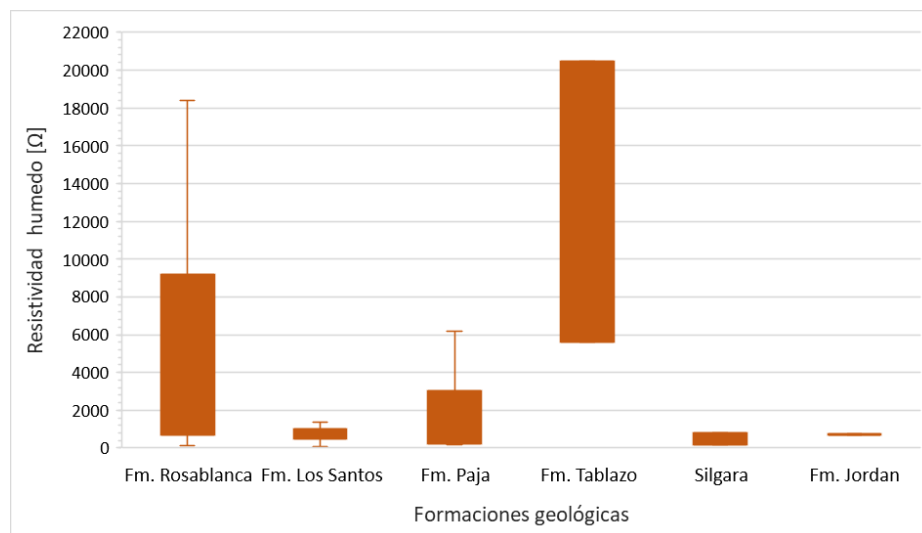


Fig. 10 Gráfica de cajas y bigotes de la cargabilidad en seco y húmedo de las formaciones geológicas.

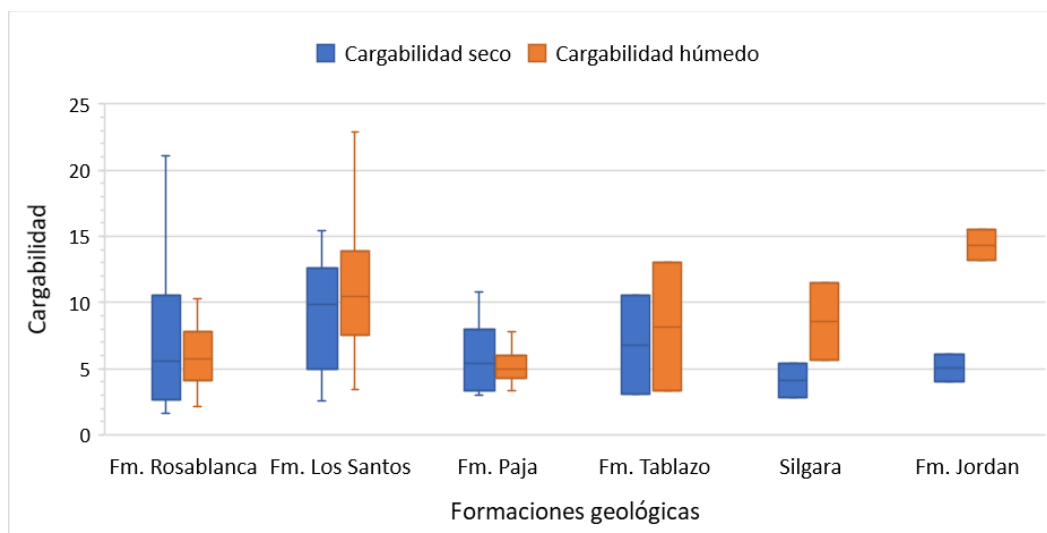


Fig. 11 Gráfica de cajas y bigotes de la velocidad de onda P de las formaciones geológicas.

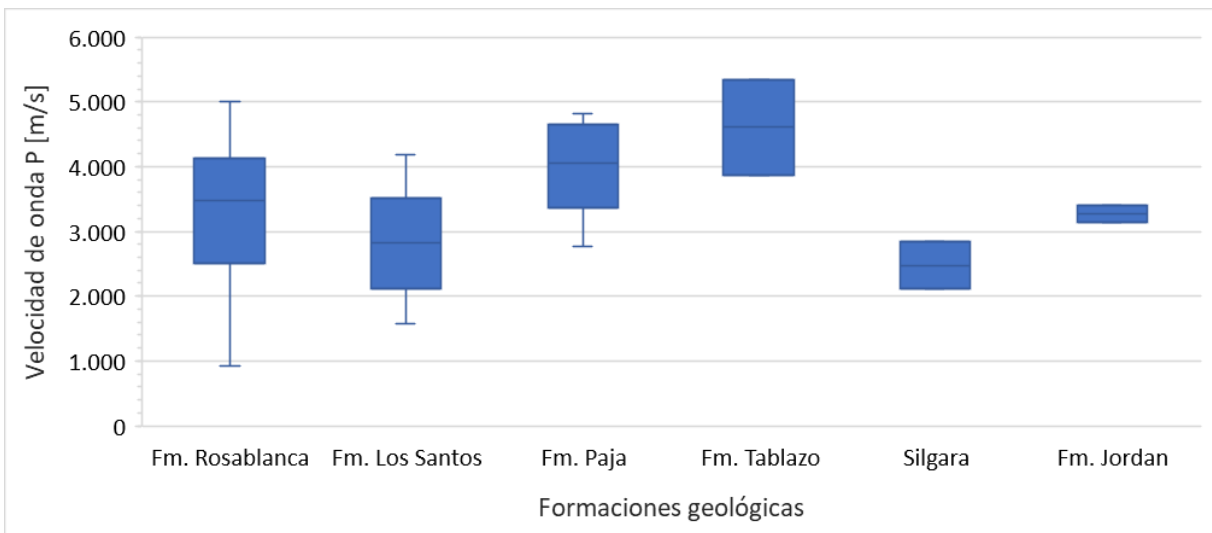


Fig. 12 Gráfica de cajas y bigotes de la porosidad de las formaciones geológicas.

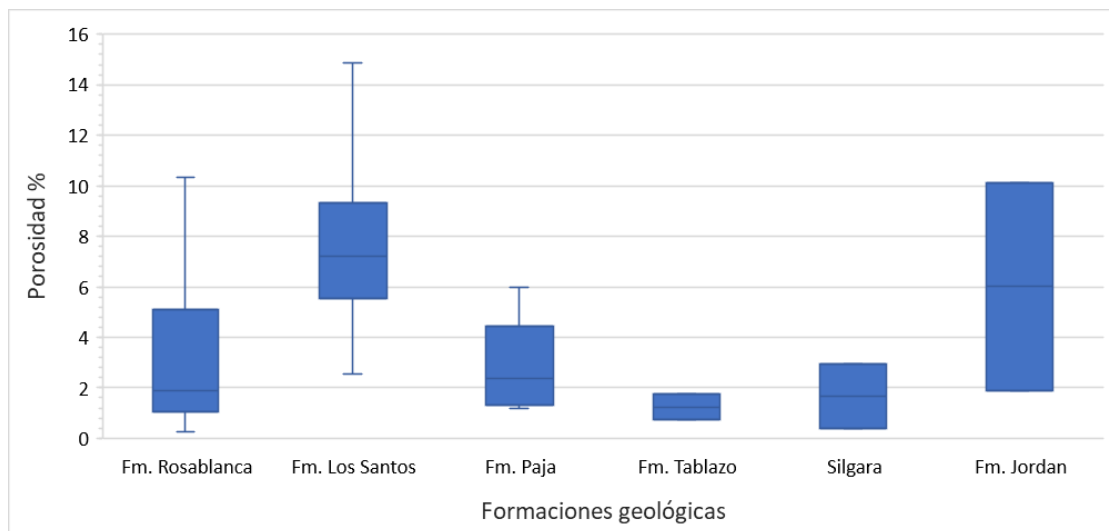


Fig. 13 Gráfica de cajas y bigotes de la densidad de las formaciones geológicas.

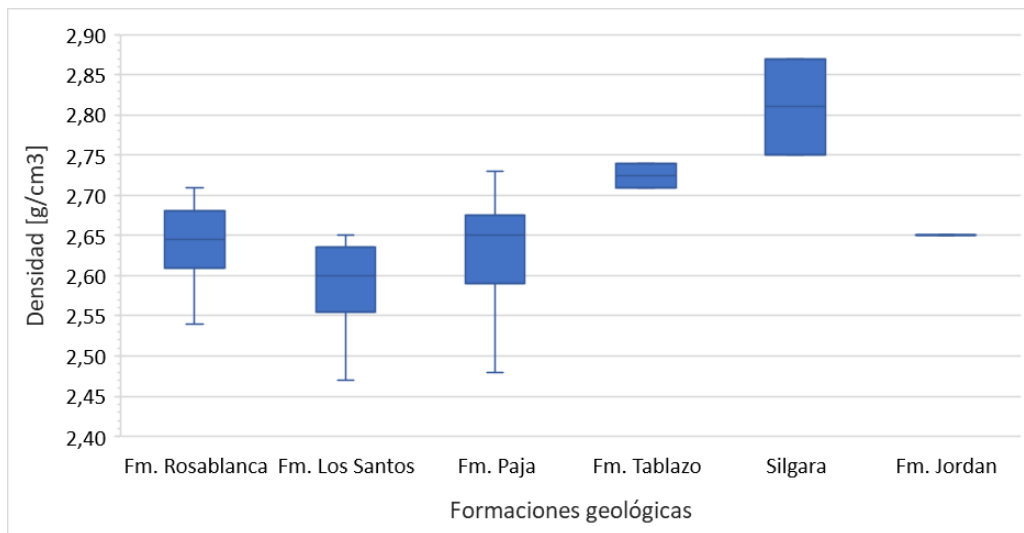
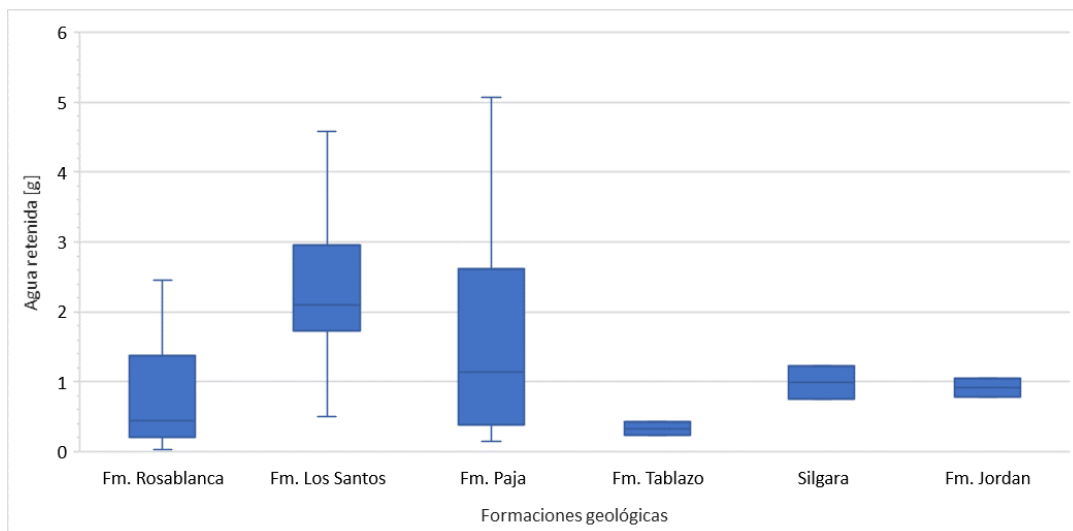


Fig. 14 Gráfica de cajas y bigotes del agua retenida de las formaciones geológicas.



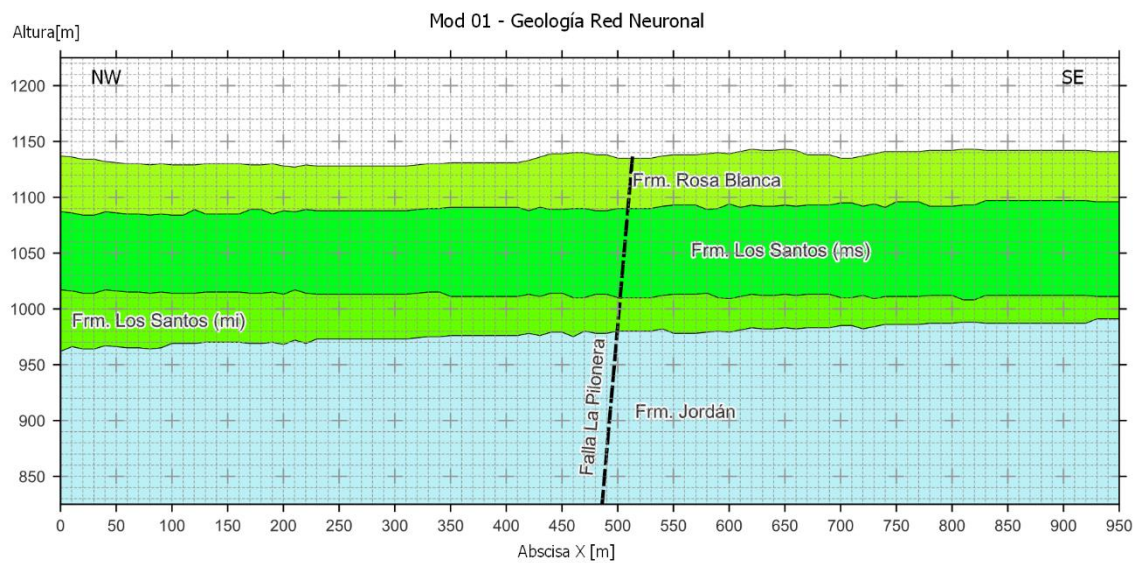
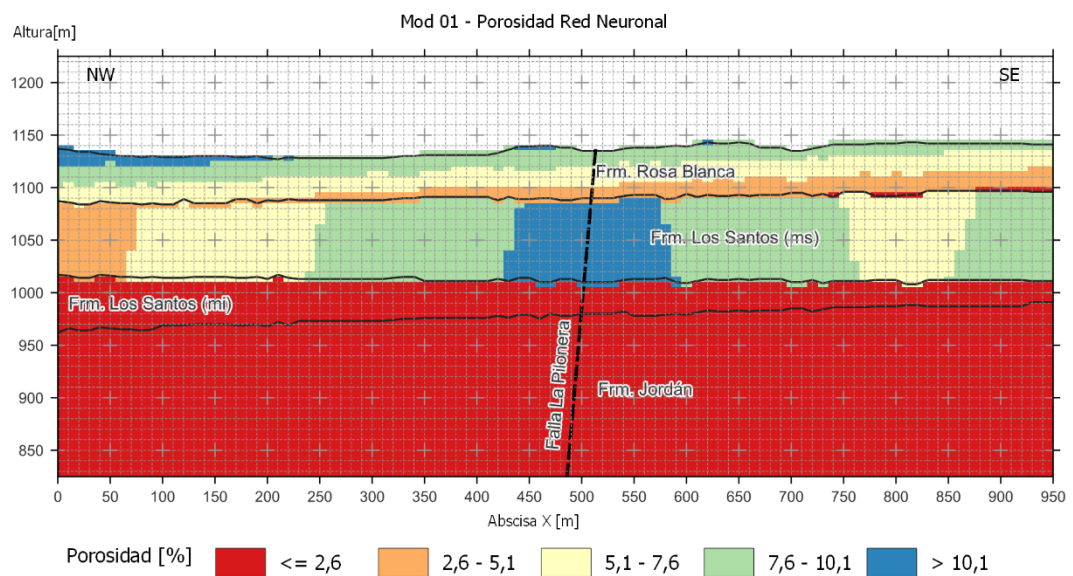
*Apéndice C Modelos sintéticos preliminares***Modelo preliminar Mod 01***Fig. 15 Modelo geológico preliminar Mod 01 estimado por la red neuronal.**Fig. 16 Modelo distribución de la porosidad preliminar Mod 01 estimado por la red neuronal.*

Fig. 17 Modelo distribución de la resistividad en húmedo preliminar Mod 01 estimado por la red neuronal.

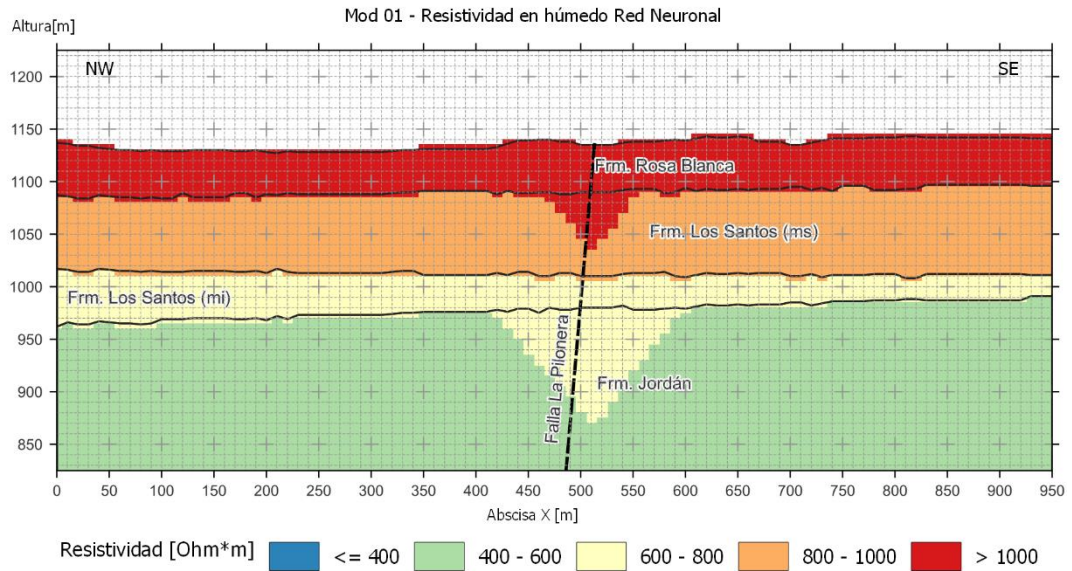
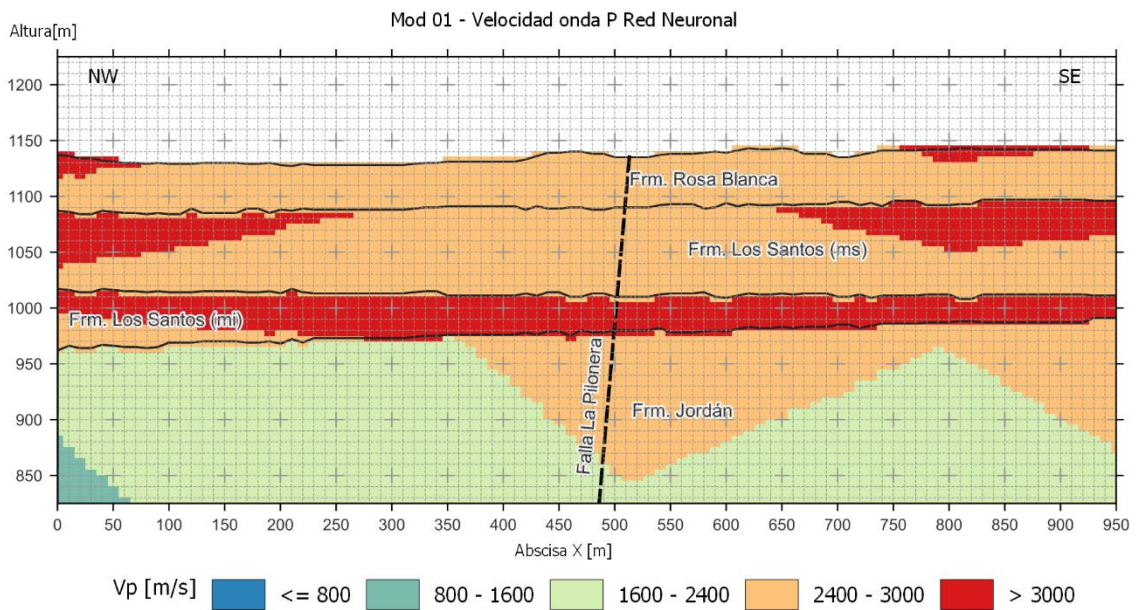


Fig. 18 Modelo distribución de la velocidad de onda P preliminar Mod 01 estimado por la red neuronal.



Modelo preliminar Mod 02

Fig. 19 Modelo geológico preliminar Mod 02 estimado por la red neuronal.

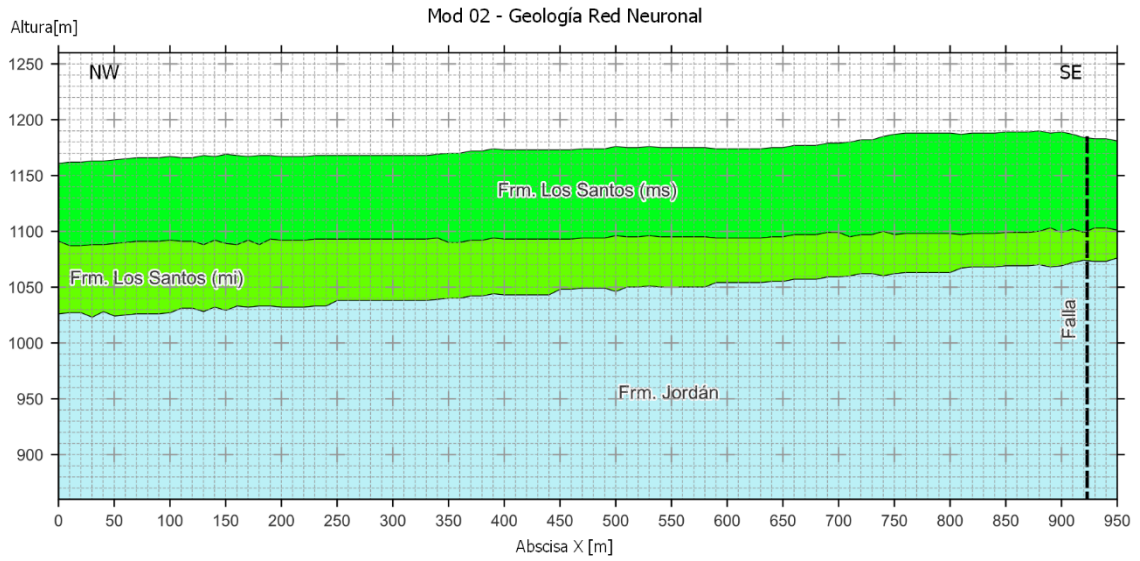


Fig. 20 Modelo distribución de la porosidad preliminar Mod 02 estimado por la red neuronal.

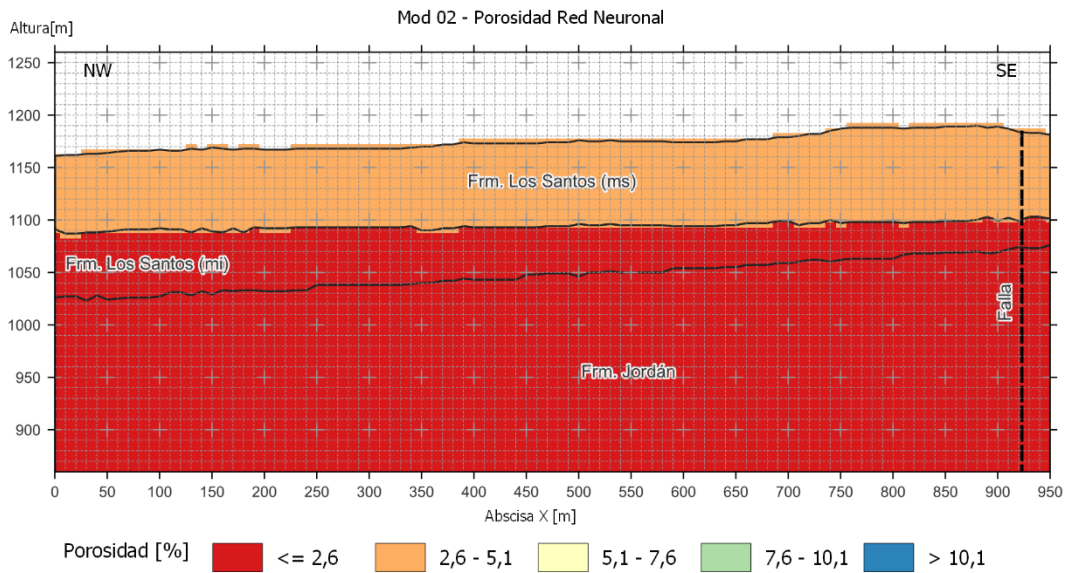


Fig. 21 Modelo distribución de la resistividad en húmedo preliminar Mod 02 estimado por la red neuronal.

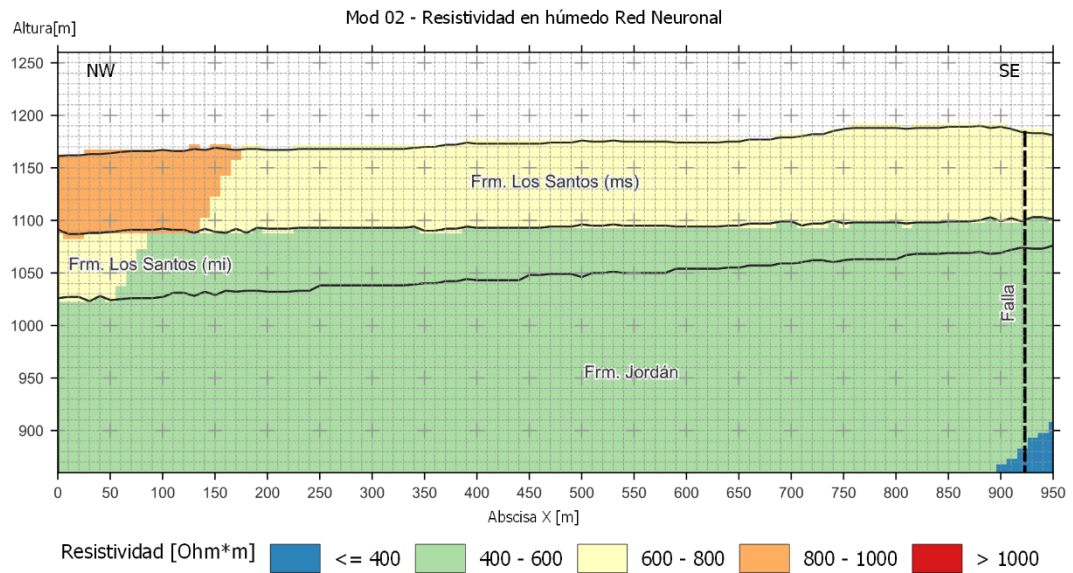
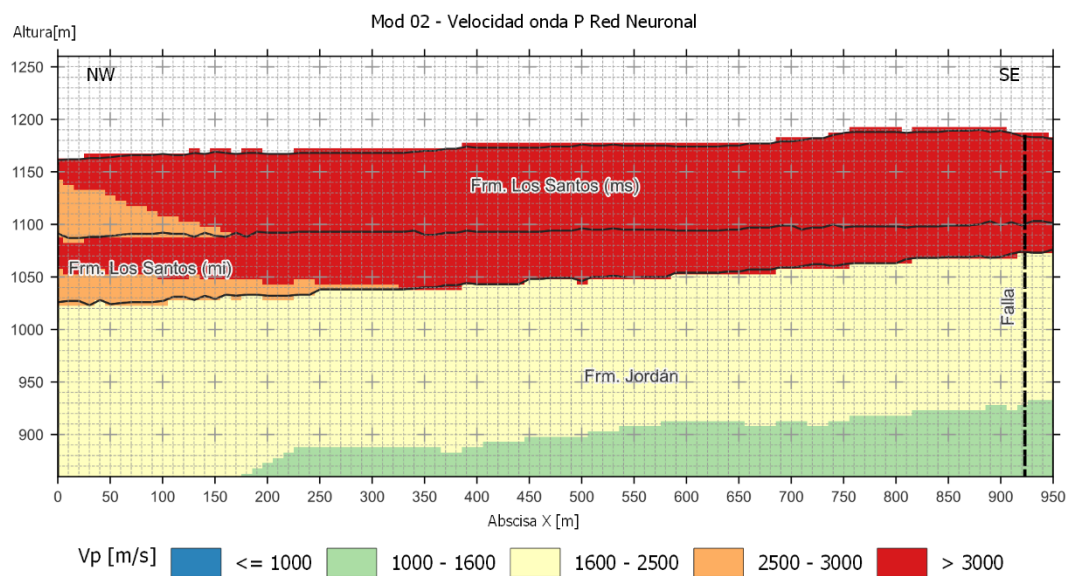


Fig. 22 Modelo distribución de la velocidad de onda P preliminar Mod 02 estimado por la red neuronal.



Modelo preliminar Mod 03

Fig. 23 Modelo geológico preliminar Mod 03 estimado por la red neuronal.

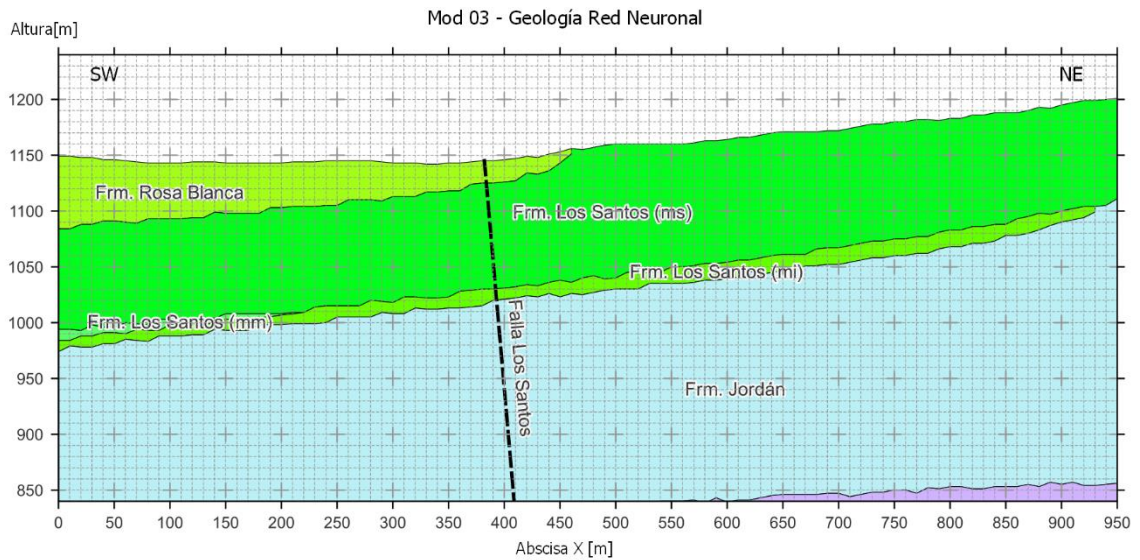


Fig. 24 Modelo distribución de la porosidad preliminar Mod 03 estimado por la red neuronal.

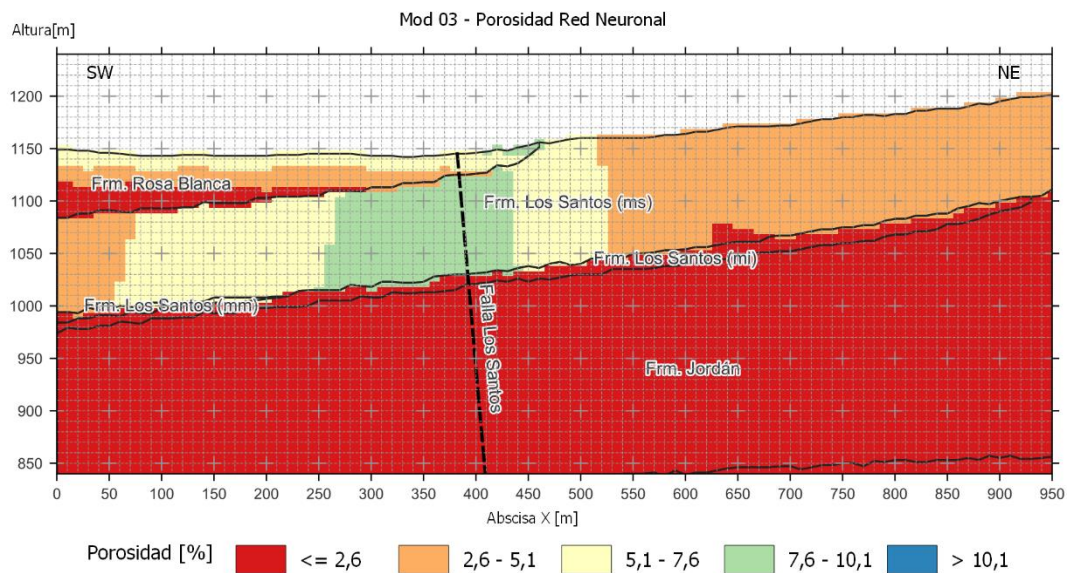


Fig. 25 Modelo distribución de la resistividad en húmedo preliminar Mod 03 estimado por la red neuronal.

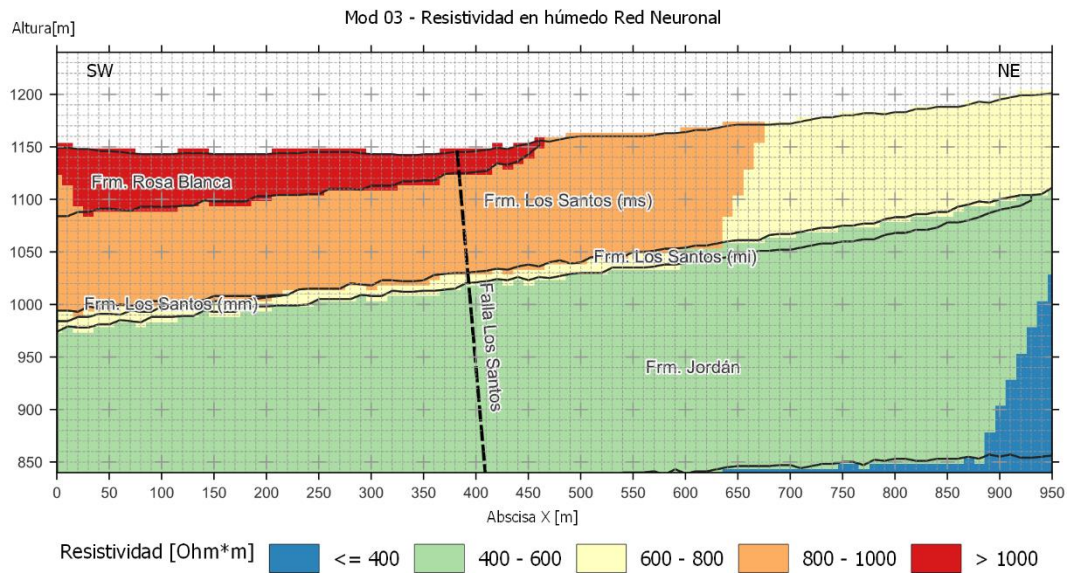
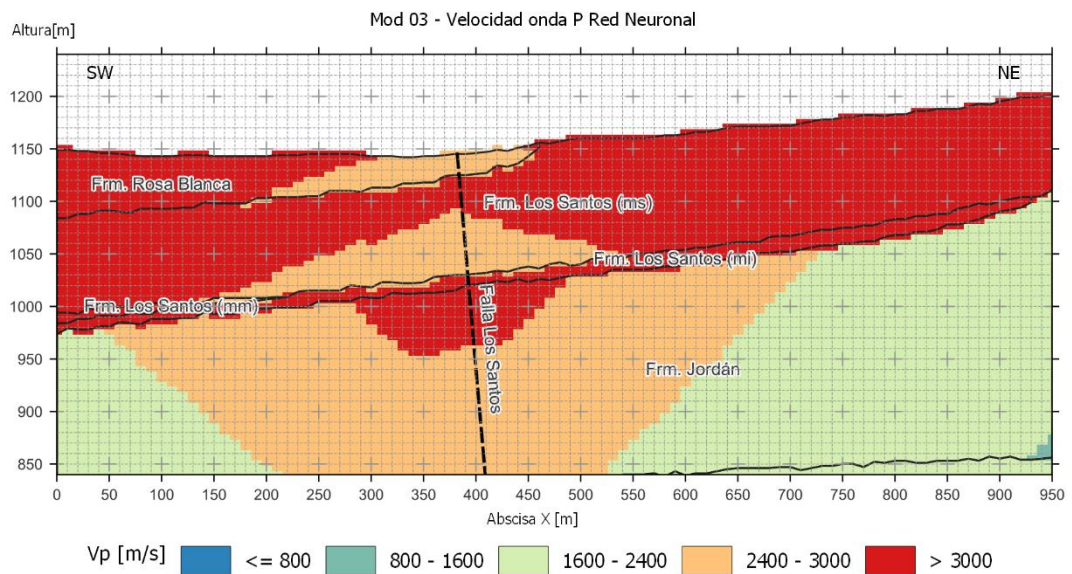


Fig. 26 Modelo distribución de la velocidad de onda P preliminar Mod 03 estimado por la red neuronal.



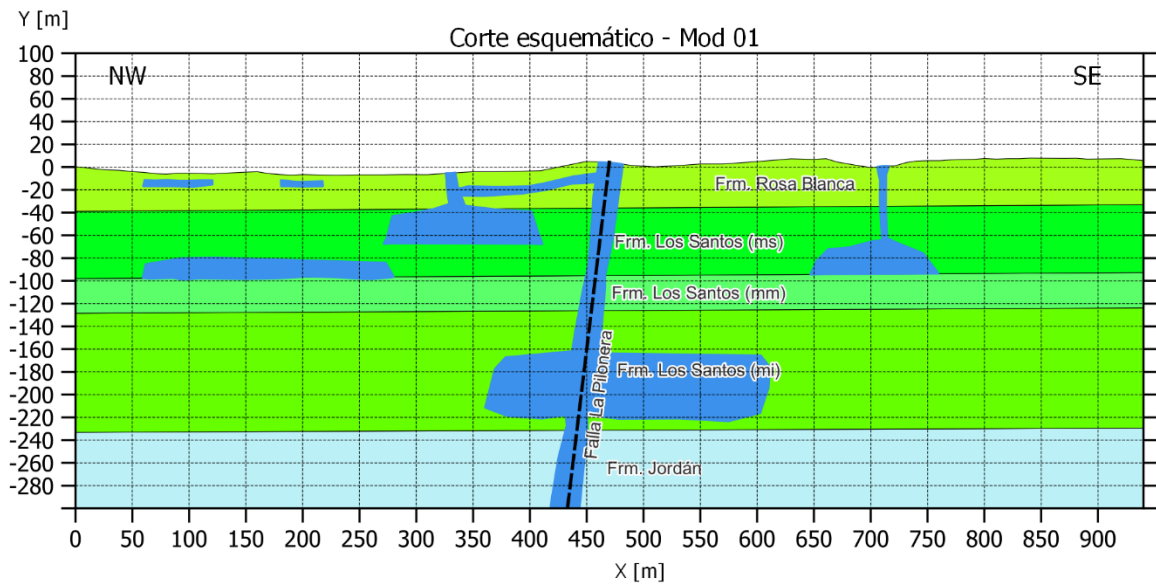
*Apéndice D Modelos sintéticos finales***Modelo final Mod 01***Fig. 27 Modelo geológico final para Mod 01.*

Fig. 28 Modelo final de resistividad eléctrica para Mod 01.

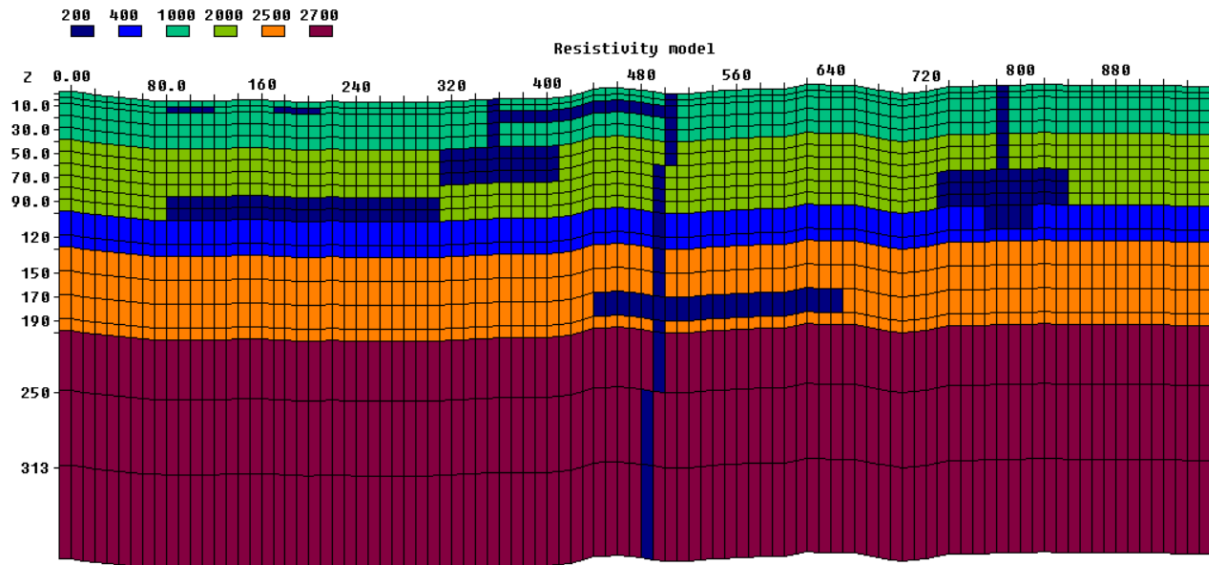
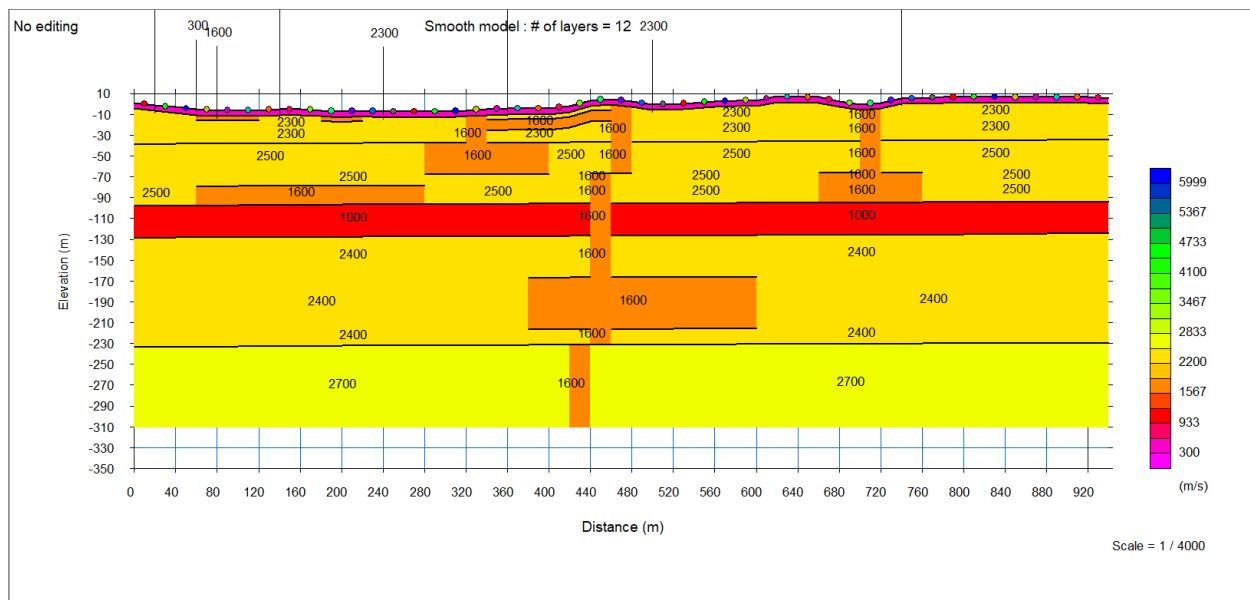


Fig. 29 Modelo final de velocidad de onda P para Mod 01.



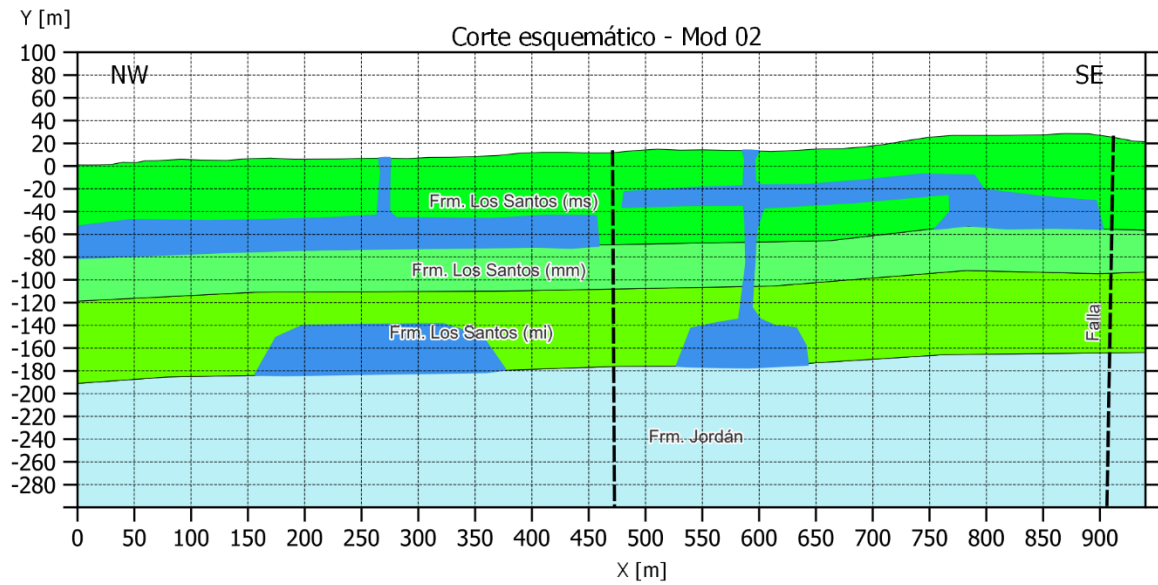
Modelo final Mod 02*Fig. 30 Modelo geológico final para Mod 02.*

Fig. 31 Modelo final de resistividad eléctrica para Mod 02.

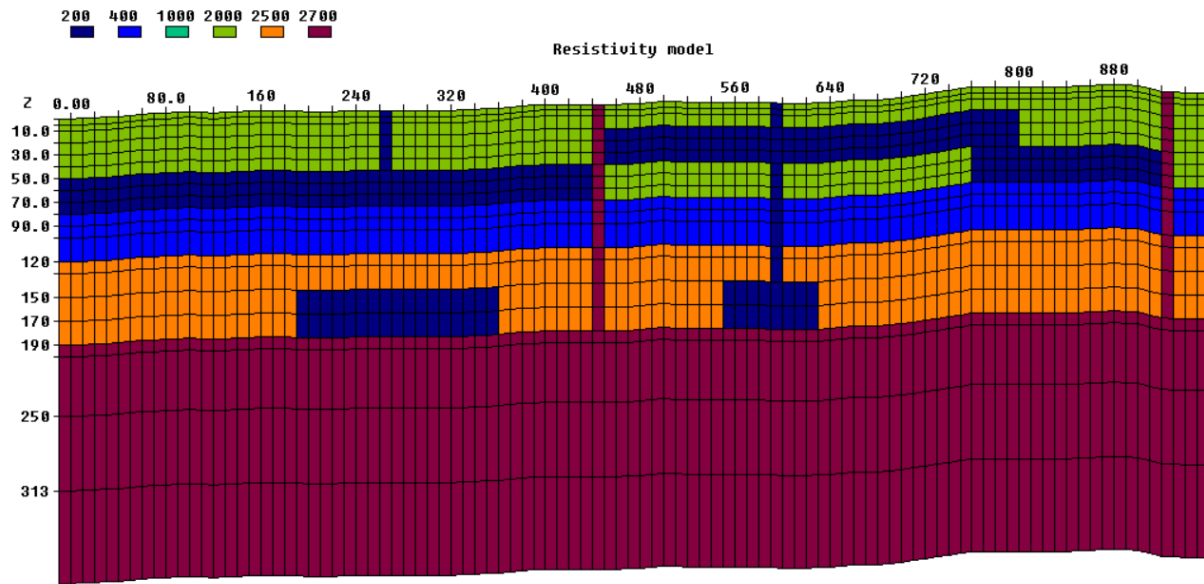
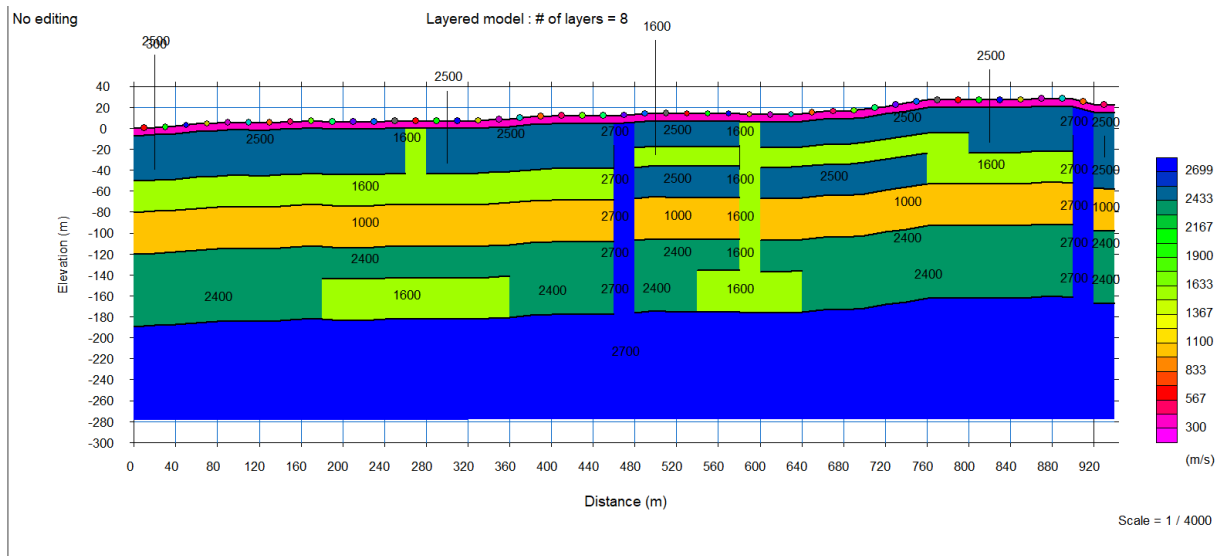


Fig. 32 Modelo final de velocidad de onda P para Mod 02.



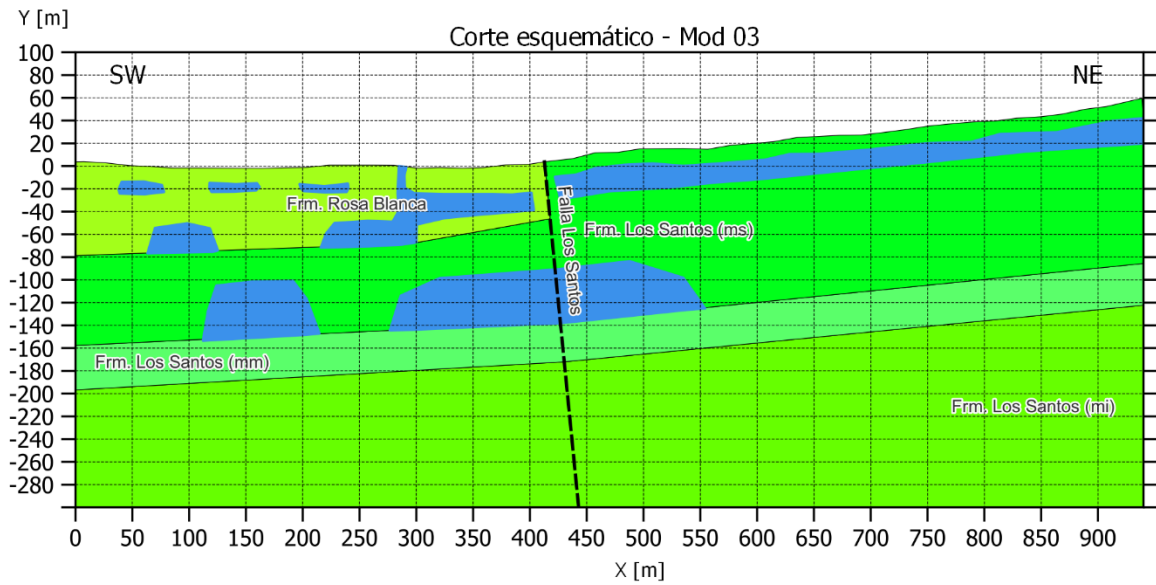
Modelo final Mod 03*Fig. 33 Modelo geológico final para Mod 03.*

Fig. 34 Modelo final de resistividad eléctrica para Mod 03.

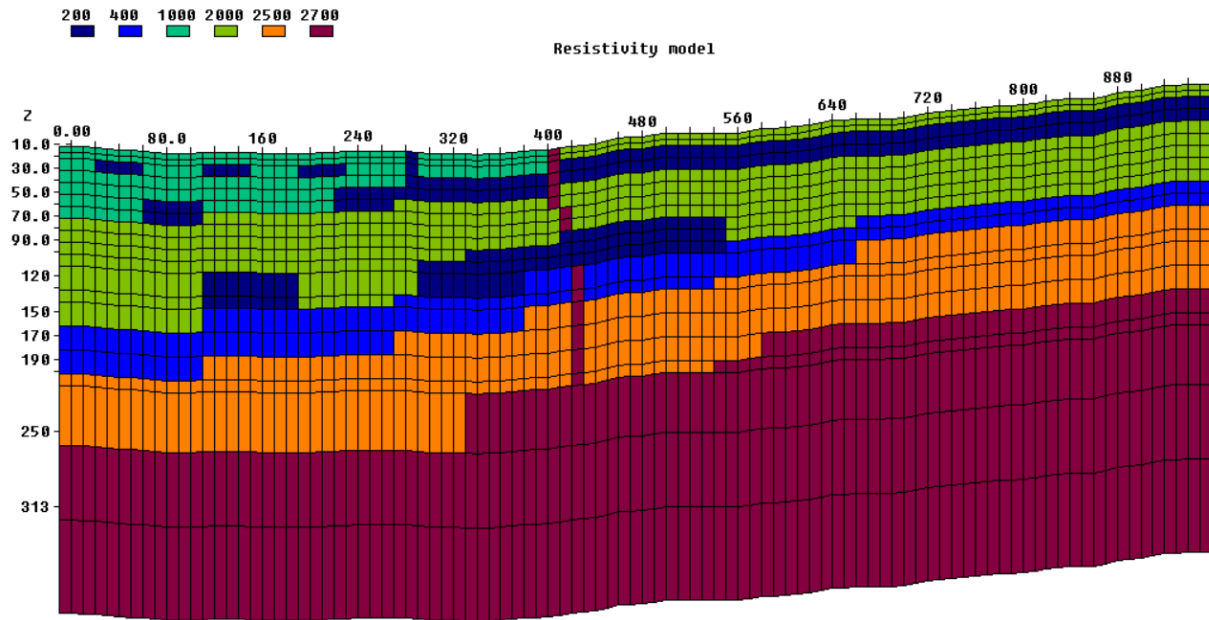
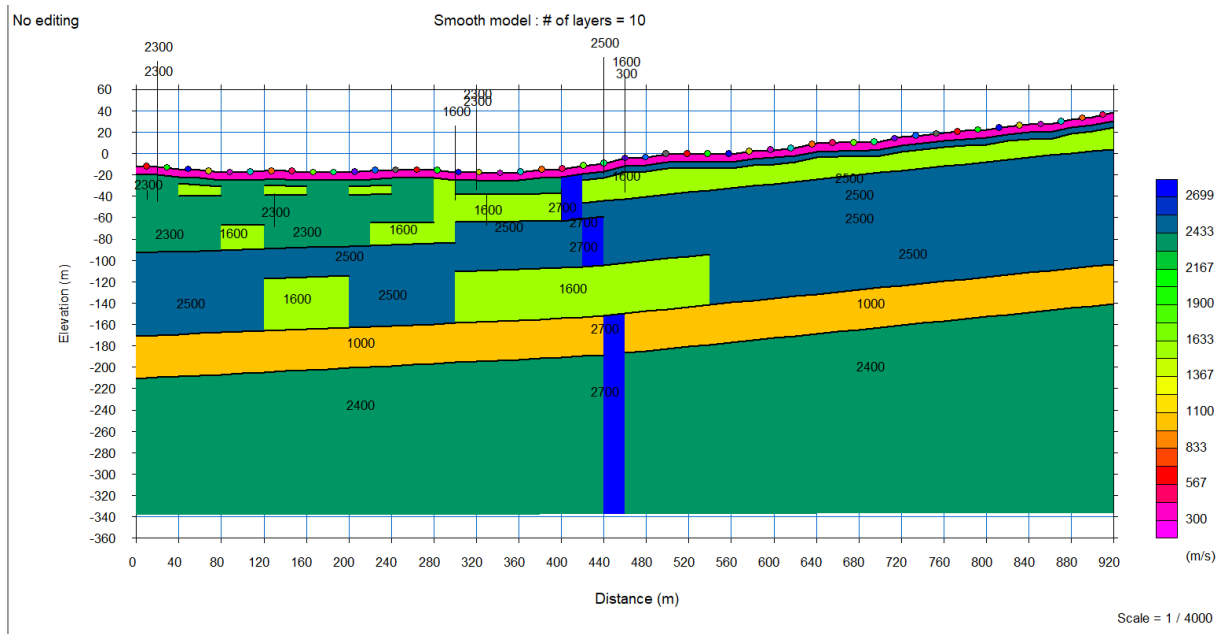


Fig. 35 Modelo final de velocidad de onda P para Mod 03.



Apéndice E Modelos 1D MT

Fig. 36

Resultados sondeo MT correspondiente a WMTC.005

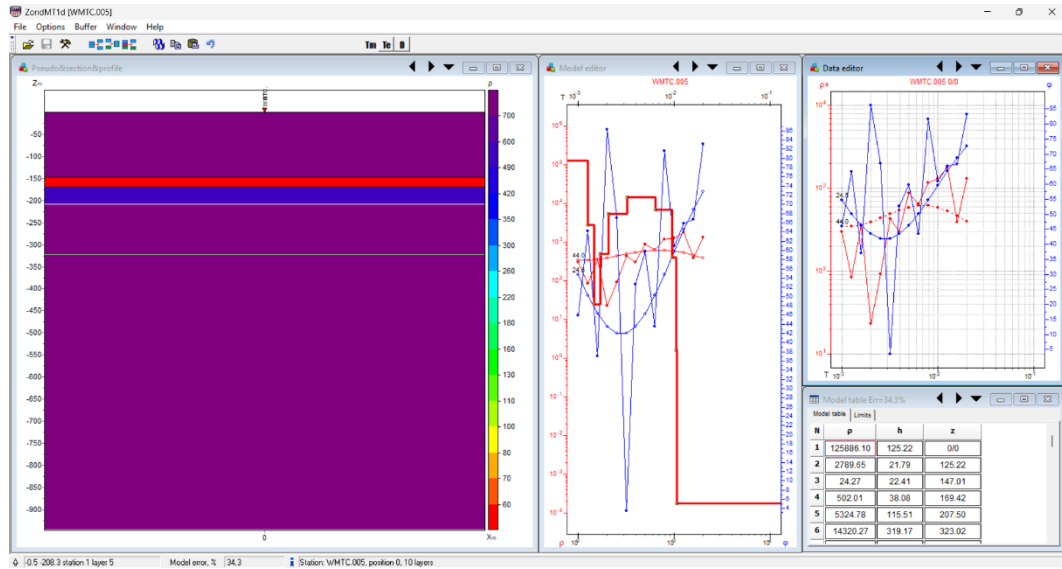


Fig. 37

Resultados sondeo MT correspondiente a WMTC.006

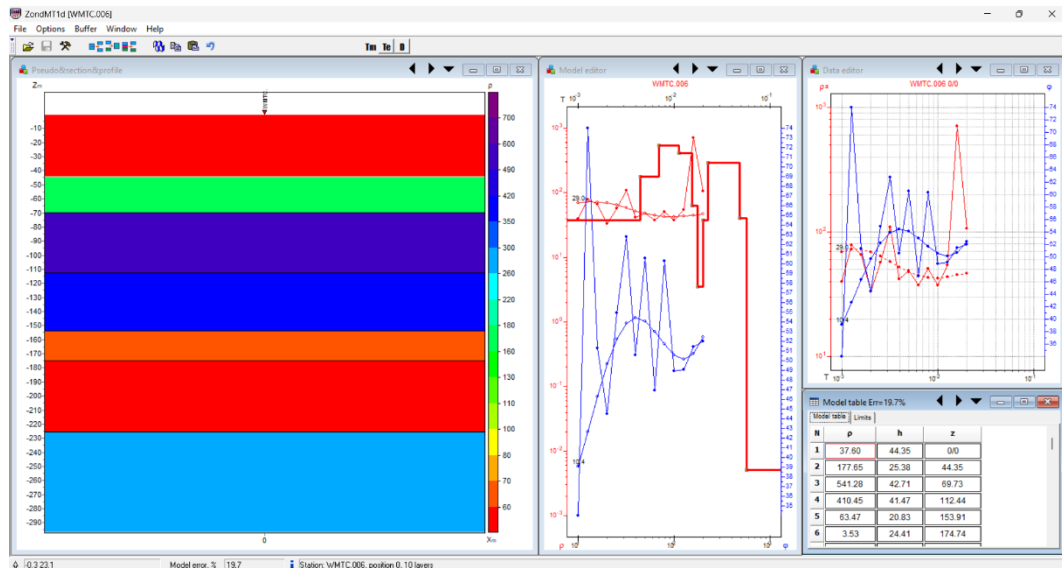


Fig. 38

Resultados sondeo MT correspondiente a WMTC.007

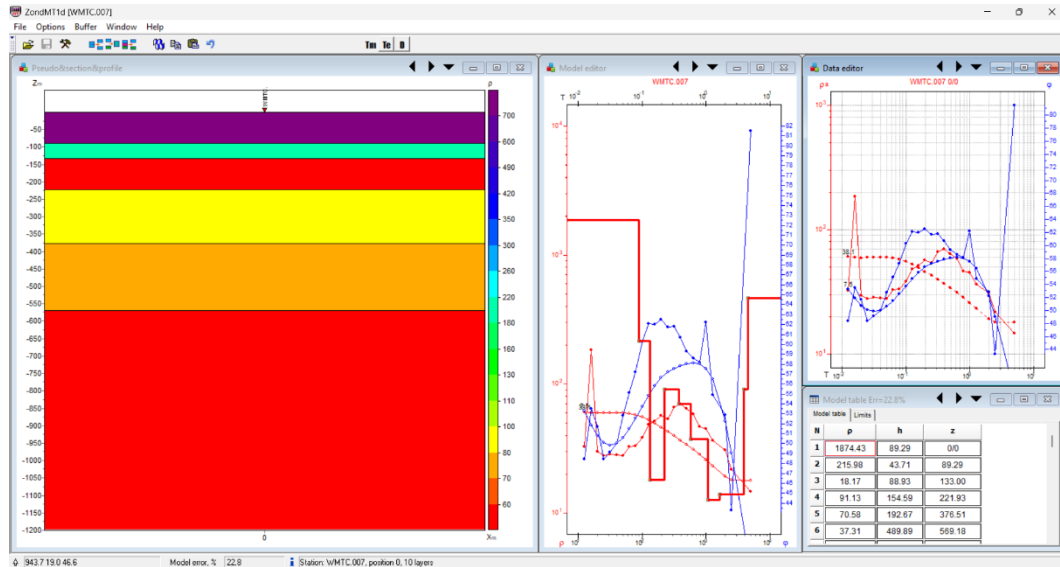


Fig. 39

Resultados sondeo MT correspondiente a WMTC.008

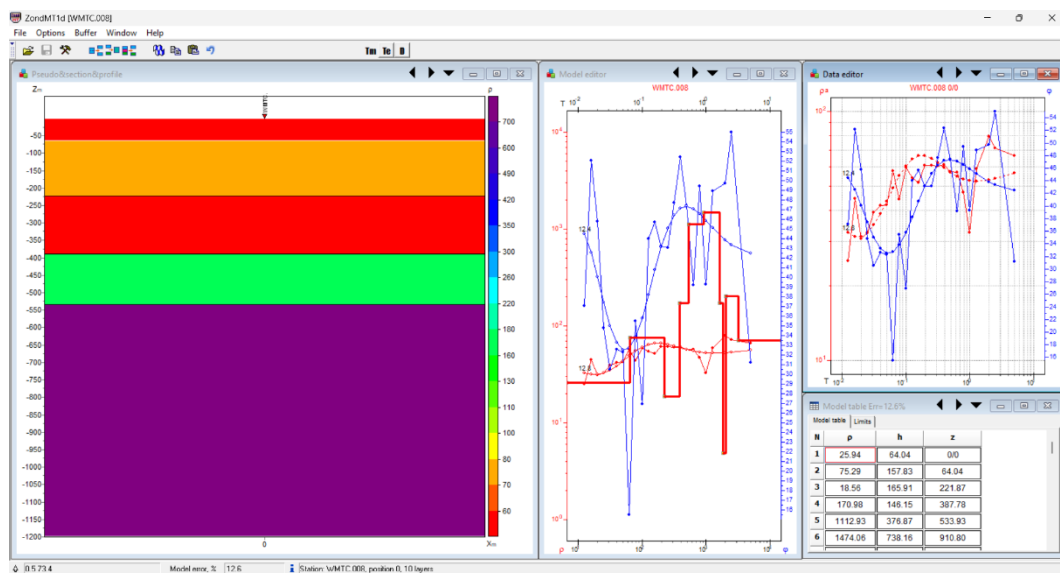


Fig. 40

Resultados sondeo MT correspondiente a WMTC.009

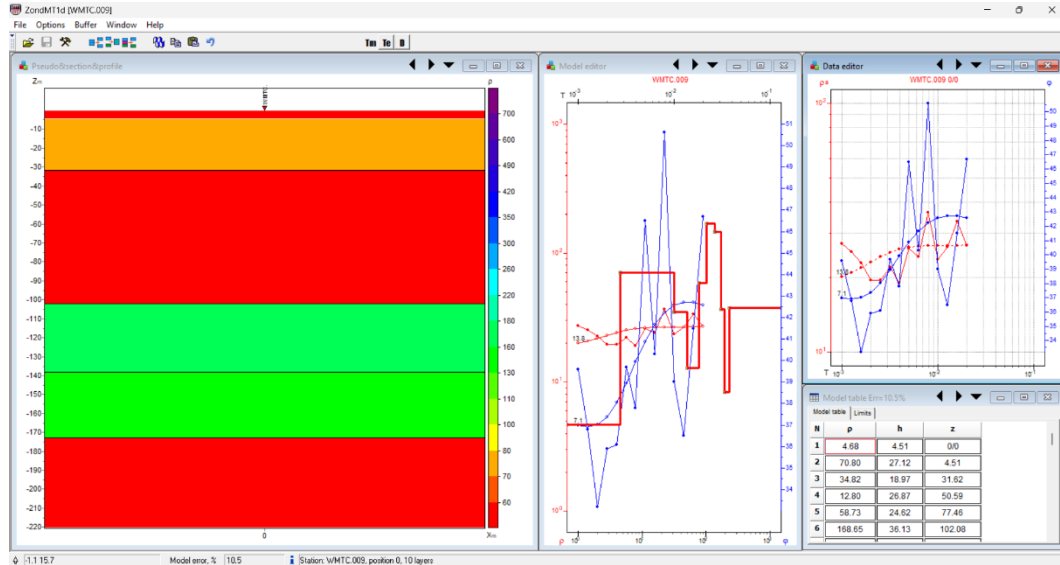


Fig. 41

Resultados sondeo MT correspondiente a WMTC.010

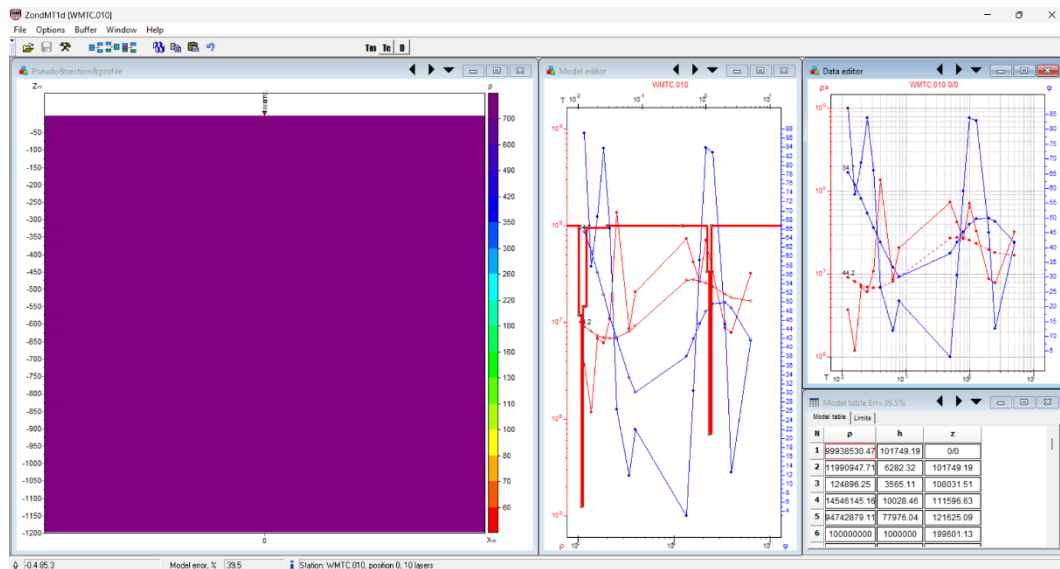


Fig. 42

Resultados sondeo MT correspondiente a WMTC.011

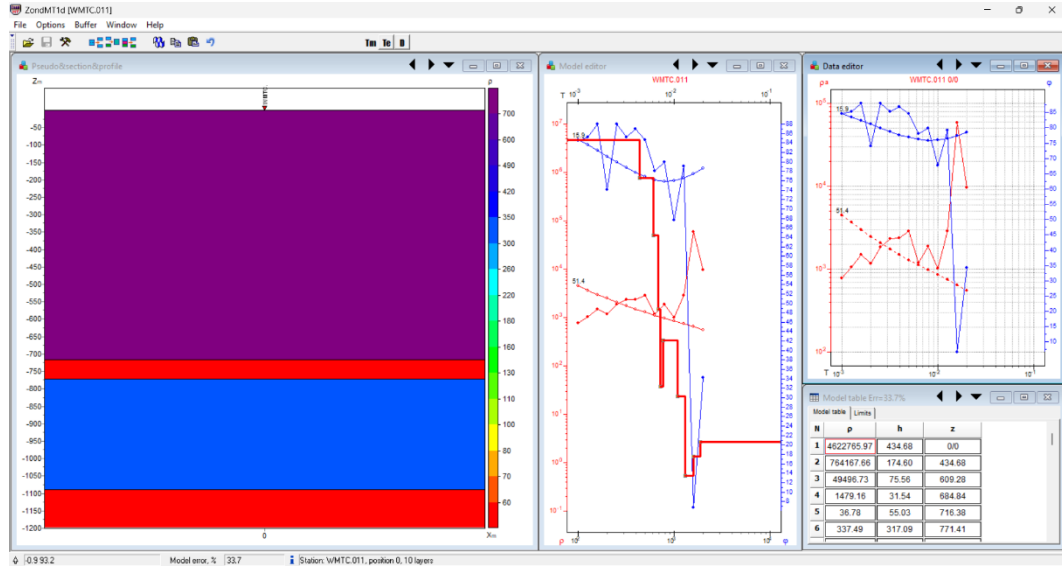


Fig. 43

Resultados sondeo MT correspondiente a WMTC.012

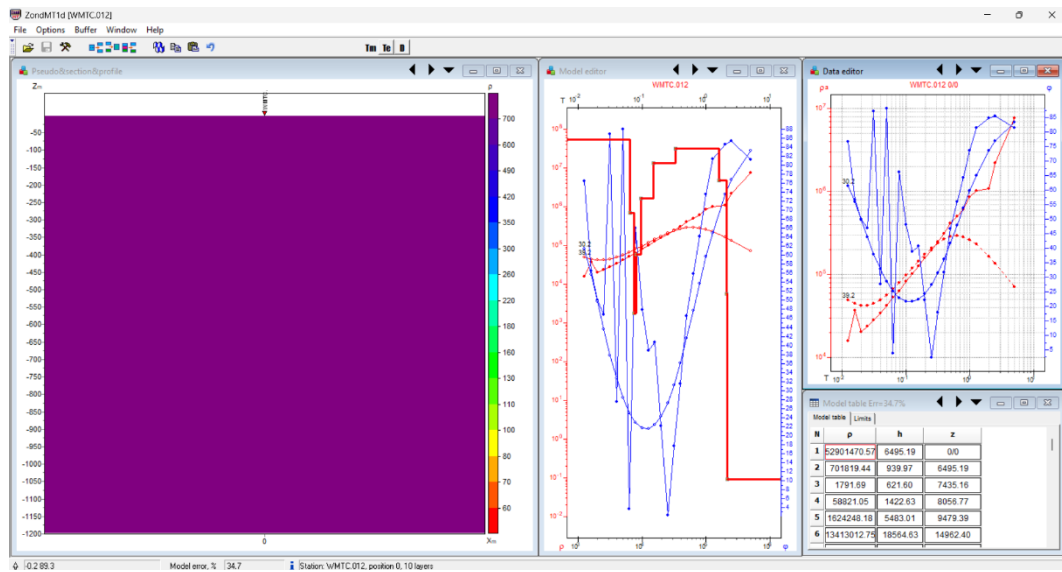


Fig. 44

Resultados sondeo MT correspondiente a WMTC.013

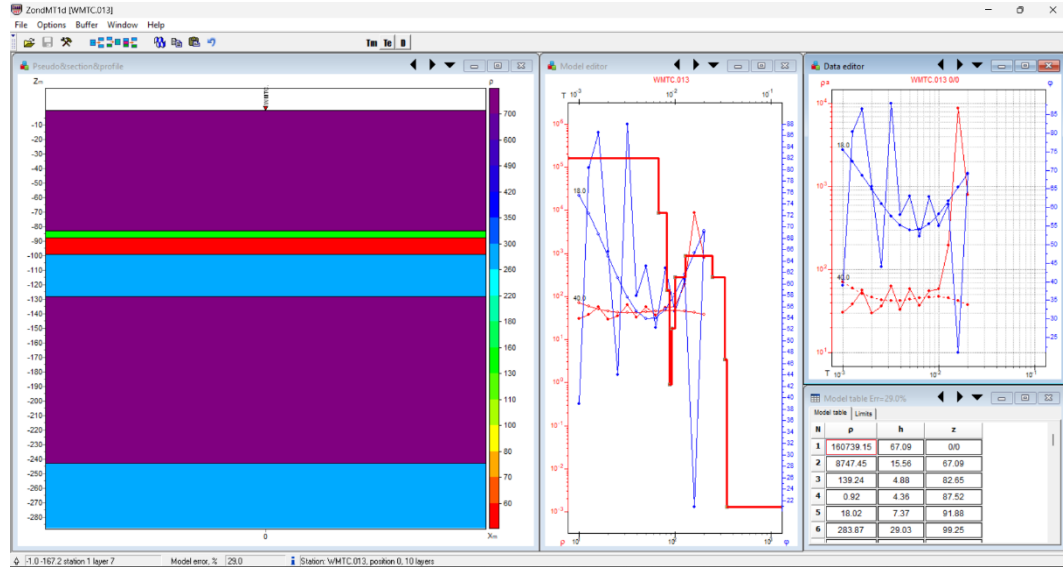
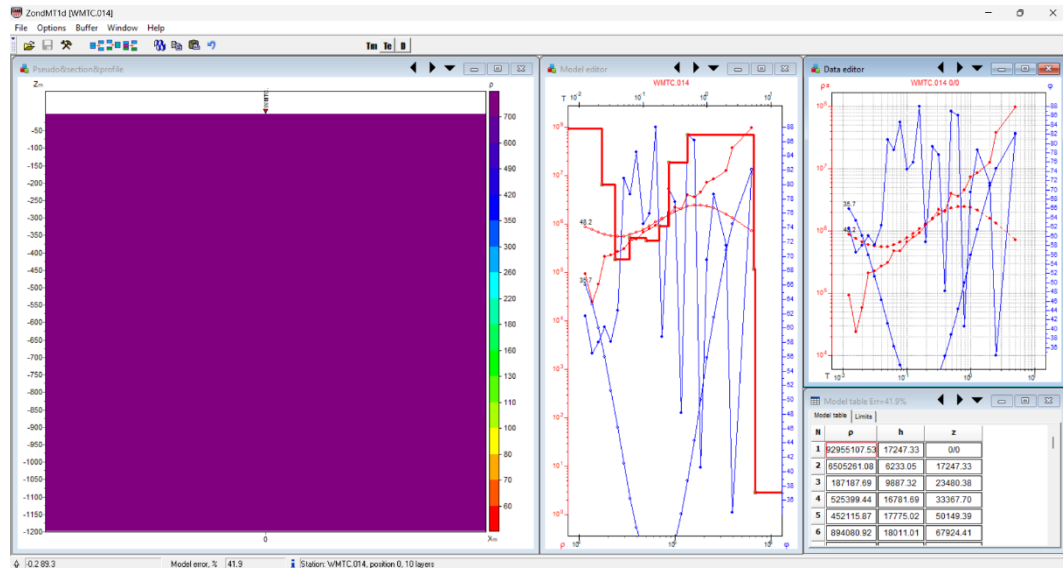
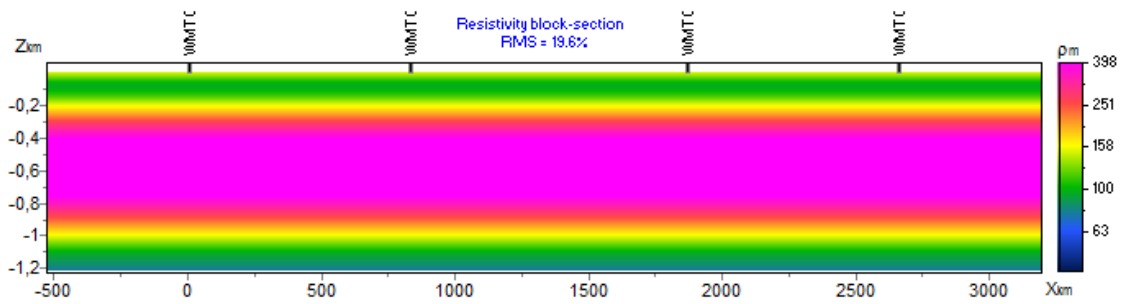
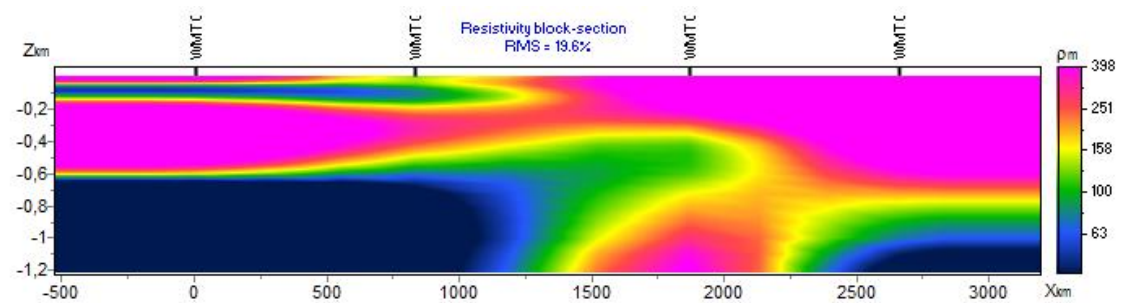
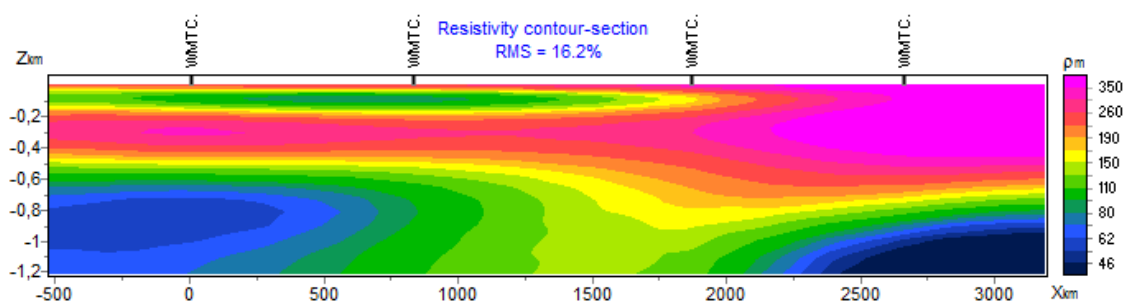


Fig. 45

Resultados sondeo MT correspondiente a WMTC.014



*Apéndice F Perfiles invertidos de MT***Perfil MT 01***Fig. 46 Inversión 1D Línea MT 1**Fig. 47 Inversión 1.5D Línea MT 1**Fig. 48 Inversión 2D Línea MT 1*

Perfil MT 02

Fig. 49 Inversión 1D Línea MT 2

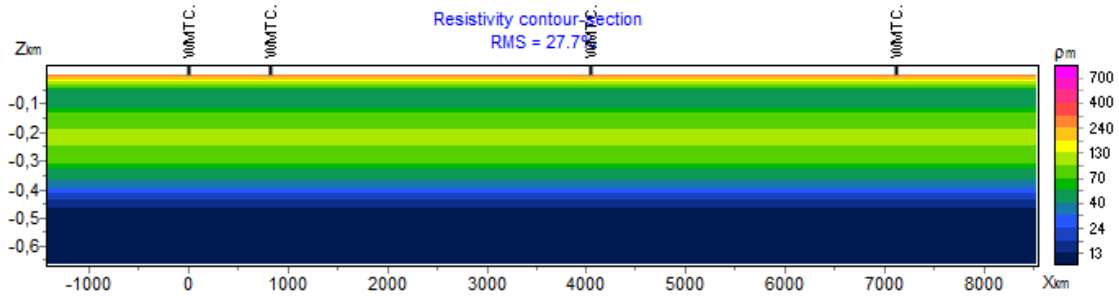


Fig. 50 Inversión 1.5D Línea MT 2

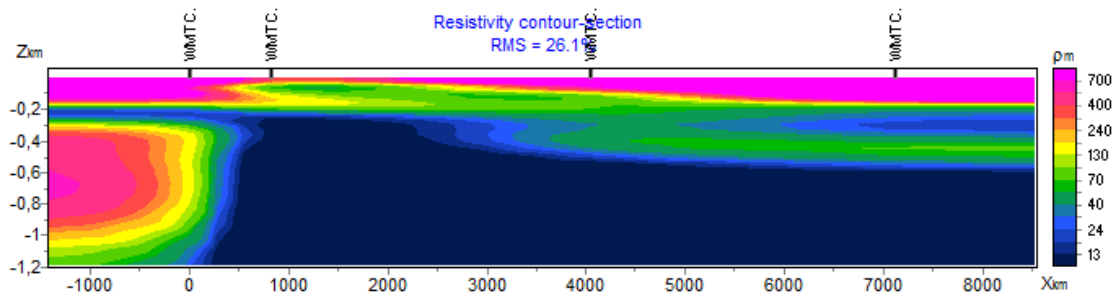
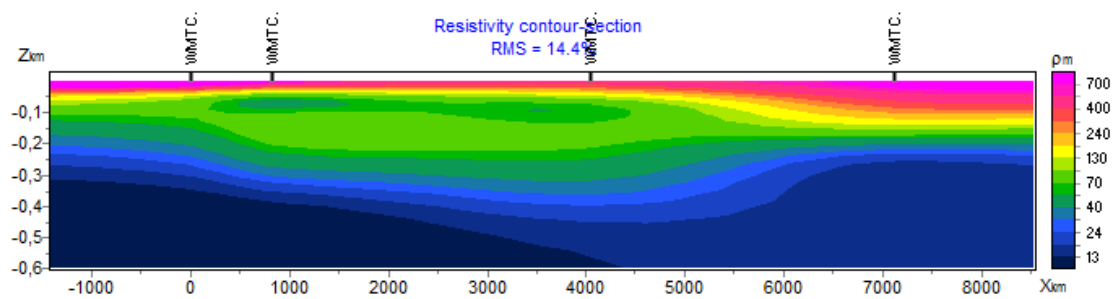


Fig. 51 Inversión 2D Línea MT 2



Apéndice G Datos medidos en laboratorio

Muestra	X	Y	Z	Formación Geológica	Litología	Agua gr	Porosidad	Densidad gr/cm3	Densidad kg/m3	Resistividad seco	Resistividad húmedo	Cargabilidad seco	Cargabilidad húmedo	Vp m/s	Peak Load (kN)	Is50 Mpa
LS1	1114152	1244081	1422	Fm. Jordan	arenisca	0,78	1,90	2,65	2650	8950	684	4,07	13,16	3405	15,32	6,2
LS2	1113826	1244500	1631	Fm. Jordan	arenisca	1,05	10,12	2,65	2650	26583	756	6,06	15,55	3149	15,82	4,8
LS3	1105455	1242655	1200	Fm. Los Santos	arenisca	1,07	2,54	2,57	2570	27795	2103	3,53	7,54	2831	8,62	4,3
LS4	1105454	1242659	1200	Fm. Los Santos	arenisca	2,19	5,26	2,62	2620	55924	1351	8,09	22,91	3637	6,22	2,2
LS5	1105609	1242455	1229	Fm. Los Santos	arenisca	0,96	4,94	2,61	2610	29712	517	6,83	8,98	2826	6,82	3,6
LS6	1106042	1241446	1227	Fm. Los Santos	arenisca	0,50	3,28	2,61	2610	11656	561	3,30	14,85	3179	4,42	2,8
LS7	1105632	1245854	1445	Fm. Los Santos	arenisca	1,65	5,70	2,57	2570	12477	339	4,94	6,31	2425	4,82	1,9
LS8	1105361	1246203	1363	Fm. Los Santos	arenisca	2,04	5,35	2,60	2600	243203	1085	13,55	16,27	2832	6,62	2,4
LS9	1107287	1246076	1604	Fm. Los Santos	arenisca	2,18	6,29	2,56	2560	185501	670	10,89	9,56	1571	3,92	1,9
LS10	1107365	1246252	1638	Fm. Los Santos	arenisca	6,12	13,63	2,48	2480	38390	459	4,89	16,65	1663	0,87	0,3
LS11	1109578	1241228	1588	Fm. Los Santos	arenisca	3,63	9,98	2,64	2640	165891	544	10,96	9,70	2497	0,72	0,3
LS12	1109374	1241751	1613	Fm. Los Santos	arenisca	2,10	16,28	2,64	2640	69612	644	15,45	8,70	1997	0,62	0,2
LS13	1109409	1242476	1669	Fm. Los Santos	arenisca	1,80	8,91	2,62	2620	131112	726	14,94	4,75	3141	12,92	6,0
LS14	1108010	1243616	1667	Fm. Los Santos	arenisca	2,76	5,77	2,63	2630	71051	222	11,71	7,56	3288	6,72	2,4
LS15	1107075	1243480	1603	Fm. Los Santos	arenisca	4,59	7,12	2,64	2640	215719	506	13,75	11,60	3949	4,12	1,3
LS16	1106473	1243618	1534	Fm. Los Santos	arenisca	2,90	7,20	2,58	2580	205318	1100	7,06	11,70	3786	4,32	1,4
LS17	1108011	1244488	1675	Fm. Los Santos	arenisca	2,10	7,26	2,65	2650	4708	165	2,60	13,70	2624	2,32	0,8
LS18	1108413	1244914	1650	Fm. Los Santos	arenisca	3,06	7,96	2,55	2550	195987	791	9,90	10,44	2049	2,82	1,5
LS19	1108589	1245474	1701	Fm. Los Santos	arenisca	1,97	7,24	2,50	2500	956083	675	28,65	7,13	1846	4,82	2,1
LS20	1110765	1244063	1660	Fm. Los Santos	arenisca	3,00	9,08	2,63	2630	308870	1380	6,48	3,40	3817	12,52	4,0
LS21	1109411	1245488	1681	Fm. Los Santos	arenisca	1,93	14,86	2,64	2640	8288	115	4,78	7,47	1575	0,22	0,1
LS22	1109326	1245962	1658	Fm. Los Santos	arenisca	2,12	6,78	2,58	2580	119164	978	10,08	14,10	3631	3,22	1,4
LS23	1103846	1246353	1122	Fm. Los Santos	arenisca	0,85	9,53	2,47	2470	248281	2186	11,25	13,56	2615	7,02	2,9
LS24	1102829	1247250	1045	Fm. Los Santos	arenisca	2,92	11,99	2,11	2110	1252	69	5,05	6,21	3389	4,72	2,2
LS25	1099120	1243546	897	Fm. Paja	lodo calcareo	3,32	5,98	2,59	2590	2392	235	4,40	7,77	3473	3,62	1,3
LS26	1101844	1240417	1295	Fm. Paja	caliza	0,35	2,36	2,65	2650	33485	4211	3,02	6,12	4803	6,02	3,2
LS27	1100125	1240466	1065	Fm. Paja	lodo calcareo	1,56	1,56	2,48	2480	8738	995	5,68	4,80	3241	3,12	1,6
LS28	1099993	1240365	1033	Fm. Paja	lodo calcareo	0,76	1,37	2,62	2620	3693	565	6,57	3,95	3756	4,02	2,3
LS29	1100300	1240380	1083	Fm. Paja	lodo calcareo	0,42	1,18	2,68	2680	42894	6205	9,35	5,36	4513	7,02	2,9
LS30	1103016	1240579	1278	Fm. Paja	lodo calcareo	1,90	2,86	2,59	2590	64598	733	5,40	4,55	4055	4,42	1,9
LS31	1098793	1242406	923	Fm. Paja	lodo calcareo	0,15	1,27	2,67	2670	8061	192	3,25	3,36	4071	5,92	2,6
LS32	1099616	1240997	1127	Fm. Paja	biomicrita	5,07	11,14	2,73	2730	61148	1800	10,81	4,97	4810	6,02	2,8
LS33	1100729	1240236	1115	Fm. Paja	arenisca calcarea	1,13	2,39	2,65	2650	1392	276	3,47	5,83	2775	6,32	2,0
LS34	1104424	1238243	1309	Fm. Rosablanca	biomicrita	0,10	1,91	2,67	2670	10578	8944	3,38	5,54	2691	4,52	3,6
LS35	1101870	1246233	1083	Fm. Rosablanca	caliza	4,27	21,76	2,54	2540	35752	190	11,37	6,52	2147	1,82	1,4
LS36	1101531	1246088	1075	Fm. Rosablanca	arenisca	2,45	10,33	2,54	2540	1106927	4578	47,23	6,29	1398	7,67	3,3
LS37	1102311	1244211	1146	Fm. Rosablanca	arenisca	2,19	14,23	2,46	2460	601115	481	17,89	4,01	1954	3,57	2,3
LS38	1102620	1243796	1147	Fm. Rosablanca	caliza	0,23	0,46	2,66	2660	2632	1409	2,69	6,66	5007	12,92	4,9

Muestra	X	Y	Z	Formación Geológica	Litología	Agua gr	Porosidad	Densidad gr/cm3	Densidad kg/m3	Resistividad seco	Resistividad húmedo	Cargabilidad seco	Cargabilidad húmedo	Vp m/s	Peak Load (kN)	Is50 Mpa
LS39	1103010	1243469	1130	Fm. Rosablanca	biomicrita	0,20	1,11	2,62	2620	973	529	1,67	2,50	2922	10,82	5,7
LS40	1103010	1243469	1130	Fm. Rosablanca	biomicrita	0,55	1,88	2,63	2630	475	223	2,41	4,24	2378	4,42	2,4
LS41	1103332	1243581	1136	Fm. Rosablanca	biomicrita	0,22	0,34	2,71	2710	38996	12618	8,18	7,97	3190	6,97	3,3
LS42	1103332	1243581	1136	Fm. Rosablanca	caliza	0,02	3,63	2,69	2690	86996	27575	5,42	4,39	4967	3,87	3,1
LS43	1106150	1240278	1305	Fm. Rosablanca	caliza	0,05	5,59	2,63	2630	26177	18390	15,71	14,95	3680	5,67	3,5
LS44	1106150	1240278	1305	Fm. Rosablanca	caliza	0,20	2,51	2,69	2690	19187	17061	3,72	2,15	4012	6,42	2,3
LS45	1106119	1240293	1288	Fm. Rosablanca	caliza	0,09	2,16	2,66	2660	17229	9853	3,59	4,16	4871	8,72	5,5
LS46	1106212	1239561	1274	Fm. Rosablanca	arenisca calcarea	0,53	1,88	2,63	2630	16413	1070	7,31	7,33	2837	6,72	2,5
LS47	1106732	1239074	1274	Fm. Rosablanca	lodo calcareo	0,21	0,74	2,68	2680	122773	17386	21,07	5,87	4500	4,72	2,3
LS48	1103218	1245683	1129	Fm. Rosablanca	caliza	10,11	21,15	2,58	2580	34024	102	9,82	4,11	2841	0,97	0,5
LS49	1102678	1245568	1127	Fm. Rosablanca	biomicrita	0,19	1,73	2,67	2670	4223	2513	2,62	3,23	923	6,42	3,8
LS50	1100917	1243639	1069	Fm. Rosablanca	biomicrita	1,89	4,91	2,62	2620	9450	808	2,62	7,13	3668	3,72	1,3
LS51	1100292	1243696	1016	Fm. Rosablanca	caliza	0,20	1,84	2,68	2680	95646	5012	5,28	7,83	3459	3,22	1,1
LS52	1098677	1243124	829	Fm. Rosablanca	caliza	0,35	1,15	2,68	2680	9726	5401	6,12	7,87	3849	5,62	2,0
LS53	1098422	1242838	788	Fm. Rosablanca	biomicrita	0,39	0,25	2,63	2630	11139	2265	6,95	5,00	2546	6,17	3,6
LS54	1102818	1242331	1173	Fm. Rosablanca	biomicrita	0,81	1,53	2,68	2680	16935	3132	5,41	8,84	3708	7,22	2,7
LS55	1108238	1238953	1355	Fm. Rosablanca	caliza	0,96	1,78	2,61	2610	3963	1013	10,32	9,70	4678	6,17	2,1
LS56	1108289	1239061	1376	Fm. Rosablanca	lodo calcareo	1,20	2,32	2,61	2610	468	134	2,13	4,13	3482	6,42	3,0
LS57	1108747	1239055	1427	Fm. Rosablanca	lodo calcareo	0,48	0,72	2,66	2660	2244	979	2,32	2,99	4634	5,87	2,7
LS58	1100683	1245715	1062	Fm. Rosablanca	arenisca	3,59	8,69	2,49	2490	2582162	1523	84,69	5,16	2001	7,82	2,4
LS59	1104155	1241372	1234	Fm. Rosablanca	biomicrita	0,69	0,79	2,71	2710	2067	769	5,69	10,29	3583	11,12	3,4
LS60	1101615	1241175	1272	Fm. Tablazo	biomicrita	0,23	0,74	2,74	2740	297346	20441	10,51	3,33	5348	7,62	2,4
LS61	1101023	1242414	1225	Fm. Tablazo	biomicrita	0,42	1,74	2,71	2710	91122	5593	3,08	13,00	3875	9,62	4,0
LS62	1114643	1243865	1246	Silgara	esquistoso	0,75	0,37	2,87	2870	2593	814	2,82	5,62	2124	4,92	1,6