



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudio de resistividad
electromagnética para unidad
minera en el estado de Coahuila**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de

Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Diego Israel Sánchez Rosete

ASESOR DE INFORME

M.C. José Luis Salas Corrales



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ESTUDIO DE RESISTIVIDAD ELECTROMAGNETICA PARA UNIDAD MINERA EN EL ESTADO DE COAHUILA que presenté para obtener el título de INGENIERO GEOFÍSICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

DIEGO ISRAEL SANCHEZ ROSETE
Número de cuenta: 317099605

Índice

1. Introducción	2
1.1. Objetivos	2
1.2. Participación en la empresa	3
2. Antecedentes	4
2.1. Zona de estudio	4
2.2. Resistividad eléctrica	5
2.3. Porosidad y permeabilidad	6
2.4. Teoría del método TDEM	7
3. Fundamentos del Método TDEM	14
4. Logística y adquisición de datos	17
4.1. Equipo de medición utilizado	17
4.2. Planeación de los sondeos TDEM	17
4.3. Distribución y características de los sondeos TDEM	18
4.4. Desplazamiento a los sondeos	21
4.5. Procedimiento de la ejecución de sondeos	22
4.6. Parámetros de adquisición	23
4.7. Control de calidad	24
5. Procesamiento de los datos	26
6. Resultados	29
6.1. Modelos de inversión 1D	29
6.2. Vista 3D	30
7. Interpretación	31
7.1. Unidades geológicas	31
8. Conclusiones	35
9. Bibliografía	37
10. Anexos	38
10.1. Bitácora de adquisición	38
10.2. Especificaciones TerraTEM24	64

Resumen

El presente informe de experiencia profesional detalla las actividades realizadas en campo que incluye: la planeación, la ejecución, el seguimiento de flujos de trabajo para el control de calidad en campo y registro de bitácora de campo diaria. También se detallan las actividades de gabinete donde se realizó el procesamiento de datos.

El estudio abarcó un área de 21.7 km² dentro de los límites de la Sierra Madre Oriental, con el objetivo de delimitar la presencia y nivel del manto freático, mediante la determinación de las resistividades eléctricas de las capas geológicas de los perfiles propuestos. Para ello, se diseñó una campaña de adquisición utilizando el método transitorio electromagnético (TDEM), que consistió en realizar 90 sondeos con dimensiones de 300 x 300 metros, distribuidos en una malla con 12 líneas este - oeste. La planificación se realizó aprovechando herramientas de geolocalización (GPS y QGIS) y se empleó el equipo de medición TerraTEM24, junto con baterías LiFePO4 y cableado AWG10. Durante la adquisición se implementó un estricto control de calidad, verificando en campo la coherencia de las curvas de decaimiento de voltaje y asegurando el aislamiento de conexiones para minimizar la única fuente de ruido presente.

Se generaron modelos de inversión 1D para dos perfiles (N-S y W-E) y una vista 3D que corroboró la consistencia entre ambos. La interpretación de las pseudosecciones evidenció tres unidades geoelectrónicas:

- UG1, asociada a depósitos aluviales.
- UG2, compuesta por areniscas, areniscas-lutitas y areniscas-calizas.
- UG3, correspondiente al basamento de caliza con altas resistividades.

Particularmente en el perfil W-E se detectaron variaciones en la UG1 que podrían sugerir procesos de filtración de agua, así como también se observa la presencia de una estructura del tipo sinclinal con base en los registros definidos por el Servicio Geológico Mexicano donde existen también estructuras geológicas del tipo anticlinal cerca de este perfil.

Se caracterizó eléctricamente la estructura del subsuelo y se definieron unidades geoelectrónicas con claridad. Sin embargo, a pesar de identificar zonas de interés en relación con posibles infiltraciones de agua, el método TDEM, al ser indirecto, no resulta suficiente para confirmar su presencia. Se recomienda complementar este estudio con exploraciones hidrogeológicas adicionales, incorporar otra técnica de exploración geofísica como la gravimetría y perforaciones exploratorias para validar las inferencias obtenidas. El método TDEM se comprobó como una herramienta eficaz para la caracterización del subsuelo, pero sus limitaciones exigen un análisis integral para estudios hidrogeológicos concluyentes.

Agradecimientos

Primero, quiero agradecer a Dios por todas las oportunidades que me ha brindado a lo largo de este camino, así como por cada reto que me ha puesto, confiando en mi capacidad para superarlo.

También deseo expresar mi gratitud hacia mis padres, Sandra e Israel, quienes han sido un pilar fundamental en todas las etapas de mi formación académica. No solo me han apoyado incondicionalmente en cada uno de mis proyectos, sino que también han sido mi mayor ejemplo de esfuerzo, dedicación y amor. Gracias a ellos, he aprendido a nunca rendirme y a perseguir mis sueños con determinación. Su confianza en mí y el cariño con el que siempre me han guiado han sido esenciales para llegar hasta aquí. No tengo palabras suficientes para agradecerles todo lo que han hecho por mí.

A mis hermanas, Pau, Moni y Eli, les agradezco profundamente por haber sido una parte esencial de este proceso. Su ánimo, apoyo, escucha y paciencia fueron invaluableles. En especial, agradezco a Pau por ser siempre una fuente de inspiración para mí, y a Moni y Eli por llenarme de alegría en mis días con su cariño y energía.

Extiendo mi agradecimiento a mis abuelitos Toñita, Miguel, Rosa y Beto, quienes, desde mi infancia, al igual que mis padres, me guiaron con sus consejos y siempre supieron decirme las palabras adecuadas en los momentos de adversidad.

También quiero expresar mi amor y gratitud a mi novia, Brisa, quien estuvo a mi lado en la última etapa de mi vida universitaria y con quien dimos juntos el paso a la vida profesional. Su amor, apoyo incondicional y compañía han sido una fuente constante de inspiración y motivación para mí. La amo profundamente y me siento afortunado de tenerla a mi lado en este camino.

Estoy agradecido con GEODEX y con el Ing. Arturo Hernández por todas las facilidades otorgadas para la realización de este reporte. Asimismo, valoro enormemente el esfuerzo de mis compañeros de brigada, Laura, Fernando y Frederick, con quienes compartí meses de trabajo de campo, haciendo posible la adquisición de esta y otras campañas.

A mis amigos, les agradezco enormemente por acompañarme durante mi etapa universitaria, por los buenos momentos compartidos y por el apoyo que me brindaron en distintos momentos de esta etapa. Cada uno de ustedes ha dejado una huella en mi vida, y valoro profundamente su amistad.

También quiero agradecer a mis perritos Princesa, Batman y Molly, quienes, con su cariño incondicional siempre alegran mis días.

Finalmente, expreso mi más sincero agradecimiento al M.I. José Salas por el valioso asesoramiento brindado a lo largo de este proceso. Su guía y conocimientos fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

1. Introducción

A solicitud de la Unidad Minera, a través de Geophysical Development for Exploration (GEODEX), se realizó un estudio geofísico utilizando el método transitorio electromagnético (TDEM por sus siglas en inglés), en un área de 21.7 km² ubicada dentro de la Sierra Madre Oriental, la cual se caracteriza por la presencia de formaciones del tipo calizas y sedimentos cuaternarios. A través de la medición de la resistividad eléctrica del subsuelo, el estudio permitió interpretar el modelo geológico de los perfiles analizados.

La Unidad Minera requiere de un gran abastecimiento de agua, sin embargo, su ubicación geográfica dificulta el acceso a las fuentes hídricas. Por ello, este proyecto fue de suma importancia, ya que se buscó identificar posibles puntos de suministro de agua para garantizar las operaciones de la mina.

El proyecto incluyó la planificación, la cual se realizó con una malla proyectada en el programa "Qgis" tomando en cuenta la logística y la geología de la zona de estudio. La adquisición en campo la cual se realizó con el equipo TerraTEM24 donde se siguió un estricto control de calidad para garantizar la buena adquisición de datos, mientras que el procesamiento de datos se realizó con los programas TEMPlot y ZondTDEM1D. Se realizaron un total de 90 sondeos distribuidos estratégicamente, el arreglo empleado fue de bobina simple y las dimensiones de estos sondeos fueron de 300 x 300 metros con cable AWG10.

Se realizó el análisis de dos perfiles, N-S y W-E, de los cuales se obtuvieron modelos de inversión y una vista tridimensional que proporcionan una representación detallada de la distribución de resistividades en los perfiles estudiados para su posterior interpretación.

Por motivos de confidencialidad, los mapas del área de estudio no serán presentados de forma exacta, excluyendo coordenadas o ubicaciones cercanas, de igual forma se omiten nombres de empresas así como etiquetas del proyecto, por parte de la unidad minera no ofrecieron información complementaria por lo cual la única información disponible es la presentada en este documento.

1.1. Objetivos

El objetivo general del presente estudio fue el delimitar la presencia y nivel del manto freático, mediante la determinación de las resistividades eléctricas de las capas geológicas de los perfiles propuestos.

Objetivos específicos:

- Describir la logística de la adquisición de datos.
- Detallar el proceso de adquisición.
- Determinar las resistividades eléctricas del subsuelo.
- Interpretar las variaciones de las resistividades para definir la presencia de agua.

1.2. Participación en la empresa

En mi trayectoria en GEODEX desde junio del año 2024 he participado en:

- Implementación de metodologías para la eficiencia en procesos.
- Desarrollo de trabajos en campo, planeación y ejecución.
- Registro de bitácora de campo.
- Seguimiento de planes de seguridad e higiene.
- Operación de equipos geofísicos.
- Colaboración en proyectos de ingeniería aplicada, interpretación de imágenes geofísicas y elaboración de reportes.
- Mantenimiento de equipos geofísicos.

Lo anterior mencionado se realiza en todos y cada uno de los proyectos realizados por GEODEX, en este reporte se detallan algunos de los puntos.

2. Antecedentes

2.1. Zona de estudio

La zona de estudio está ubicada al noreste del estado de Coahuila siendo parte de la Sierra Madre Oriental, entre las subprovincias Sierras del Norte y Cuencas y Sierras.

En la zona aflora principalmente roca caliza de estratos gruesos, así como depósitos recientes de sedimentos cuaternarios como limo, arcilla e intercalaciones con rocas lutitas-calizas y conglomerados. Existen 3 elementos estructurales en nuestra zona de estudio, 2 anticlinales y una falla normal las cuales están representados en el siguiente mapa:

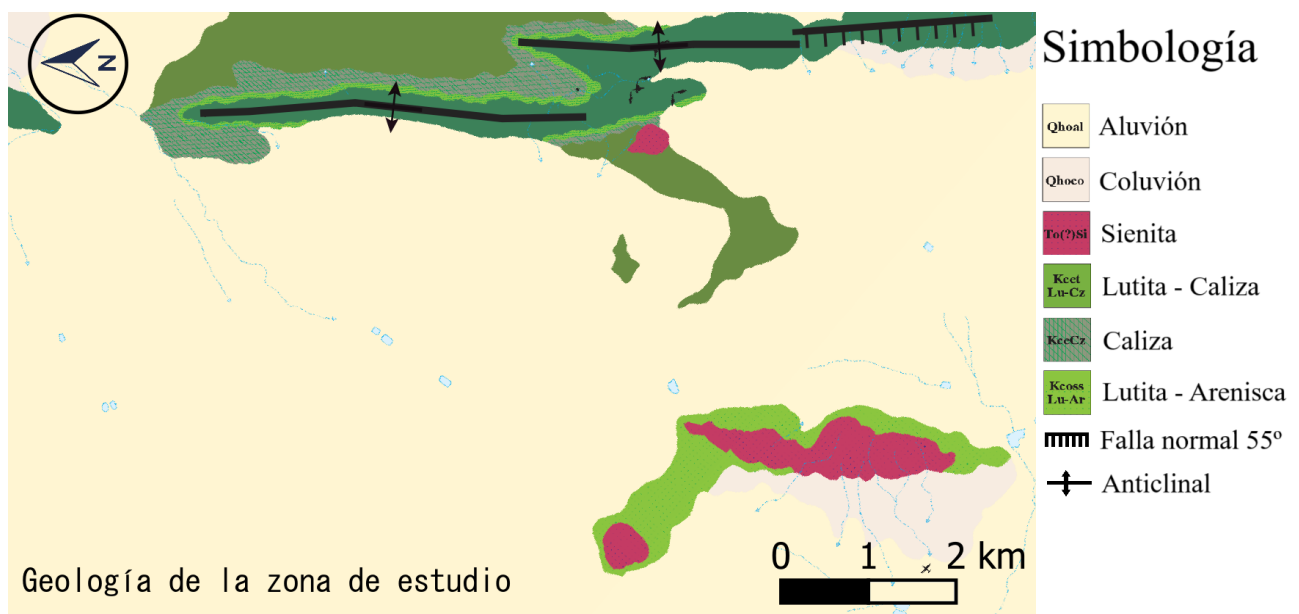


Figura 1: Mapa de la geología de la zona de estudio de acuerdo con las cartas del Servicio Geológico Mexicano (2006).

Como consecuencia de un ambiente semidesértico existe una flora en su mayoría constituida por cactáceas donde encontramos especies como: cactus pezón cola de rata, chautle, cactus erizo de agujones largos y nopal morado. La fauna está compuesta por especies como: serpiente de gopher, zorrillo moteado, oso negro, coyote y venado bura.

El área de estudio abarca aproximadamente 21.7 km², con una superficie predominantemente plana. Se observa un aumento en la elevación en dirección norte-sur de 30 metros, y una disminución en la elevación de oeste a este de 30 metros. En la figura 2 se muestra el mapa de la zona de estudio, donde el área delimitada en verde corresponde a la zona en la que se realizaron los 90 sondeos. Las formaciones montañosas, delimitadas en rojo, muestran una influencia en el área de estudio; sin embargo, solo los sondeos cercanos a estas formaciones presentaron dificultades para su ejecución debido a la topografía.



Figura 2: Mapa de la Zona de estudio.

2.2. Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica se define como la medición de la dificultad que encuentra la corriente eléctrica al pasar por un material determinado. Según Orellana (1972), los valores de resistividad (figura 3) pueden variar debido a factores como el contenido de agua, la conductividad de ésta, el tamaño de grano, la porosidad, el metamorfismo y los efectos tectónicos.

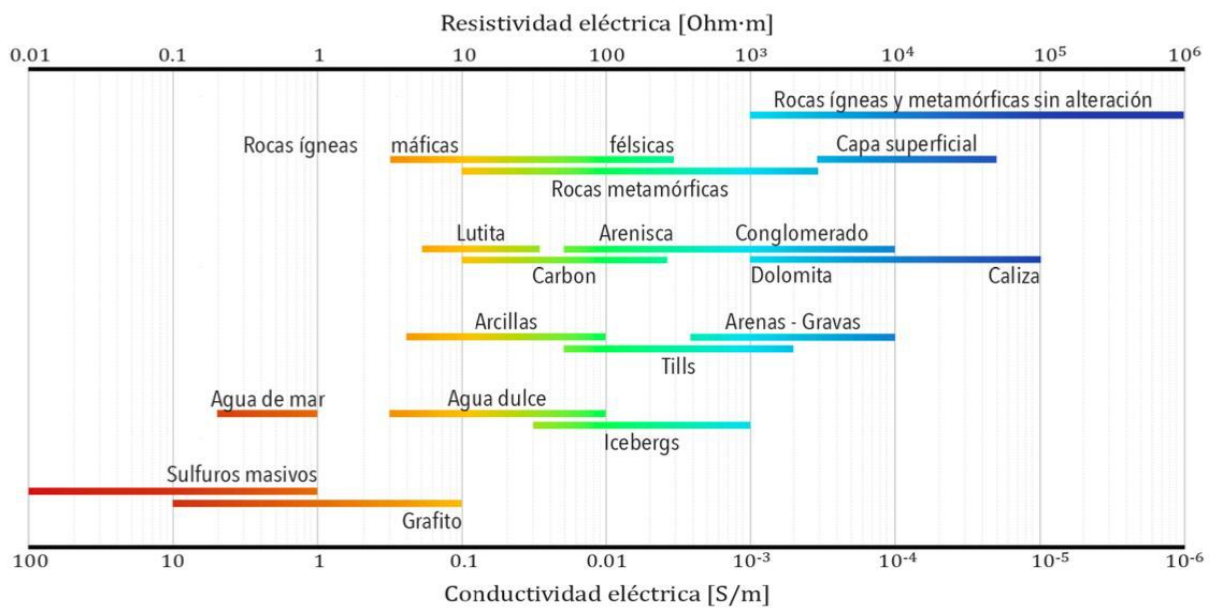


Figura 3: Esquema de los márgenes de variación más comunes en las rocas GEODEX (2024).

Si tenemos cuerpos con baja resistividad (ρ) o facilidad al paso de la corriente eléctrica entonces le llamaremos conductividad (σ) la cual expresada matemáticamente será el inverso de la resistividad.

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

La resistividad medida de las rocas está dada en función de su composición, heterogeneidades, grado de intemperismo, porosidad, y si éstas están saturadas de agua. La presencia de agua afecta de manera significativa la resistividad medida de la roca ya que al ser un buen conductor de electricidad, disminuye la resistividad de las rocas. Esto se debe a que el agua contiene iones disueltos que facilitan el paso de la corriente eléctrica. Por lo tanto, en zonas donde las rocas están saturadas de agua, se espera encontrar valores de resistividad más bajos.

2.3. Porosidad y permeabilidad

La porosidad se define como la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total en una roca. De acuerdo con Freeze y Cherry (1979) tenemos dos tipos de porosidad: la porosidad primaria relacionada con la porosidad existente al momento de la formación de la roca, mientras que la porosidad secundaria está asociada a procesos que ocurren después de la formación de la roca. La principal roca que encontramos dentro de la zona de estudio es roca caliza, su porosidad varía del 0-20 %.

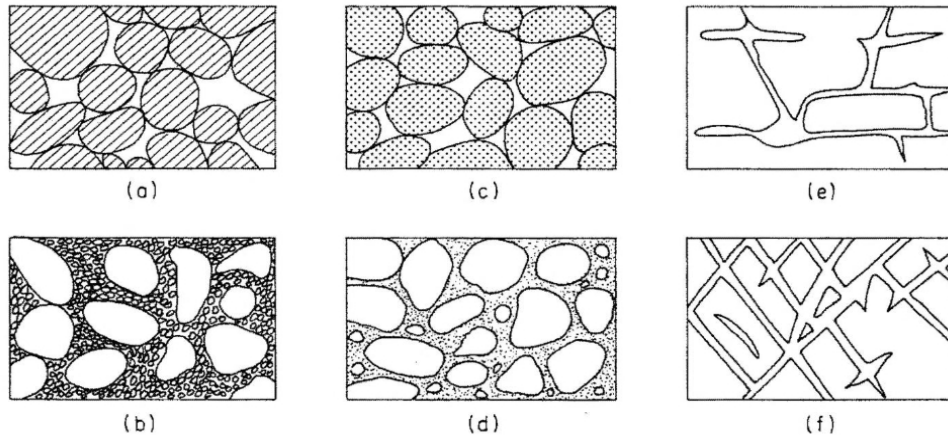


Figura 4: Esquema de tipos de porosidad, porosidad primaria (a,b,c,d) porosidad secundaria (e,f) (Freeze And Cherry 1979).

La permeabilidad (K) de una roca se define como la capacidad de la roca para permitir el paso de fluidos a través de ella, siendo dependiente de la estructura y la composición de la roca, así como de la presencia de poros o fracturas que faciliten el flujo de agua, en la figura 5 tenemos valores de referencia para distintas rocas.

PERMEABILIDAD (K)	m/s ▶	10 ¹	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰
	en darcy cm/s ▶	10 ³	10 ²	10 ¹	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸
GRANULOMETRIA	homogéneo ▶	gravas		arena limpio	arena fino		silt		arcilla				
	diámetro de los granos en mm ▶	2		0.25	0.06		0.002						
	variado ▶	gruesas al media gravas		gravas y arenas	mezcla arena arcilla, silt				arcilla				
		rocas permeables				semi-permeables				impermeables			

Figura 5: Rango de valores de la permeabilidad (K) (Freeze And Cherry 1979).

La porosidad de las calizas permite el almacenamiento de agua, lo que es esencial para la recarga de acuíferos locales ya que de acuerdo a las cartas del INEGI el basamento de el área de estudio está constituido por calizas, mientras que la permeabilidad de estas rocas facilita el flujo de agua subterránea.

2.4. Teoría del método TDEM

El método transitorio electromagnético en el dominio del tiempo (TDEM por sus siglas en inglés) se relacionan el campo eléctrico y el campo magnético. Las ecuaciones de Maxwell describen la relación de ambos, teniendo así los fenómenos electromagnéticos (Ward y Hohmman, 1988) :

- Ley de Faraday:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

- Ley de Ampère:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

- Ley de Gauss para campos magnéticos:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

- Ley de Gauss para campos eléctricos:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

Donde:

- E: Campo eléctrico [$\frac{V}{m}$]
- B: Campo de inducción magnética [T o $\frac{Wb}{m^2}$]
- H: Campo magnético [$\frac{A}{m}$]
- J: Densidad de corriente eléctrica [$\frac{A}{m^2}$]
- D: Desplazamiento eléctrico [$\frac{C}{m^2}$]
- ρ : Densidad de carga eléctrica [$\frac{C}{m^2}$]

Tomando en consideración las relaciones constitutivas, las cuales involucran las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia, así como asumiendo un medio homogéneo, lineal e isótropo donde sus características son independientes de la temperatura, el tiempo y la presión.(Ward y Hohmman, 1988). Tenemos lo siguiente:

- $D = \varepsilon E$
- $B = \mu H$
- $J = \sigma E$

Donde:

- ε : Permitividad eléctrica [$\frac{F}{m}$]
- μ : Permeabilidad magnética $\frac{H}{m}$
- σ : Conductividad eléctrica $\frac{S}{m}$

Ecuación de onda

La ecuación de onda describe la propagación de los campos eléctricos y magnéticos en el interior de la tierra. Partiendo de las ecuaciones de Maxwell, aplicando el rotacional a las leyes de Faraday y de Ampere, se obtiene: (Ward y Hohmman, 1988)

- $\nabla^2 H - \sigma\mu \frac{\partial H}{\partial t} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$
- $\nabla^2 E - \sigma\mu \frac{\partial E}{\partial t} - \varepsilon\mu \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0$; Si y sólo si $\nabla \cdot E = 0$

Asumiendo que E y H son continuos y poseen primera y segunda derivada al tener dependencia temporal, tenemos entonces:

- $E = E_0 e^{-i(\omega t + \psi)}$
- $H = H_0 e^{-i(\omega t + \psi)}$

Sustituyendo y simplificando en las primeras ecuaciones para la ecuación de onda:

- $\nabla^2 H + (-i\omega\sigma\mu + \omega^2\varepsilon\mu)H = 0$
- $\nabla^2 E + (-i\omega\sigma\mu + \omega^2\varepsilon\mu)E = 0$

Se define como propagación de onda al cuadrado a $\gamma = -i\omega\sigma\mu + \omega^2\varepsilon\mu$

- $\nabla^2 H + \gamma^2 H$
- $\nabla^2 E + \gamma^2 E = 0$

Considerando un modelo cuasiestacionario ($\omega^2\varepsilon\mu \ll \omega\sigma\mu$), implica que las corrientes de desplazamiento son mucho menores a las corrientes de conducción, entonces la constante de propagación se aproxima a $\gamma^2 \approx i\mu\sigma\omega$ (Ward y Hohmann, 1988) teniendo a bajas frecuencias y asumiendo la incidencia de onda plana entonces:

- $\nabla^2 E - i\omega\sigma\mu E = 0$
- $\nabla^2 H - i\omega\sigma\mu H = 0$

Condiciones de Frontera

Las condiciones de frontera parten de las ecuaciones de Maxwell en su forma integral, se hace una consideración para fenómenos electromagnéticos homogéneos, lineales e isótropos (Ward y Hohmann, 1988) siendo entonces:

La componente normal del campo magnético es continua a través de la interfase de separación entre el medio uno y el medio dos:

- $Bn_1 = Bn_2$

La componente normal del desplazamiento dieléctrico Dn es continua a través de la interfase debido a la acumulación en la densidad de carga superficial ρ_s :

- $Dn_1 - Dn_2 = \rho_s$

La componente tangencial del campo eléctrico Et es continua a través de la interfase:

- $Et_1 = Et_2$

La componente tangencial del campo magnético Ht es continua a través de la interfase siempre y cuando no haya corriente superficial.

- $Ht_1 = Ht_2$

La componente normal de la densidad de corriente Jn es continua a través de la interfase:

- $Jn_1 = Jn_2$

Solución a la ecuación de onda

A partir de las ecuaciones diferenciales de segundo orden obtenidas a partir de las leyes de Faraday y de Ampere, donde se considera una onda plana con dependencia sinusoidal en el tiempo, presentando una variación armónica ($e^{i\omega t}$) (Ward y Hohmann, 1988):

- $E = E_0^+ e^{-i(\gamma z - \omega t)} + E_0^- e^{i(\gamma z - \omega t)}$
- $H = H_0^+ e^{-i(kz - \omega t)} + H_0^- e^{i(kz - \omega t)}$

Tomando en consideración que γ es un número complejo, que E_0^+ y H_0^+ son las amplitudes iniciales $t = 0$ con $z = 0$ donde el signo indica la dirección de propagación de onda entonces:

- $\alpha = \left\{ \frac{\mu\omega}{2}(\sigma^2 + \varepsilon^2\omega^2)^{\frac{1}{2}} + \varepsilon\omega \right\}^{\frac{1}{2}}$
- $\beta = \left\{ \frac{\mu\omega}{2}(\sigma^2 + \varepsilon^2\omega^2)^{\frac{1}{2}} + \varepsilon\omega \right\}^{\frac{1}{2}}$

Considerando un modelo cuasiestacionario donde $\alpha = \beta$ entonces:

- $\alpha = \beta = \left(\frac{\omega\sigma\mu}{2} \right)^{\frac{1}{2}}$

Considerando que existe decaimiento en la dirección del eje z positivo

- $E = E_0^+ e^{-i\alpha z} e^{-\beta z} e^{-i\omega z}$
- $H = H_0^+ e^{-i\alpha z} e^{-\beta z} e^{-i\omega z}$

Con base a las ecuaciones anteriores, $e^{-\beta z}$ tiende a cero conforme aumenta el valor de z lo cual representa una atenuación en la amplitud de onda electromagnética en una distancia δ , siguiendo una relación establecida de $\frac{1}{e}$. Esta distancia es conocida como skin depth o penetración nominal (Ward y Hohmann, 1988) y se representa:

- $\delta = \left(\frac{2}{\omega\mu\sigma} \right)^{\frac{1}{2}}$

Respuesta transitoria

Para generar una respuesta transitoria del campo electromagnético, se obtiene la componente vertical para eliminar las heterogeneidades laterales a través de un dipolo magnético vertical la cual es una bobina que se considera tiene una forma circular (Ward y Hohmann, 1988) se define como:

- $H_z = -\frac{I}{K^2 a^3} \left[3 - (3 + 3iak - a^2 k^2) e^{-ika} \right]$

- a = Radio de la bobina
- k = constante de propagación

Para obtener una respuesta transitoria de una señal tipo escalón es necesario dividir entre $i\omega$ aplicando también la transformada de Laplace. Por lo tanto el campo magnético en el centro de la bobina después de apagar la corriente se expresa como:

$$\blacksquare H_z = \frac{I}{2a} \left[\frac{3}{\sqrt{\pi}\theta a} e^{-\theta^2 a^2} + \left(1 - \frac{3}{2\theta^2 a^2}\right) \text{erf}(\theta a) \right]$$

Donde erf es la función error y se define como:

$$\blacksquare \text{erf}(x) = \frac{2}{\pi^{0.5}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$
$$\blacksquare \theta = \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma}{4t}}$$

El campo magnético en el espacio libre previo a interrumpir el flujo de corriente es representado por $\frac{I}{2a}$, cuando se multiplica por el segundo término entonces da lugar al decaimiento del campo magnético. La derivada del campo magnético con respecto al tiempo se expresa:

$$\blacksquare \frac{\partial H_z}{\partial t} = -\frac{I}{\mu_0 \sigma a^3} \left[3 \text{erf}(\theta a) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \theta a (3 + 2\theta^2 a^2) e^{-\theta^2 a^2} \right]$$

El centro de la bobina es importante ya que es donde se da el decaimiento del campo magnético y su derivada con respecto al tiempo, el campo magnético transitorio se debe a un sistema de corrientes circulares que fluyen en la misma dirección que la corriente transmisora, el campo magnético puede ser aproximado al de un filamento circular de corriente similar a un anillo de humo que se mueve hacia abajo con una velocidad dada por $\frac{2}{\sqrt{\pi \sigma \mu_0 t}}$ y su radio está dado por la expresión $r = \sqrt{\frac{4.37t}{\mu_0 \sigma}}$. Fuera de la bobina, el signo del campo magnético cambia cuando el anillo de humo pasa aproximadamente debajo del punto de observación pero se mantiene al centro de la bobina.

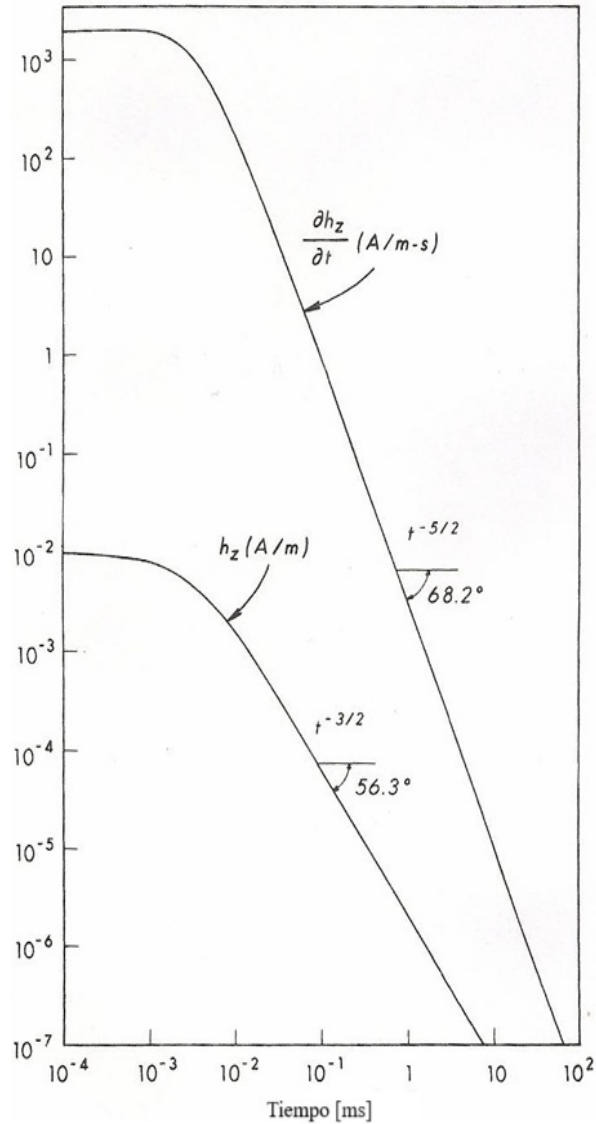


Figura 6: Campo magnético y su derivada con respecto al tiempo (Nabighian,1979).

Para valores pequeños de θ y tiempos tardíos:

- $h_z = \frac{\mu_0^{3/2} I a^2 \sigma^{3/2}}{30\sqrt{\pi}} t^{-3/2}$
- $\frac{\partial h_z}{\partial t} = \frac{\mu_0^{3/2} I a^2 \sigma^{3/2}}{20\sqrt{\pi}} t^{-5/2}$

Esta derivada es la representación de la respuesta transitoria de la tierra, a partir de la cual se calcula la resistividad aparente del subsuelo, principalmente porque sus mediciones representan menor sensibilidad en la profundidad de cuerpos conductores (Spies, 1989). La respuesta transitoria para el semiespacio homogéneo se puede dividir en tres etapas:

- Etapa temprana: respuesta constante en el tiempo.
- Etapa intermedia: La respuesta presenta una variación con respecto el tiempo.

- Etapa tardía: Respuesta lineal en una gráfica.

Resistividad Aparente

La resistividad aparente (ρ_a) es un parámetro derivado del voltaje inducido (V) en la bobina receptora, que permite estimar la resistividad del subsuelo en función del tiempo.

- **Tiempos cortos** (respuesta superficial):

$$V = \frac{3mI}{\sigma a^3}$$

- **Tiempos largos** (respuesta profunda):

$$V = \frac{\mu_0^{5/2} I m a^2 \sigma^{3/2}}{20\sqrt{\pi} t^{5/2}}$$

Donde m es el momento magnético de la bobina receptora ($m = N \cdot A$, con N como el número de vueltas y A el área).

La resistividad aparente está dada por:

- **Tiempos cortos:**

$$\rho_a = \frac{a^3 V}{3mI}$$

Aproxima la resistividad de las capas superficiales.

- **Tiempos largos:**

$$\rho_a = \frac{\mu_0^{5/3} a^{4/3} m^{2/3} I^{2/3}}{20^{2/3} \pi^{1/3} t^{5/3} V^{2/3}}$$

Aproxima la resistividad de las capas profundas.

Interpretación Física de la Solución

- **Tiempos Tempranos** ($t \rightarrow 0$): La señal es sensible a capas superficiales (alta frecuencia espacial).
- **Tiempos Tardíos** ($t \rightarrow \infty$): La señal penetra a mayor profundidad, dominada por la conductividad integrada del subsuelo.
- El **decaimiento exponencial** de $V(t)$ refleja la difusión de las corrientes inducidas hacia el interior de la Tierra.

3. Fundamentos del Método TDEM

El método TDEM es una técnica no invasiva de gran penetración, cuya profundidad de exploración depende de diversos factores como el tamaño de la bobina utilizada, el momento de la bobina, la corriente inyectada y el número de vueltas de la espira así como de las características eléctricas del medio en el que nos encontremos.

El método se basa en hacer pasar una corriente a través de un conductor (bobina) bien aterrizado en el suelo. En el momento $t=0$, la corriente se corta abruptamente, lo que genera un campo electromagnético secundario. Conforme este campo decae, induce un pulso de voltaje que provoca la circulación de corriente a mayor distancia del transmisor como en profundidad. Este flujo de corriente también disminuye debido a la resistividad finita del suelo, induciendo a su vez otro flujo más profundo, y así sucesivamente.

Para medir la amplitud del flujo de corriente en función del tiempo, se registra su campo magnético decreciente mediante una bobina receptora, que puede tener una o múltiples vueltas. Esta bobina receptora suele ubicarse en el centro de la bobina transmisora. Al medir el voltaje inducido en la bobina receptora en distintos instantes, se obtiene información sobre la resistividad eléctrica del subsuelo a diferentes profundidades, lo que constituye la base del método TDEM.

Desde un punto de vista geométrico, la bobina transmisora debería ser circular para optimizar su eficiencia, sin embargo, debido a la complejidad que esto representa en campo, se suele utilizar una bobina cuadrada, ya que es más sencilla de desplegar siendo la aproximación más práctica a la geometría circular.

El arreglo de las bobinas puede variar según la configuración utilizada (Ver figura 7):

- Single loop o bobina simple: Se emplea una sola bobina que actúa tanto como transmisora como receptora.
- Bobina coincidente: Se utilizan dos bobinas, una transmisora y otra receptora, colocadas en la misma ubicación
- Bobina central: La bobina receptora se coloca en el centro de la bobina transmisora
- Bobinas separadas: La bobina receptora y transmisora están separadas por una distancia fija n . Una variante de esta técnica consiste en un receptor de dipolo mantenido a una distancia fija fuera del lazo transmisor.
- Doble bobina: utiliza dos bobinas adyacentes conectadas en paralelo para acoplarse mejor con conductores verticales (Spies, 1975). Además, dado que el ruido inducido por fuentes remotas de interferencia eléctrica es casi opuesto en las dos bobinas sobre un terreno homogéneo, se puede lograr una reducción significativa del ruido con esta configuración. En áreas con variaciones laterales de conductividad, la reducción del ruido suele ser ineficaz.

- Bobina transmisora fija, bobina receptora móvil: Esta configuración consiste en una gran bobina transmisora fija y una bobina receptora pequeña móvil que toma mediciones a lo largo de líneas perpendiculares a la bobina

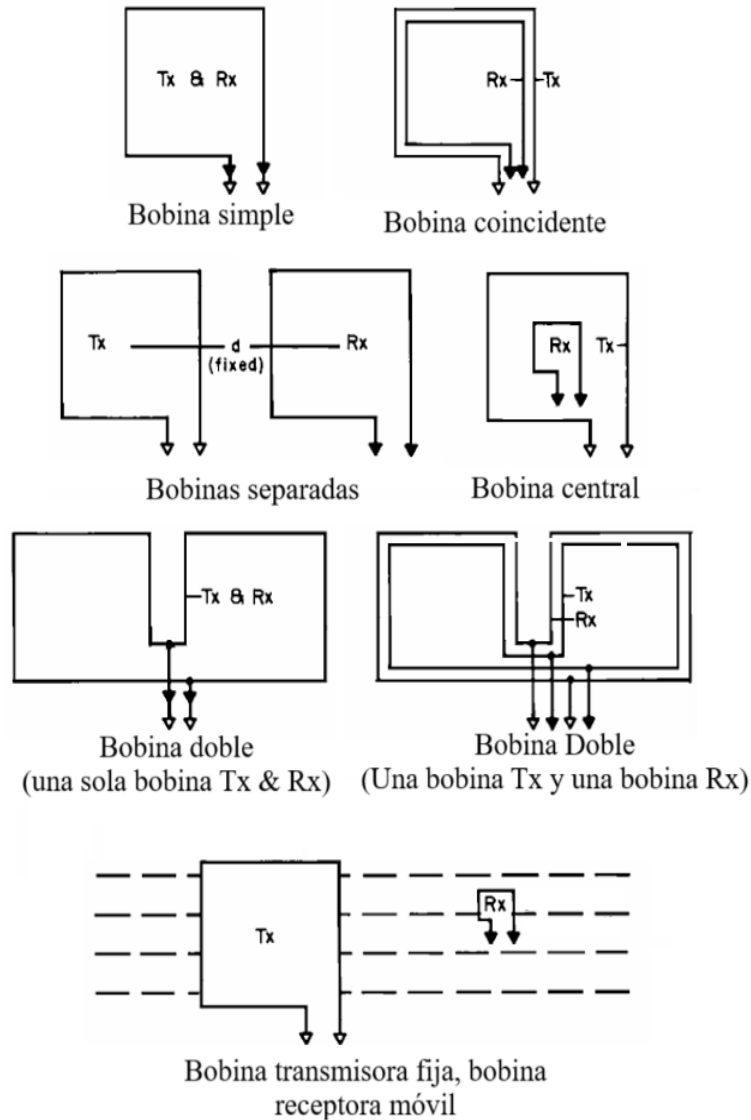


Figura 7: Tipos de arreglos TDEM (Nabighian y Macnae, 1991)

La configuración del arreglo se realiza considerando el área de estudio, el número de sondeos así como su orientación con respecto al centro geométrico deseado para la futura creación de los perfiles de resistividad. Una vez definida la disposición, se extiende el cable conductor el cual se aterriza correctamente, siguiendo la orientación establecida. Es fundamental aislar todas las conexiones para evitar fugas de corriente, ya que estas podrían generar ruido y afectar la calidad del sondeo.

Existen cuatro fuentes principales de ruido:

- Ruido en el circuito debido a malas conexiones
- Ruido inducido por fuentes cercanas.
- Presencia de estructuras metálicas.
- Polarización inducida.

Tras completar la instalación del sistema de transmisión y recepción, se llevan a cabo pruebas de control (curva de ruido) y ajustes según las condiciones del sitio. Una vez establecidos los parámetros de adquisición, se procede a realizar todos los sondeos programados.

Al finalizar la adquisición de datos, se generan las curvas de decaimiento de voltaje y resistividad aparente en función del tiempo. El análisis (Figura 8 a) se centra en el decaimiento tardío, donde se encuentra la información de interés. Para garantizar el control de calidad, se verifica la coherencia entre curvas, la desviación estándar y el tiempo hasta el cual hay información coherente.

Una vez aprobado el sondeo, se emplea un software especializado para crear modelos de inversión numérica que permiten estimar la profundidad real y la resistividad eléctrica del subsuelo (Figura 8 b). Estos modelos son representaciones matemáticas idealizadas de una porción de la Tierra, cuyos parámetros se obtienen a partir de los datos medidos en campo. Los algoritmos de inversión realizan un proceso iterativo para ajustar el modelo de resistividad calculado hasta que sea consistente con las mediciones obtenidas en campo.

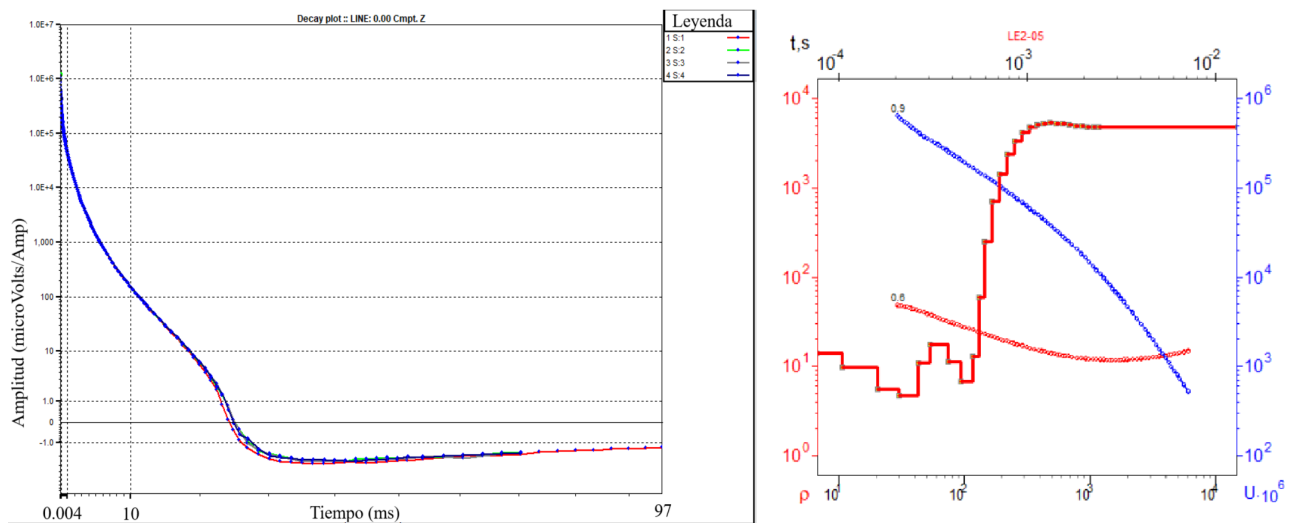


Figura 8: Ejemplo de curva de datos obtenidos en campo (izquierda) y modelo de inversión con serie de tiempo *HiRes*.

Los parámetros de inversión que se pueden modificar son: el factor de atenuación, número de iteraciones, número de capas, factor de incremento del espesor, resistividad inicial. La visualización puede mejorarse usando un rango adecuado de resistividades y una escala de colores adecuada.

4. Logística y adquisición de datos

4.1. Equipo de medición utilizado

Se utilizó el equipo de medición TerraTEM 24 , de Monex Geoscope, con su pack de alimentación externa el cual contiene dos baterías de fosfato de hierro y litio (LiFePO4) 20 Ah 12.8 V, este equipo cuenta con distintas opciones de series de tiempo, apilamiento, ventaneo y muestreo el cual facilita la adquisición de datos TDEM.

Para la transmisión de corriente se ocuparon dos baterías LiFePO4 de 36V 50Ah de la marca CANBAT conectadas en serie.



Figura 9: Equipo TerraTEM24 y baterías en campo

4.2. Planeación de los sondeos TDEM

Para la distribución de sondeos se tomó en cuenta el acceso, logística y la geología del lugar, se puede observar en la figura 1 las estructuras geológicas (Falla y sinclinales) cercanas a nuestra área de estudio, es por lo anterior que se optó por tener mayor densidad de sondeos de este a oeste para poder observar algún cambio geológico.

Con base a las consideraciones anteriores se distribuyeron 90 sondeos TDEM de la siguiente manera: de norte a sur se construyeron 12 líneas de sondeos con una separación de 300 metros entre ellas. De estas 12 líneas, 4 fueron de sondeos continuos sin separación entre ellos, mientras que las otras 8 líneas fueron de sondeos intercalados con una separación de 300 metros entre ellos; esta propuesta de distribución se puede observar en la figura 10.

Para la planeación de los sondeos la primera consideración que se hizo fue ajustar la malla para que ésta quedara colineal al camino principal Norte - Sur para tener un fácil acceso, así como un desplazamiento de manera semejante tanto para el este como para el oeste.

Esta propuesta de sondeos se exportó en formato KML para ingresarla en la aplicación Guru Maps, donde sirvió de referencia para realizar los sondeos en campo.

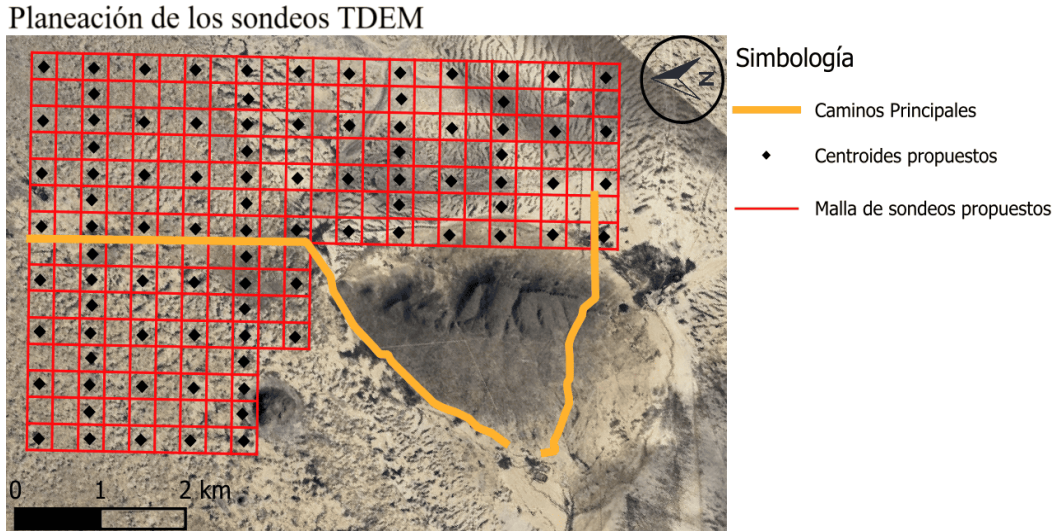


Figura 10: Mapa de planeación de los sondeos TDEM

4.3. Distribución y características de los sondeos TDEM

Considerando que el método proporciona información suficiente entre sondeos sin perder detalles geológicos relevantes dentro de la separación establecida, se tiene una distribución adecuada para conocer las características geológicas del subsuelo del lugar.

Cada bobina tuvo dimensiones de 300 metros por lado, formando una bobina cuadrada con 1,200 metros de cable AWG10 (4 carretes de 300 metros cada uno). El tipo de arreglo elegido fue single loop, ya que, de acuerdo con las dimensiones de la propuesta de sondeos, es el más apto para el trabajo en campo. De acuerdo MacNeill (1994) la profundidad de penetración será mínima proporcional a un lado de la bobina, por lo cual resultando una profundidad de penetración de 300 metros, por otro lado, Spies (1989) propone la siguiente fórmula para determinar la profundidad:

$$d \approx 40 \left(\frac{IA}{\sigma} \right)^{\frac{1}{5}}$$

Donde:

- σ : conductividad promedio
- I : Corriente inyectada
- A : Área de la bobina

En cada sondeo, se inyecta una corriente mínima de 18 A, el área fue de 90,000 m² y usamos una conductividad promedio de la caliza de 0.1 mS/m por lo tanto se obtuvo una profundidad de penetración teórica de 1,106 metros.

De acuerdo con Spies (1989) si el medio es resistivo la profundidad de penetración aumenta, caso contrario si se encuentran medios conductores la atenuación de la señal es más rápida y la profundidad de penetración será menor.



Figura 11: Construcción del arreglo

Para la construcción del arreglo, previamente a los trabajos en campo se agregó la malla propuesta (Figura 10) a la aplicación GPS "Guru Maps". El procedimiento que se siguió es el siguiente:

1. Establecer 2 equipos de 2 colaboradores. Para los cuales, los integrantes del mismo equipo se les asignará el mismo color de cable (únicas opciones Azul o Rojo)
2. Iniciando en el vértice del sondeo, colocar a nivel de suelo el cable eléctrico, en secuencia cable (A1), cable (A2) y cable (R1), cable (R2).
3. Con la aplicación GPS orientarse y tomar referencias visuales para crear un cuadrado con aristas cercanas a la perpendicularidad.
4. Iniciar la grabación del track e ir revisando intermitentemente la correcta creación de la bobina.
5. Al finalizar los segmentos de cable A1-A2 y R1-R2, realizar la conexión eléctrica en secuencia A1-A2-R2-R1 (Figura 12) y verificar el correcto aislamiento con cinta aislante para garantizar la continuidad del circuito.

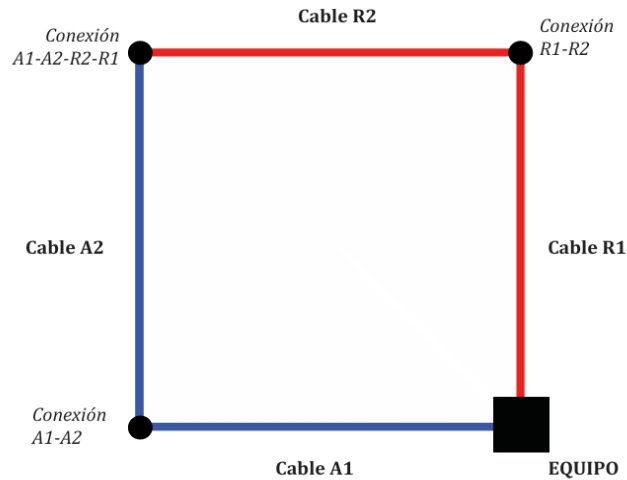


Figura 12: Diagrama de arreglo geométrico

Teniendo el registro anterior se ingresaron los datos al programa "QGIS" donde se registró el avance día con día, al final teniendo el registro de cada sondeo mediante el programa se generan los centroides a usarse en el procesamiento de datos. A continuación se detallan los 90 sondeos con sus respectivos centroides realizados en el área de estudio. Cada color (Figura 13) representa un día de adquisición.

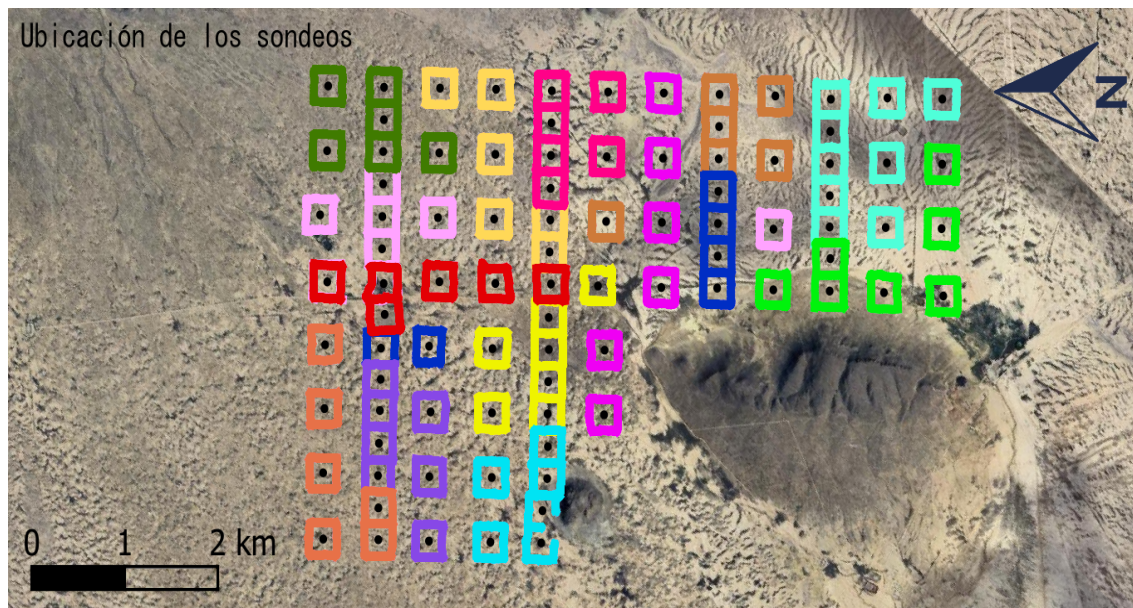


Figura 13: Ubicación de los sondeos

4.4. Desplazamiento a los sondeos

La adquisición de datos en campo presentó diversos retos, asociados a factores como: el acceso, la densidad de vegetación, la fauna y la distancia de desplazamiento entre sondeos. En el siguiente mapa se señalan las principales vías de acceso así como los caminos secundarios:

Caminos

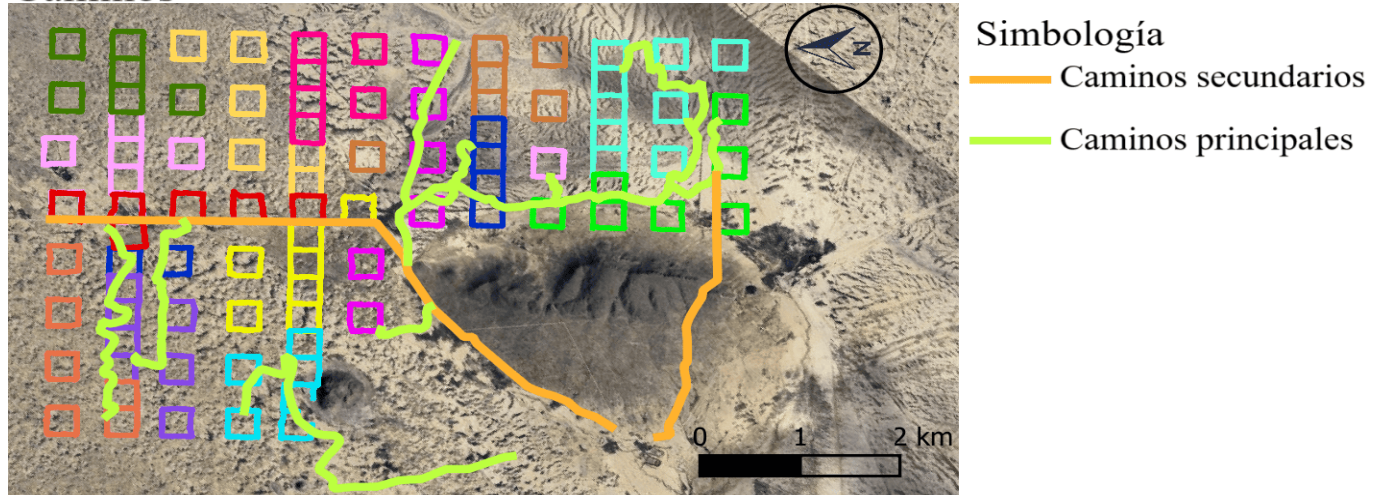


Figura 14: Mapa de caminos en la zona de estudio.

De color naranja se muestran los caminos principales, los únicos construidos para el paso de vehículos; en cambio, de color verde limón se señalan los caminos secundarios, que constituyeron un registro del trayecto seguido para acercarse a los distintos sondeos en vehículo.



Figura 15: Desplazamiento de la brigada.

Previo a ingresar a estos caminos, se realizó un reconocimiento mediante mapa satelital, en el que se identificaron zonas con menor densidad de vegetación para facilitar el acceso en vehículo partiendo de los caminos principales. Esta planificación se llevó a cabo porque el acceso a pie desde dichos caminos implicaba un desgaste físico considerable para la brigada, ya que se debía ingresar con cuatro carretes (cada uno con 1,200 metros de cable AWG10),

además de transportar las baterías tanto del equipo como para inducir corriente, el equipo de medición TerraTEM24, botellas para hidratación y alimentos; trayecto que alcanzaba hasta los 2,100 metros.

Como se puede observar en la figura 14, en los cuadrantes noroeste y sureste se logró ingresar a la mayoría de los sondeos por vehículo o, en su defecto, acercándose lo suficiente para desplazarse hasta un máximo de 900 metros a pie (figura 15) donde terminando la adquisición regresabamos con todo el equipo al vehículo. Sin embargo, en el cuadrante noreste no fue posible ingresar con vehículo, ya que tanto el terreno como la vegetación impedían el paso. Por ello, se optó por ingresar a pie.

Desplazamiento en los sondeos



Figura 16: Mapa de desplazamiento en el cuadrante noreste.

El flujo de trabajo seguido para lograr una adquisición de la manera más eficiente está señalado por flechas azules en la figura 16. Este flujo se discutió un día antes de ingresar a este cuadrante, considerando la opinión de todos y el desgaste que esto podía generar. Las consideraciones que se tomaron fueron: acercarse a los sondeos del día siguiente, aprovechar los sondeos continuos en los que un carrete se quedaba fijo y minimizar el desplazamiento entre sondeos para evitar un desgaste físico excesivo.

Una de las características del trabajo en este cuadrante fue que los carretes (lo más pesado de cargar) se dejaban en el lugar donde se comenzaría el levantamiento el día siguiente, regresando únicamente con las baterías y víveres, de modo que al día siguiente pudiéramos ingresar a ese punto sin generar un desgaste físico considerable. Lo anterior se puede ver señalado con flechas color rojo.

4.5. Procedimiento de la ejecución de sondeos

Los datos de adquisición en campo fueron registrados mediante el sistema de transmisión/recepción anteriormente mencionado TerraTEM24.

A continuación, se listan las actividades ejecutadas para la adquisición de datos TDEM en la zona de estudio.

1. Revisión y selección del sitio para su ejecución.
2. Orientación ortogonal N, S, E y W.
3. Tendido de cable y cierre de loop.
4. Verificación de circuito cerrado y prueba de resistencia de circuito.
5. Prueba de verificación de máxima corriente de inyección.
6. Inicio de medición de ruido electromagnético.
7. Inicio de medición con series de tiempo HighRes.
8. Revisión de las curvas mediante el software TemPlot.
9. Para el caso donde las mediciones no cumplen el control de calidad se regresó a la actividad 4.
10. Una vez aprobada la adquisición geofísica se desplaza la brigada al siguiente punto de interés.
11. Al finalizar la jornada se respalda la información y se concentra en una bitácora de adquisición.

4.6. Parámetros de adquisición

Parámetros de adquisición establecidos:

Tabla 1: Parámetros de adquisición TDEM.

Sondeos	90
Tipo de bobina	single loop
Corriente inyectada	> 18 [A]
Tamaño de la bobina	300 m x 300 m
Serie de tiempo	<i>HiRes</i>
Ventanas	Periodo de 400 [ms]
Apilamiento	512
Tipo de apilamiento	Lineal
Frecuencia de muestreo	312,500 (S/s)
Voltaje de entrada	80 [V]
Frecuencia base	60 [Hz]
Tiempo de medición	204.8 [s]

4.7. Control de calidad

En cada sondeo TDEM se implementó un riguroso control de calidad mediante la verificación de cumplimiento de los parámetros de adquisición establecidos. Este procedimiento garantizó la confiabilidad de los datos medidos y la coherencia de la campaña de adquisición en todos los sondeos.

Como parte del control de calidad también se buscaron fuentes de ruido cercanas a la zona sin embargo no se encontraron ninguna estructura metálica o fuentes cercanas que puedan transmitir ruido. Con base a lo anterior se verificó tener todas las conexiones bien aisladas eliminando así cualquier fuente de ruido.

Conforme avanzaron los trabajos en campo se analizaron las curvas de decaimiento de voltaje a partir de las cuales se construyeron pseudosecciones para evaluar la continuidad lateral y vertical, así como para visualizar la distribución de resistividad eléctrica. El análisis de estas pseudosecciones reveló un ambiente geoelectrico característico del sitio, identificándose una capa de alta resistividad, interpretada como roca caliza.

Para determinar las profundidades asociadas a la resistividad medida, se realizó la inversión de datos mediante el algoritmo de ajuste suavizado 1D por mínimos cuadrados en el software ZondTEM1D. Los parámetros de inversión utilizados fueron:

- Inversión combinada 1D con restricción por suavizado.
- Reducción del efecto lateral.
- Intervalo de 12 a 24 capas planas.
- Mínimo de 20 iteraciones. Error de ajuste máximo del 1 %.

El programa ZondTEM1D está diseñado para la interpretación unidimensional multiestación de sondeos transitorios electromagnéticos (TDEM) y sondeos de frecuencia para varios sistemas de observación ya sea terrestres o aéreos. Debido a que la base del programa es la interpretación multiestación, los datos cargados para un perfil son considerados como un todo y no como sondeos separados.

A continuación, se presenta un ejemplo de una pseudosección generada en campo para los sondeos 17-23, que corresponden a una sección del perfil W-E, junto con sus respectivos modelos de inversión 1D.

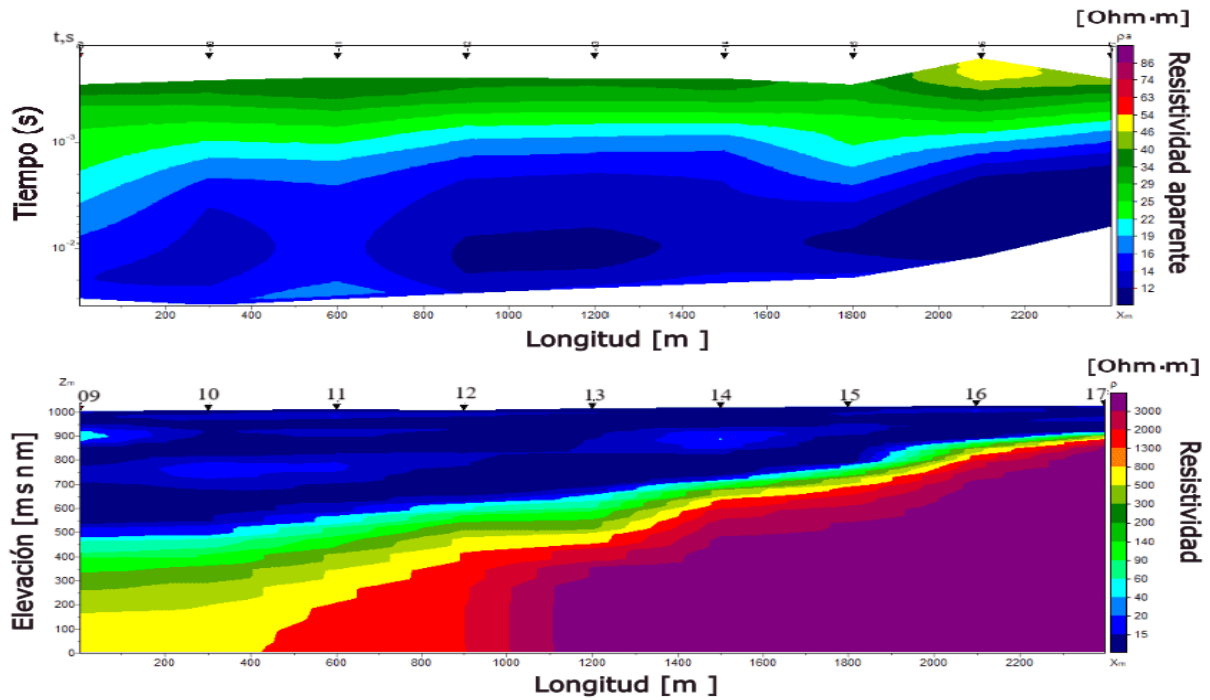


Figura 17: Parte superior: pseudosección de la distribución geoelectrica. Parte inferior: Modelo de inversión 1D

Los perfiles analizados en este reporte son los indicados N-S y W-E (Figura 18), el primero contando con 12 sondeos y el segundo con 15 sondeos teniendo así un total de 26 sondeos. Ambos perfiles comparten el sondeo 17.

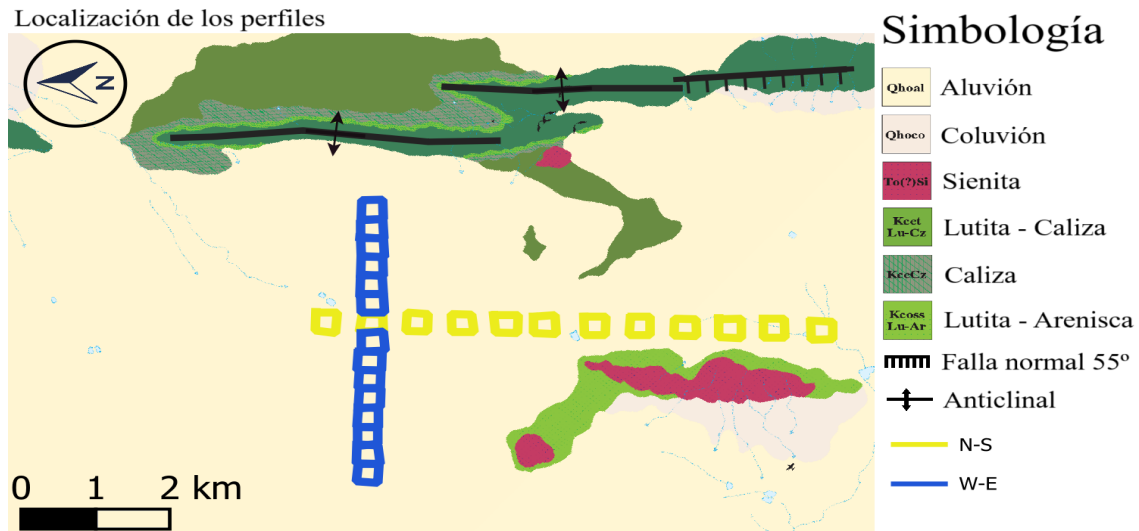


Figura 18: Mapa de localización de los perfiles de acuerdo con las cartas del Servicio Geológico Mexicano (2006), modificado.

5. Procesamiento de los datos

Como se mencionó anteriormente, al finalizar cada día se realizaba una revisión de los datos en campo siguiendo el control de calidad establecido y usando el siguiente flujo de proceso:

1. Realizar la extracción de datos del equipo TerraTem24 a través de una memoria USB
2. Visualizar las curvas de decaimiento de voltaje a través del programa TEMPlot
3. Exportar los archivos .bin a el formato archivos de campo con extensión .tdf, siendo así compatibles con el programa ZONDTEM1D el cual es nuestro programa de procesamiento
4. Realizar el control de calidad observando las pseudosecciones de distribución geoelectrica y el modelo de inversión a priori en el programa ZONDTEM1D

Realizado lo anterior en campo posteriormente en gabinete se realizó el procesamiento completo de datos, siendo el procedimiento el siguiente:

1. Teniendo todos los archivos en crudo (extensión tdf) se organizan en una base de datos en ZondTEM1D, posteriormente se seleccionan los archivos del área de estudio.
2. En la base de datos se les asignó coordenadas X e Y correspondientes a cada sondeo obtenidas anteriormente en QGIS, se asignó también el valor de elevación de acuerdo con las cartas del INEGI.
3. Una vez cargados todos los archivos, para la creación de perfiles se genereró una línea de selección de datos donde se encuentran los sondeos de ese perfil .
4. Con la base de datos generada se establecieron los parámetros de procesamiento de datos, los cuales fueron: ajuste suavizado 1D por mínimos cuadrados, restricción por suavizado, 28 capas planas, 40 iteraciones y un error de ajuste máximo de 1%.
5. Se asignó una escala de colores, también estableciendo los valores de resistividad siendo el mínimo 9.5 y el máximo $5000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$
6. Por último, se ajustó, sondeo por sondeo, las curvas de resistividad tomando en consideración los valores establecidos al sitio (9 - $5,000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$), sin perder resolución entre capas y sin caer en valores fuera del rango de resistividades. Iniciando desde un patrón y después dando detalle a sondeos fuera de ese patrón.

Mediante el fujo de proceso descrito se obtuvieron una pseudosección de resisitividad aparente y modelo de inversión para los perfiles N-S (Figura 19) y W-E (Figura 20):

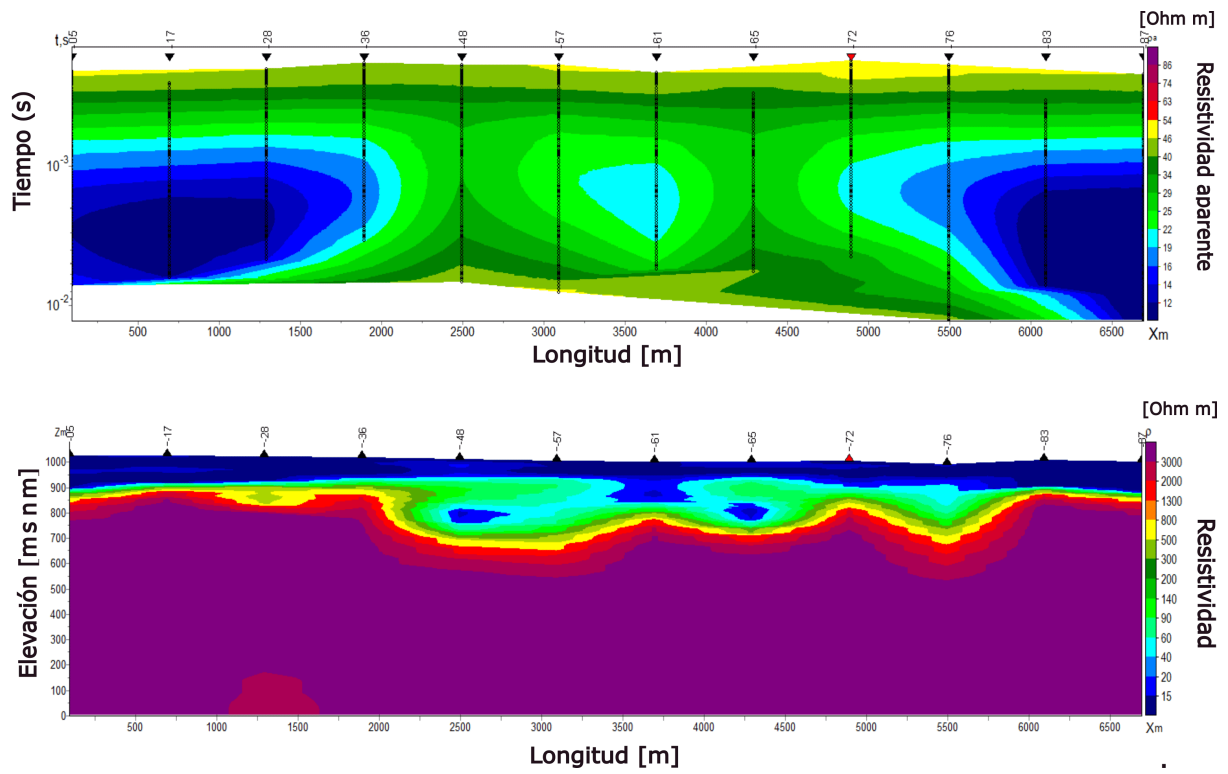


Figura 19: Perfil N-S, en la parte superior pseudosección geoelectrica y en la parte inferior modelo de inversión 1D

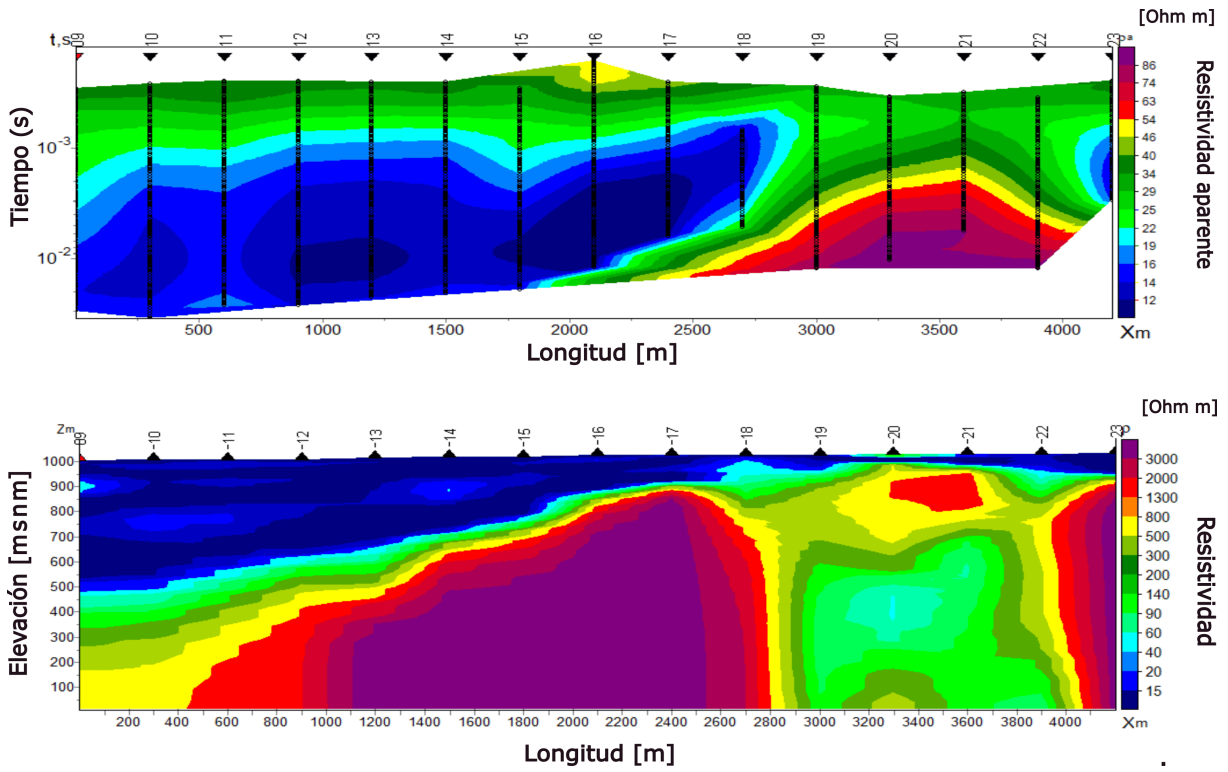


Figura 20: Perfil W-E, en la parte superior pseudosección geoelectrica y en la parte inferior modelo de inversión 1D

6. Resultados

6.1. Modelos de inversión 1D

Se obtuvieron los siguientes modelos de inversión a partir de una elevación del terreno de 1033 msnm:

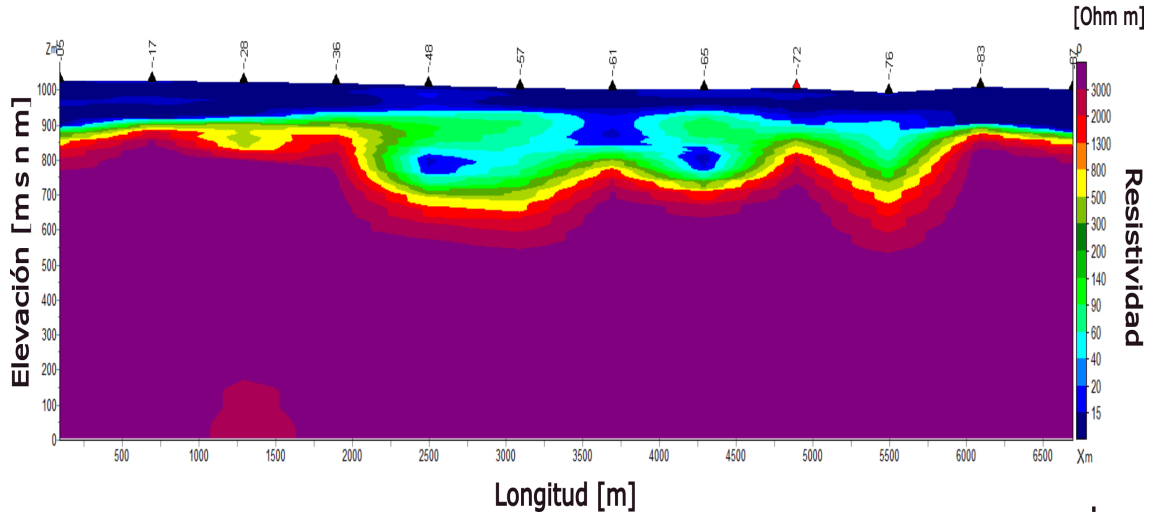


Figura 21: Modelo de inversión 1D N-S.

El perfil N-S (Figura 21) lo conforman 12 sondeos, teniendo una longitud de 6.9 kilómetros, tiene unas resistividades de 9 a 5000 $Ohm \cdot m$ se observan capas principales.

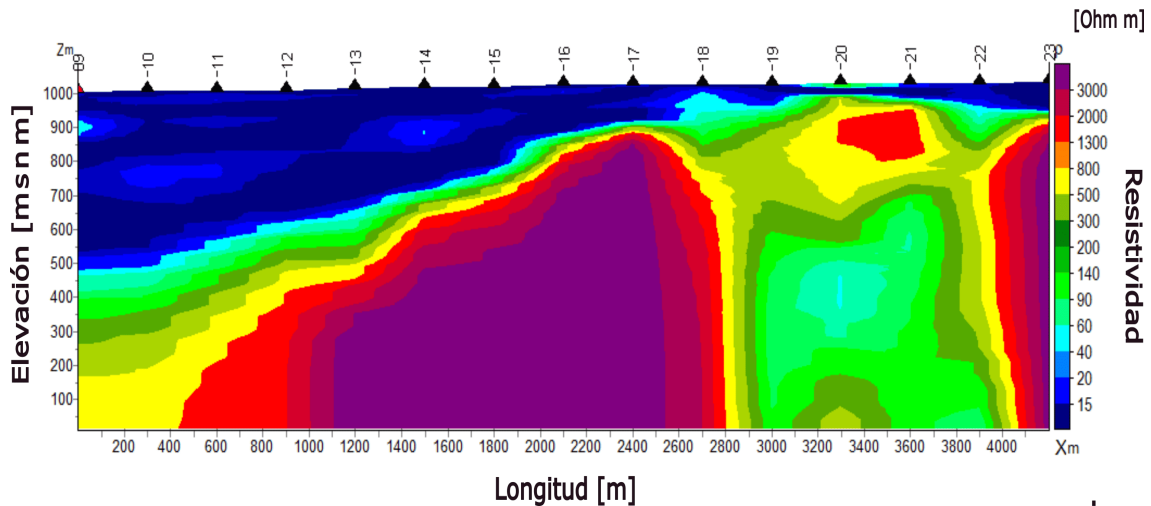


Figura 22: Modelo de inversión 1D W-E.

El perfil W-E (Figura 22) lo conforman 15 sondeos, teniendo una longitud de 4.5 kilómetros, tiene unas resistividades de 9 a 5000 $Ohm \cdot m$ se observan capas principales.

6.2. Vista 3D

Se generó una vista 3D con ambos modelos de inversión para correlacionarlos y confirmar la coherencia de datos. Se obtuvo la siguiente imagen:

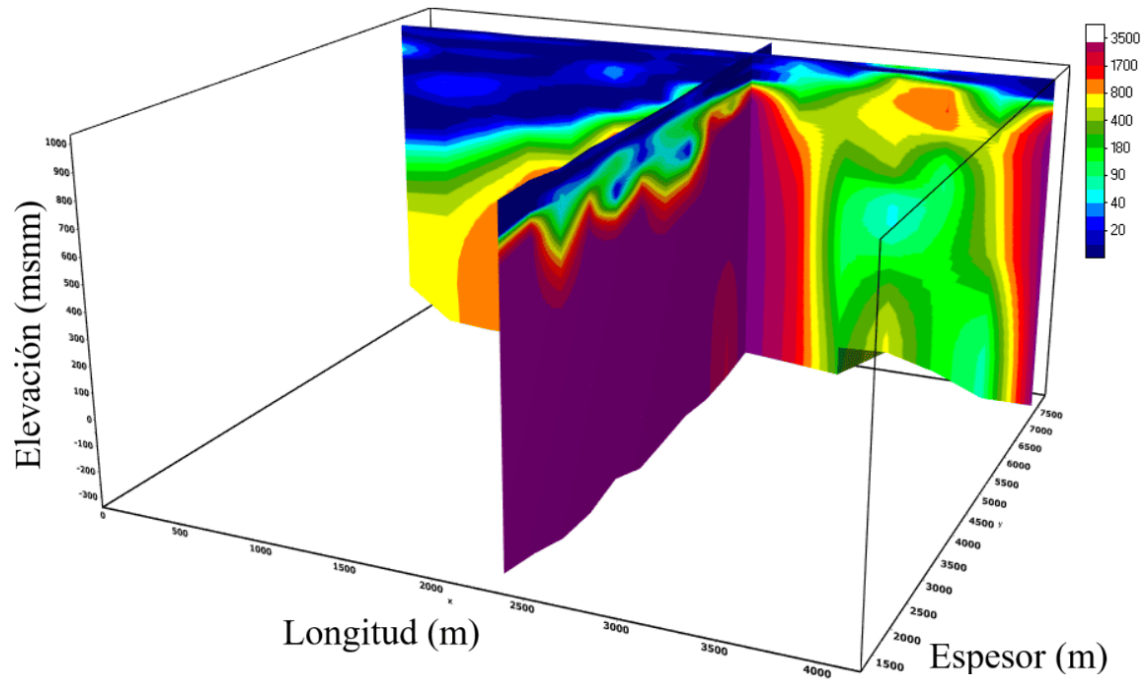


Figura 23: Modelo de inversión 3D vista este.

Se puede observar que existe coherencia cuando cruzan ambos perfiles en el sondeo 17.

7. Interpretación

7.1. Unidades geológicas

De acuerdo con lo observado en los dos perfiles geoelectricos se pueden diferenciar tres unidades geoelectricas principales:

Tabla 2: Clasificación geoelectrica-litológica

Unidad geoelectrica	Subunidad geoelectrica	ρ [Ohm.m]	Espesor máx [m]	Asociación litológica
UG1	UG1	0-40	550	Aluvión
UG2	UG2.A	40-80	100	Areniscas, intercalación de areniscas-lutitas y areniscas-calizas
	UG2.B	80-140	500	
	UG2.C	140-300	500	
	UG2.D	300-800	200	
UG3	UG3	< 1300	850	Basamento de caliza

Unidades Geoelectricas

La unidad geoelectrica uno (UG1), caracterizada en tonos azules (Figura 24), es una capa de relleno conformada por depósitos aluviales, con valores de resistividad que oscilan entre 15 y 40[Ohm.m] y un espesor variable. En el perfil N-S, su espesor máximo es de 150 metros; mientras que en el perfil W-E alcanza hasta 550 metros.

La unidad geoelectrica dos (UG2), con tonalidades que varían desde el verde hasta el amarillo (Figura 24), es una capa compuesta por areniscas, areniscas-lutitas y areniscas-calizas. En el perfil N-S se observa que la capa es lateralmente continua y presenta un espesor máximo de 200 metros, aunque se evidencian intrusiones de la UG1. Por otro lado, en el perfil W-E, la capa se extiende verticalmente, alcanzando hasta 900 metros de espesor. Las resistividades oscilan entre 40 y 800[Ohm.m].

La unidad geoelectrica tres (UG3), con tonalidades que varían desde el rojo hasta el morado (Figura 24), constituye el basamento, formado por calizas de alta resistividad (mayores a los 1300 [Ohm.m]) y muy compactas. Es la capa predominante en el perfil N-S, sin presentar variaciones laterales, con un espesor máximo de 850 metros; en cambio, en el perfil W-E se observa que tiene discontinuidad horizontal, con un espesor máximo de 900 metros.

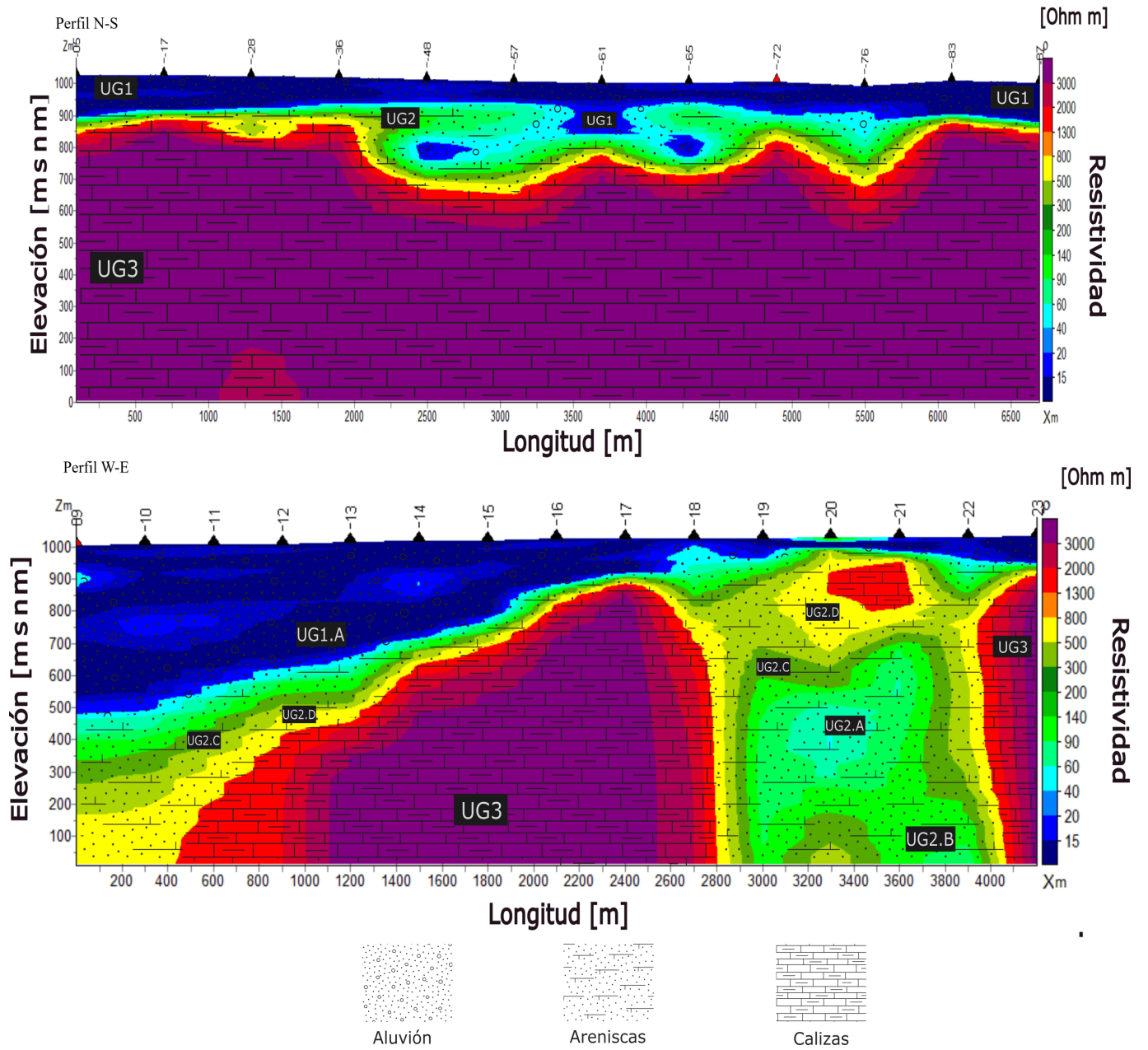


Figura 24: Interpretación geológica.

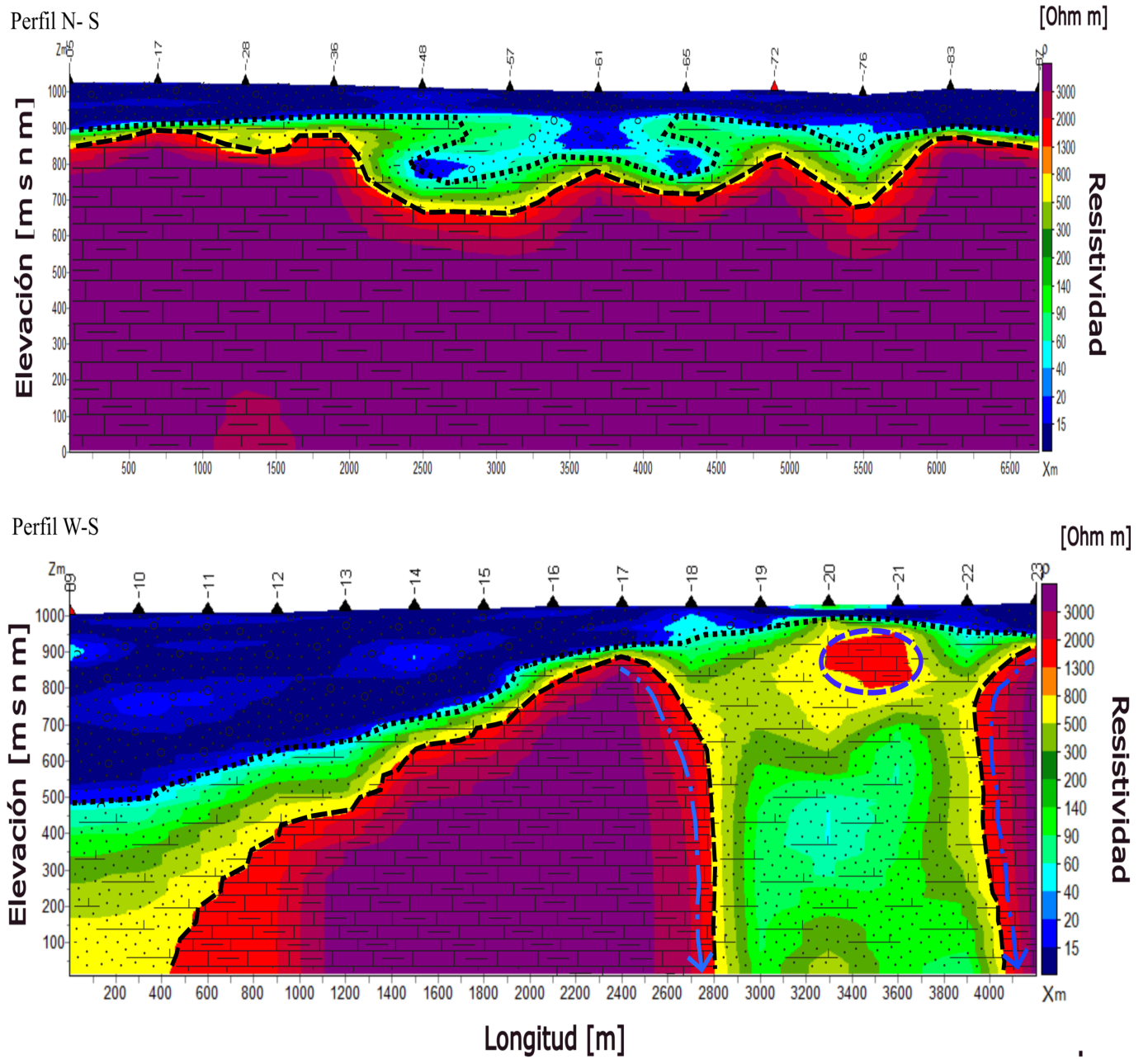


Figura 25: Interpretación con límites y contactos entre capas.

Haciendo el análisis de ambos perfiles se pueden observar claramente las tres capas geoelectricas principales. En el perfil N-S (Figura 25), el cual tiene una longitud de 6.9 kilómetros, se aprecia que la capa predominante es la UG3 la cual es el basamento conformado de calizas, aunque se evidencian variaciones en su elevación desde los 900 hasta los 650 metros. Asimismo, se observa una continuidad lateral de la capa UG1, destacándose la presencia de lentes correspondientes al aluvión a una elevación de 750 metros que interrumpen la continuidad de la capa UG2.

Como se indicó en el mapa de localización de los perfiles (fig. 18), existen dos anticlinales y una falla a una distancia menor a los 2 kilómetros. Con base en la información geológica se infiere que en el perfil W-E (figura 25) debe observarse la influencia de la estructura geológica (anticlinal).

El perfil W-E (Figura 25) cuenta con una longitud de 4.5 kilómetros, identificado por rayas discontinuas negras, se delimita la UG3, la cual estructuralmente presenta el inicio de un anticlinal con longitudes de 500 a 2200 metros con una elevación de 0 hasta 900 metros, para posteriormente mostrar un sinclinal completo, marcado con raya y punto color azul claro, de 2800 a 4200 metros con la misma elevación. Lo anterior con base a las estructuras geológicas que se observan cerca del perfil.

En el perfil W-E con un círculo de color azul se muestra señalado un cuerpo a una elevación de 850 metros aproximadamente el cual tiene las características geoelectricas de la UG3.

En la capa UG1 correspondiente al perfil W-E se observan variaciones de la resistividad que se pueden asociar a cambios en la composición del aluvión.

8. Conclusiones

El área de estudio abarcó 21.7 km^2 la cual está ubicada dentro de la Sierra Madre Oriental, la geología del lugar está compuesta por aluviones, lutitas, calizas y areniscas las cuales de acuerdo a los perfiles geoelectricos fue posible determinar las resistividades correspondientes a las mismas.

La distribución de los sondeos fue adecuada con base en los perfiles geoelectricos y las capas observadas en los mismos, consideramos que el espaciamiento da una resolución lateral adecuada para las estructuras observadas.

De acuerdo con los antecedentes e información adquirida en campo y posteriormente procesada, se realizó lo siguiente:

Construcción de dos perfiles, el primero fue el N-S el cual tuvo una longitud de 6.9 kilómetros en el cual se lograron observar las tres capas geoelectricas, sin embargo, con base en los objetivos de este estudio, no es de utilidad ya que no se define claramente un cuerpo de agua o variaciones de interés hidrogeológico.

El segundo perfil fue el perfil W-E el cual tuvo una longitud de 4.5 kilómetros donde se observaron claramente las 3 capas geoelectricas así como las subunidades de las mismas, también se pueden observar la influencia de las estructuras geológicas (anticlinales) mencionadas en la figura 1. Este perfil tiene una zona de interés hidrogeológico:

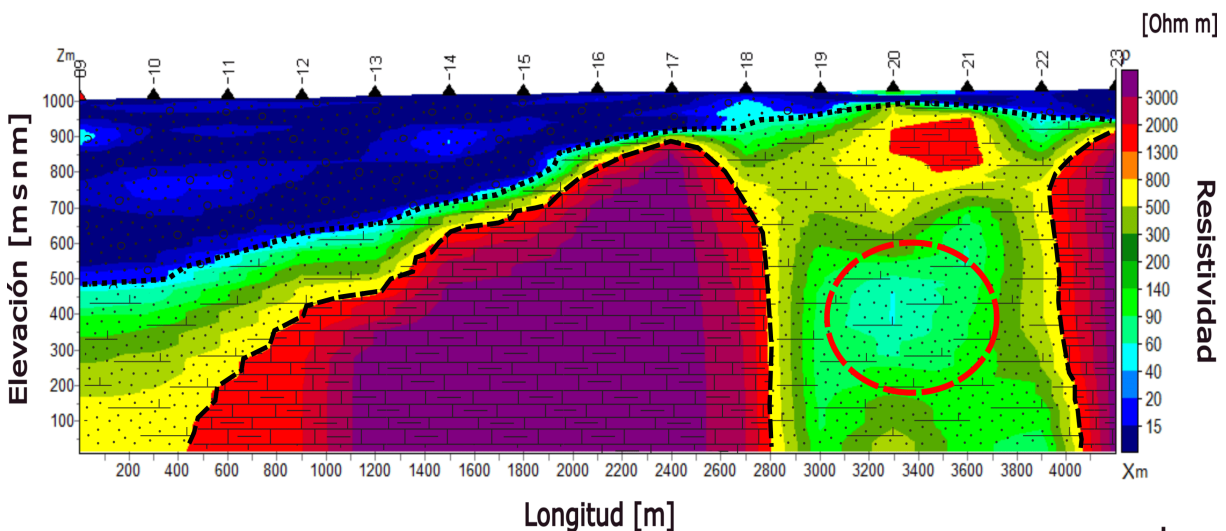


Figura 26: Perfil W-E.

Dentro de este perfil se puede observar variaciones en la composición de la UG1 lo cual podría indicar posiblemente una filtración de agua por lluvias previas.

En la figura 26 de color rojo y en forma de círculo a una distancia de 3,300 metros se puede observar la UG2.A, la cual presenta resistividades de 40 a 80 $[Ohm \cdot m]$ ésta es la

zona de mayor interés ya que como anteriormente se mencionó la capa que la rodea (UG3) estructuralmente forma un sinclinal que funcionaría como capa de baja permeabilidad.

Podría considerarse que el agua se filtraría en la capa UG1, pasar a través de las areniscas si su continuidad y sus propiedades lo permiten donde alrededor de la capa UG3 podría fluir horizontalmente o tendrá una acumulación hasta encontrar una zona de descarga.

Debido a que el método TDEM es un método indirecto, se recomienda incorporar otra técnica de exploración geofísica como la gravimetría, realizar una perforación exploratoria para confirmar dicha inferencia y así discernir entre variaciones de interés o posibles variaciones generadas por la interpretación de los datos.

La información aquí presentada es de gran importancia para la Unidad Minera, ya que, si se realiza un estudio integral hidrogeológico que incluya la correlación de esta información con datos de pozos establecidos y perforaciones cercanas, se obtendrán los elementos necesarios para identificar posibles zonas de saturación; de esta manera, se podrá utilizar la información de forma eficaz.

Con base en los objetivos planteados, podemos afirmar que, mediante el uso del método TDEM, fue posible determinar las resistividades eléctricas de las capas geológicas en los perfiles analizados, así como interpretar sus variaciones. No obstante, esta información por sí sola no permite determinar de manera precisa la presencia y el nivel del manto freático.

En conclusión, la logística de la adquisición de datos fue exitosa, habiéndose seguido un estricto control de calidad para garantizar que los datos obtenidos fueran óptimos para la zona de estudio generando así perfiles con buenos datos para su interpretación.

9. Bibliografía

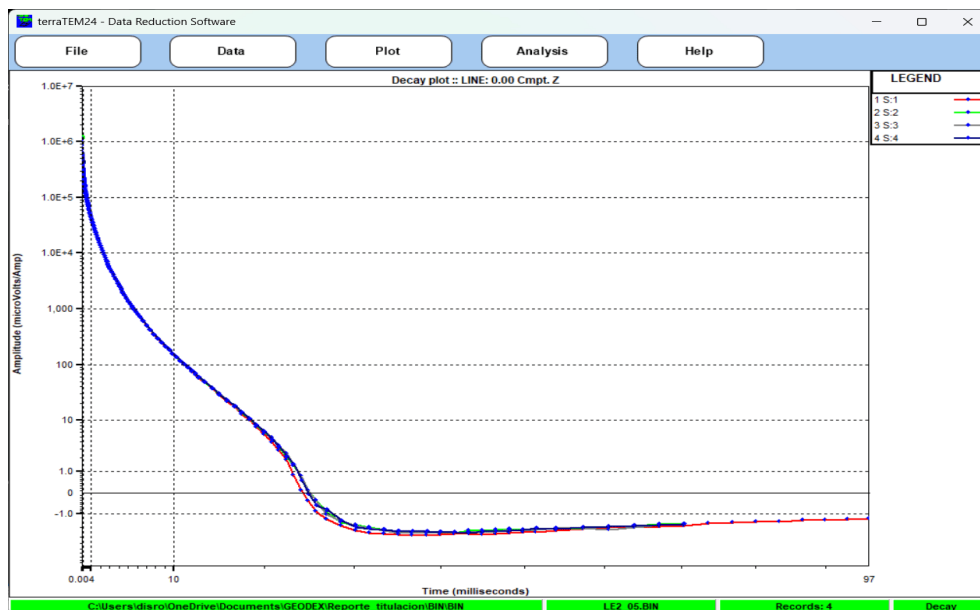
- Benavente, D., González, A. B., & Cañaveras, J. C. (2004). Estudio de propiedades físicas de las rocas. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 12(1), 62–68. <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/25568>
- Canbat Technologies Inc. (2024, October 7). *36V 50Ah lithium battery (LiFePO₄)*. <https://canbat.com/product/36v-50ah-lithium-battery-lifepo4/>
- Carrasquilla, A., Goncalves, A., & Ulugergerli, E. (2007). Evaluating the performance of different geophysical methods for groundwater prospecting in Espírito Santo Basin—Southeast Brazil. *Tecnociencia*, 9, 89–106.
- Cumming, W., & Mackie, R. (2010). Resistivity imaging of geothermal resources using 1D, 2D, and 3D MT inversion and TDEM static shift correction illustrated by a Glass Mountain case history. *Proceedings World Geothermal Congress 2010*.
- Fadillah, T., Sulistijo, B., Notosiswoyo, S., Kristanto, A., & Yushantarti, A. (2015). The resistivity structure of alluvial in geothermal prospect using time domain electromagnetic method (TDEM) survey. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2015*.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall.
- Geophysical Development for Exploration, S.A. de C.V. (2023, July 17). *GEODEX: Improving ground exploration*. <https://www.geodex.com.mx/>
- González-Álvarez, I., Anand, R. R., Hough, R., Salama, W., Laukamp, C., Sweetapple, M., ... Walshe, J. (2014). *Greenfields geochemical exploration in a regolith-dominated terrain: The Albany-Fraser Orogen/Yilgarn Craton margin* (Report No. EP1312271). CSIRO.
- McNeill, J. D. (1994). *Principles and application of time domain electromagnetic techniques for resistivity sounding* (Technical Note TN-27). Geonics Ltd.
- Monex GeoScope Pty Ltd. (2024, September 24). *TerraTEM24 specifications*. <https://www.monexgeoscope.com.au/index.php/terratem24-2/terratem24-specifications/>
- Silva, E. O., & Orellana, E. (1981). *Prospección geoelectrica corriente continua*. Editorial Universitaria.
- Society of Exploration Geophysicists. (1991). *Electromagnetic methods in applied geophysics: Volume 2, application, parts A and B*. Investigations in Geophysics. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802686>
- Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied geophysics* (2nd ed.). Cambridge University Press.

10. Anexos

10.1. Bitácora de adquisición

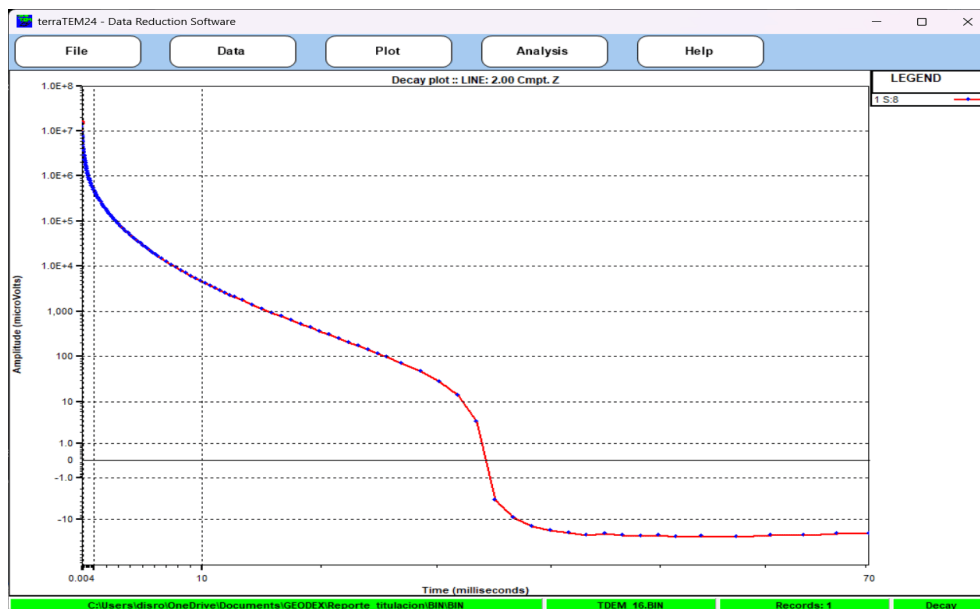
Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	18-10-24
Sondeo	05
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_05
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512



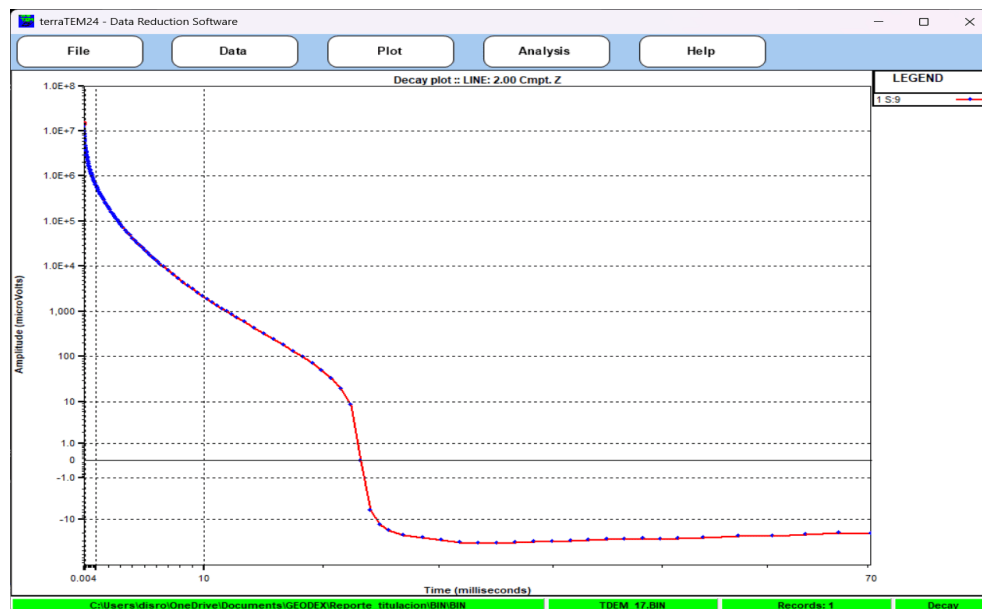
Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	18-10-24
Sondeo	16
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_16
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512



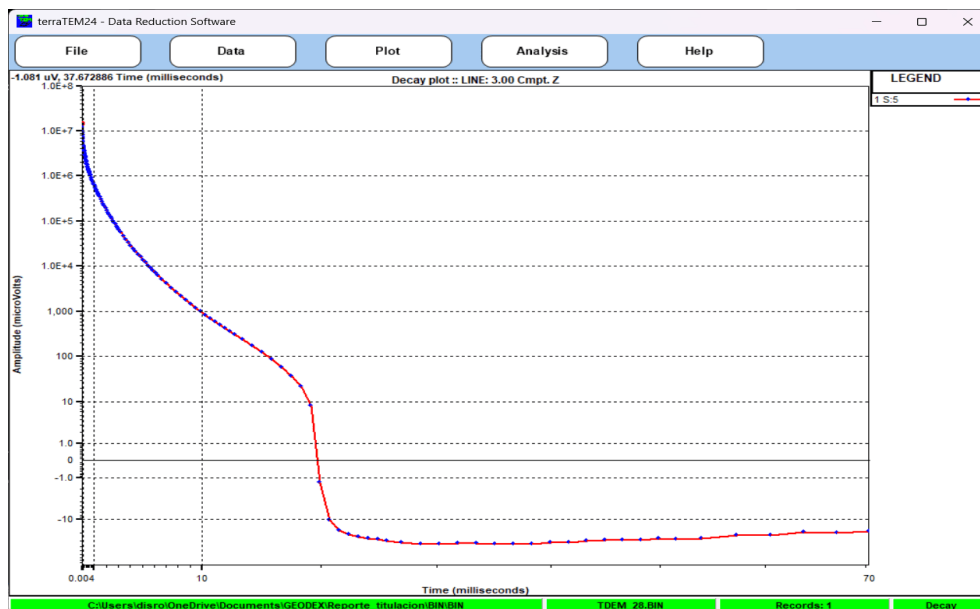
Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	18-10-24
Sondeo	17
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_17
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512



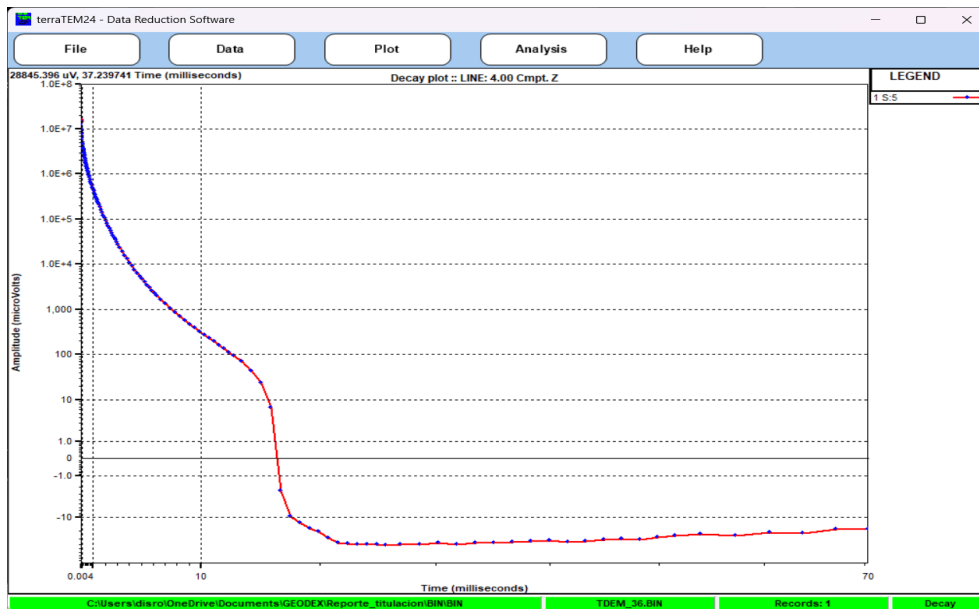
Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	18-10-24
Sondeo	28
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_28
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512



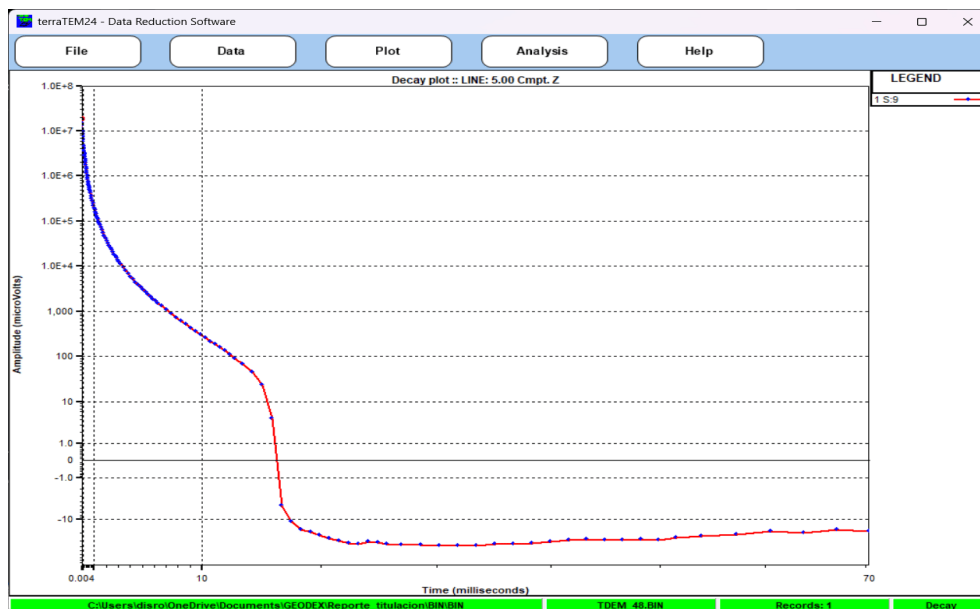
Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	18-10-24
Sondeo	36
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_36
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512



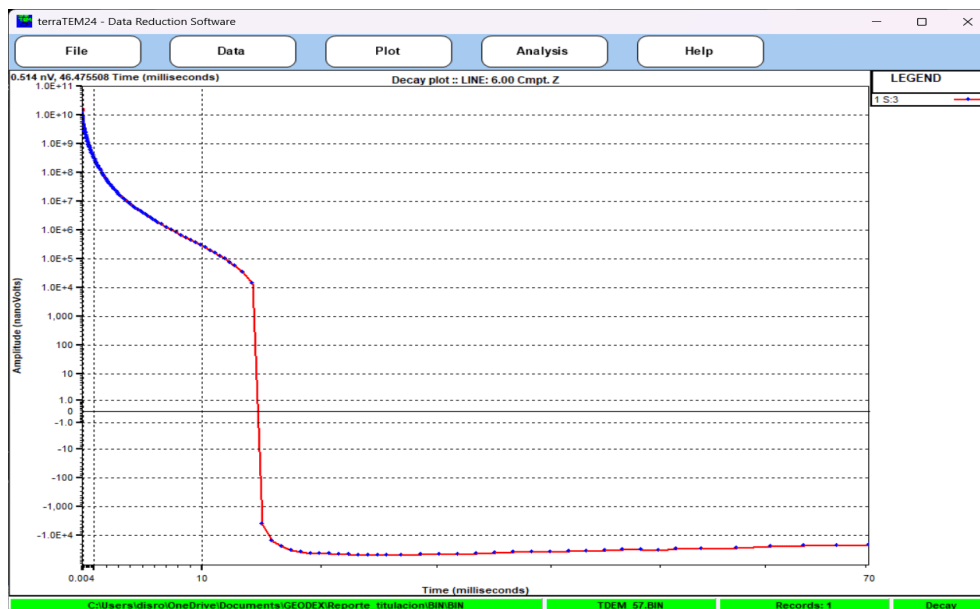
Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	18-10-24
Sondeo	48
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_48
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512



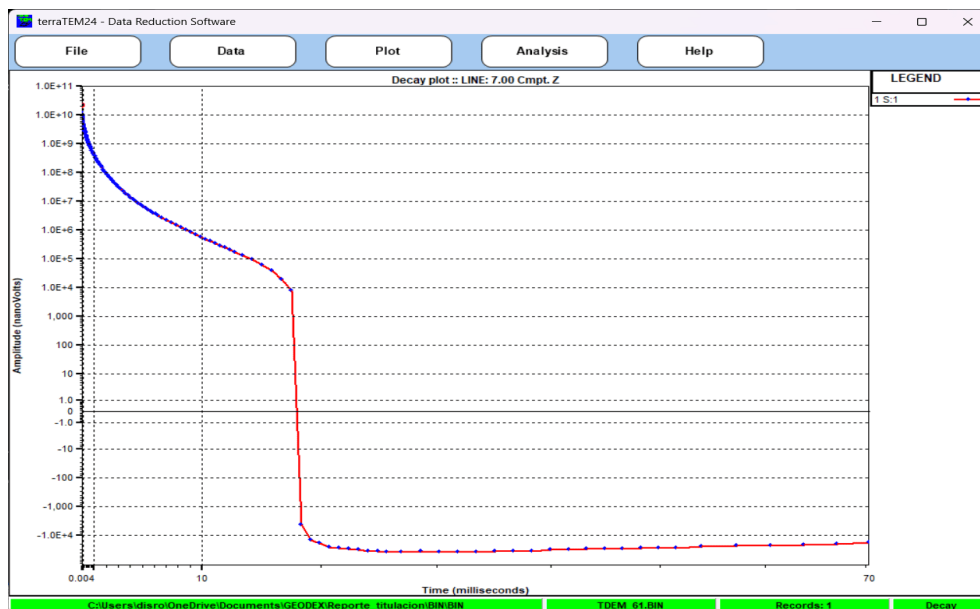
Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	21-10-24
Sondeo	57
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_57
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512



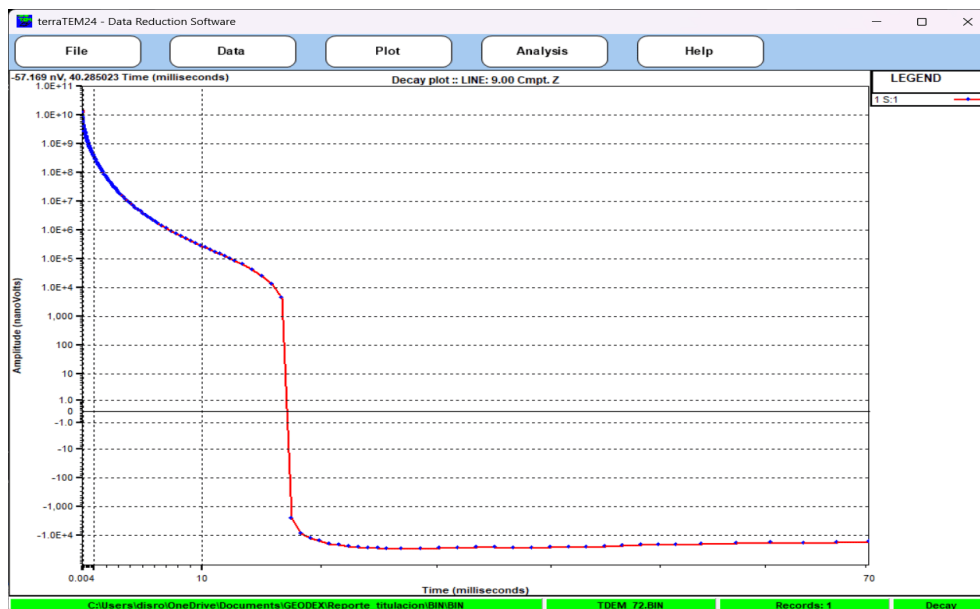
Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	22-10-24
Sondeo	61
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_61
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512



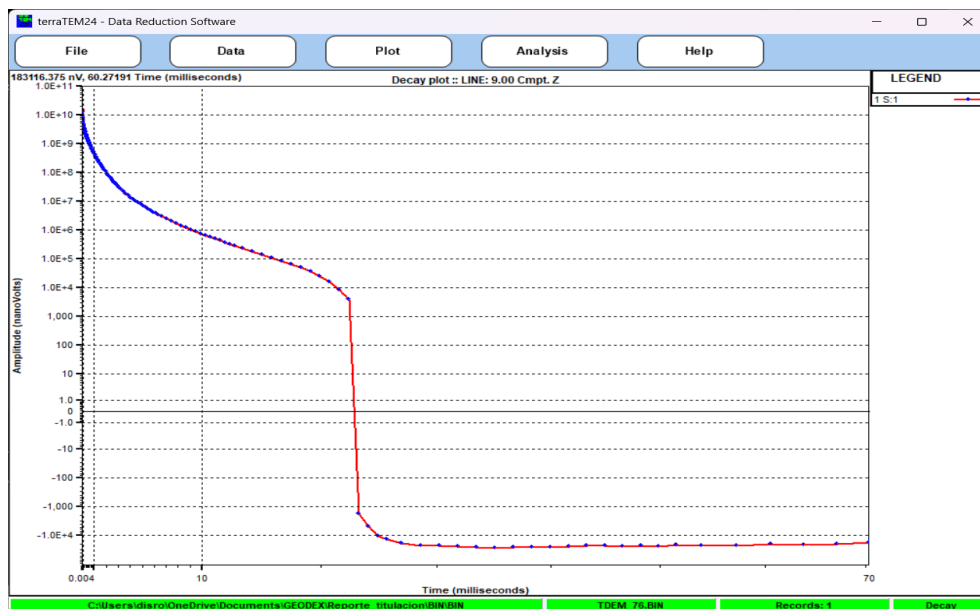
Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	23-10-24
Sondeo	72
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_72
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512



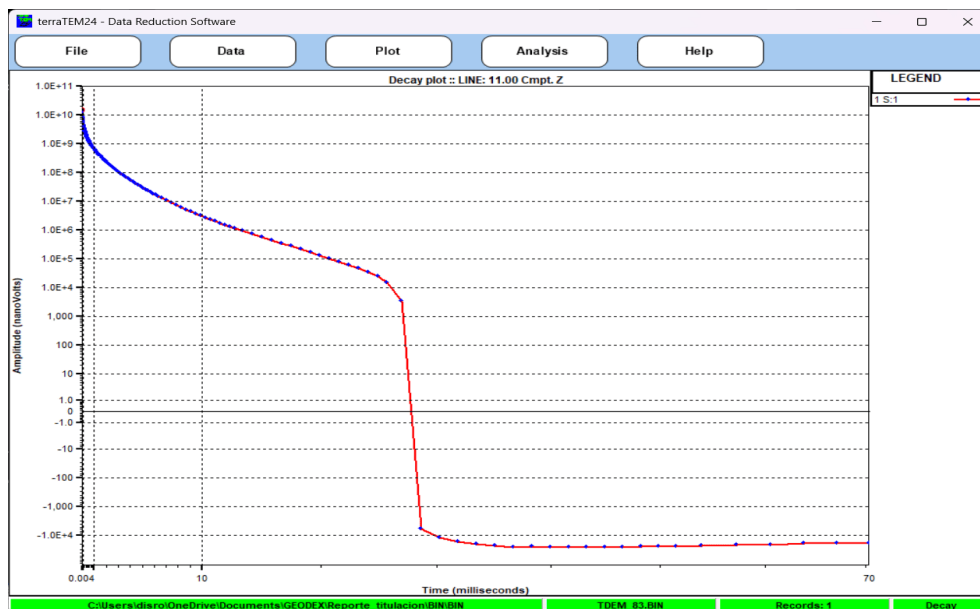
Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	23-10-24
Sondeo	76
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_76
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512



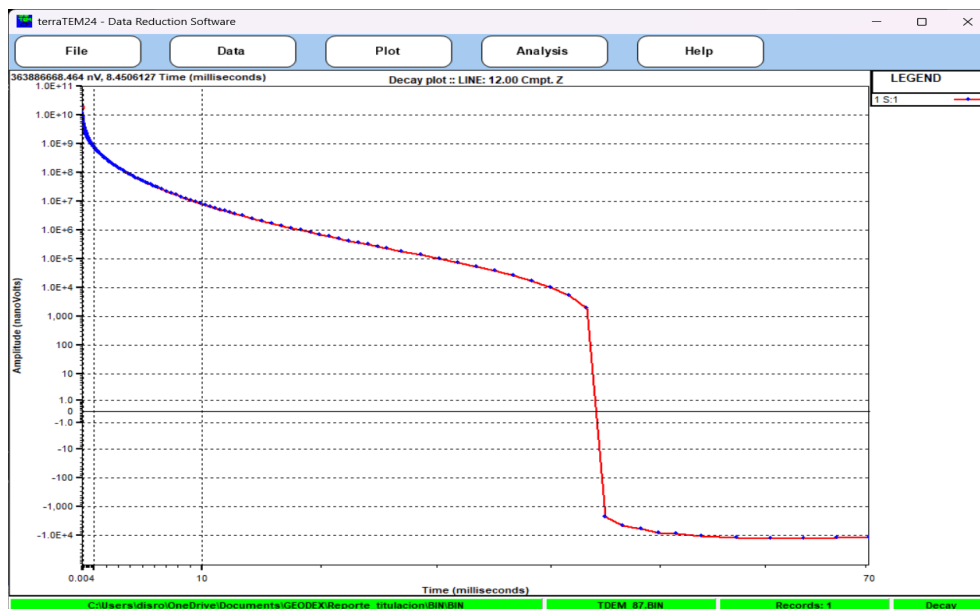
Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	23-10-24
Sondeo	83
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_83
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512



Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	23-10-24
Sondeo	87
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_87
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512



Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	26-10-24
Sondeo	09
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_09
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512



Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	26-10-24
Sondeo	10
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_10
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512



Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	27-10-24
Sondeo	11
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_11
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512



Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	27-10-24
Sondeo	12
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_12
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512, 1024



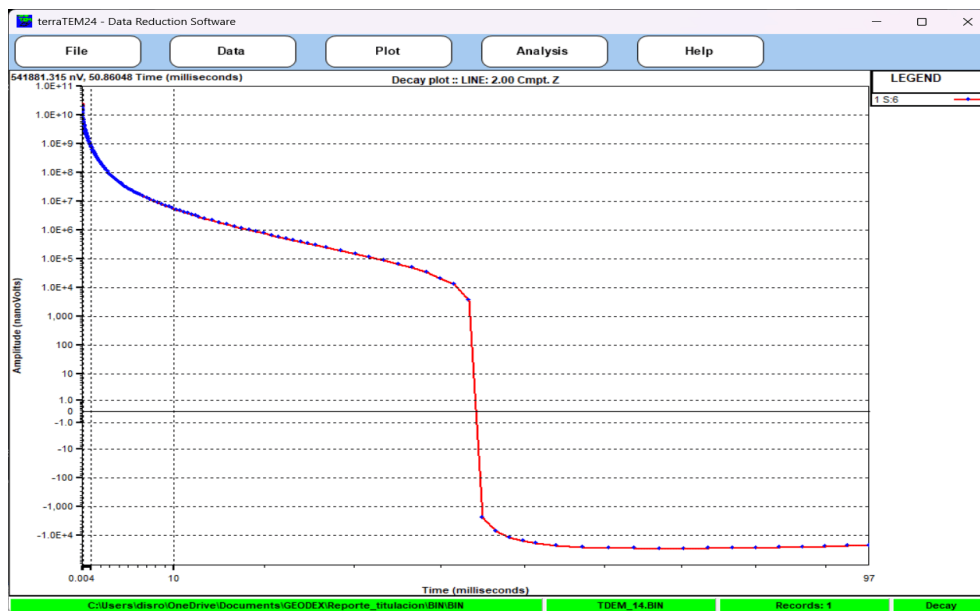
Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	27-10-24
Sondeo	13
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_13
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512



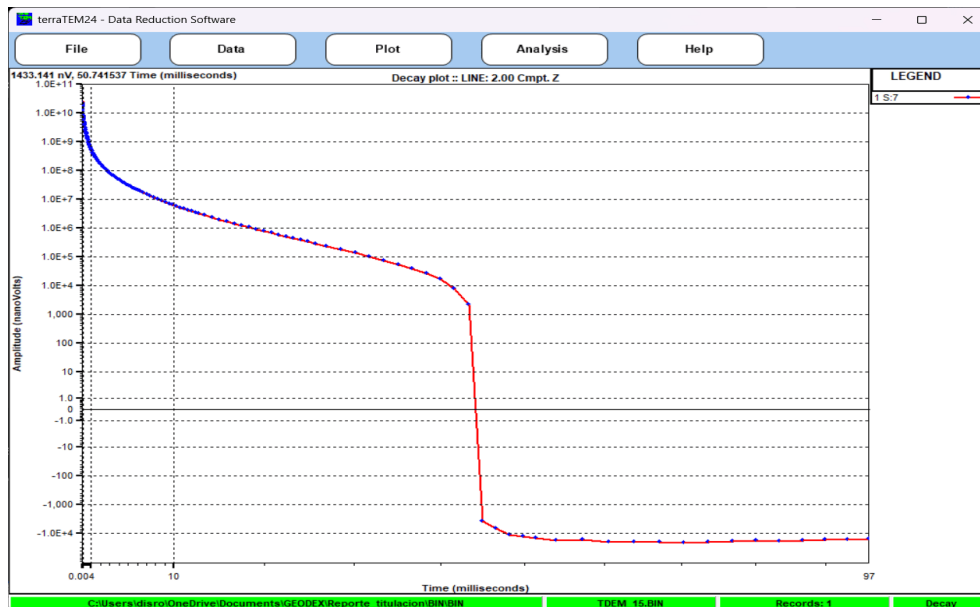
Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	27-10-24
Sondeo	14
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_14
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512



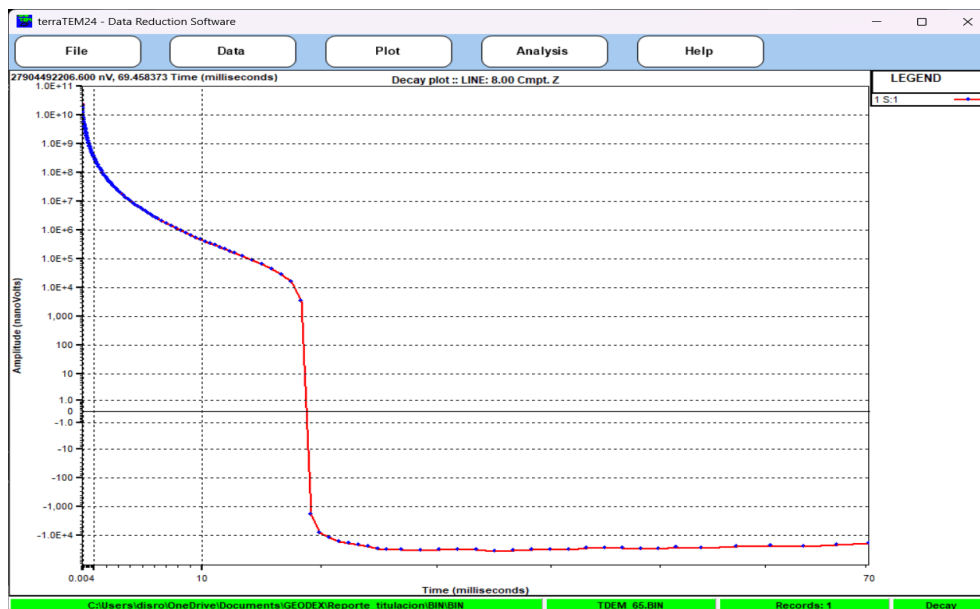
Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	28-10-24
Sondeo	15
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_15
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512



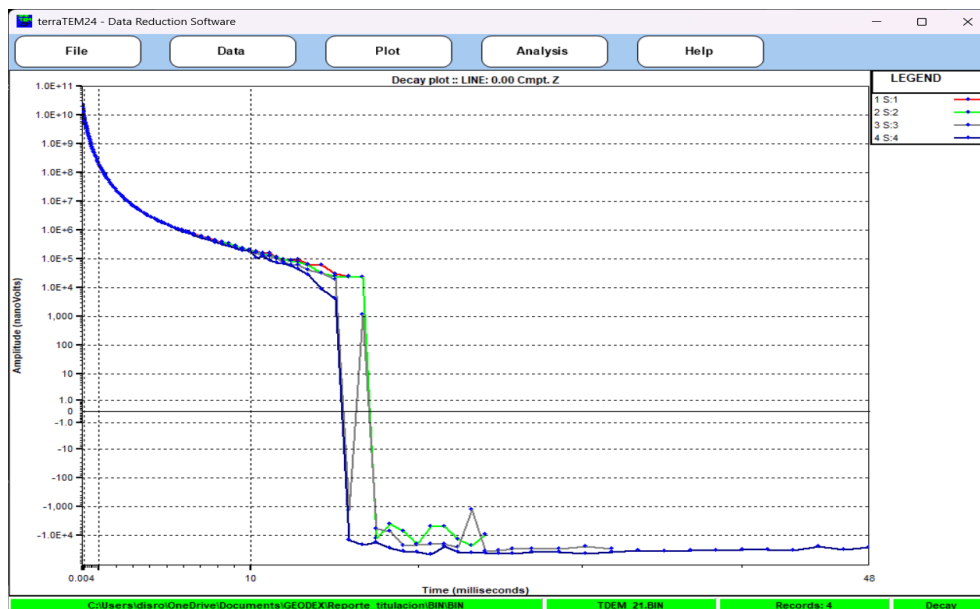
Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	28-10-24
Sondeo	65
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_65
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512



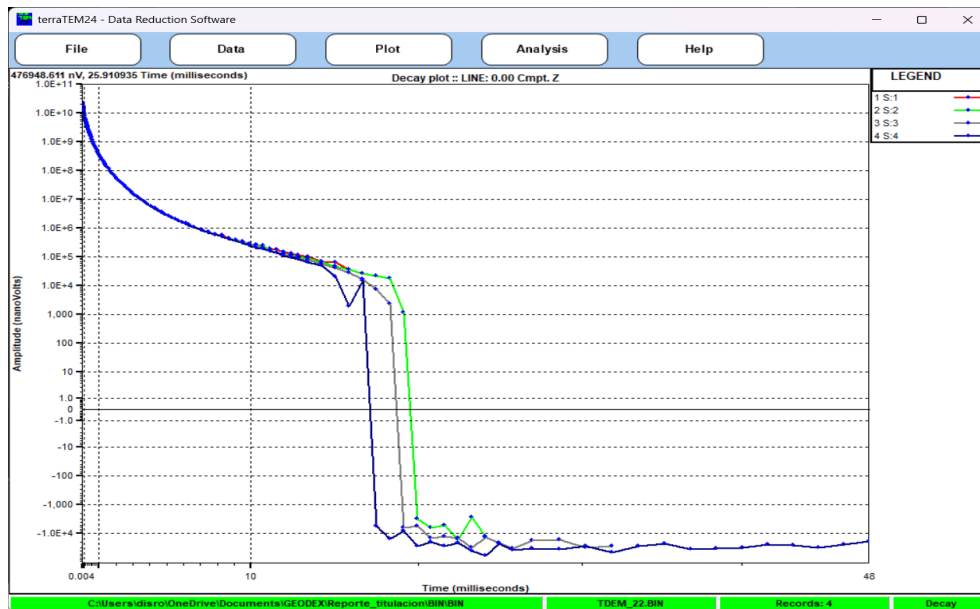
Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	02-11-24
Sondeo	21
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_21
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512, 1024, 2048



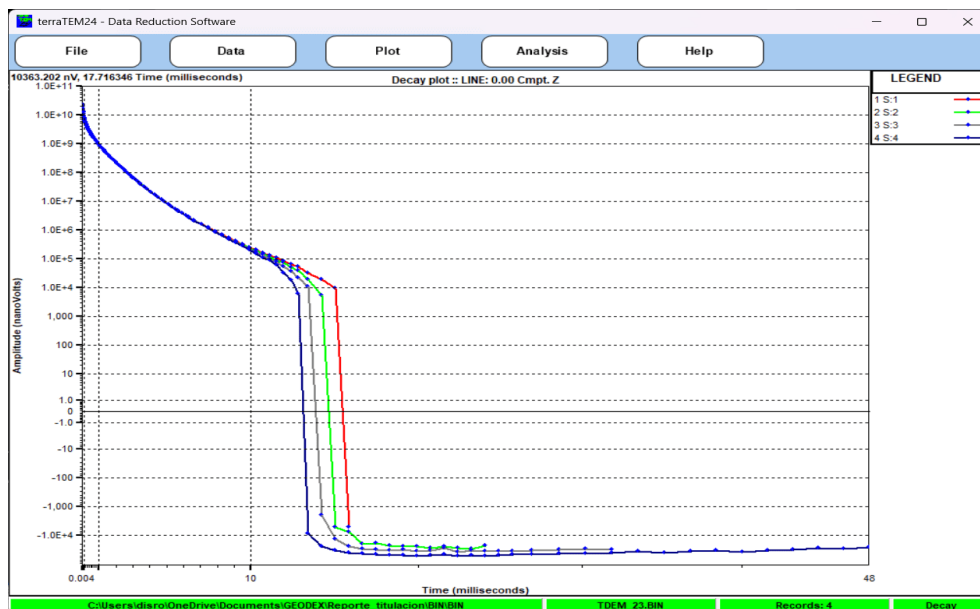
Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	02-11-24
Sondeo	22
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_22
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512, 1024, 2048



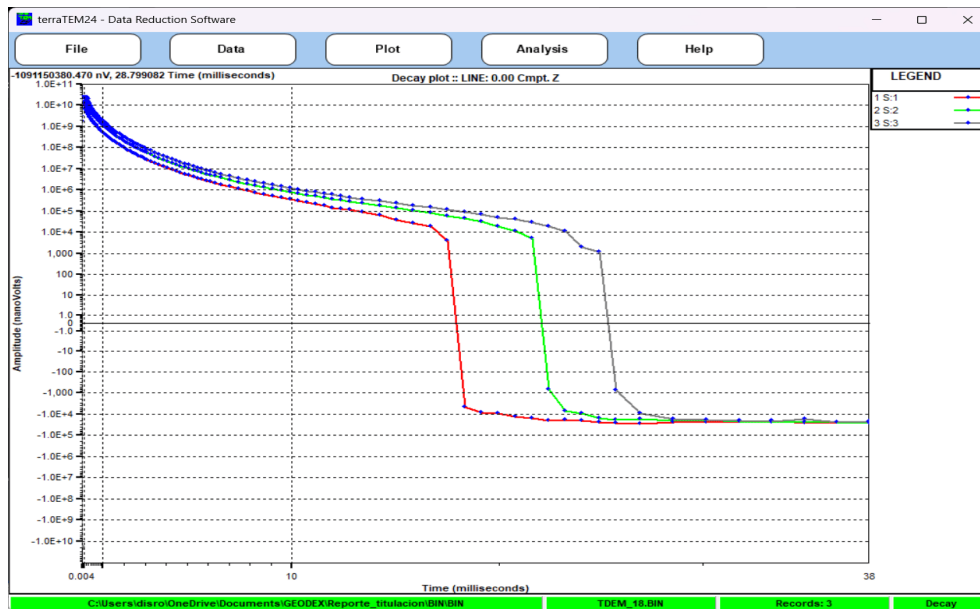
Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	02-11-24
Sondeo	23
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_23
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512, 1024, 2048



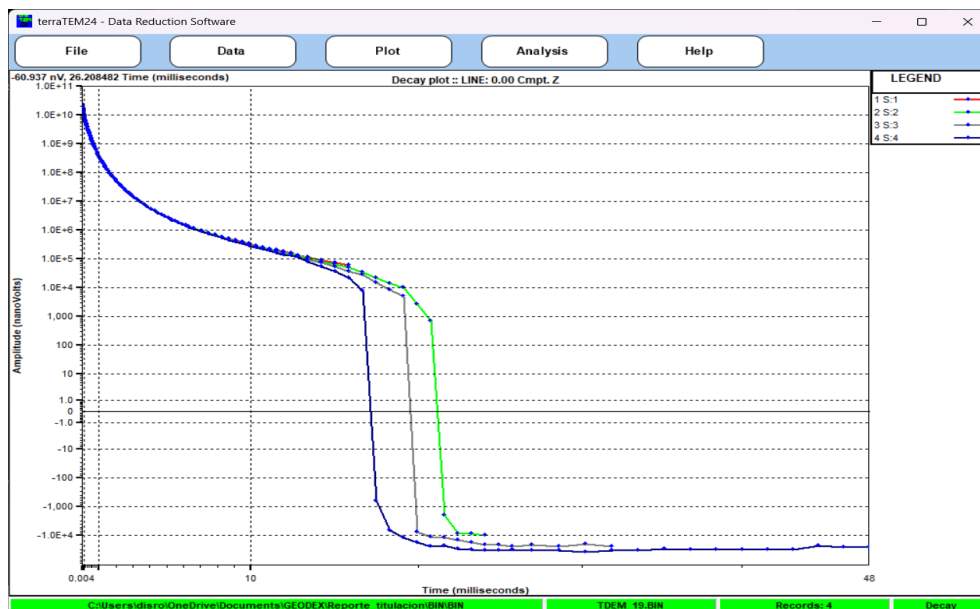
Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	03-11-24
Sondeo	18
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_18
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512, 1024, 2048



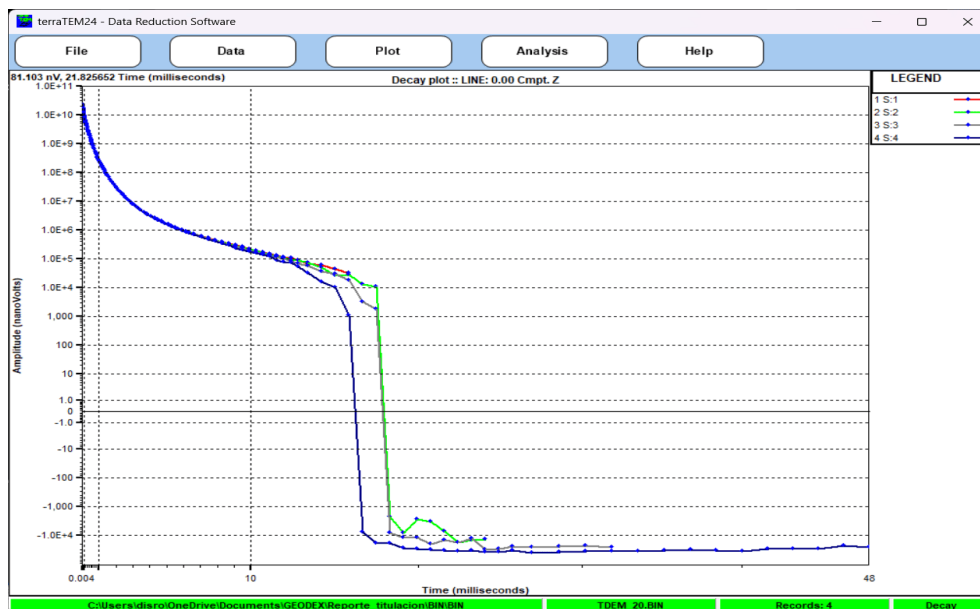
Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	03-11-24
Sondeo	19
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_19
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512, 1024, 2048



Proyecto de exploración geofísica para la Unidad Minera Bitácora de adquisición

Datos de la exploración	
Estado	Coahuila
Elaborado para	Unidad Minera
Fecha	03-11-24
Sondeo	20
Control de calidad	Aprobado
Nombre de archivo	TDEM_20
Formato del archivo	.BIN
Parámetros de adquisición	
Configuración	Single Loop
Tamaño de bobina	300x300
Corriente	>18
Ventanas	>150
Apilamiento	512, 1024, 2048



10.2. Especificaciones TerraTEM24

De acuerdo a la página oficial de Monex GeoScope: La nueva generación terraTEM, el terraTEM24, ha sido diseñada para adquirir datos electromagnéticos transitorios de alta calidad de una amplia variedad de sensores, que van desde sensores inductivos remotos y sensores de campo B hasta configuraciones de bobina simple y bobina coincidente.

El terraTEM24 está disponible como un sistema de 1, 2, 3, 6 o 9 canales de datos. Los datos se registran simultáneamente desde todos los canales. Los convertidores de 24 bits reales y las rutas de señal dedicadas para cada canal aseguran la integridad de los datos.

Los canales tienen protección de voltaje de entrada hasta 700 V y tienen un rango de medición que comienza en +/- 200 V para entradas de bucle coincidente y único, y +/- 20 V para sensores activos. Las etapas de ganancia interna seleccionables por el usuario permiten una mejor resolución de niveles de señal bajos. Esto extiende el rango dinámico del sistema a 198 dB. Cuando se combina con una tasa de muestreo máxima seleccionable por el usuario de 625 kHz y la capacidad de configurarse con o sin un transmisor interno de 6 kW (50 Amp, 120 V), el terraTEM24 es un sistema altamente versátil adecuado para todas las configuraciones TDEM.

Sus especificaciones en cuanto el receptor son las siguientes:

1. Resolución: Resolución real de 24 bits por muestra. La resolución depende de la configuración de ganancia, que puede ser manual o automática. La resolución mínima de un solo punto es de 23 nV.
2. Rango de entrada: El voltaje de entrada máximo medible es de +/- 200V. Todos los canales están equipados con protección de entrada de 700 V.
3. Tasa de muestreo: Seleccionable por el usuario de 78 kHz a 625 kHz a 24 bits completos por muestra. Cada canal tiene una ruta de señal y ADC distintos para minimizar el aplomamiento cruzado. Todos los canales de datos se muestrean simultáneamente.
4. Ventanas: Máximo de 200 ventanas. Esquemas de ventana predefinidos y seleccionables por el usuario disponibles. Junto con los datos de ventana, también se pueden guardar datos de forma de onda completa, lo que permite procesar los sondeos después de la encuesta. Esto permite al usuario cambiar el esquema de ventanas, ajustar los retrasos para diferentes transmisores y receptores externos.
5. Funciones medidas: Tiempos de encendido y apagado del Tx, voltaje de entrada del bucle, resistencias del bucle Tx y, donde corresponda, Rx, forma de onda completa de la corriente del transmisor, respuesta transitoria y muchos más parámetros. Las mediciones de ruido se pueden adquirir con los mismos parámetros que un sondeo para permitir una comparación directa. También están disponibles modos de análisis espectral y osciloscopio
6. Opciones de apilamiento: 1 a 65,536 apilamientos.

7. Ganancia: 1 a 100 y una opción de ganancia automática. Con 24 bits no se requiere una ganancia más alta. Una ganancia de 0.1 está disponible para usar con configuraciones de bucle coincidente o único.

Sus especificaciones en cuanto el transmisor son las siguientes:

1. Corriente de salida: 50 A a 6 V hasta 120 V (6kW) transmisor interno como estándar. También está disponible un transmisor externo opcional, el terraTX-50 (50 A 250 V). Ambas configuraciones de transmisor pueden funcionar con baterías o el rectificador de voltaje Monex GeoScope. La sincronización entre el receptor terraTEM24 y el transmisor externo opcional (terraTX-50) es mediante cable o GPS. También está disponible una sincronización opcional con módulo de cristal. La sincronización con el transmisor interno está integrada en el hardware.
 2. Forma de onda: Forma de onda bipolar con ciclo de trabajo del 50
 3. Tiempo de encendido/apagado: Ajustable de 10 a 2,000 ms de tiempo de encendido/apagado.
 4. Apagado: Depende del transmisor seleccionado. Por ejemplo, un terraTX-50, 10 Amp para 50 m x 50 m, 7.2 microsegundos. 50 Amp para 50 m x 50 m, 36 microsegundos. 33 Amp para 100 m x 100 m, 48 microsegundos. El usuario también puede aumentar la longitud de la rampa desde el mínimo requerido.
 5. Frecuencia de repetición del transmisor: 25 Hz a 0.125 Hz o 40 milisegundos a 8 segundos.
 6. Tamaño del bucle del transmisor (área efectiva): Esto depende de las especificaciones de la encuesta del cliente. El transmisor puede operar en cualquier tamaño/configuración de bucle.
 7. Momentos: Los momentos seleccionables por el usuario están disponibles con el rectificador opcional, lo que permite ajustar la potencia de entrada del bucle en lugar de usar resistencias de carga externas. El usuario puede ajustar con precisión la corriente del transmisor a cualquier valor menor que el máximo de 50 A. Esto puede ser controlado por el receptor terraTEM24 o directamente por el operador.
1. Pantalla: Pantalla táctil capacitiva a color de 10", visible a la luz del día con resolución de 800 x 600.
 2. Almacenamiento: Memoria de 30 GByte con sondeos guardados como estándar apilados y con ventanas junto con la forma de onda completa si es necesario.
 3. Puerto I/O: La transferencia de datos se realiza a través de USB. La conectividad GPS externa se realiza a través de un puerto serie. Todos los puertos del receptor están equipados con puertos RS485 individuales para comunicarse con sensores activos.

4. Software: El paquete de reducción y procesamiento de datos permite el control de calidad de los datos, contorneado, seudosecciones de conductividad aparente, contorneado de datos en cuadrícula y edición de datos. Curvas de respuesta apiladas y agrupadas, formas de onda apiladas con opción de guardar la serie temporal completa, algoritmos de promediado de señales, procesamiento digital de señales, rechazo de sferics y análisis espectral están disponibles. Los datos se pueden ver en varios formatos según las preferencias del usuario. También se incluyen capacidades de trazado de perfiles y decaimiento para la revisión de datos en campo y control de calidad. También está disponible un software opcional de inversión 1D.
5. Temperatura de operación: -20°C a $+50^{\circ}\text{C}$.
6. Carcasa: Carcasa de aluminio resistente.
7. Dimensiones de la carcasa: $46\text{ cm} \times 36\text{ cm} \times 16\text{ cm}$, 10 kg.
8. Maletín de transporte: Se proporciona un maletín de transporte resistente para el campo.
9. Manual: Se proporciona un manual completo de operación y solución de problemas en formato digital.
10. Cargador de batería: Se proporciona un cargador de batería adecuado.
11. Garantía: Un año.