



PROYECTO
ESTUDIO GEOFÍSICO
GEOHIDROLÓGICO M. F.
ALTAMIRANO

A SOLICITUD DE
Ing. Vicente López Hernández

ESTUDIO GEOFÍSICO
GEOELÉCTRICO

REALIZADO POR
Ingeniero Geofísico Juan Jesús Torres
Solano

Cédula profesional: 12293507
Fecha de inicio: 10 de Septiembre de 2023
Fecha de entrega: 25 de Octubre de 2023
San Nicolás de Los Garza, N.L.

Índice de Contenidos

1. Resumen	1
2. Generalidades	2
2.1. Antecedentes	2
2.2. Objetivos	3
2.3. Localización	3
3. Características físicas del sitio	5
3.1. Fisiografía local y regional	5
3.2. Geomorfología y condiciones de sitio	6
3.3. Recursos hidráulicos locales y regionales	6
3.4. Hidrogeología	7
3.5. Información climática	8
4. Geología	9
4.1. Geología local y regional	9
5. Marco teórico y metodología	11
5.1. Geofísica - método geoeléctrico	11
5.1.1. Sondeos eléctrico vertical (SEV)	11
descripción del equipo de prospección	12
5.2. Metodología de adquisición y procesado geofísico	13
5.2.1. Adquisición en campo (SEV)	15
5.3. Pre-procesado y procesado geofísico (SEV)	15
5.3.1. Criterios de modelado 1D de inversión	16
5.3.2. Criterios de seudo-sección	16
6. Resultados e interpretación	17
6.1. Resultados de SEV's y modelos de inversión 1D	17
6.1.1. S1-MFA-VER	18
6.1.2. S2-MFA-VER	19
6.1.3. S3-MFA-VER	20
6.2. Resultados de seudo secciones	21
6.2.1. Seudo sección S1-S3	22
6.2.2. Seudo sección S2-S1	23
6.2.3. Seudo sección S2-S3	24
7. Conclusión	25
Referencias	26
Anexo A. Sondeos Eléctricos Verticales	27
A.1. Sondeo S1-MFA-VER	27
A.2. Sondeo S2-MFA-VER	29
A.3. Sondeo S3-MFA-VER	31

Índice de Figuras

1.	Mapa de ubicación.	2
2.	Disposición de los SEV's.	4
3.	Mapa local de red de causes y escorrentías.	5
4.	Mapa de cuenca y Subcuenca RH27Ca.	7
5.	Perfil geológico del sitio de estudio.	7
6.	Mapa Geológico de la zona de estudio.	9
7.	Distribución del arreglo Schlumberger.	11
8.	Modelo de inversión 1D S1-MFA-VER	18
9.	Modelo de inversión 1D S2-MFA-VER.	19
10.	Modelo de inversión 1D S3-MFA-VER.	20
11.	Seudo sección S1-S3.	22
12.	Seudo sección S2-S1.	23
13.	Seudo sección S3-S2.	24
A.1.	Distribución del arreglo Schlumberger sondeo S1-MFA-VER.	27
A.2.	Distribución del arreglo Schlumberger sondeo S2-MFA-VER.	29
A.3.	Distribución del arreglo Schlumberger sondeo S3-MFA-VER.	31
B.1.	S1-MFA-VER, sitio de estudio preparación de adquisición geofísica.	33
B.2.	S2-MFA-VER, vista de dirección de tendido.	34
B.3.	S2-MFA-VER, vista de dirección de tendido.	35
B.4.	S3-MFA-VER, Punto de atribución del sondeo.	36

Índice de Tablas

1.	Coordenadas de los SEV.	3
2.	Descripción de la metodología de adquisición y procesado geofísico	14
3.	Modelo de inversión 1D sitio S1-MFA-VER	18
4.	Modelo de inversión 1D sitio S2-MFA-VER.	19
5.	Modelo de inversión 1D sitio S3-MFA-VER.	20
A.1.	Coordenadas del punto de atribución S1-MFA-VER.	27
A.2.	Sondeo 1, datos de adquisición en campo.	28
A.3.	Coordenadas del punto de atribución S2-MFA-VER.	29
A.4.	Sondeo 2, datos de adquisición en campo.	30
A.5.	Coordenadas del punto de atribución S3-MFA-VER.	31
A.6.	Sondeo 3, datos de adquisición en campo.	32

1. Resumen

Solicitud del Ing. Vicente López Hernández, se realizo el trabajo denominado EXPLORACIÓN GEOFÍSICA GEOHIDROLÓGICA EN MANLIO FABIO ALTAMIRANO (EGGH-MFA), en el municipio de Cazones de Herrera, Veracruz; teniendo una fecha de inicio el 10 de Septiembre del 2023 al 25 de Octubre del 2023, periodo en el cual se realizo la planeación (ver capítulo 2, 3 y 4), ejecución de 3 sondeos, modelado / procesado, la elaboración del informe Geofísico y entrega del mismo.

Realizado en la comunidad de Manlio Fabio Altamirano con el objetivo de identificar el acuífero y la configuración geológica en la cual se encuentra. El estudio se realizo el día 18 de Septiembre del 2023, iniciando a las 9:00am y finalizando a las 01:24pm, durante la ejecución se alcanzo temperatura mínima de 29°C y 32°C como máxima (medida en campo).

Se Realizaron un total de 3 sondeos eléctricos verticales mediante el método schlumberger (ver capítulo 5), teniendo como resultado la identificación de las unidades geológicas (ver capítulo 6) y su correlación con el acuífero, completando los objetivos planteados para el presente estudio (ver capítulo 7).

2. Generalidades

2.1. Antecedentes

En el área de estudio se encuentra dentro de la provincia Llanura Costera del Golfo Norte, próximo al río Cazones, cuyo predio esta limitado por un meandro (arollo temporal) que descarga directamente en el río Cazones, el uso de suelo de la localidad en la que se ubica el sitio de estudio esta dedicado principalmente a la agricultura, jungla y asentamientos rurales.

El área de estudio se encuentra a 4.3 km del río Cazones y a 12.8 km de del litoral marino, aunque presenta una cercanía al afluente principal, no se ubica dentro de la cuenca de depósitos sedimentarios del río cazones, en su lugar se emplaza entre lomerios poco extendidos a escasos 15 metros sobre el nivel medio del mar.

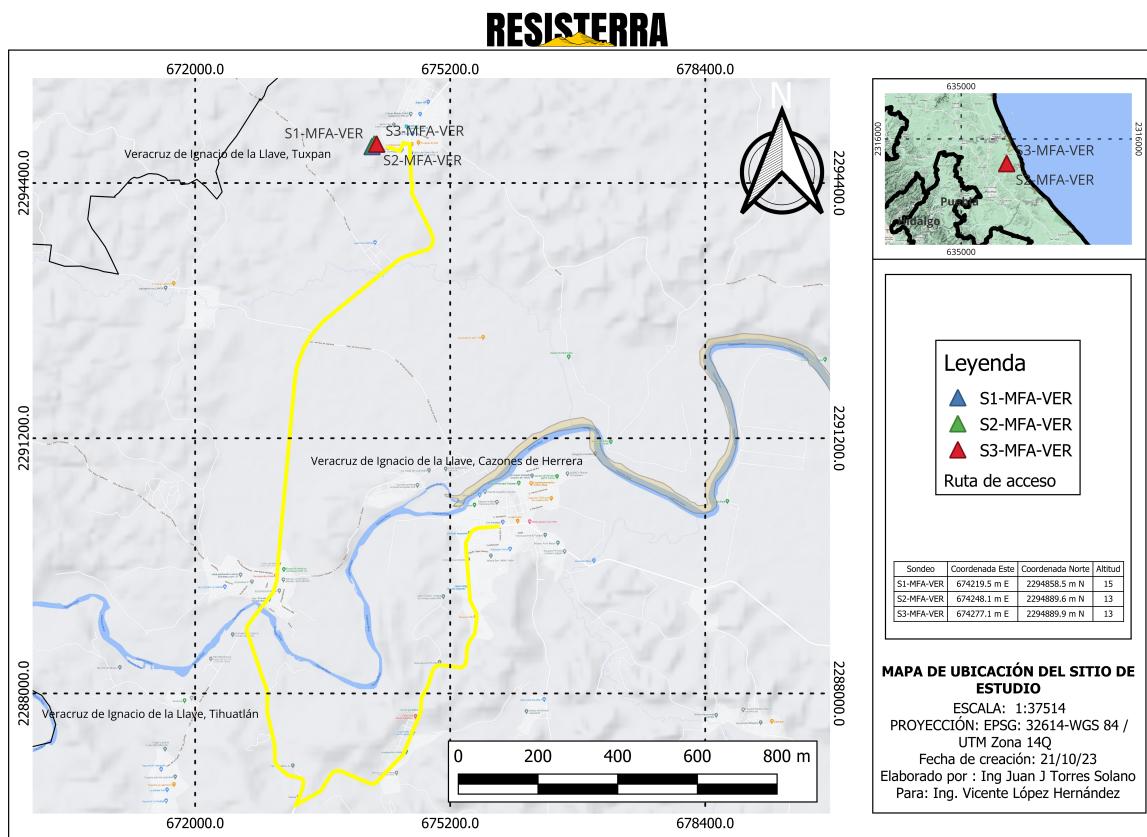


Figura 1: Mapa de localización y ruta de acceso.

2.2. Objetivos

- Identificar la profundidad de saturación en las unidades geológicas características del sitio.
- Evaluación de condiciones locales que favorezcan la recepción y almacenamiento hídrico.
- Delimitar zonas recarga y descarga del acuífero.
- Inferir distribución y alcance de las unidades geológicas relacionadas al acuífero a partir de los resultados de inversión 1D.

2.3. Localización

El sitio de estudio se encuentra a 138.7 kilómetros de Xalapa capital, se accede desde Puebla, a través de la carretera federal 119D por 73 km, continuando por la autopista El Tajín/México - 132D/Papantla, se toma la salida en dirección a Poza Rica-Cazones, por la carretera 130D México-Tuxpan por 20 km, tomando la salida hacia la carretera Poza Rica Cazones por 20km girando en dirección al Ramal A. Cazones por la carretera 20 de noviembre por 9.5km, (ver figura 2), desde la Cabecera municipal de Cazones de Herrera se ubica a 5.2 kilómetros al NNW, a 15.3 Km sobre la carretera Ramal a Cazones en dirección a Tuxpan de Rodríguez Cano. La ruta de acceso se traza en el figura 1, con coordenadas UTM WGS84 14Q 674686.3 m E 2294887.1 m N (Ver mapa 1), siendo el lugar donde se ubica la comunidad de Manlio Fabio Altamira.

Los sitios designados para realizar los levantamientos geofísicos en el predio se describe en la tabla siguiente::

Tabla 1: Coordenadas de los SEV.

Sitio	Coordenada Este	Coordenada Norte	Altitud
S1-MFA-VER	674219.5 m E	2294858.5 m N	15 msnmm
S2-MFA-VER	674248.1 m E	2294889.6 m N	13 msnmm
S3-MFA-VER	674277.1 m E	2294889.9 m N	13 msnmm

¹ Coordenadas de los puntos de atribución, proyección: WGS-84 / UTM Zona 14Q.

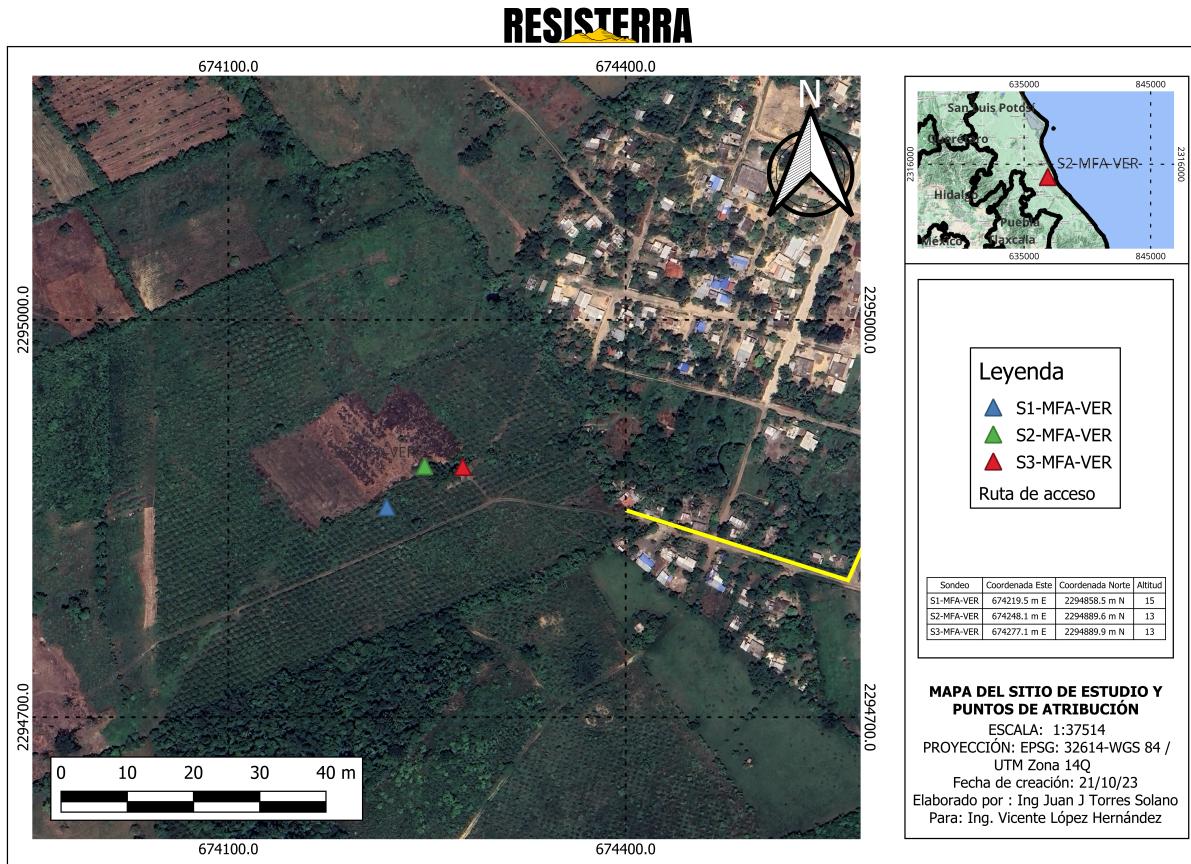


Figura 2: Sitio de estudio donde se realizaron los sondeos eléctricos verticales (SEV's) y la así como las direcciones, longitud máxima alcanzada de apertura de los sondeos.

3. Características físicas del sitio

3.1. Fisiografía local y regional

El relieve primario está constituido principalmente por valles y lomeríos corresponden a la Provincia Llanura Costera del Golfo Norte (LCGN), la cual recorre los estados de Veracruz, Puebla, San Luis Potosí, Hidalgo, Tamaulipas y Nuevo León.

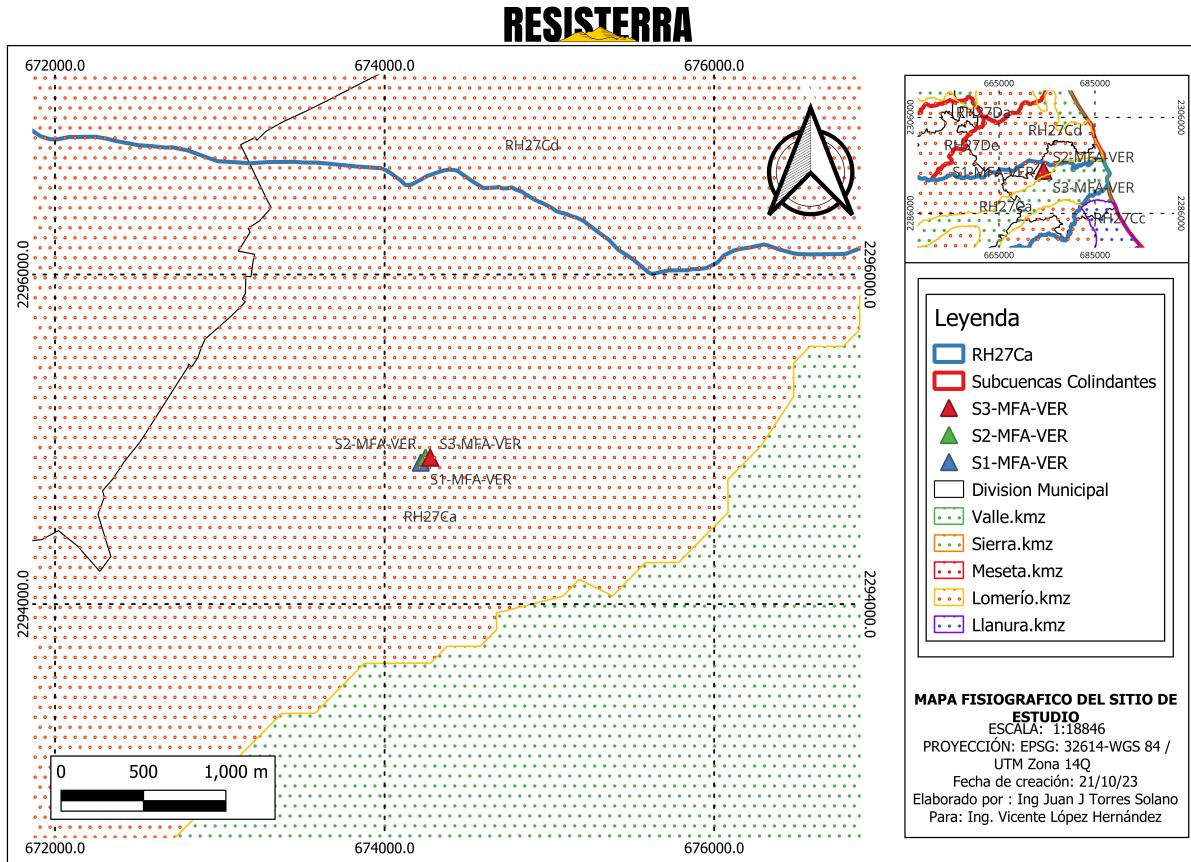


Figura 3: fisiografía local del área de estudio.

El sitio de estudio se ubica en la porción norte del estado de Veracruz, en la Planicie Costera del Golfo, dentro de la Subprovincia planicies y lomeríos del norte [8], a su vez, dentro de la Subcuenca Rio Cazones (RH27Ca)[4], ubicado en la proximidad del área de depósitos y sedimentos del río Cazones, el sitio comprende parte del sistema de lomeríos señalados anteriormente, los cuales se encuentran cortados por afluentes sinuosos entre los lomeríos.

La zona de estudio está conformada por unidades fisiográficas de carácter sedimentario en su mayoría, principalmente valles, llanuras, mesetas y lomeríos, y volcánico en los límites hacia el Sur y Oeste, caracterizado por sierras, se identifica un extenso valle sobre la cuenca principal del río Cazones hasta su desembocadura, al norte del valle se identifica un área amplia de lomeríos bajos con pequeños valles, identificándose el sitio de estudio cerca del límite entre estas dos unidades fisiográficas (ver 3)).

3.2. Geomorfología y condiciones de sitio

La región presenta un suave contraste entre llanuras y lomeríos que se extienden por la provincia (LCGN), localmente el sitio se encuentra dividido por una amplia zona de deposito fluvial provenientes del flujo del Rio Cazones y Rio Tuxpan, socavando y formando un valle, que se extiende de Este a Oeste, aunque próximo al área de deposito fluvial, no se identifican depósitos directos, por lo que es notorio el dominio de estructuras de lomeríos (pliegues suaves de rocas sedimentarias) mayormente orientadas al Noroeste y en menor proporción al Noreste, cuya dimensión se reduce en dirección a la costa (Este) [10].

No se identifica un contraste topográfico marcado, sin embargo es posible identificar en la región estructuras que cortan de forma abrupta la planicie costera del golfo, como es el Eje Neovolcánico Transmexicano al Suroeste y la Sierra Madre Oriental al Noroeste.

El sitio de estudio se ubica entro del conjunto de llanuras y lomerios, mayormente dentro de un llanura rodeado de lomerios y de bajo perfil topográfico.

3.3. Recursos hidráulicos locales y regionales

La zona de estudio se encuentra en la Región Hidrológica: RH-26 Norte de Veracruz , perteneciente a la Planicie Costera del Golfo Norte, presenta una extensión de $26,592km^2$, con una precipitación normal anual de 1,422 mm, con un escurrimiento natural medio superficial interno de $15,021hm^3/año$, la cual esta integrada por 12 subcuencas [4].

El sitio de estudio se encuentra dentro del la sub cuenca RH27Ca Rio Cazones, la cual presenta una área de $1,187km^2$, cuyo aporte fluvial principal corresponde a la vertiente del la Subcuenca Rio San Marcos, terminando en la desembocadura del Rio Cazones en Barra de Cazones, manteniendo una dirección principal al Noreste (ver Figura 4)[5].

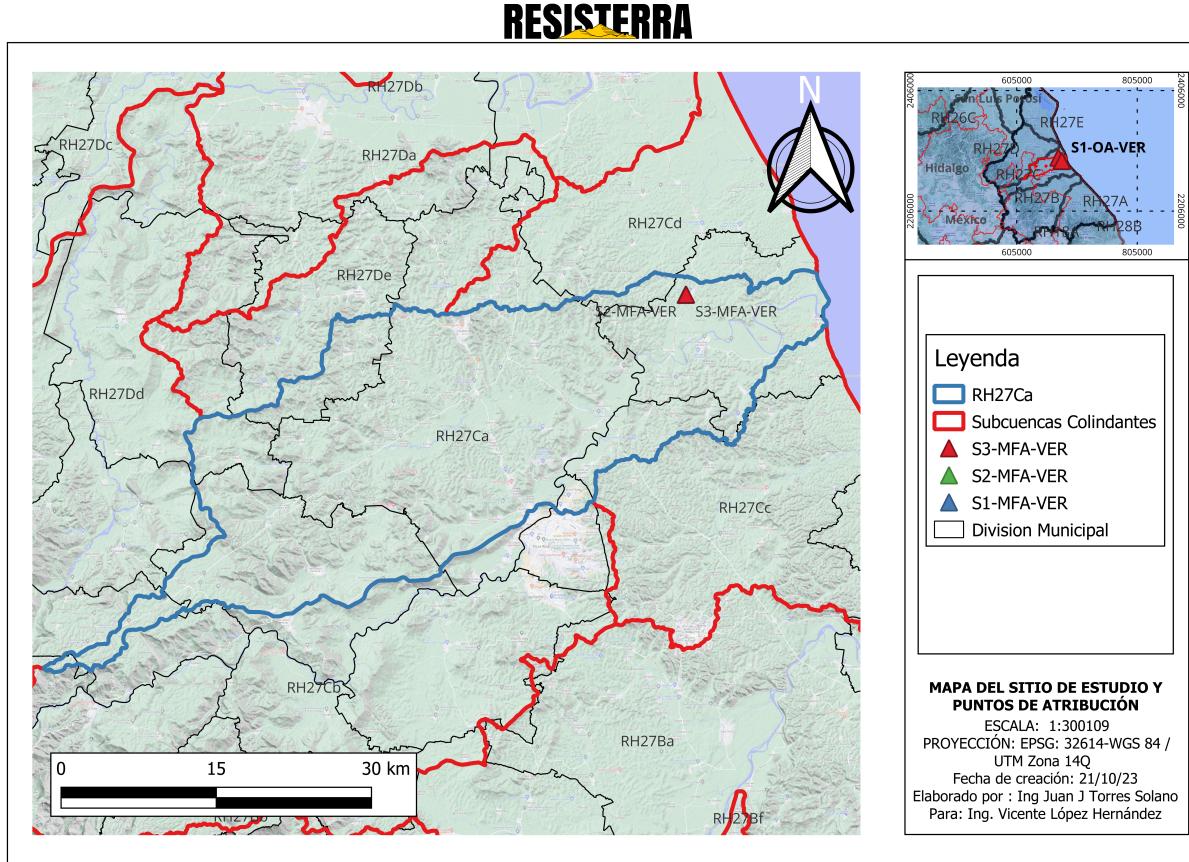


Figura 4: Región Hidrológica 24 Bravos-Conchos y Sub cuencas.

3.4. Hidrogeología

El área de estudio corresponde al acuífero Poza Rica (3001), el cual se extiende principalmente en la subcuenca Río Cazones, abarcando en menor proporción las subcuencas Río Tuxpan y Río Tecolutla, abarcando parte del norte del Estado de Veracruz y de Puebla, limitando al norte con el acuífero Álamo-Tuxpan, al sur el acuífero Tecolutla, al suroeste con el acuífero Acaxochitlán y al este con el Golfo de México.

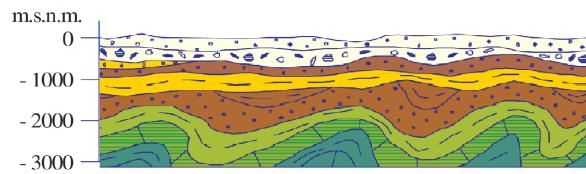


Figura 5: Perfil geológico de la zona de estudio, fuente SGM [?].

Se identifica como zona de recarga toda superficie de la cuenca, teniendo mayor impacto las zonas altas, representadas por las sierras y lomeríos (ver mapa 3), siendo los afluentes superficiales las zonas de descarga y por lo tanto los cuerpos que drenan el acuífero. Por lo tanto se esperaría que los niveles

estáticos del acuífero cerca de los afluentes se mantuviera estable la mayor parte del año.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua 2015, el acuífero se clasifica como zona de disponibilidad 3 [11], lo cual nos indica la factibilidad de explotación del recurso hídrico.

En la región de estudio se identifican unidades sedimentarias del Paleógeno, Neogeno y Cuaternario, de las cuales se consideran materiales aluviones de espesores reducidos como parte principal del acuífero superficial [11]. sin embargo se identifican en la región del acuífero, principalmente, unidades sedimentarias marinas, continentales, representadas por calizas lutitas, limonitas, areniscas, aluvión, conglomerado polimítico principalmente (ver Figura 5 y 6).

3.5. Información climática

De acuerdo con **INEGI** (2023). en el municipio de Cazones de Herrera se identifican dos tipos de clima, el primero consta de un clima cálido sub húmedo con presencia de lluvias en verano, presentando una humedad de 48.22 %, de igual forma se identifica un clima cálido húmedo con abundantes lluvias en verano, se identifica un rango de temperatura de 22 a 36°, y con precipitaciones medias de 1123 a 1600 mm.

4. Geología

4.1. Geología local y regional

El sitio de estudio se encuentra ubicado en la Porción Norte del Terreno Tectonoestratigráfico Maya, al norte colinda con el Terreno Coahuila y al oeste con el Terreno Sierra Madre Oriental [1], el área de muestreo se ubica sobre la denominada Planicie Costera del Golfo, misma que comprende la costa del golfo de México, desde Tamaulipas hasta Tabasco, la cual está caracterizada por depósitos sedimentarios continentales y marinos, desde arenas gruesas, conglomerados, limos, lutitas, limos arenosos y aluviones de origen terrestre y marino, este terreno está caracterizado por depósitos de regresión y transgresión marina, originando una erosión diferencial en estructuras plegadas formando lomeríos en la porción norte de este Terreno [10], los cuales se identifican en el sitio de estudio.

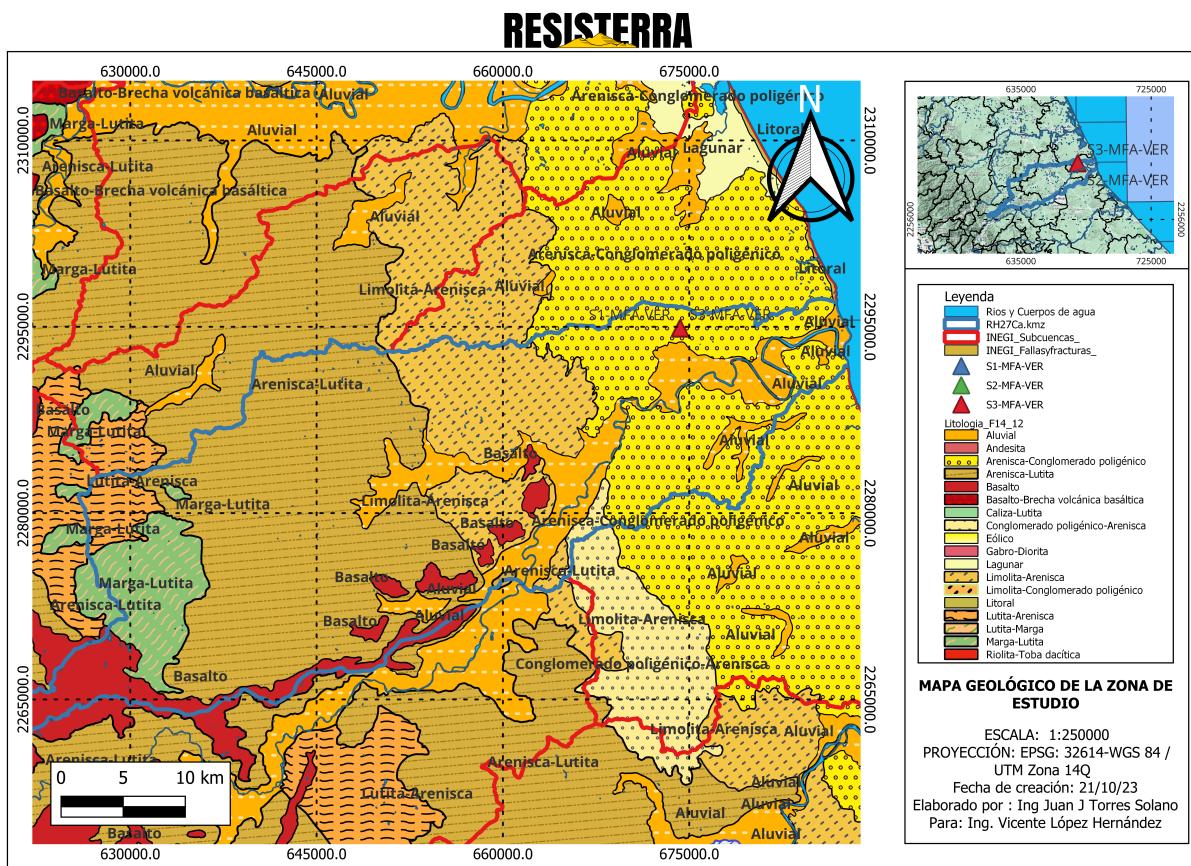


Figura 6: Mapa geológico del sitio de estudio, se puede observar los puntos de atribución y las unidades geológicas relacionadas próximas .

Dentro de la región de estudio, RH27Ca Rio Cazones se identifican rocas sedimentarias del Mesozoico, Jurásico medio y Cretácico superior, tales como calizas, anhidritas, dolomitas, areniscas, intercalaciones de lutitas y calizas arcillosas.

Las unidades geológicas identificadas a profundidad somera corresponden a rocas sedimentarias

terciarias, de las cuales se identifica alternancia entre unidades de lutitas y areniscas de poco espesor, de igual forma se identifican depósitos aluviales y fluviales en el cauce del río y zonas de inundación o planicie fluvial, correspondientes a depósitos recientes del Cuaternario caracterizados por arenas y grabas con una matriz arcillosa (Ver Mapa 6).

En el área de estudio se tiene presencia de una capa superficial, de pobre espesor, correspondiente ha aluvial (Qhoal), seguido de la Formación Tuxpan representada por arenisca-conglomerado polimíctico (TmAr-Cgp), por debajo se identifica la Formación Escolin, la cual esta formada por un conglomerado polimíctico con areniscas, de mayor dureza y espesor variable y finalmente se identifica una unidad de arenisca limonita como capa sello, diferenciando las unidades correspondientes al periodo cuaternario (ver Figura 5 y 6).

5. Marco teórico y metodología

5.1. Geofísica - método geoeléctrico

Es un método de prospección Geofísica el cual aprovecha las características de resistividad, polarización, potencial eléctrico natural y cargabilidad eléctrica de un medio geológico en un tiempo definido y en una geometría definida, a fin de establecer una relación entre la respuesta de las propiedades físicas del medio geológico con las características físicas de las unidades geológicas en un sitio de estudio, así como los elementos que interactúan y modifican la respuesta conjunta del medio geológico.

A la circulación de cargas eléctricas se le conoce como conducción eléctrica, en un medio líquido y gaseoso los iones y/o electrones presentan cargas positivas o negativas, cuando estos presentan movimiento se dice que presentan conductividad iónica lo que permite realizar mediciones y diferencias entre el comportamiento del medio ante una carga eléctrica (campo inducido) y un campo natural auto generado [3].

5.1.1. Sondeos eléctrico vertical (SEV)

Las mediciones, empleando el método de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) se realizan a través de inyecciones de corriente controlada por medio de dos electrodos denominados A y B, que se colocan en los extremos del arreglo geoeléctrico, en la parte central del arreglo se coloca un electrodo denominado punto de atribución, a partir del cual se establecen las distintas distancias que obedece el arreglo geométrico establecido para el tipo de sondeo, al igual mediante dos electrodos denominados M y N, colocados a la misma distancia del punto de atribución, es medida la diferencia de potencial (ΔV) que indica el cambio de potencial eléctrico del medio geológico al paso de la inyección de corriente y por el cual confluye la contribución eléctrica del medio geológico circundante de acuerdo a las capacidades de resistividad eléctrica del medio, siendo la lectura de un punto de atribución única, ya que el medio geológico presenta heterogeneidad en la distribución, composición y propiedades petrofísicas distintas.

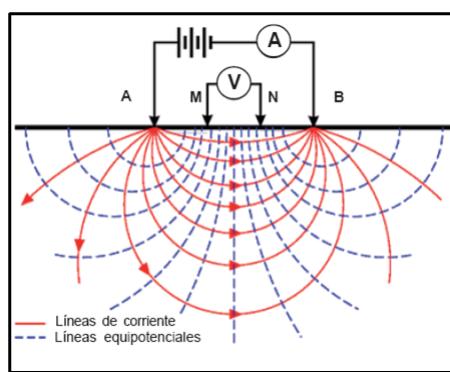


Figura 7: Ilustración del arreglo geoelectrónico y la dispersión del campo eléctrico.

El arreglo geoeléctrico empleado es el denominado Schlumberger, el cual consta de un par de electrodos de corriente y un par de electrodos de potencial, el primer par corresponden al circuito de corriente, por el que se inyecta corriente eléctrica al medio geológico y se encuentran a una misma distancia del centro del arreglo, el segundo par corresponde a los electrodos de potencial, con ellos se miden las variaciones de potencial eléctrico del medio, la apertura entre estos electrodos obedece

una geometría de donde "L" es igual a la distancia entre el primer par de electrodos denominados A y B, de la misma manera "a" se define como la distancia entre los electrodos M y N, manteniendo una relación de distancia definida por el tipo de arreglo geoeléctrico de modo que $L \gg a$.

El valor de resistividad aparente ρ se obtiene al multiplicar por la razón de la "K" diferencia de potencial y la corriente eléctrica, siendo " K_{el} " factor geométrico (ver Ecuación 1 y 2), de esta manera obtenemos el valor de resistividad aparente para un punto en un medio heterogéneo.

$$\rho_a = \frac{2\pi\Delta V}{I} \left(\frac{2}{L-a} - \frac{2}{L+a} - \frac{2}{L+a} + \frac{2}{L-a} \right)^{-1} \quad (1)$$

Ecuación 1.

Durante la adquisición se obtienen valores de potencial " ΔV " de corriente " I ", medidos directamente de la respuesta del medio geológico [6], empleando dos multímetros, se realizan 3 lecturas, a fin de obtener un promedio y reducir la incertidumbre de la toma de datos ajustando la desviación estándar por cada conjunto de datos, obteniendo el promedio general de las resistividades aparentes (ρ) para cada punto de atribución en cada nivel del sondeo (ver Ecuación 3).

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

Ecuación 2.

$$\rho_a = \frac{\Delta V \pi}{I} \frac{1}{4} \left(\frac{L^2}{a} \right) \quad (3)$$

Ecuación 3.

descripción del equipo de prospección

Especificaciones técnicas del equipo de adquisición geoeléctrica (ver Figura B.3).

Resistivímetro analógico

- Funciones: Sondeos Eléctricos Verticales y Tomografía de Resistividad Eléctrica
- Configuraciones Admitidas: Wenner, Schlumberger
- Manufacturado por Sismocontrol 2019
- Rango de Temperatura: -10 °C a 80 °C
- Fuente de poder: Generador eléctrico
- Voltaje de inyección: 100 a 1,200 Volts
- Corriente: 1 a 10 A
- Panel con conexión para sonda de SEV
- Controles manuales para cambios de canal de SEV
- Reguladores manuales de corriente

- 10 canales para estudios de tomografía
- Botón de encendido y apagado
- Botón para inyección de corriente
- Dimensiones: 47 cm x 33 cm x 25 cm
- Peso: 25 kg
- Electrodos despolarizados de $\frac{1}{2}$ pulgada

Generador Eléctrico Parazzini

- Motor: 3 HP a gasolina 4 tiempos
- Frecuencia: 60 HZ
- Salida promedio: 1000 Watts
- Salida Máxima: 1200 Watts
- Volts: 110 V / Corriente alterna: 9 A
- Capacidad tanque gasolina: 6.3 Lts
- Operación continua: 7 Hrs
- Encendido: Manual
- Peso: 29 Kg
- Peso por carrete: 10 kg
- Dimensiones por carrete: 30 cm x 30 cm x 30 cm

Cables de corriente y potencial

- Cada carrete carga 500 m de cable para inyección de corriente y 50 m de cable de Potencial
- Sonda de electrodos de potencial para método schlumberger de 10 canales y 100 m de longitud

5.2. Metodología de adquisición y procesado geofísico

La planeación del levantamiento geofísico inicia a partir de establecer objetivos de exploración, de igual forma se realiza un análisis geológico del sitio de estudio, se identifica la fisiografía local del terreno y configuración hídrica local y regional.

Tabla 2: Descripción de la metodología de adquisición y procesado geofísico

Día	Proceso	Descripción
18/19/23	PLANEACIÓN	<p>Se realiza un proceso de investigación previo a fin de conocer las características geomorfológicas y geológicas del sitio antes del levantamiento geofísico en campo. Se realiza un reconocimiento en campo para identificar el sitio, la problemática topográfica que presenta y establecimiento de los objetivos y sitios de estudio. Se diseña y prepara el arreglo, la distribución de los niveles y las aperturas de AB y MN, así como las direcciones de apertura del arreglo geoeléctrico. Se define el código de los sondeos, a partir de:</p> <ul style="list-style-type: none"> 1. Número de sondeo. 2. Iniciales del municipio ó localidad. 3. Abreviatura del estado donde se realizo es estudio. Estableciéndose la clave para los sondeos como: • S#-MFA-VER
21/09/23	RECONOCIMIENTO Y ADQUISICIÓN DE SEV's	<p>Se realizó un reconocimiento del terreno y replanteamiento de las direcciones de apertura, como re ubicación de los sondeos, se llevó a cabo la adquisición de datos mediante el arreglo Schlumberger, en los sitios:</p> <ul style="list-style-type: none"> • S1-MFA-VER • S1-MFA-VER • S1-MFA-VER
1/10/23 - 16/10/23	GABINETE	<p>Se realiza limpieza de datos, cálculo de resistividades aparentes, documentación complementaria, preparación de la información, procesado de datos, interpretación en crudo y en modelo de inversión geofísico, integrado de topografía, modelos 1D de sondeos, preparado de pseudo secciones, elaboración de mapas y redacción de informe.</p>

En cuanto al levantamiento geofísico se evalúan tiempos, costos, accesibilidad y la viabilidad de realizar estudio, ya sea por circunstancias de terreno, climáticas o sociales.

Una vez aclarados los pormenores y la viabilidad del estudio, se realiza la planificación de las siguientes tres etapas, planeación, reconocimiento y adquisición de SEV's finalizando con trabajo de gabinete. Las etapas son detalladas a continuación (ver Tabla 2)

5.2.1. Adquisición en campo (SEV)

Una vez establecidos los puntos para realizar los SEV, en el proceso de planeación y reconocimiento del sitio, se lleva el equipo al sitio y se establece las direcciones de las aperturas, considerando la accesibilidad, la seguridad de los operadores y la uniformidad topográfica, a fin de reducir la concentración o dispersión de la corriente.

Establecida la dirección de apertura, se prepara el sitio, transportando el equipo de adquisición, se limpia el sitio, es decir, se despeja de maleza a fin de poder tener contacto visual con los electrodos de potencial y las líneas de apertura de potencial y se montando la sonda de potencial Schlumberger, colocando los electrodos despolarizados, montando los carretes de corriente y conectando todo el equipo en la consola central, desde donde se realizarán los cambios de electrodos y el cambio de potencia de inyección al necesitar mayor flujo de corriente (ver Figura B.1).

Se realiza una verificación de los electrodos de potencial, corroborando que estén emitiendo lectura, estén afianzados al suelo y presentan conductividad iónica (la colocación de salmuera en los electrodos no fue necesaria, ya que el medio se presentaba moderadamente saturado debido a recientes precipitaciones), se procede a encender la planta eléctrica y a realizar las mediciones (Ver Figura ??)).

Las mediciones se realizan inyectando corriente y leyendo directamente el valor del potencial eléctrico y la corriente inducida, se anotan en la hoja de cálculo previamente configurada con el arreglo schlumberger, y se prosigue con la siguiente medición. Para las siguientes mediciones se cambia de apertura aumentando los electrodos de corriente A y B de acuerdo al arreglo Schlumberger previamente establecido. De esta forma se prosigue hasta concluir con todos los puntos de arreglo Schlumberger [7].

5.3. Pre-procesado y procesado geofísico (SEV)

Una vez adquiridos los datos en campo (datos en crudo), se procede a calcular la resistividad aparente (ecuación 3), se calcula profundidad aparente y se procede a organizar la información, a partir de las variaciones de resistividad aparente se establecen rangos de profundidad en los que la respuesta eléctrica es similar en valor y tendencia, a fin de agrupar por secciones geoeléctricas en una interpretación preliminar. Una vez hecho esto se procede a ingresar la información al software WinGLink.

El procesamiento, así como la inversión de datos 1D de los SEV se realiza en el software WinGLink el cual es un programa multidisciplinario desarrollado para procesar, interpretar e integrar varias disciplinas geofísicas en un entorno integrado. WinGLink utiliza una interfaz gráfica para la creación de bases de datos, la generación de proyectos, la importación y exportación de datos y modelos. Cada aplicación incluye funciones dedicadas para cada tipo de datos geofísicos.

El software nos permitirá realizar modelos de inversión; sin embargo, se requiere de consulta constante de los datos limpios, las anotaciones realizadas en campo, así como la geología del sitio, su génesis y la respuesta del modelo de tendencia, a partir de la interpretación preliminar y las observaciones en campo se relaciona el comportamiento eléctrico de la roca y su estado físico, de este modo se identifica la respuesta eléctrica que tiene una unidad geológica con condiciones específicas,

como son fracturamiento, saturación, mineralización.

Tomando en consideración todo lo anterior se realiza un ajuste manual de los modelos y posteriormente se corre la inversión para realizar un ajuste de mayor precisión de la tendencia en la curva de resistividad aparente obtenida en campo, a fin de generar un modelo simplificado que integre los modelos de tendencia y el aporte geoeléctrico de las distintas unidades geoeléctricas.

5.3.1. Criterios de modelado 1D de inversión

Los modelos de ajuste normalmente son realizados de forma automática por WinGLink, sin embargo, la Inversión de datos deberá ser siempre supervisada, se consideran los datos limpios para omitir aquellos puntos que salgan de la tendencia normal de la curva, o que se encuentren por fuera del espectro de frecuencia de la señal total, ya que afectarán el ajuste de resistividades, espesores de cada capa y profundidades aparentes, de modo que afecten el ajuste de resistividades del modelo de inversión.

Después de realizar el ajuste y considerar la geología, las anotaciones de campo y la limpieza de datos, se tendrá como resultado en el espectro de frecuencias de resistividades aparentes, a partir de estas se definirán las resistividades para cada segmento del sondeo. Tal como se aprecia en el anexo “Resultados de Sondeos Eléctricos Verticales”.

5.3.2. Criterios de seudo-sección

Para la selección de las direcciones de seudo secciones, Sección S1-S3, Sección S2-S3 y Sección S3-S2, se considerado tener la capacidad de observar los rasgos generales y la distribución aproximada (a partir de los valores de resistividad aparente y de inversión 1D), ajustando los valores de interpolación a la topografía del sitio y distancias entre sondeos, con la finalidad de observando una posible distribución de la unidades geológicas y unidades de saturación, ajustada a los valores obtenidos a partir de los resultados observados [7].

Se emplea una interpolación logarítmica a partir del "Smoothed correction" [2] a fin de poder definir de mejor manera las unidades y sus espesores aproximados, la interpolación recorre de la superficie a la profundidad máxima por lo que en la interpretación se deberá de considerar la configuración geológica y secuencia de depósitos a fin de corregir la distribución obtenida por la interpolación global a lo largo de la profundidad máxima, y así reduciendo la ambigüedad del modelo matemático.

- Sección S1-S3: Presenta una dirección de Rumbo 22° SW-NE, punto inicial: S1-MAF-VER, punto final: S2-MAF-VER, con una longitud de 70 m, profundidad: 60 m.
- Sección S1-S3: Presenta una dirección de Rumbo 49° SW-NE, punto inicial: S2-MAF-VER, punto final: S3-MAF-VER, con una longitud de 50 m, profundidad: 60 m.
- Sección S1-S3: Presenta una dirección de Rumbo 2° W-E, punto inicial: S3-MAF-VER, punto final: S2-MAF-VER, con una longitud de 35 m, profundidad: 58 m.

6. Resultados e interpretación

6.1. Resultados de SEV's y modelos de inversión 1D

En esta sección se mostraran los resultados así como la interpretación de los mismos, se presentaran las figuras correspondientes a cada sitio de estudio y las unidades en las que se dividen las a partir de la inversión 1D.

En la primera imagen, Resistividad App / AB/2, se observa la distribución de los valores de resistividad aparente ajustada, así como la curva de ajuste del modelo de inversión.

En la segunda imagen, Resistividad / Profundidad, se observa los valores de resistividad modelada y el modelo de inversión de capas 1D.

Los datos empleados y el modelo de distribución de datos en crudo corregidos se encuentran en el Anexo A

6.1.1. S1-MFA-VER

En el primer sitio se obtiene un modelo de tres capas, las cuales se correlaciona, por sus respuesta geeléctrica, con las formaciones identificadas y descritas por el Servicio Geológico Nacional [9]. La primera unidad se identifica como Aluvión (Qhoal) correspondiente al periodo reciente, Cuaternario, la segunda unidad observada se correlaciona mediante estratificación con depósitos arcillosos mixtos (Ar) producto de deposito de arrastre y erosión, y por debajo de esta se correlaciona la respuesta geeléctrica con zona de acuífero, así como con la formación Tuxpan constituida por Arenisca - conglomerado polimíctico(TmAr-Cgp), cuya respuesta geeléctrica y distribución es asociada a la unidad saturada de interés (ver Figura A.1).

Tabla 3: Modelo de inversión 1D sitio S1-MFA-VER

Unidad	Resistividad	Espesor
Qhoal	86.7 ohm*m	2.9 m
Ar	13.4 ohm*m	19.9 m
TmAr-Cgp	195.4 ohm*m	37.2 m

¹ Resultados de inversión 1D primer sondeo.

Modelo de inversión 1D Sondeo S1-MFA-VER

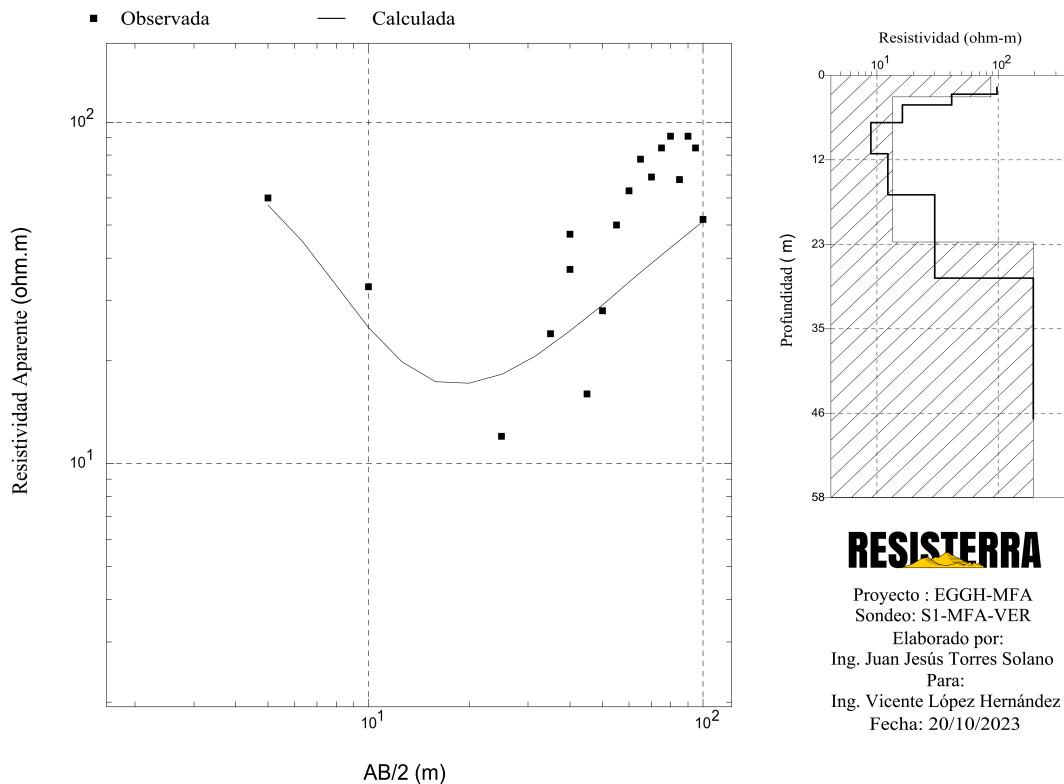


Figura 8: Modelo de invención 1D del sondeo S1-MFA-VER.

6.1.2. S2-MFA-VER

En el segundo sitio se observa cierta similitud con el primer sondeo con respecto a la primera unidad, la cual se identifica como Aluvión (Qhoal) de corto espesor 1.7 m, la segunda zona presenta un respuesta resistiva muy baja, la cual esta asociada en magnitud de las resistividades obtenidas con depósitos arcillosos mixtos (Ar), por debajo de esta unidad se identifica una tercera zona iso resistiva con baja respuesta geoeléctrica, sin embargo el modelo de inversión y la respuesta geoeléctrica sugiere una unidad no diferenciada entre las unidades Arenisca Limonita (ToAr-Lu) y Conglomerado Polimítico-Arenisca (TmCgp-Ar), estas unidades corresponden a las esperadas en el sitio de estudio[9], ver A.2.

Tabla 4: Modelo de inversión 1D sitio S2-MFA-VER.

Unidad	Resistividad	Espesor
Qhoal	21.8 ohm*m	1.7 m
Ar	1.9 ohm*m	15.7 m
ToAr-Lm / TmCgp-Ar	80 ohm*m	42.6 m

¹ Resultados de inversión 1D segundo sondeo.

Modelo de inversión 1D Sondeo S2-MFA-VER

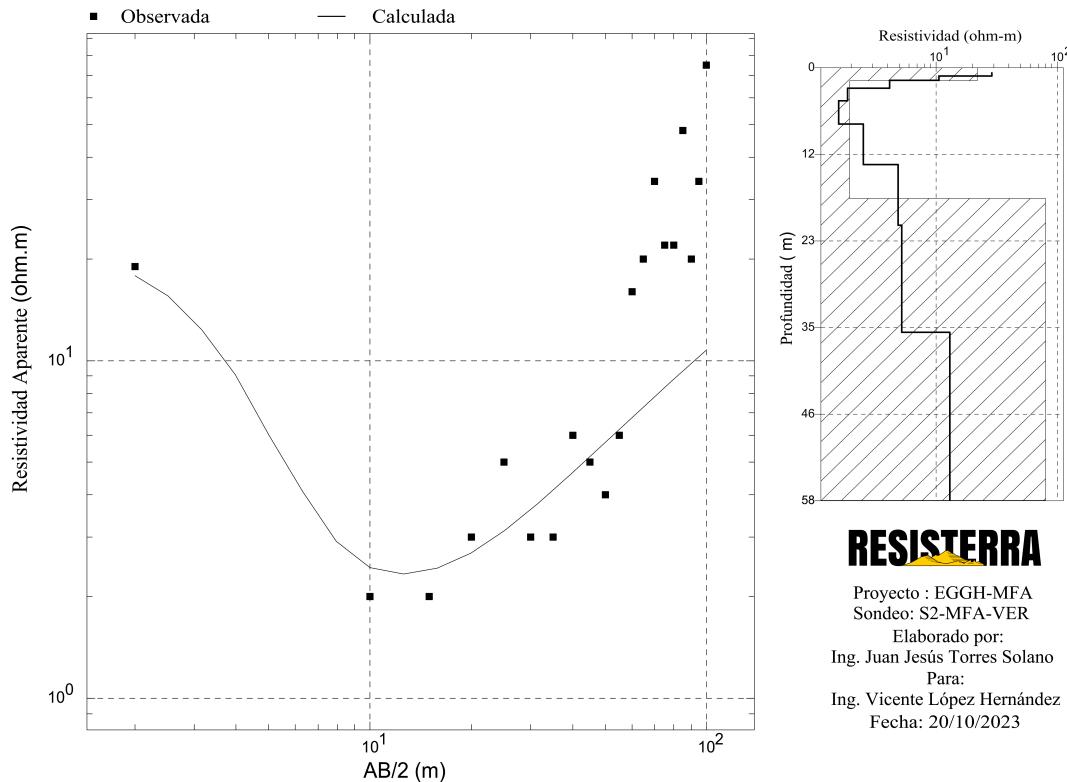


Figura 9: Modelo de invención 1D del sondeo S2-MFA-VER.

6.1.3. S3-MFA-VER

En el tercer sitio se identifican 3 zonas iso resistivas, la primera se identifica como Aluvial, seguido de una zona iso resistiva de poco espesor identificada como Conglomerado Polimíctico - Arenisca (TmCgp-Ar) con posible saturación, por ultimo se ubica una zona de gran espesor correspondiente a Arenisca limonita (ToAr-Lm).

Tabla 5: Modelo de inversión 1D sitio S3-MFA-VER.

Unidad	Resistividad	Espesor
Qhoal	26.1 ohm*m	1.7 m
TmCgp-Ar	77.8 ohm*m	5.6 m
ToAr-Lm	32.5 ohm*m	52.7 m

¹ Resultados de inversión 1D tercer sondeo.

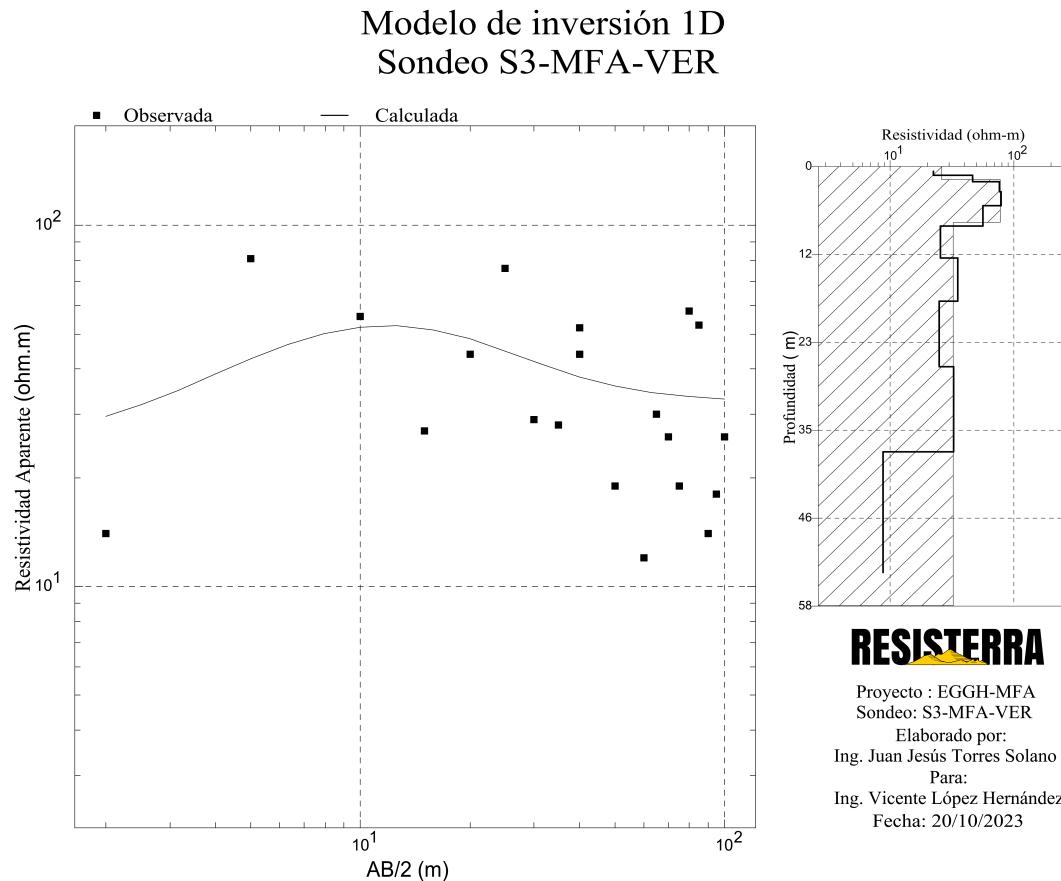


Figura 10: Modelo de invención 1D del sondeo S3-MFA-VER.

6.2. Resultados de seudo secciones

En las siguientes seudo secciones, se observa la interpolación de la corrección smoothed [2] contra el perfil del modelo de inversión 1D respectivo a cada sitio (correspondiente a la barra de colores que se ubica justo debajo del sitio del sondeo), de igual forma se observa la profundidad máxima obtenida y la correlación entre las unidades identificadas mediante el grid de interpolación.

A partir de las seudo secciones se identifican dos zonas con distinta configuración geológica, compartiendo correlación entre los sondeos S1-MFA-VER y S3-MFA-VER, mientras que en el sondeo S2-MFA-VER corresponde a una zona de intersección o contacto geológico, destacando la baja respuesta geoeléctrica en la seudo sección como en el modelo de inversión 1D, resultando únicamente de interés el perfil de sección S1-S3.

La primera unidad iso resistiva, apegada al contexto geológico del sitio de estudio y donde se observa en la correlación entre los resultados del modelo de inversión, corresponde a una primera unidad de Aluvial (Qhoal) identificada en la parte superior, con valores de resistividad calculada de 20 ohm*m y 26 ohm*m para el primer, segundo y tercer sondeo respectivamente, siendo mucho más claro en el modelo de inversión 1D que en el grid de interpolación.

La segunda unidad se identifica con base en los valores de resistividad como zona arcillosa mixta, únicamente identificada en el sondeo S1-MFA-VER y S2-MFA-VER, teniendo su valor más bajo en el segundo sondeo, esta unidad presenta valores resistivos dentro del rango de 1.9 a 13.4 ohm*m.

La tercera unidad identificada corresponde a un área iso resistiva entre el segundo y el tercer sondeo al tercer nivel del primer sondeo, correspondiente a la unidad de arenisca - conglomerado polimictico, la relación se puede apreciar en el perfil de sección S1-S3, donde se integra junto con los resultados de inversión 1D, esta unidad presenta valores resistivos dentro del rango de 77 a 195 ohm*m.

La cuarta unidad identificada y correlacionada con base en su respuesta geoeléctrica y disposición estratigráfica, que corresponde con arenisca - limonita (ToAr-Lm), la cual se puede apreciar en el sondeo S3-MFA-VER y S2-MFA-VER, esta unidad presenta valores resistivos dentro del rango de 32.5 a 80 ohm*m.

6.2.1. Seudo sección S1-S3

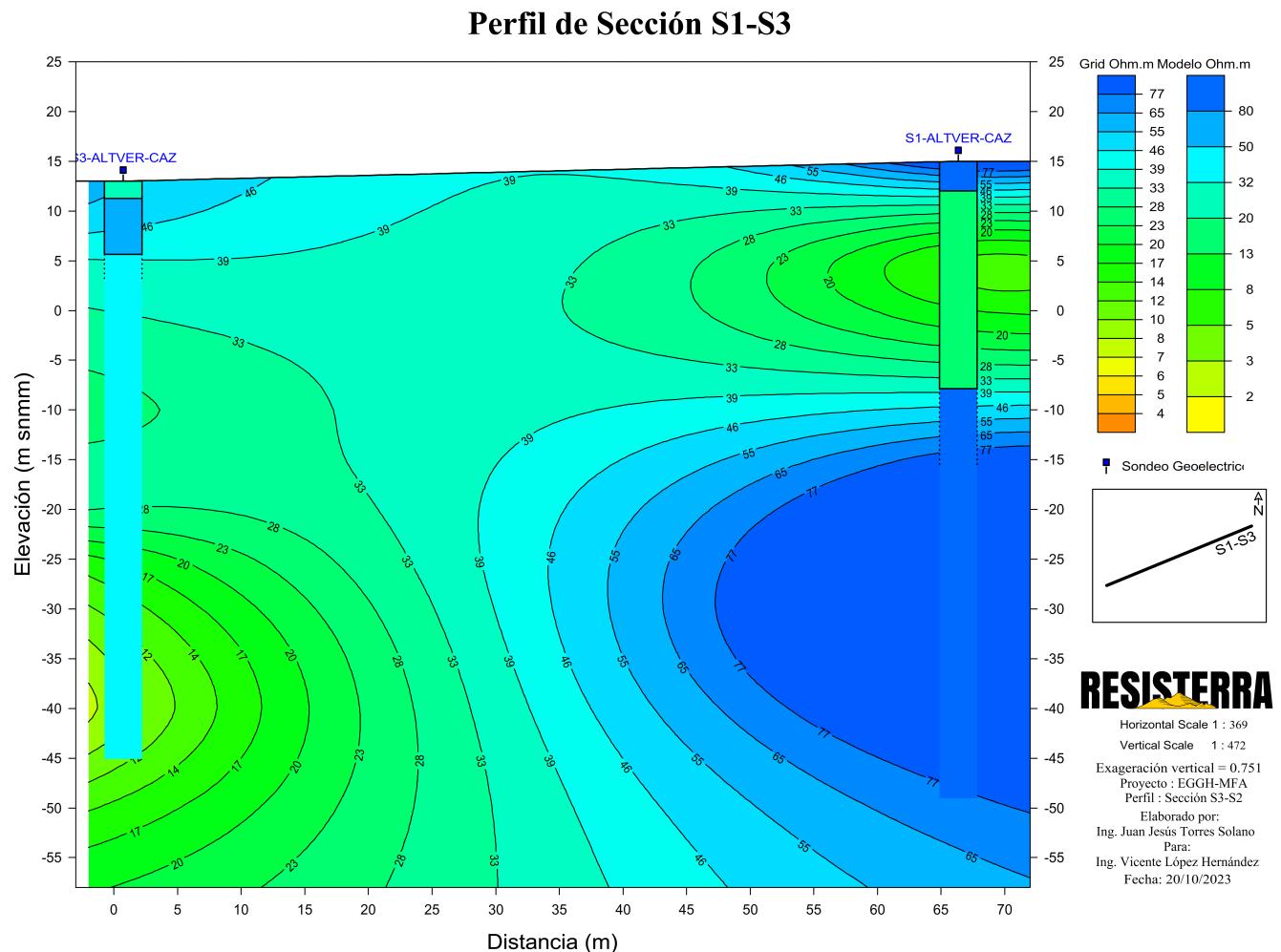


Figura 11: Perfil de la seudo sección entre el sondeo S1-MFA-VER y S3-MFA-VER, se observa sobrepuerto el modelo de capas de inversión 1D de cada sondeo, con respecto a la seudo sección de resistividad aparente.

6.2.2. Seudo sección S2-S1

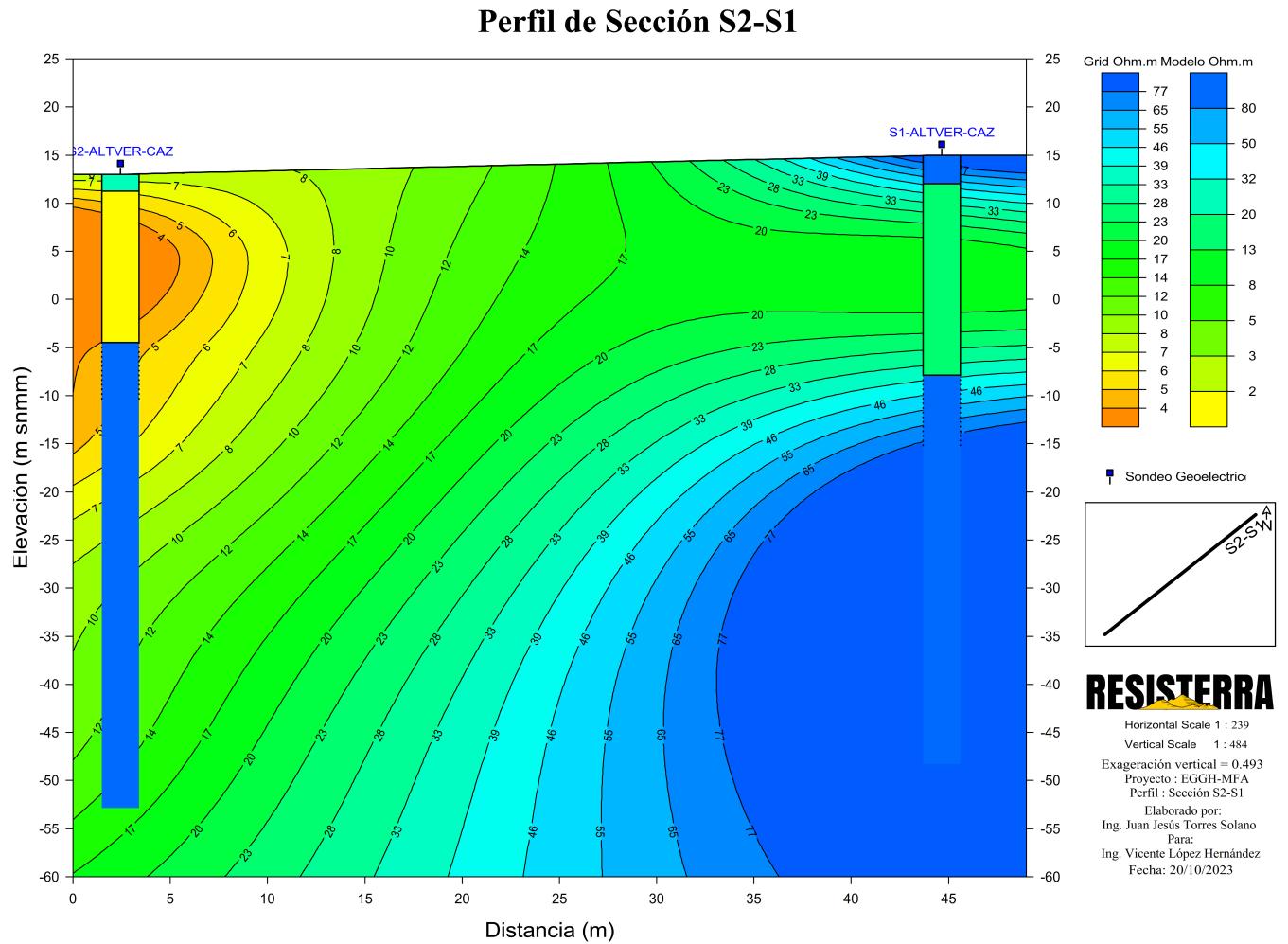


Figura 12: Perfil de la seudo sección entre el sondeo S2-MFA-VER y S1-MFA-VER, se observa sobrepuerto el modelo de capas de inversión 1D de cada sondeo, con respecto a la seudo sección de resistividad aparente.

6.2.3. Seudo sección S2-S3

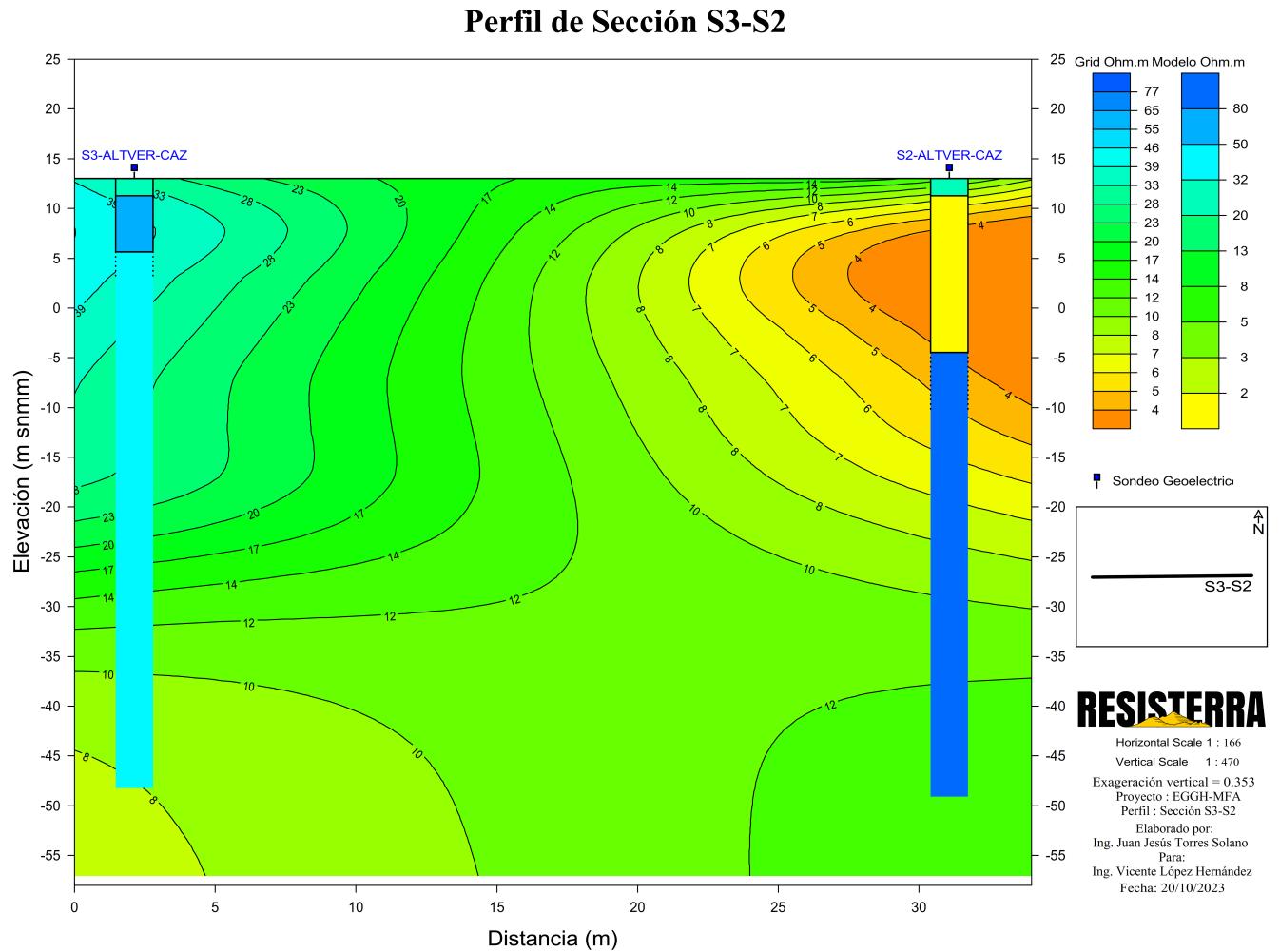


Figura 13: Perfil de la seudo sección entre el sondeo S2-MFA-VER y S3-MFA-VER, se observa sobrepuerto el modelo de capas de inversión 1D de cada sondeo, con respecto a la seudo sección de resistividad aparente.

7. Conclusión

De acuerdo a los resultados antes mostrados con base en los objetivo del trabajo, se logran las siguientes conclusiones para el presente estudio, detallando lo siguiente:

- Se puede concluir con base en las respuestas geoeléctricas que la zona de estudio mantiene una conductividad eléctrica alta, ya sea que este asociado a la presencia de arcillas, la retención de saturación en el caso de las unidades segunda y cuarta (ver sección 6.2) ó saturación parcial de las unidades, se identifica como sitios de interés el S1-MFA-VER y el S3-MFA-VER, resaltando el primer sondeo como el mejor respuesta, a partir de los 23 m se identifica una unidad de conglomerados posiblemente saturados.
- Con base en las condiciones de escurrimiento y recarga freática (acuífero), el área de estudio puede considerarse como muy favorable, sin embargo considerando las condiciones geológicas es probable que el acuífero se comporte como un acuífero tipo acuitardo, es decir tiene la capacidad de contener agua pero de lenta transferencia.
- De forma general, a partir del entendido de la distribución fisiográfica y geológica, las zonas de recarga de la cuenca hidrológica se ubica en las zonas altas, conformadas por unidades volcánicas correspondientes a la porción este de la cuenca, por otra parte, el sitio de estudio se encuentra donde de la zona de descarga, la cual fluye en dirección al río Cazones, por lo que se presenta en esta zona un flujo constante, limitado por la precipitación anual en zonas de recarga y la capacidad de transferencia (permeabilidad) del suelo.
- Los resultados descritos en las secciones 6.1 y 6.2, muestran límites entre las unidades identificadas, sin embargo es importante considerar estos límites como difusos, ya que las unidades presentan comportamientos eléctricos similares al igual que límites en sus rangos probables, es decir, comparten similitud en respuesta, por lo que se definieron a partir de correlación estratigráfica y zonas de iso resistividad.

Referencias

- [1] Cano, E. C., Zenteno, D. M., and Fucugauchi, J. U. (1986). Paleomagnetismo y terrenos tectonoestratigráficos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, pages 89–102.
- [2] Chen, J., Beraun, J., and Jih, C. (1999). Completeness of corrective smoothed particle method for linear elastodynamics. *Computational mechanics*, 24(4):273–285.
- [3] Dentith, M. and Mudge, S. T. (2014). *Geophysics for the mineral exploration geoscientist*. Cambridge University Press.
- [4] INEGI (2010). Compendio de información geográfica municipal.
- [5] INEGI (2023). Geografía y medio ambiente.
- [6] Loke, M. H. (1999). Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. *A practical guide to*, 2:70.
- [7] Loke, M. H. (2004). Tutorial: 2-d and 3-d electrical imaging surveys.
- [8] Méndez, D. M., Flores, A. M., and Gallardo, E. S. Morfodinámica costera veracruzana (1976-2017): una línea base previa al establecimiento de los prototipos energéticos undimotrices.
- [9] Mexicano, S. G. (2004). Carta geológica minera poza rica f14-12.
- [10] MEXICANO, S. G. (2004). Carta geológica-minera poza rica f14-12, escala 1:250.000. In *CARTA GEOLOGICA-MINERA VERACRUZ, PUEBLA E HIDALGO*.
- [11] SUBTERRÁNEAS, C.-S. G. T. G. D. A. (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero poza rica (3001), estado de veracruz.

Anexo A. Sondeos Eléctricos Verticales

A.1. Sondeo S1-MFA-VER

Tabla A.1: Coordenadas del punto de atribución S1-MFA-VER.

SEV	Datum	Coordenada E	Coordenada N	Altitud
S1-MFA-VER	UTM Zona 14Q	674219.5 mE	2294858.5 mN	15 msnm

^a Punto de atribución del reglo geeléctrico del sitio 1, dirección de apertura hacia el NNW (ver Figura 2).

Modelo de inversión 1D Sondeo S1-MFA-VER

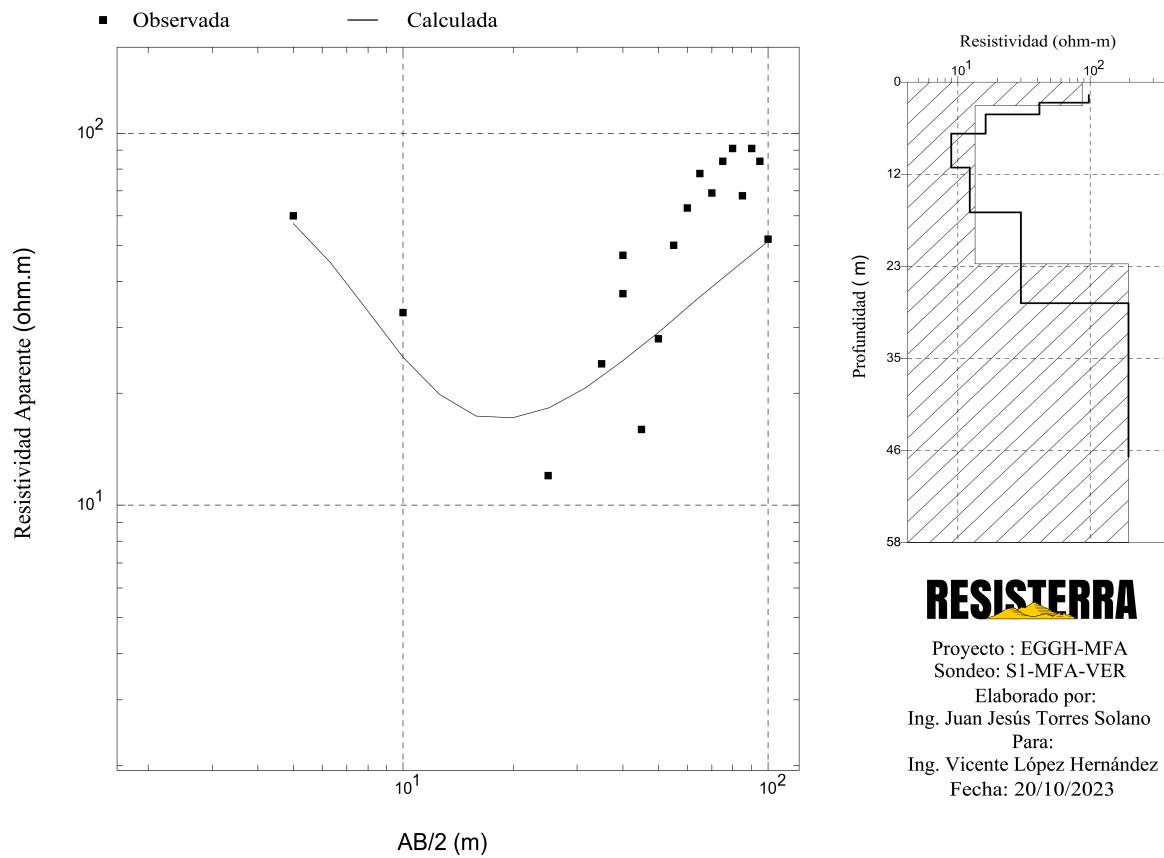


Figura A.1: resultados de resistividad Aparente contra apertura de corriente.

Tabla A.2: Sondeo 1, datos de adquisición en campo.

AB/2	MN	ΔV	I	$Rha(\rho a)$
2	1	20.3	45.7	9.54
5	1	32	41.7	60.3
10	1	2.3	22.3	32.7
10	4	12.3	117.7	8.07
15	4	41	102.7	109.5
20	4	1.3	119.7	3.4
25	4	2.7	113.3	11.5
30	4	1	104.3	6.7
35	4	2	81.3	23.6
40	4	2	53	47.4
40	15	4	41	37.1
45	15	1	27.3	15.5
50	15	1.7	31.7	27.6
55	15	2.3	30.3	50
60	15	2.7	31.3	62.6
65	15	4.3	50.7	78.4
70	15	1	15	69.2
75	15	6	84.3	83.5
80	15	5.3	78.7	90.9
85	15	2	44.3	68.2
90	15	7	131	90.6
95	15	5	113	83.6
100	15	3	120.3	52.3

* Se obtuvieron 23 muestras del sondeo S1-MFA-VER, con una apertura máxima en AB de 200 m.

A.2. Sondeo S2-MFA-VER

Tabla A.3: Coordenadas del punto de atribución S2-MFA-VER.

SEV	Datum	Coordenada E	Coordenada N	Altitud
S2-MFA-VER	UTM Zona 14Q	674248.1 mE	2294889.6 mN	13 msnmm

^a Punto de atribución del reglo geoeléctrico del sitio 2, dirección de apertura hacia el NNW (ver Figura 2).

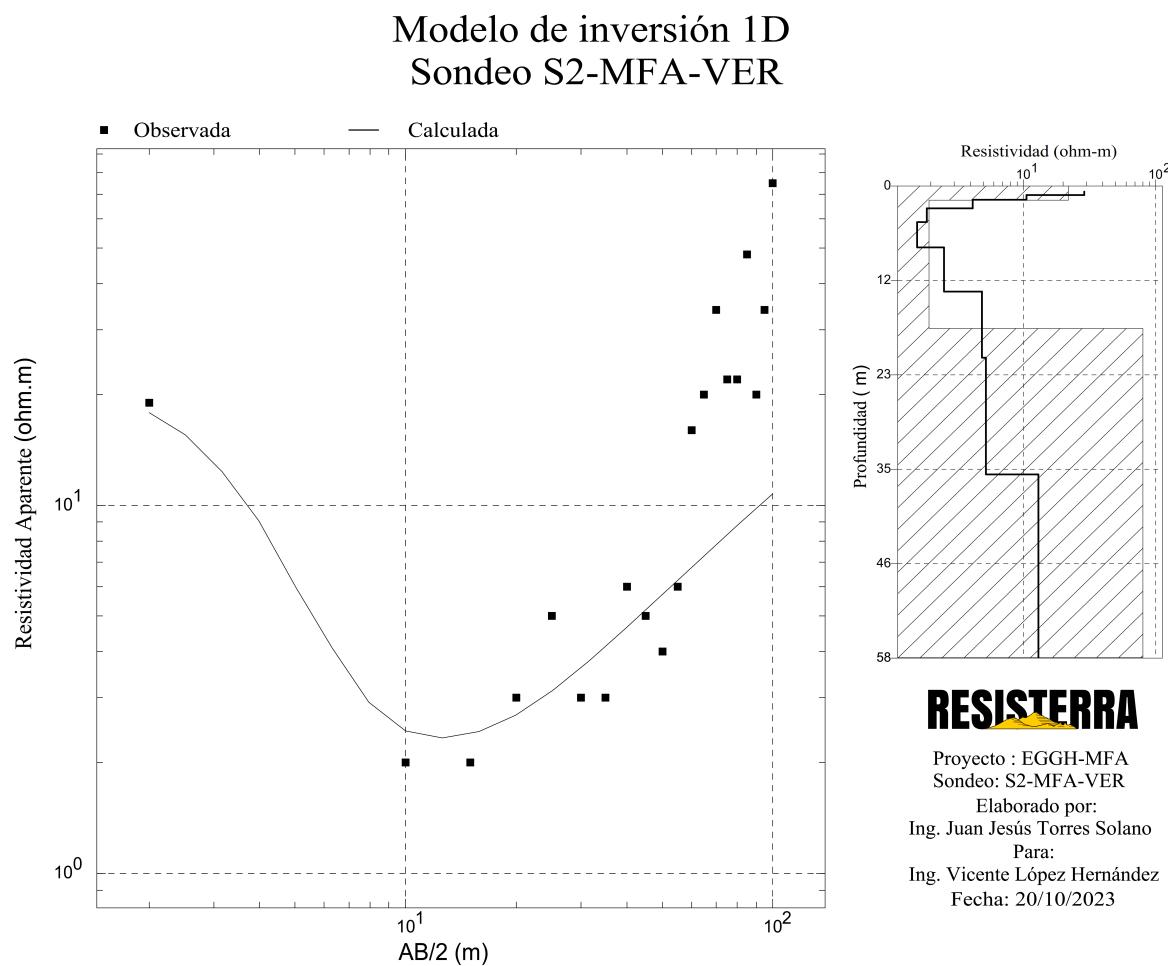


Figura A.2: resultados de resistividad Aparente contra apertura de corriente.

Tabla A.4: Sondeo 2, datos de adquisición en campo.

AB/2	MN	ΔV	I	$Rha(\rho a)$
2	1	50.3	59.3	14.5
5	1	2.3	113.3	1.25
10	1	4	83.3	12.5
10	4	2.7	92.7	2.2
15	4	2.3	240.7	1.9
20	4	1.7	201	2.55
25	4	3.7	392.7	4.62
30	4	1.7	378.7	3.2
35	4	1.3	396.3	3.26
40	4	1	168.7	8.14
40	15	3	176.7	5.7
45	15	1.7	128.3	5.46
50	15	1	148.3	3.54
55	15	1.7	176.7	5.85
60	15	3.7	168.3	16.46
65	15	3.3	145.7	20.3
70	15	6.3	192.7	33.7
75	15	2.7	145.7	21.6
80	15	2.3	144	21.8
85	15	6	190.3	47.7
90	15	3	254.3	20
95	15	4.7	259.3	33.9
100	15	4.7	130.7	75

* Se obtuvieron 23 muestras del sondeo S2-MFA-VER, con una apertura máxima en AB de 200 m.

A.3. Sondeo S3-MFA-VER

Tabla A.5: Coordenadas del punto de atribución S3-MFA-VER.

SEV	Datum	Coordenada E	Coordenada N	Altitud
S3-MFA-VER	UTM Zona 14Q	674277.1 mE	2294889.9 mN	13 msnmm

^a Punto de atribución del reglo geoeléctrico del sitio 3, dirección de apertura hacia el W-E (ver Figura 2)

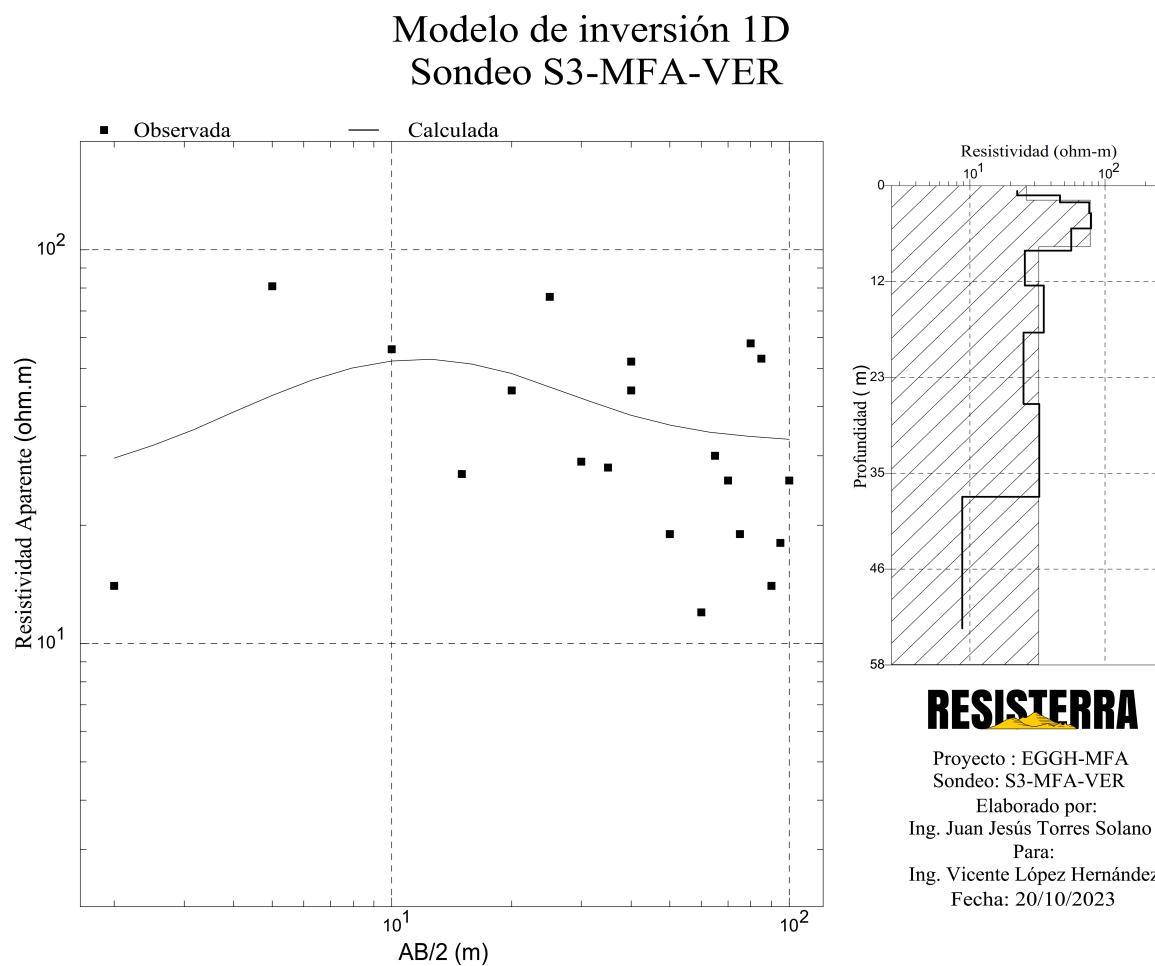


Figura A.3: resultados de resistividad Aparente contra apertura de corriente.

Tabla A.6: Sondeo 3, datos de adquisición en campo.

AB/2	MN	ΔV	I	$Rha(\rho a)$
2	1	28.3	24.7	14.4
5	1	23	22	81.1
10	1	26	147	55.5
10	4	16	82.3	15.3
15	4	11.7	77.3	26.6
20	4	16	115	44
25	4	22	142.3	75.5
30	4	5.3	130	29.1
35	4	3	105.3	27.5
40	4	5.3	128	52.2
40	15	8.3	63.3	44
45	15	1	57.7	8
50	15	3	81.7	19.3
55	15	1	131	4.8
60	15	1.7	106.3	12
65	15	3	89	29.8
70	15	1.7	66	25.8
75	15	1	62.7	18.8
80	15	2.3	53.3	58.3
85	15	1.7	47.7	53.1
90	15	1	117.3	14.4
95	15	1	106.3	17.7
100	15	1.3	107	26.4

* Se obtuvieron 23 muestras del sondeo S3-MFA-VER, con una apertura máxima en AB de 200 m.

Anexo B. Evidencia fotográfica



Figura B.1: S1-MFA-VER, sitio de estudio preparación de adquisición geofísica.



Figura B.2: S2-MFA-VER, vista de dirección de tendido.



Figura B.3: S2-MFA-VER, vista de dirección de tendido.



Figura B.4: S3-MFA-VER, Punto de atribución del sondeo.