



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Tomografía Eléctrica y Sísmica
como apoyo para la Estabilidad de
un Talud**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de

Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Javier Bravo Flores

ASESORA DE INFORME

Ing. Reyes Pimentel Thalía Alfonsina



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

CONTENIDO

	Página
1. Introducción	1
2. Objetivo General	2
3. Objetivos Particulares	2
4. Antecedentes	3
5. Ubicación de la Zona de Estudio	6
6. Marco Geológico	7
6.1 Análisis Geomorfológico	7
6.2 Estratigrafía	9
7. Desarrollo de los Trabajos de Campo	16
7.1 Volumen de Obra.....	18
8. Métodos Geofísicos Empleados	19
8.1 Tomografía de Resistividad Eléctrica.....	19
8.2 Tomografía de Refracción Sísmica	26
9. Análisis e Interpretación de Resultados	32
10. Conclusiones	46
Anexo 1 Imágenes resultantes de Tomografía de Resistividad Eléctrica	47
Anexo 2 Imágenes resultantes de Tomografía de Refracción Sísmica	51
11. Bibliografía	55

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Zona de estudio, camino de acceso y casa de máquinas de la central hidroeléctrica	2
Figura 2. Esquema donde se muestra la zona de estudio.....	7
Figura 3. Modelo digital de sombras regional en el que sitúa la zona de estudio controlado por el sistema de fallas regional NW-SE.	8
Figura 4. Modelo digital de sombras y mapa de pendientes de la zona de estudio, destacan las geoformas “circos de erosión” delimitadas por los escarpes y lineamientos con actitud NW-SE y NE-SW con dirección preferencial de salida al SE.	9
Figura 5. Columna litológica de la zona de estudio.....	10
Figura 6. Distribución de las líneas de exploración geofísica.....	17
Figura 7. Distribución de los TRE y TRS ejecutados.....	19
Figura 8. Medio por el cual fluye una Corriente eléctrica (I) con un área de sección (A) y longitud (L).....	20

Figura 9. Arreglo lineal de electrodos, ubicado en la superficie del terreno, donde se registran los parámetros geoelectricos	21
Figura 10. Arreglo lineal y simétrico.....	22
Figura 11. Arreglo Wenner, de acuerdo con (Telford, Geldart, Sheriff, 1990)	22
Figura 12. Arreglo Schlumberger, de acuerdo con (Telford, Geldart, Sheriff, 1990).....	23
Figura 13. Arreglo Dipolo – Dipolo, de acuerdo con (Telford, Geldart, Sheriff, 1990)	24
Figura 14. Arreglo Polo – Dipolo, de acuerdo con (Telford, Geldart, Sheriff, 1990).....	24
Figura 15. Ejemplo de un modelo 2D obtenido con la técnica de TRE	26
Figura 16. Diagrama esquemático de la ley de reflexión.	27
Figura 17. Diagrama esquemático de la ley de refracción. Modificado de (Sheriff and Geldart, 1995).....	28
Figura 18. Esquema de adquisición de un TRS.....	29
Figura 19. Sismograma obtenido al efectuar un tendido de 24 geófonos con un tiempo total de registro de 0.1 s.	29
Figura 20. Gráfico de tiempos de arribo contra distancia de cada uno de los puntos de tiro de un tendido sísmico, llamado dromocronas.....	30
Figura 21. Ejemplo de un modelo 2D, obtenido a partir del proceso de inversión de un TRS.....	32
Figura 22. Imagen resultante de la TRE 2, obtenida con la aplicación del software EarthImager 2D.....	33
Figura 23. Resultado de las TRS 7, 8 y 9, ejecutadas en la línea L3, obtenido con la aplicación del software Rayfract.	35
Figura 24. Ripabilidad de distintos macizos rocosos con respecto a su velocidad de onda P	36
Figura 25. Esquema de meteorización del granito.....	38
Figura 26. Secciones LEG 1, LEG 2 y LEG 3	41
Figura 27. Secciones LEG 4 y LEG 5.....	42
Figura 28. Sección LEG 6	43
Figura 29. Modelo Geofísico para la zona de estudio	44

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

	Página
Fotografía 1. Vista de la margen derecha de la central con la identificación de material de azolve.	4
Fotografía 2. Identificación de las tres zonas en donde se presentaron los principales deslizamientos de tierra y roca.....	4
Fotografía 3. Afectaciones originadas en la zona 1	5
Fotografía 4. Afectaciones originadas en la zona 2	5
Fotografía 5. Afectaciones originadas en la zona 3	6
Fotografía 6. Disposición de la roca corneana en la zona de estudio, se observa en contacto discordante con el granito.	11

Fotografía 7. a) Afloramiento de granito-granodiorita de color gris claro, masivo y moderadamente fracturado, lo que ocasiona la formación de bloques inestables. **b)** Granito-granodiorita de color pardo con tonalidad ocre, afectada por un grado de alteración medio y fácilmente deleznable con la pica. 12

Fotografía 8. Secuencia volcánica en contacto discordante con el granito-granodiorita..... 13

Fotografía 9. Aspecto de los diques andesíticos que afectan al granito-granodiorita, que se localizan en los cauces de los arroyos..... 13

Fotografía 10. a) Deposito de talud constituido por material limo-arenoso, así como clastos y bloques de hasta 50 cm. **b)** Vista de los depósitos de talud, donde se observa un gran bloque de riolita. 14

Fotografía 11. Depósitos aluviales, se observan en los cauces de los arroyos y en ambas márgenes del río. 15

Fotografía 12. a) Flujo de detritos depositado en un arroyo, cubriendo parcialmente al granito alterado. **b)** Vista del flujo de detritos cercano a los edificios auxiliares. 15

Fotografía 13. Aspectos de la adquisición de datos de TRE 18

Fotografía 14. Aspectos de la adquisición de datos de TRS 18

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Resumen del volumen de obra ejecutado	18
Tabla 2. Permeabilidad del granito y otros materiales	34
Tabla 3. Clasificación de Weaver para macizos rocosos	37
Tabla 4. Tabla de meteorización del granito.....	37
Tabla 5. Resumen de las unidades geofísicas obtenidas	40

1. Introducción

Derivado de las intensas lluvias en el sitio de estudio se presentaron deslizamientos de roca y tierra, desde las partes altas hacia los caminos de acceso, lo que provoco que se obstaculizaran, por lo cual, fue necesario realizar estudios geotécnicos para la caracterización de las zonas que comprende los deslizamientos, y de esta forma realizar posteriormente obras de contención y mitigación de derrumbes. Entre los trabajos realizados, el área de Exploración Geofísica realizó un estudio de caracterización, empleando las técnicas de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y Tomografía de Refracción Sísmica (TRS), con la finalidad de integrar el modelo geológico-geofísico del sitio.

Los trabajos se desarrollaron en una zona, en donde fueron distribuidas seis líneas de longitud igual a 141 metros, en estas se realizó un total de seis tendidos de TRE y 17 de TRS.

De acuerdo con la correlación de los resultados de TRE, TRS y la información geológica del sitio, se determinaron dos unidades geofísicas U1 y U2 con sus respectivas subunidades U2a, U2b y U2c, en donde U1 se asocia con el suelo residual, depósitos de talud, relleno y/o granito muy alterado, U2a representa al granito fracturado y moderadamente alterado, U2b se relaciona con el granito medianamente fracturado, y por último U2c corresponde con el granito poco fracturado a sano.

Con base en la determinación de unidades geofísicas obtenidas, se considera que la U1 es la que representa a los materiales sueltos en el sitio de estudio y estos presentan un mayor riesgo de deslizamiento, en el camino de acceso hacia casa de máquinas se calculan los máximos espesores de este material sin consolidar. Se observaron anomalías geofísicas principalmente en las subunidades U2a y U2b, que indican cambios súbitos en las propiedades geoelectricas y sísmicas del medio, los cuales podrían asociarse a la presencia de estructuras geológicas, cambios litológicos en el subsuelo y/o mayor o menor proporción de materiales alterados y fracturados.

En el presente informe de actividades profesionales se describen los trabajos geofísicos realizados como apoyo para la definición del diseño de obras civiles contra futuros deslizamientos de material en la zona de estudio.

En la **Figura 1** se muestra el sitio de estudio que corresponde con las inmediaciones de una central hidroeléctrica, así mismo, se observan los caminos de acceso que se vieron afectados por los deslizamientos de roca y tierra.

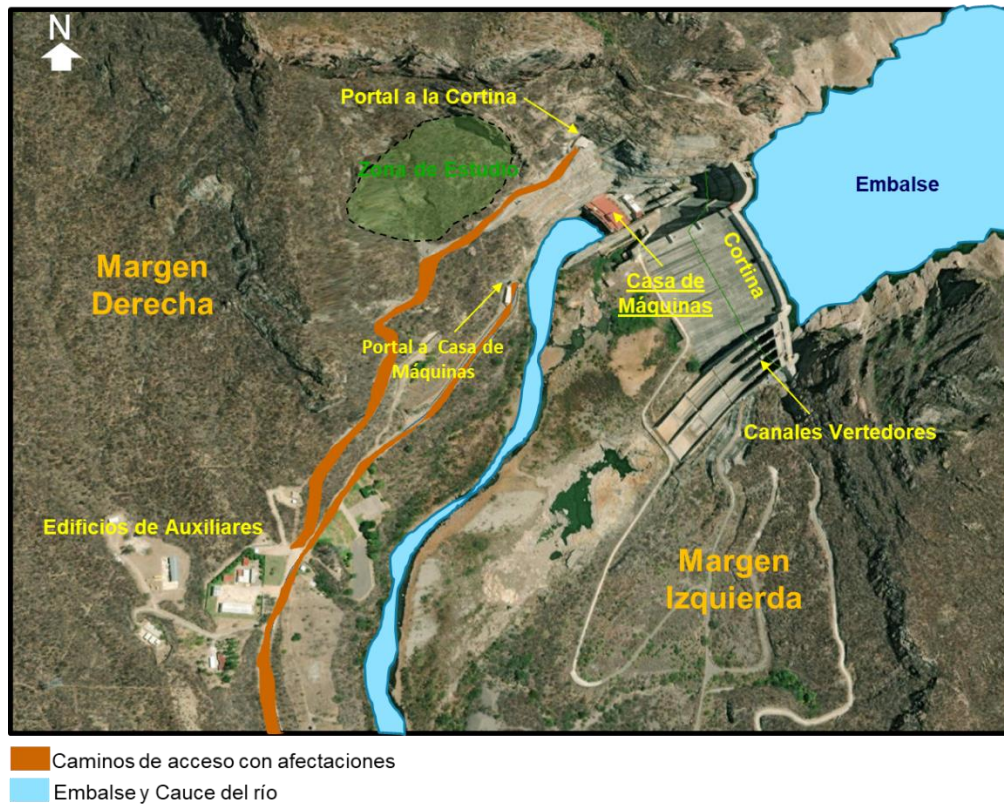


Figura 1. Zona de estudio, camino de acceso y casa de máquinas de la central hidroeléctrica

2. Objetivo General

Realizar el Estudio de Caracterización Geofísica en la zona de estudio, aplicando las técnicas de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y Tomografía de Refracción Sísmica (TRS) con la finalidad de determinar la distribución de los valores de resistividad eléctrica y velocidad de onda compresional (V_p), que permita definir el modelo geofísico del subsuelo.

3. Objetivos Particulares

- Definir con tomografía de resistividad eléctrica variaciones laterales y/o verticales de resistividad que puedan indicar cambios litológicos, presencia de fallas, fracturas, así como, alteración en los materiales del subsuelo.
- Determinar mediante la tomografía de refracción sísmica los espesores de material no consolidado, roca fracturada y roca alterada.

4. Antecedentes

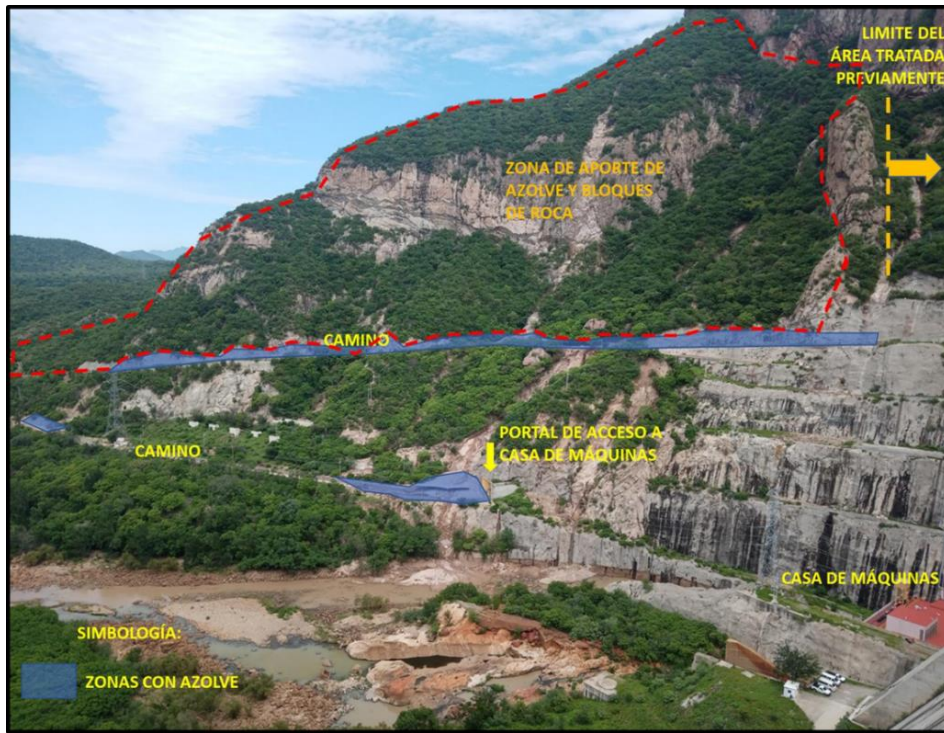
Durante el mes de julio del presente año en la zona de estudio, se presentaron deslizamientos en la margen derecha aguas abajo respecto de la cortina de una Central Hidroeléctrica (CH), estos deslizamientos fueron generados por las intensas lluvias que acontecieron en esta región, provocando el cierre parcial del camino de acceso a la Cortina y a la Casa de Máquinas.

En este sentido, se realizó un estudio geofísico necesario para la caracterización del sitio en donde se presentaron dichos deslizamientos, con la finalidad de apoyar al área de Ingeniería Civil encargada de realizar el diseño y construcción de las obras de contención que permitan mitigar riesgos durante la operación de la Central.

En este contexto, el área de Exploración Geofísica, realizó un Estudio de Caracterización Geofísica, en el cual se emplearon las técnicas de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y Tomografía de Refracción Sísmica (TRS), con las cuales se determinó la distribución de los valores de resistividad eléctrica y velocidad de onda compresional en el subsuelo, permitiendo definir el modelo geofísico en el sitio de estudio.

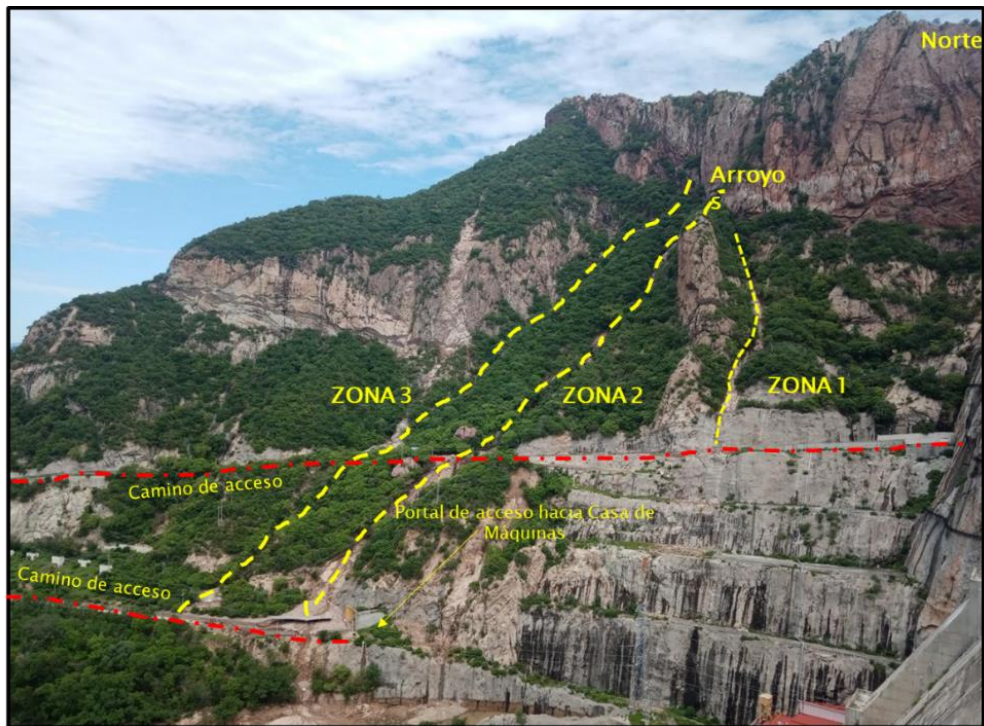
Derivado de lo anterior, en el presente informe de actividades profesionales describo los trabajos de campo y actividades de gabinete desarrollados, que corresponde a la adquisición; procesamiento; análisis, interpretación y elaboración de resultados de la caracterización geofísica en donde fui participe.

En la **Fotografía 1** se muestra la margen derecha, de la central hidroeléctrica, en donde se pueden observar los caminos de acceso y sitios en donde se encontró la principal acumulación de los materiales de azolve.



Fotografía 1. Margen derecha de la central con la identificación de material de azolve.

En la **Fotografía 2** se aprecian las tres principales zonas en donde se presentaron deslizamientos de roca y tierra, hacia los caminos de acceso.



Fotografía 2. Identificación de las tres zonas en donde se presentaron los principales deslizamientos de tierra y roca.

En las **Fotografías 3, 4 y 5**, se observan las zonas 1, 2 y 3, respectivamente, en donde se presentaron los deslizamientos de roca y tierra.



Fotografía 3. Afectaciones originadas en la zona 1



Fotografía 4. Afectaciones originadas en la zona 2

La zona 3 fue la que presento mayores afectaciones derivado de los deslizamientos de tierra y roca.



Fotografía 5. Afectaciones originadas en la zona 3

5. Ubicación de la Zona de Estudio

El sitio de estudio se ubica en la margen derecha de un embalse artificial construido sobre el cauce de un río, con el propósito de captación de agua como medio para el control de avenidas y para utilizarla en riego y generación de energía eléctrica, el embalse normal, de la presa en cuestión, es de aproximadamente 2,900 millones de metros cúbicos de agua, consta de una cortina de concreto convencional, con 166 m de altura y 426 m de

longitud de corona, obra de control, excedencias y desagüe de fondo. Tiene una capacidad aproximada de almacenamiento de 4,500 millones de m³ y genera 3,696 millones de GWh/año. La central hidroeléctrica se conforma por la obra de toma, dos tuberías a presión de 7.8 m de diámetro interior y casa de máquinas tipo exterior, localizada en la margen derecha del cauce, donde se alojan dos turbinas. Hacia el NW de la casa de máquinas, en la margen derecha, se encuentra la zona de estudio en donde se llevó a cabo la exploración geofísica, obsérvese la **Figura 2**.



Figura 2. Esquema donde se muestra la zona de estudio.

6. Marco Geológico

6.1 Análisis Geomorfológico

Fisiográficamente el sitio de estudio se localiza en la provincia Sierra Madre Occidental en la subprovincia Sierras de Pie de Monte (Raisz, 1959). El sitio se caracteriza por pendientes abruptas y escarpadas, así como zonas de pie de monte; estructuralmente la zona está controlada por fallas regionales de rumbo NW-SE, que delimitan bloques que forman fosas y pilares; asimismo, el cauce del río es dislocado por lineamientos con dirección NW-SE y N-S, véase la **Figura 3**. Las laderas de ambas márgenes del río están constituidas litológicamente por un intrusivo granítico y una secuencia volcánica de composición riolítica.

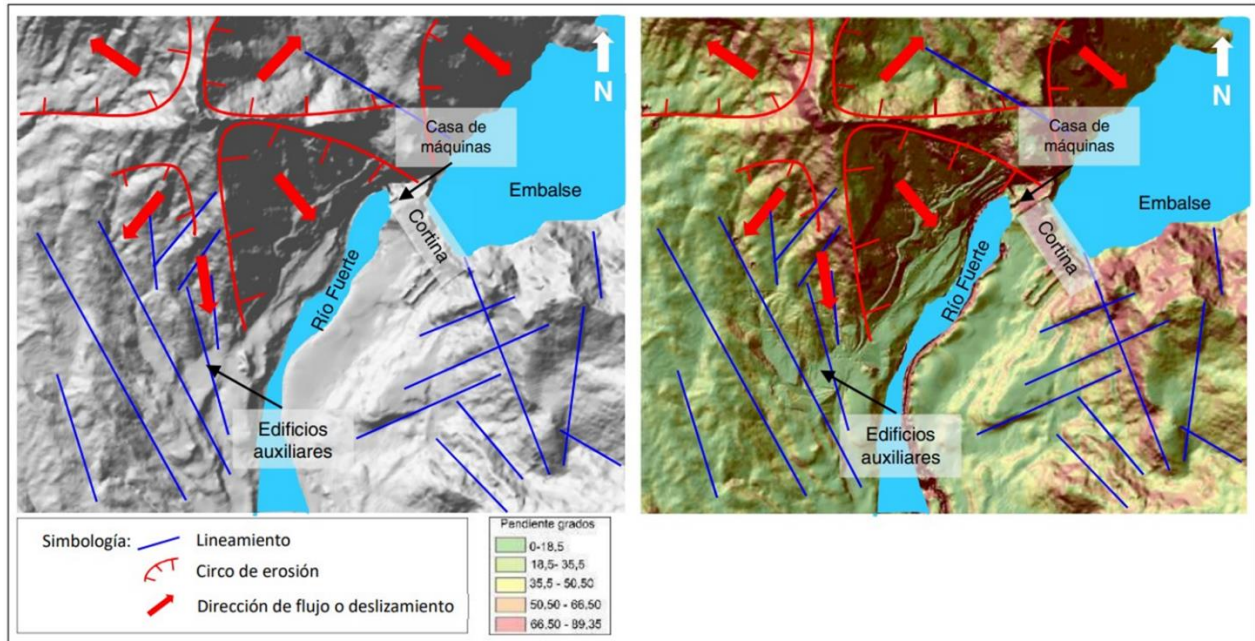


Figura 4. Modelo digital de sombras y mapa de pendientes de la zona de estudio, destacan las geoformas “circos de erosión” delimitadas por los escarpes y lineamientos con actitud NW-SE y NE-SW con dirección preferencial de salida al SE.

6.2 Estratigrafía

Las unidades litológicas expuestas en la zona de estudio consisten en rocas corneanas (Ksc) que se asocian a metamorfismo de contacto, roca granítica-granodiorítica (Tsgr) y una secuencia volcánica (Ts-to), estas unidades están afectadas por diques andesíticos; cubriendo parcialmente a estas rocas se encuentran los depósitos no consolidados, obsérvese la **Figura 5**. A continuación, se hace la descripción de las unidades litológicas que se encuentran en la zona de estudio.

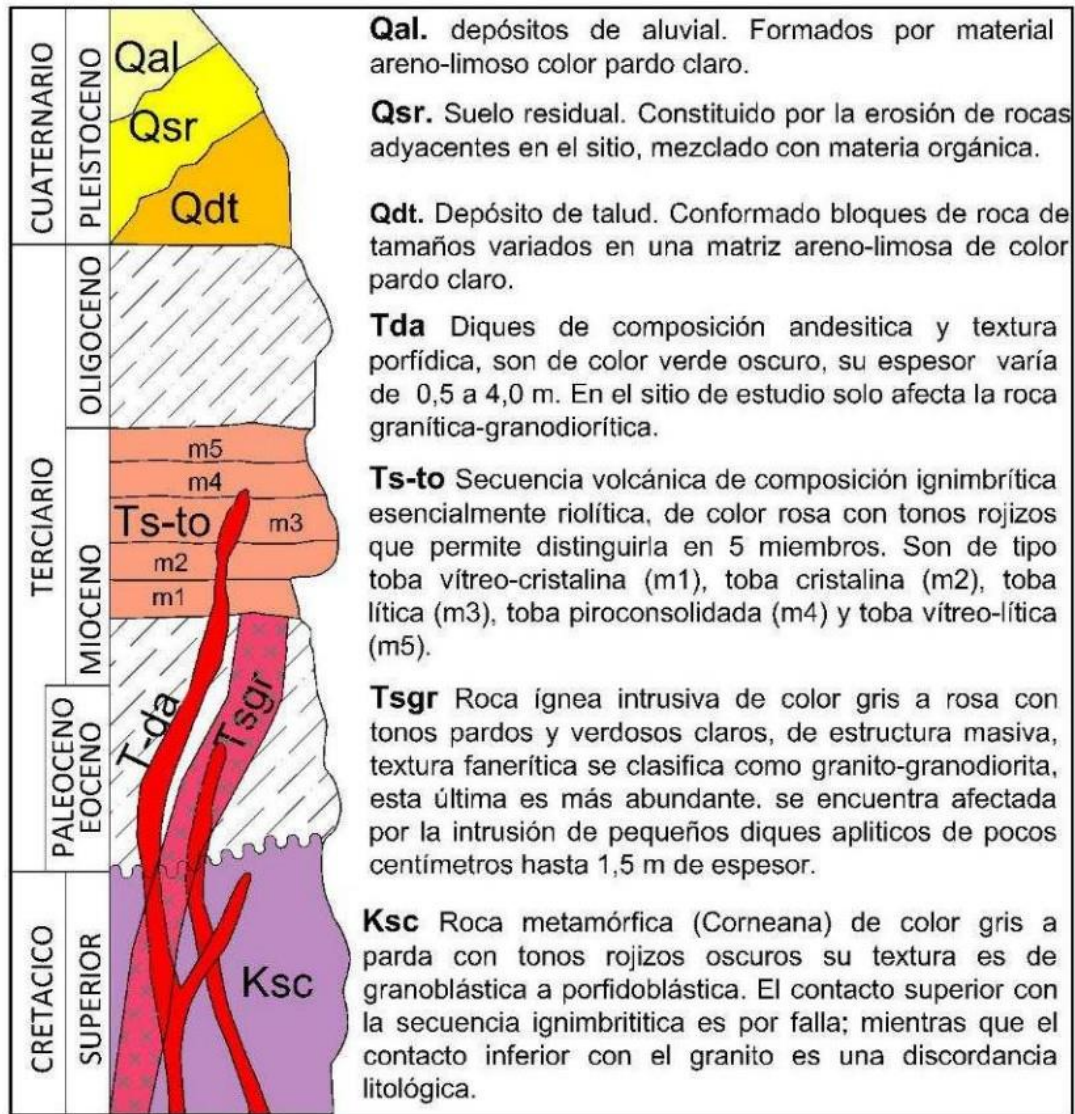


Figura 5. Columna litológica de la zona de estudio.

Corneana (Ksc)

Su origen se debe a que cuando las masas ígneas intrusivas interactúan con una roca previa, se produce una transformación física y química de la misma como consecuencia, principalmente, de las altas temperaturas de aquellas masas, dando origen a un nuevo tipo de roca, el Hornfels o Corneana (Encyclopædia Britannica, 1911)

En la región Este y NW de la cortina de la central se encuentran andesitas de edad Jurásico Superior a Cretácico Superior, la cual en la zona de estudio fue intrusionada por el granito-granodiorita y genero metamorfismo de contacto que origino la roca corneana, esta roca se caracteriza por un color gris a pardo con tonalidad rojiza debido a la oxidación por hematita que la afecta, es de estructura compacta, de alta resistencia al impacto del

martillo, de densidad alta, afectada por un fracturamiento de grado bajo; de textura granoblástica a porfidoblástica.

En la zona de estudio se encuentra en contacto discordante con el granito-granodiorita, **Fotografía 6**. Se distribuye principalmente en los cantiles de la porción Norte y noroeste del eje de cortina de la central.



Fotografía 6. Disposición de la roca corneana en la zona de estudio, se observa en contacto discordante con el granito.

Granito-Granodiorita (Tsgr)

Se presenta como un gran cuerpo intrusivo, los principales afloramientos se localizan en los arroyos y en los cortes de los caminos de acceso que se localizan al Este, noreste y sureste del eje de cortina, es la unidad litológica de mayor distribución en el área de estudio, formando grandes cantiles.

Es una roca de color gris claro a blanco con tonalidad rosada en muestra sana, adquiere una tonalidad pardo-ocre debido al intemperismo, de estructura masiva, compacta, afectada por intemperismo esferoidal dando origen a “tecatas”, es de resistencia media a alta al impacto del martillo de geólogo (**Fotografía 7a**); de textura fanerítica, se observan minerales de cuarzo, feldespatos, anfíboles y piroxenos.

La roca afectada por intemperismo, oxidación y argilización, ocasiona la formación de materiales areno-limosos y areno-arcillosos poco consolidados, fácilmente deleznable con la pica, pero aún conserva la estructura original de la roca (**Fotografía 7b**). Esta roca es intrusada por diques andesíticos de color gris oscuro.



Fotografía 7. a) Afloramiento de granito-granodiorita de color gris claro, masivo y moderadamente fracturado, lo que ocasiona la formación de bloques inestables. **b)** Granito-granodiorita de color pardo con tonalidad ocre, afectada por un grado de alteración medio y fácilmente deleznable con la pica.

Secuencia Volcánica (Ts-to)

Está constituida por una potente secuencia ignimbrítica de composición riolítica, en la zona de estudio aflora al Norte y noroeste de la cortina de la central, formando grandes cantiles como el cantil Cara del Indio.

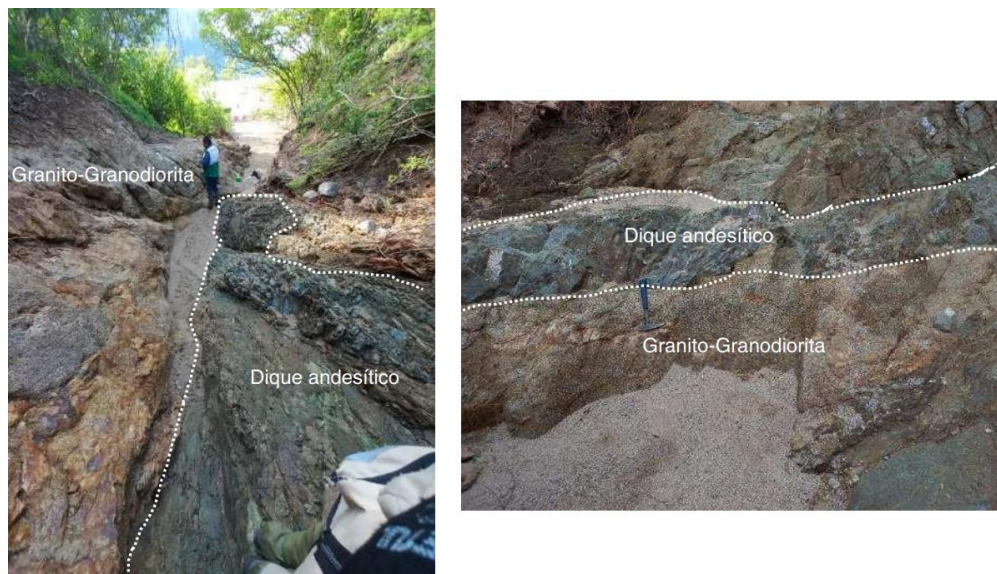
Esta secuencia es de color rosado a blanquecino con tonalidad rojiza y parda, es de estructura semicompacta a compacta, de estratificación gruesa a masiva, de resistencia media a alta al impacto del martillo de geólogo, presenta variaciones texturales y mineralógicas por lo que se observan tobas vítreas, tobas cristalinas y tobas líticas de composición riolítica., en la zona de estudio se observa en contacto discordante con el granito-granodiorita (**Fotografía 8**). Esta roca es afectada por diques andesíticos de color gris oscuro.



Fotografía 8. Secuencia volcánica en contacto discordante con el granito-granodiorita.

Diques andesíticos (Tda)

Son cuerpos intrusivos discordantes que atraviesan a las litologías anteriormente descritas, se presentan como cuerpos tabulares con espesor de unos cuantos centímetros hasta 1,50 m, la roca es de color gris oscuro en muestra sana, al intemperismo adquiere una tonalidad parda y verdosa, de estructura compacta, masiva, de resistencia alta a media al impacto del martillo y están afectados por un fracturamiento de grado medio a bajo (**Fotografía 9**); son de textura porfídica, constituidos por plagioclasas y ferromagnesianos.



Fotografía 9. Aspecto de los diques andesíticos que afectan al granito-granodiorita, que se localizan en los cauces de los arroyos.

Depósitos no consolidados

Depósito de talud (Qdt)

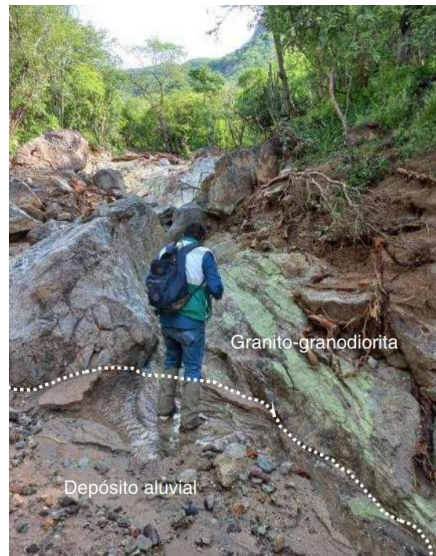
Es producto del transporte y acumulación de materiales por procesos geológicos gravitacionales, presenta un color pardo, constituido por material limo-arenoso y clastos con tamaños máximos de 20,0 cm de formas angulosas a subredondeadas, así como grandes bloques de diversa composición con tamaños máximos de 9,0 m, en algunas ocasiones estos materiales se encuentran semiconsolidados dándole un grado de consistencia medio en estado seco. Este depósito tiene un espesor variable que va de 2,0 a 16,0 m (**Fotografía 10**).



Fotografía 10. a) Depósito de talud constituido por material limo-arenoso, así como clastos y bloques de hasta 50 cm. b) Vista de los depósitos de talud, donde se observa un gran bloque de riolita.

Depósito aluvial (Qal)

Se encuentran en los cauces de los arroyos y en ambas márgenes del río, son producto de la erosión y arrastre de la corriente (**Fotografía 11**), está constituido principalmente por materiales areno-limoso de color pardo, así como cantos rodados y bloques principalmente de composición granítica y riolítica de formas subredondeadas a subangulosas, con tamaños máximos de 50,0 cm.



Fotografía 11. Depósitos aluviales, se observan en los cauces de los arroyos y en ambas márgenes del río.

Flujo de Detritos o Escombros

Este depósito se generó debido a las lluvias extraordinarias que se presentaron en la zona y que saturaron el suelo; generando una mezcla de sedimentos mal clasificados y gran contenido de agua que provocó la formación de lodo, acompañado de grandes bloques de roca con tamaños máximos de 9,0 m y vegetación, que se desplazó pendiente abajo principalmente sobre los cauces de los arroyos y escurrimientos, cubriendo parcialmente el camino de acceso a casa de máquinas, cortina y que afectó las instalaciones de casa de máquinas y edificios auxiliares (**Fotografía 12**).



Fotografía 12. a) Flujo de detritos depositado en un arroyo, cubriendo parcialmente al granito alterado. b) Vista del flujo de detritos cercano a los edificios auxiliares.

7. Desarrollo de los Trabajos de Campo

Previo al inicio de los trabajos geofísicos se realizó, el trazo, marcado y levantamiento topográfico del perfil del terreno de seis secciones, para el estudio geofísico, las cuales fueron de 141 metros de longitud. El marcado físico se realizó a cada 3 metros, colocando estacas de madera y donde no fue posible por el tipo de suelo, se realizaron marcas con pintura en color naranja, rotulando el nombre de la línea y cadenamiento. Simultáneamente a esta actividad se fueron tomando puntos sobre el eje de la línea tomando en cuenta cambios de pendiente del terreno, de esta manera se aseguró representar fielmente el terreno de cada una.

La actividad en campo se realizó por medio de equipo GNSS, utilizando la técnica de posicionamiento “RTK”, la cual se basa en la solución de la portadora de las señales transmitidas por los GNSS. Una estación de referencia provee correcciones instantáneas para estaciones móviles. La estación base retransmite la fase de la portadora que midió, y las unidades móviles comparan sus propias medidas de la fase con la recibida de la estación de referencia. Esto permite que las estaciones móviles calculen sus posiciones relativas con precisión milimétrica, al mismo tiempo en que sus posiciones relativas absolutas son relacionadas con las coordenadas de la estación base.

El sitio de estudio corresponde a la ladera ubicada en la margen derecha aguas abajo respecto a la cortina de la Central, en esta margen se localiza el camino de acceso a la cortina, el cual fue afectado por los deslizamientos de los taludes inestables. Para realizar la caracterización de esta zona, se ejecutó exploración geofísica de la siguiente forma: Se realizaron seis Líneas de Exploración Geofísica (LEG) denominadas como: L1; L2; L3; L4; L5 y L6, de las cuales cuatro son paralelas al camino y dos perpendiculares al mismo; todas ellas conservaron una longitud de 141 metros. En la **Figura 6**, se muestran las líneas de exploración con relación a la cortina de la presa.

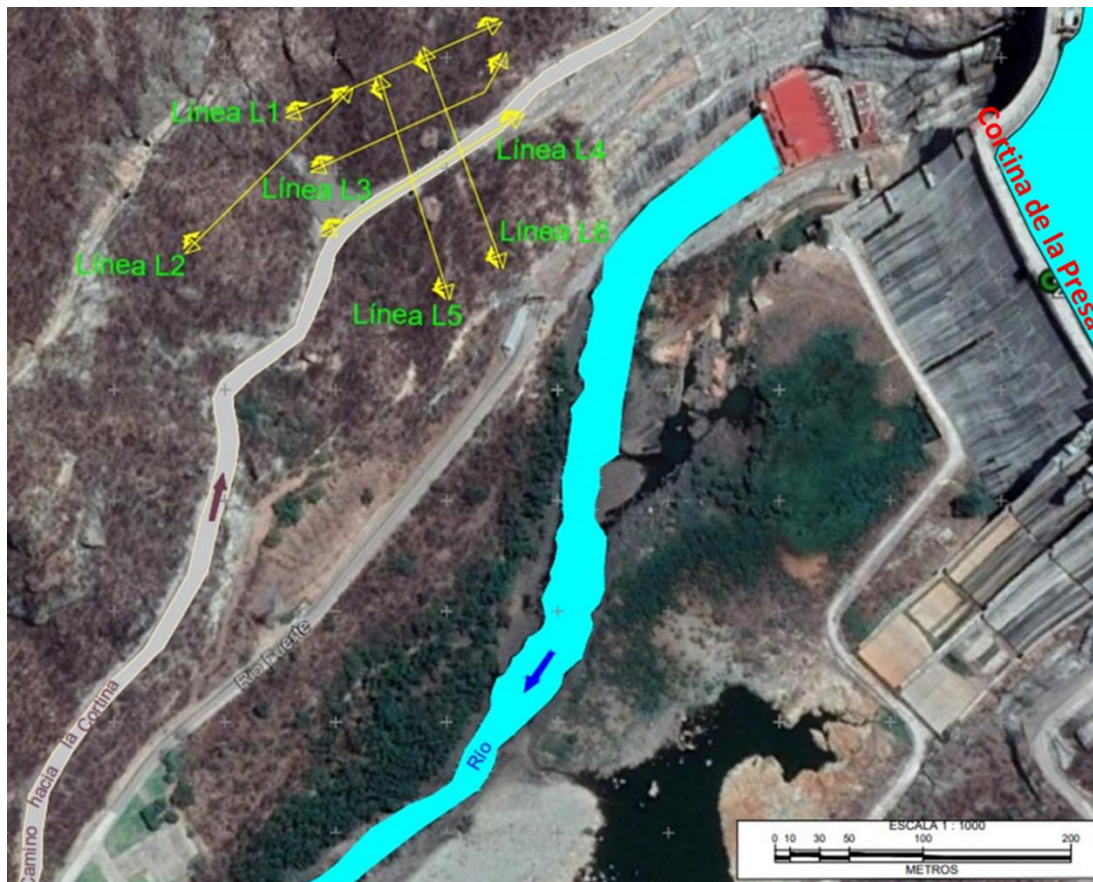


Figura 6. Distribución de las líneas de exploración geofísica

En cada una de las LEG's se llevaron a cabo tendidos de TRE y TRS, en el caso de los tendidos de TRE se emplearon 48 electrodos con separación entre ellos de tres metros, cubriendo una longitud de 141 metros, con los cuales se alcanzó una profundidad de exploración aproximada de 23 metros, considerando la configuración tipo Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo; así mismo, para la adquisición de datos se utilizó un resistímetro marca Ares I de GF Instruments y cables pasivos que fueron controlados mediante el Switch Box.

En lo relativo a los tendidos de TRS, estos tuvieron una longitud de 46 y 69 metros, con lo que fue posible alcanzar una profundidad de exploración de 10 a 15 metros. La separación entre geófonos fue de 2 y 3 metros contemplando 9 Puntos de Tiro (PT). Para la adquisición de datos se utilizó un sismógrafo marca SmartSeis de Geometrics y geófonos de 28 Hz de componente vertical; así mismo, para la generación de ondas sísmicas en cada PT se utilizó un marro de 26 lb y una placa metálica. En la **Fotografía 13** y **14**, se muestran algunos aspectos de la adquisición de datos de TRE y TRS respectivamente.



Fotografía 13. Aspectos de la adquisición de datos de TRE



Fotografía 14. Aspectos de la adquisición de datos de TRS

7.1 Volumen de Obra

A partir de los trabajos de campo ejecutados en cada una de las LEG se tiene un volumen de obra de seis tendidos de TRE y 17 de TRS, distribuidos como se indica en la **Tabla 1** y se muestran en la **Figura 7**.

Tabla 1. Resumen del volumen de obra ejecutado

Línea de exploración	Nombre de TRE	Nombre de TRS
L1	TRE 1	TRS 1, 2, 3
L2	TRE 2	TRS 4, 5, 6
L3	TRE 3	TRS 7, 8, 9
L4	TRE 4	TRS 10, 11
L5	TRE 5	TRS 12, 13, 14
L6	TRE 6	TRS 15, 16, 17
Total	6	17

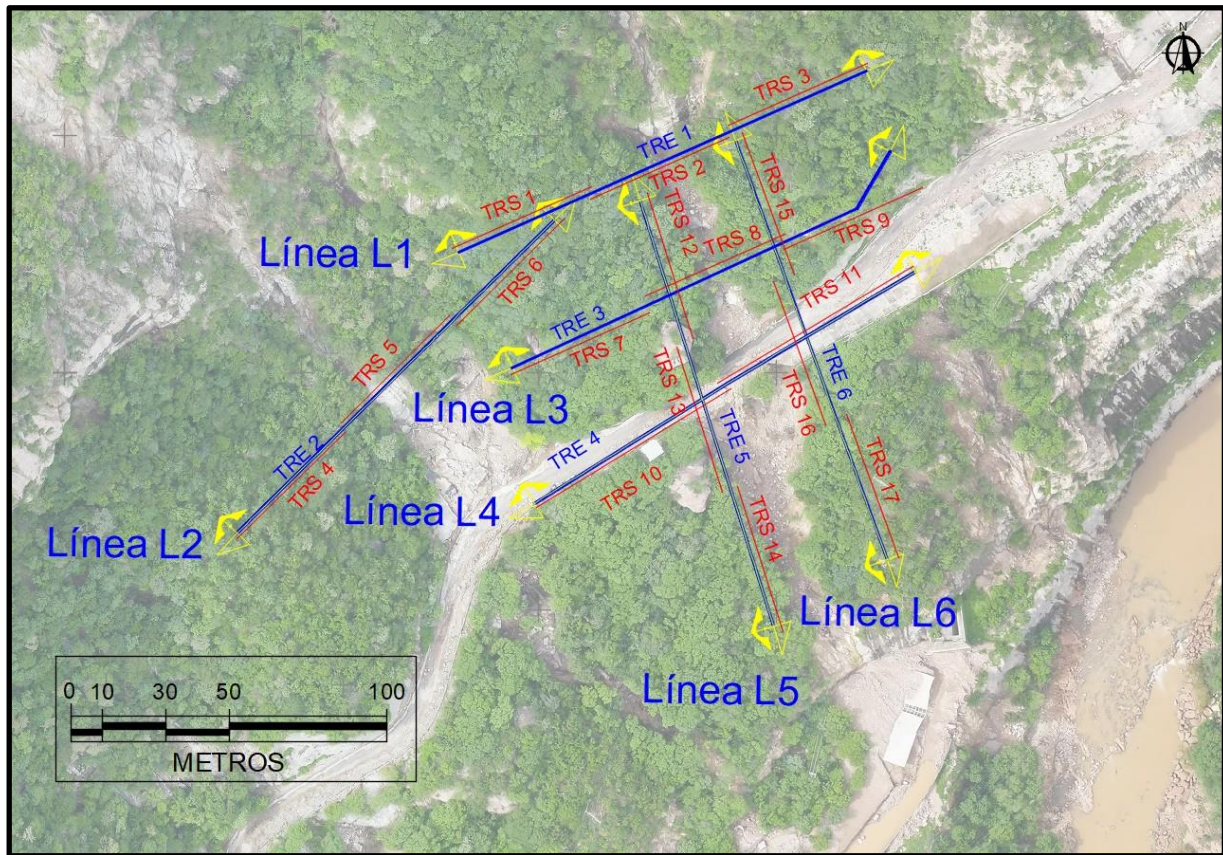


Figura 7. Distribución de los TRE y TRS ejecutados

8. Métodos Geofísicos Empleados

8.1 Tomografía de Resistividad Eléctrica

Fundamentos Teóricos

Resistencia Eléctrica y Resistividad Eléctrica

La resistencia eléctrica se puede definir como la oposición a que fluya la corriente eléctrica a través de un medio, considerando que la resistencia eléctrica es inversamente proporcional al área de su sección A y directamente proporcional a su longitud L , véase la Figura 8. Con lo anterior, se tiene que la resistencia eléctrica a través de un material estará dada por la siguiente expresión:

$$R = \rho \frac{L}{A} \dots\dots\dots (1)$$

donde la constante (ρ) se define como resistividad y es un parámetro característico para cada material. (Tippens, 2011)

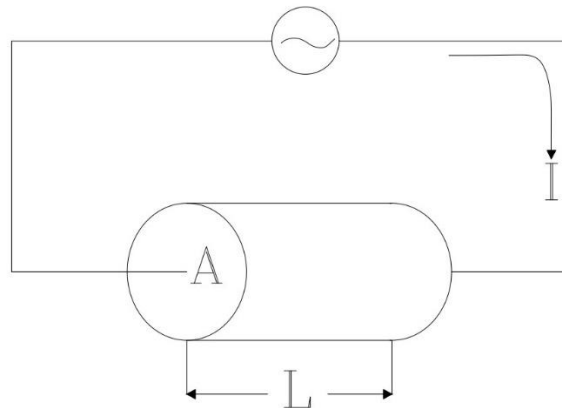


Figura 8. Medio por el cual fluye una Corriente eléctrica (I) con un área de sección (A) y longitud (L).

De acuerdo a la Ley de Ohm, la corriente que circula por un conductor dado es directamente proporcional a la diferencia de potencial entre sus puntos extremos e inversamente proporcional a la corriente que circula a través del cuerpo, por lo cual, la resistencia también se puede expresar de la siguiente forma:

$$R = \frac{V}{I} \dots\dots\dots (2)$$

Igualando las expresiones (1) y (2) y despejando la resistividad, tenemos:

$$\rho = \frac{V \cdot A}{I \cdot L} \dots\dots\dots (3)$$

cuyas unidades en el Sistema Internacional estarán dadas en Ωm . Por lo tanto, la resistividad se define como la medida de la oposición al paso de la corriente eléctrica a través de un material determinado, así mismo como la facilidad de permitir el paso a la corriente, resultando así el concepto de conductividad eléctrica (σ), con unidades en el Sistema Internacional de *Siemens/m* y que, expresado numéricamente, resultará ser el inverso de la resistividad (Orellana, 1982), es decir:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \dots\dots\dots (4)$$

Método de Tomografía de Resistividad Eléctrica

Los arreglos lineales de tomografía de resistividad eléctrica se utilizan para obtener de manera indirecta los valores de resistividad eléctrica del subsuelo, por lo cual, se emplea un flujo de energía eléctrica a través de dos electrodos (A y B), los cuales inyectan al subsuelo la corriente (I), cuyo campo eléctrico es medido por la diferencia de potencial (ΔV), con otros dos electrodos (M y N). La relación entre las variables I , ΔV , considerando

una constante geométrica del arreglo (K), constituye el parámetro conocido como resistividad aparente (ρ_a), la cual, se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\rho_a = \frac{\Delta V}{I} K \quad \text{en unidades de } (\Omega \cdot m)$$

En donde la constante geométrica K representa los efectos de la distancia de abertura entre los electrodos de corriente y de potencial con respecto a la distribución espacial de cada punto de atribución.

En la **Figura 9** se muestra el esquema de adquisición de una tomografía de resistividad eléctrica.

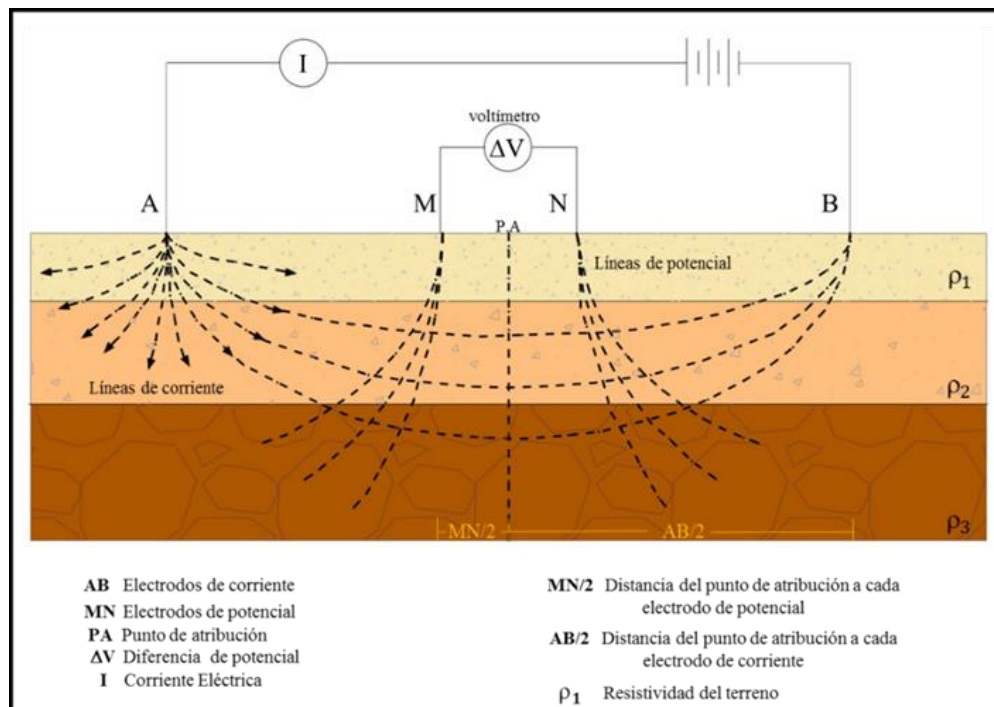


Figura 9. Arreglo lineal de electrodos, ubicado en la superficie del terreno, donde se registran los parámetros geoelectrónicos

La profundidad de investigación se encuentra en función de la apertura de los electrodos de corriente. El equipo durante cada medición obtiene información sobre las variaciones tanto verticales como horizontales de la resistividad del subsuelo.

Arreglos de Electrodos

En la práctica habitual, los electrodos AB y MN se disponen de modo que los dispositivos de medición sean fáciles de manejar. Entre estos, los más usados son los dispositivos lineales, en donde los cuatro electrodos se encuentran sobre una misma línea recta obsérvese la **Figura 10**.

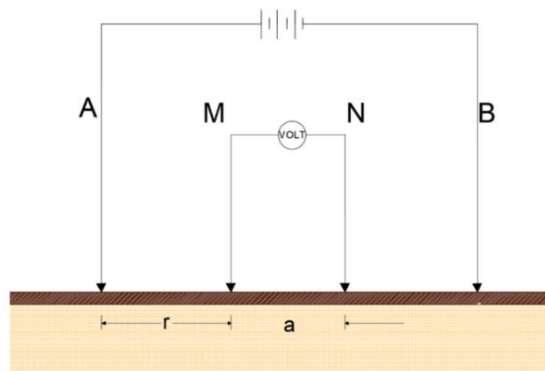


Figura 10. Arreglo lineal y simétrico

Si además se disponen simétricamente respecto del centro del dispositivo, se tendrá un dispositivo lineal y simétrico (Orellana, 1982). Para este caso, la diferencia de potencial entre 2 puntos cualesquiera, estará dada por:

$$\Delta V = U_N^M = \frac{\rho I}{\pi} \left(\frac{a}{r(r+a)} \right) \dots \dots \dots (5)$$

Partiendo de la expresión anterior y considerando que se obtendrá la medición de una resistividad aparente, se tendrá que:

$$\rho_a = \pi \frac{r(r+a)}{a} \frac{\Delta V}{I} \dots \dots \dots (6)$$

Con la ecuación 6 se puede calcular el valor de la resistividad eléctrica aparente de un arreglo lineal y simétrico. A continuación, se presentan los arreglos comúnmente utilizados en la prospección geoelectrica y la disposición de los electrodos.

Arreglo Wenner

En esta configuración los electrodos se disponen equidistantes en el orden AMNB, véase la **Figura 11**, de modo tal $AM = MN = NB = a$. (Orellana, 1982)

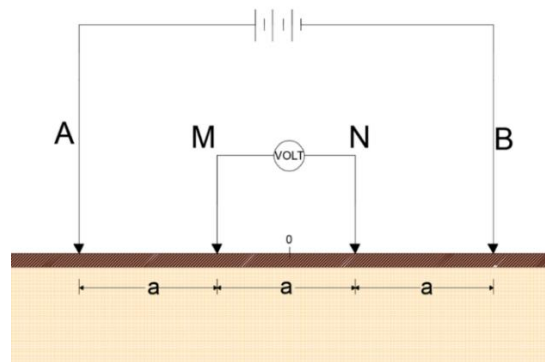


Figura 11. Arreglo Wenner, de acuerdo con (Telford, Geldart, Sheriff, 1990)

De esta forma, el cálculo de la resistividad aparente puede expresarse de la siguiente manera:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \dots\dots\dots (7)$$

En donde el factor geométrico del Arreglo Wenner está dado por:

$$K = 2\pi a$$

Arreglo Schlumberger

Se trata de una disposición de los electrodos de la forma AMNB, donde la distancia entre los electrodos de potencial MN es mucho menor a la distancia entre los electrodos de corriente AB. En la práctica $AB > 5MN$ (Orellana, 1982). En la **Figura 12** se muestra la disposición de los electrodos del arreglo Schlumberger.

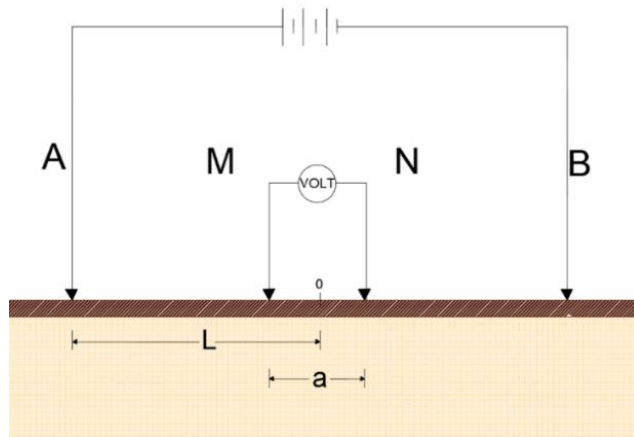


Figura 12. Arreglo Schlumberger, de acuerdo con (Telford, Geldart, Sheriff, 1990)

Si llamamos L a la distancia $OA = OB$, la expresión 7 se podrá representar de la siguiente manera

$$\rho_a = \pi \left(L^2 - \frac{a^2}{4} \right) \frac{\Delta V}{Ia} \dots\dots\dots (8)$$

Arreglo Dipolo – Dipolo

En este dispositivo los electrodos son colocados en el orden ABMN, véase la **Figura 13**.

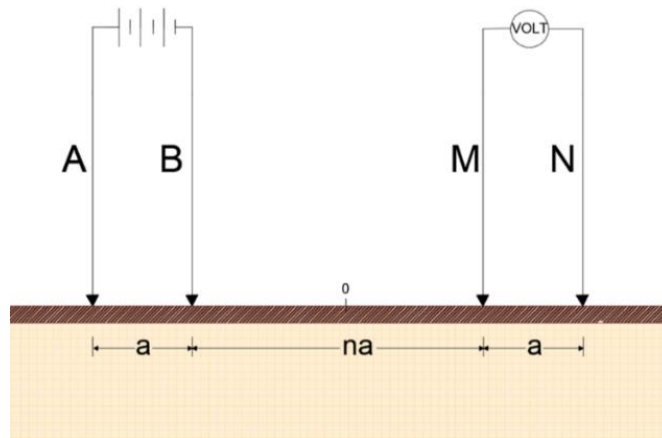


Figura 13. Arreglo Dipolo – Dipolo, de acuerdo con (Telford, Geldart, Sheriff, 1990)

Teniendo en cuenta que la separación entre los electrodos de corriente y los de potencial serán iguales y la separación entre ambos pares de electrodos será proporcional a la distancia entre cada par de electrodos, la resistividad aparente para este arreglo electródico puede expresarse de la siguiente manera:

$$\rho_a = \pi a(n + 2)(n + 1)(n) \frac{\Delta V}{I}$$

Arreglo Polo – Dipolo

En este dispositivo, el electrodo B se lleva a una gran distancia (teóricamente, se lleva al infinito) de los otros tres electrodos, observe la **Figura 14**. Para esta configuración, la resistividad aparente estará dada por:

$$\rho_a = 2\pi \frac{r(a+r)}{a} \frac{\Delta V}{I} \dots\dots\dots 9$$

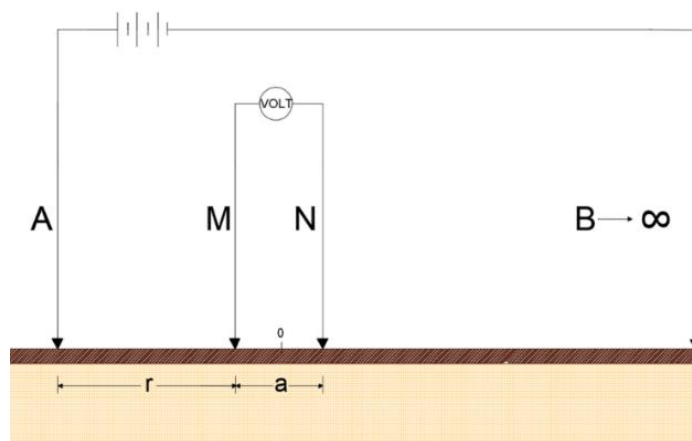


Figura 14. Arreglo Polo – Dipolo, de acuerdo con (Telford, Geldart, Sheriff, 1990)

Inversión de los datos de TRE

Las tomografías eléctricas se realizan para obtener mediciones de la resistividad aparente con apoyo de un equipo multi-electródico, posteriormente con un software especializado se determina un modelo 2D de resistividades, por medio de una inversión matemática de los datos medidos, lo cual, permite conocer la distribución de la resistividad real del subsuelo.

De esta forma, es posible obtener una imagen bidimensional (2D) que representa la distribución de los valores de resistividad real del subsuelo. A partir de dicha imagen, se identifican las anomalías geoelectricas relacionadas con los contrastes litológicos y/o estructuras geológicas que conforman los materiales del medio.

El proceso de inversión de los datos de resistividad busca obtener un modelo del subsuelo que pueda ser considerado como una solución válida y que a su vez sea compatible con los datos de campo. Por lo tanto, los datos teóricos y los obtenidos en la práctica deben de ser semejantes entre sí (Loke, 1996). Durante el proceso de inversión, se toma como criterio de convergencia el valor del error cuadrático medio (RMS), entre los datos de campo y la respuesta del modelo teórico después de cada iteración. Si el valor del RMS se encuentra por encima de la tolerancia de error predefinido por el usuario, se rediseña el modelo. Cuando el valor del RMS sea aceptable, se puede decir que la inversión ha convergido y que el proceso de inversión se encuentra terminado. Se debe de tener en cuenta que el modelo que tenga el más bajo RMS puede, algunas veces, no ser siempre el “mejor” modelo desde la perspectiva geológica (Loke, Chambers and Wikinson, 2012)

Uno de los algoritmos más utilizados en la inversión de imágenes eléctricas es el desarrollado por (Loke, 1996), que está basado en un método de mínimos cuadrados que produce un modelo en 2D, libre de distorsiones en la pseudosección de resistividad aparente ocasionadas por el tipo de arreglo electródico empleado. El modelo de inversión divide el subsuelo en un pequeño número de prismas rectangulares e intenta determinar los valores de resistividad de cada prisma y poder así minimizar la diferencia entre los valores de resistividad aparente entre los datos observados y los calculados (Loke, Chambers and Wikinson, 2012).

En la **Figura 15** se muestra un ejemplo de una imagen resultante obtenida con la técnica de TRE.

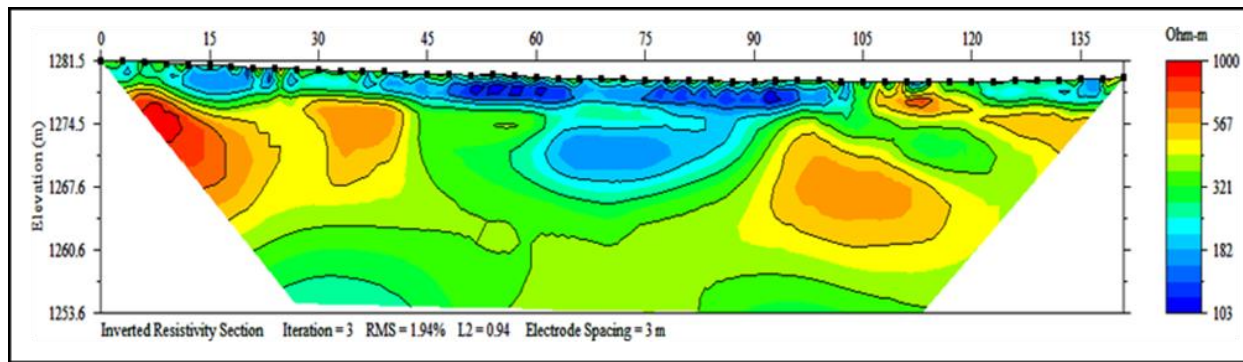


Figura 15. Ejemplo de un modelo 2D obtenido con la técnica de TRE

8.2 Tomografía de Refracción Sísmica

El principio del método se fundamenta en las trayectorias de viaje de tiempo mínimo que emplean las ondas elásticas al propagarse de un medio a otro, es decir, cuando las ondas encuentran un cambio o aumento en la impedancia acústica del medio, sufren un cambio en la dirección y ángulo de acuerdo con las leyes de Snell y se produce el fenómeno de refracción.

Los principios fundamentales que rigen la propagación de los movimientos ondulatorios son los siguientes:

Principio de Fermat: La geometría de las trayectorias seguidas por los rayos está gobernada por este principio, el cual establece: el movimiento ondulatorio entre dos puntos sigue la trayectoria de tiempo mínimo.

Principio de Huygens: El principio de Huygens establece que todo frente de onda se comporta como un nuevo centro generador de ondas, que viajan con la misma velocidad, frecuencia y longitud de onda. Se conoce con el nombre de rayos a las líneas perpendiculares a los sucesivos frentes de onda, tales líneas corresponden a las trayectorias de propagación de las ondas (Tippens, 2011)

Ley de reflexión: Cuando un rayo que se propaga por un medio incide con cierto ángulo respecto a la normal de una discontinuidad, la cual se debe a un cambio en las propiedades elásticas del medio, parte de la energía es reflejada con un ángulo, dicho ángulo será igual al ángulo del rayo incidente, siempre que el rayo incidente, el reflejado y la normal se encuentren en un mismo plano (**Figura 16**).

$$\text{Sen } \theta_i = \text{Sen } \theta_r$$

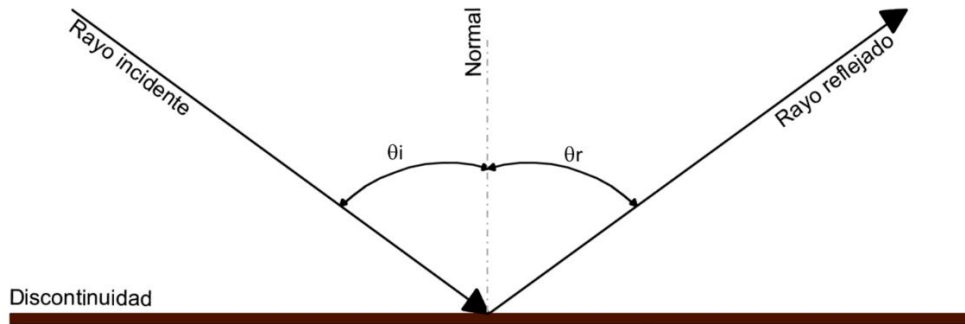


Figura 16. Diagrama esquemático de la ley de reflexión.

Ley de refracción: Como ya se mencionó anteriormente, cuando en su camino un rayo encuentra una interfaz entre dos medios con distintas propiedades elásticas, una parte de la energía de este rayo se refleja y permanece en el medio inicial, mientras que el resto de dicha energía se transfiere con un cambio de dirección al segundo medio.

Por ejemplo, si se considera un frente de onda AB, el cual incide en la interfaz entre dos medios con velocidades v_1 y v_2 respectivamente, como se muestra en la **Figura 17**. Si el frente es curvo, simplemente consideraremos A y B lo suficientemente cerca el uno del otro de modo que AB sea plano; cuando AB ocupa la posición A'B' cuando A toca la interfaz, la energía en B' aún debe recorrer la distancia B'R para tocar la superficie. Considerando que es el intervalo de tiempo en que la energía en A' recorre la distancia A'T y en el mismo intervalo la energía en B' llega a R, así, de los triángulos A'B'R y A'TR tenemos que

$$\text{sen}\theta_1 = \frac{v_1 \Delta t}{A'R}$$

Y que

$$\text{sen}\theta_2 = \frac{v_2 \Delta t}{A'R}$$

Entonces

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{v_1} = \frac{\text{sen}\theta_2}{v_2} \dots\dots\dots (4)$$

El ángulo θ_2 es el ángulo de refracción y la ecuación (4) es, en síntesis, la ley de refracción, también llamada ley de Snell.

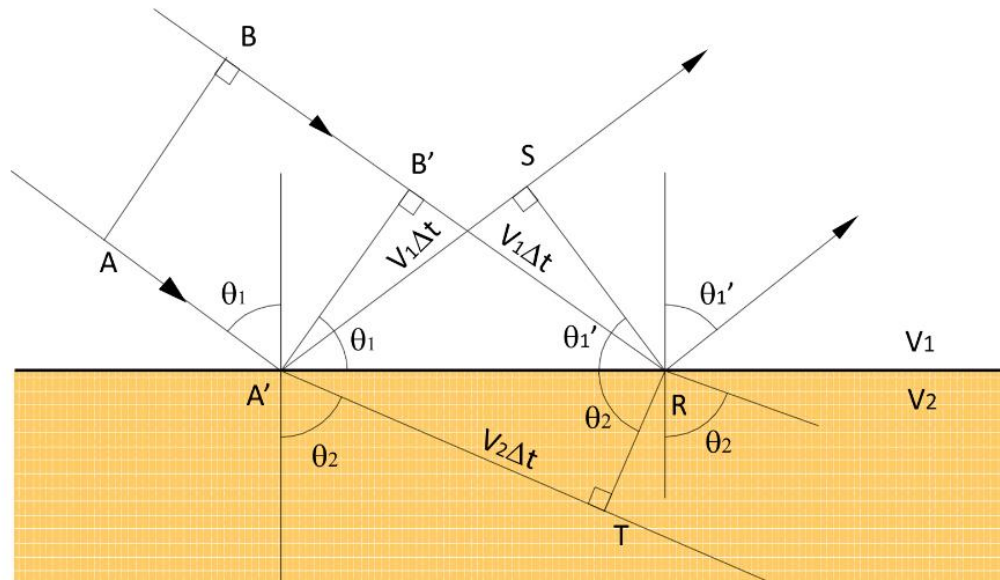


Figura 17. Diagrama esquemático de la ley de refracción. Modificado de (Sheriff and Geldart, 1995)

En los métodos sísmicos de reflexión y refracción se utilizan fuentes, equipos de registro y sensores o geófonos similares, la diferencia entre ambas es la técnica de campo y la banda de frecuencias que se utilizan para registrar las ondas sísmicas. A continuación, se describe de manera breve la implementación de la refracción sísmica realizada.

La adquisición de datos en campo consistía en registrar el tiempo de viaje de la onda P generada por una fuente artificial, tipo explosiva o tipo mecánico (golpe de marro contra placa metálica) ubicada en la superficie del terreno. La fuente y los detectores se colocan alineados con respecto al tendido TRS. Las ondas sísmicas viajan desde la fuente hasta los detectores a través del subsuelo siguiendo diversas trayectorias, donde se refractan en las discontinuidades del subsuelo y regresan a la superficie para ser registradas por los geófonos.

En la **Figura 18**, se muestra un esquema que ilustra la adquisición de los TRS, en donde se observa la ubicación de los geófonos respecto a los puntos de tiro (PT) utilizados durante la prueba.

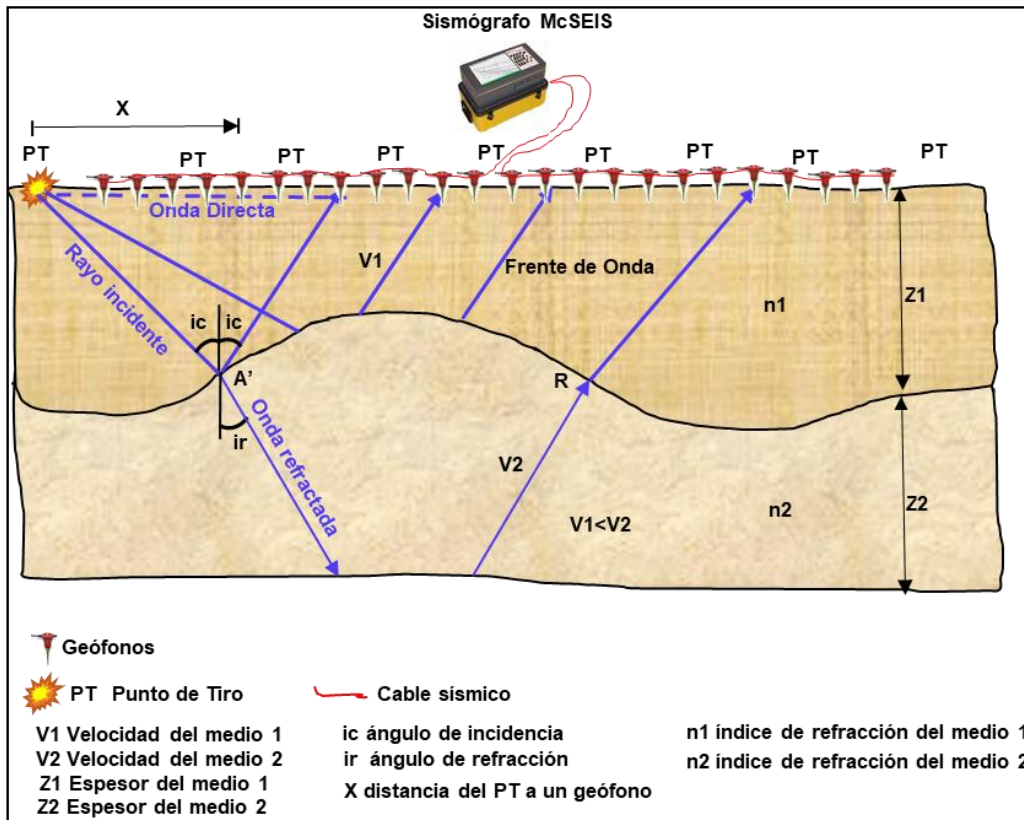


Figura 18. Esquema de adquisición de un TRS

El proceso e interpretación de los TRS se efectuó mediante la modalidad de tomografía sísmica, para ello fue necesario, crear la base de datos, definir información de referencia, distancia entre receptores, importar datos sísmicos, asignar la geometría de puntos de tiro y receptores, leer tiempos de arribo de la onda P para cada una de las 24 trazas de los sismogramas, mediante el software Rayfract 3.23 y realizar las inversiones correspondientes para así obtener finalmente el resultado tomográfico, la **Figura 19**, muestra uno de los sismogramas procesados.

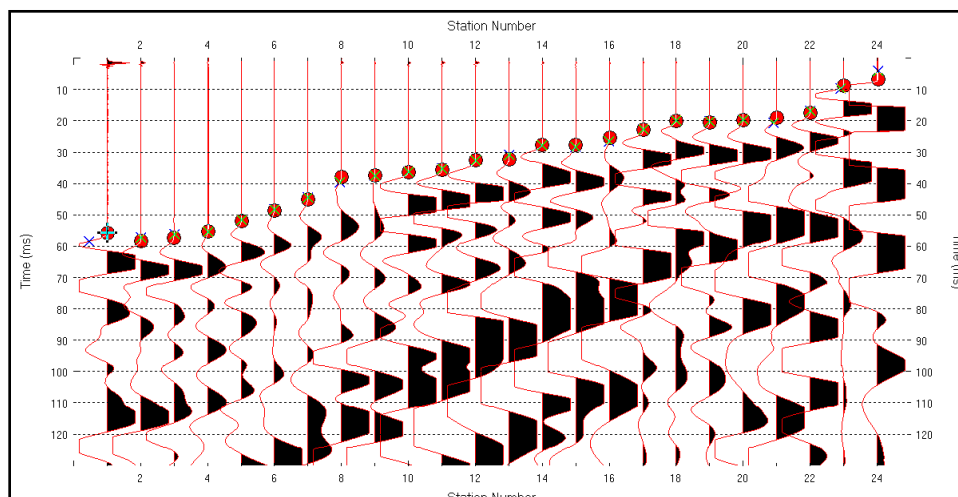


Figura 19. Sismograma obtenido al efectuar un tendido de 24 geófonos con un tiempo total de registro de 0.1 s.

Con los tiempos de los primeros arribos de cada uno de los puntos de tiros, se forman las gráficas denominadas dromocronicas en las que se relacionan el tiempo y la distancia, esto se lleva a cabo a lo largo de cada una de las líneas de exploración, la siguiente **Figura 20** muestra una dromocrona de un tendido en una de las líneas estudiadas.

Una vez obtenidos los datos en campo deben leerse los tiempos de los primeros arribos registrados en cada geófono, ya sea, en la unidad de adquisición o en una computadora con el software adecuado. Tales tiempos son graficados contra la correspondiente distancia entre el punto de tiro y cada geófono. La finalidad principal de estas curvas de tiempo vs distancia es identificar las secciones que pertenecen a un mismo refractor. El conjunto de puntos pertenecientes a un mismo refractor constituye lo que se denomina dromocrona.

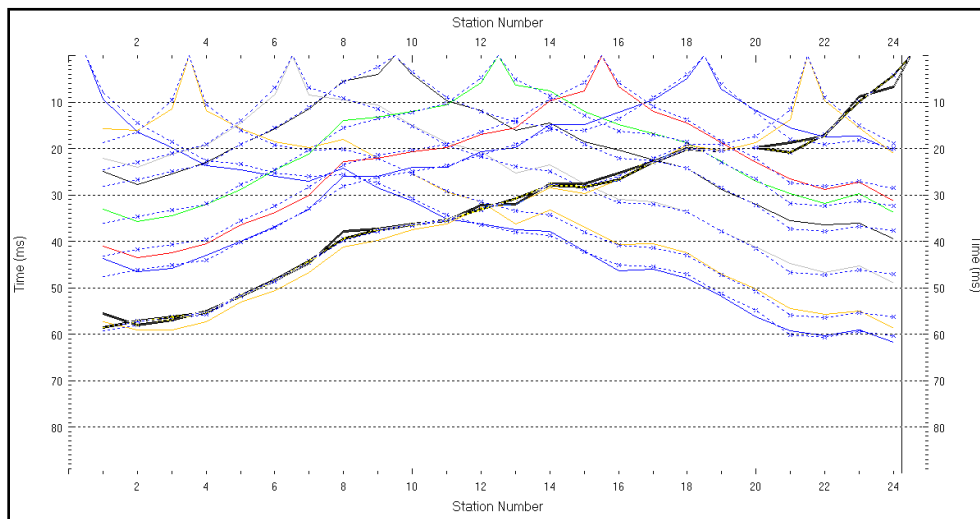


Figura 20. Gráfico de tiempos de arribo contra distancia de cada uno de los puntos de tiro de un tendido sísmico, llamado dromocronas.

Cálculo del modelo de capas, existen distintas metodologías para el cálculo de modelos sísmicos de capas, planas horizontales e inclinadas, según las necesidades de cada problema se empleará uno u otro. Los métodos más comunes son: tiempos de intersección, distancia crítica, frentes de onda, tiempos de retardo y trazado de rayos.

El software Rayfract utiliza los métodos de Tiempos de intersección (Gebrande y Miller 1985, Ruht 1995), Plus-Minus (Hagedoorn, 1959) y el de Wavefront (Brückl 1987, Jones y Jovanovich 1985, Alí Hk 1990). En el presente caso, el método **Wavefront** fue el que se aplicó, éste se basa en el campo de la regresión de tiempos de viaje y considera de manera particular ángulos emergentes de frente de ondas, de hecho, se puede considerar la aplicación de éste método como una versión optimizada del Método Recíproco Generalizado (GRM), algoritmo descrito por (Palmer, 1980)

La opción utilizada para la inversión de datos fue la de "Smooth Inversion", puesto que al modelo inicial que genera se le aplica una inversión sísmica tipo WET (Wavepath Eikonal Traveltime). Este es un método de inversión propuesto por Schuster & Quintus-Boss

(1993) que, según explican, calcula rutas de onda mediante el uso de soluciones de diferencias finitas de la ecuación eikonal. El algoritmo de la inversión tipo WET no supone una orientación del gradiente de velocidad en el subsuelo, por lo que tiene la capacidad de mostrar estructuras verticales y gradientes laterales de velocidad abruptos (Azwin et al., 2013).

Finalmente, Schuster & Quintus-Boss (1993) describen el algoritmo de WET como:

1. Ubicación del primer arribo de los tiempos de viaje de ondas P en los puntos de tiro.
2. Se propone un modelo de lentitud inicial y la ecuación es resuelta mediante un método de diferencia finita con el fin de obtener $\tau(x, x_s)$, el cual es la primera solución al tiempo de viaje del primer arribo de la ecuación eikonal (Schuster, 1991). El tiempo de viaje residual es calculado al restar los tiempos de viaje observados en el primer arribo de los tiempos de viaje de diferencia finita.
3. Se evalúa la función de ponderación de la fuente en todos los puntos en el medio para obtener el gradiente de la función de desplazamiento de fase respecto a los parámetros de lentitud. Posteriormente calcula los términos de distribución geométrica A ,
4. El modelo de lentitud se actualiza y se vuelven a repetir iterativamente los pasos anteriores hasta la convergencia. El programa Rayfract permite especificar el número de iteraciones, aunque en este mismo se recomienda un total de 20, hasta que el resultado se considere significativo.

Finalmente, sobre el proceso que se llevó a cabo se obtuvo, de manera adicional, un mapa de cobertura de rayos el cual indica la densidad en el espacio de los rayos empleado.

El resultado de esta inversión sísmica tipo WET es la obtención de los modelos de tomografías de refracción. Respecto a los mapas de cobertura de rayos, estos nos muestran la distribución y densidad de rayos en un área a lo largo de la línea de adquisición, lo cual depende de la cantidad de puntos de tiro y el distanciamiento entre estos. Las tomografías de refracción dependen de esta distribución de rayos obtenida, ya que, de haber áreas con una baja densidad de rayos el programa extrapolará la información existente para cubrir estas zonas en el perfil. Por esta razón, una mayor cobertura de los rayos es óptima. De esta manera se explica cómo el programa de Rayfract realiza el proceso que nos lleva del picado de los primeros arribos, al modelo inicial pseudo-2D a partir del método de Smooth inversión y Delta-t-V y finalmente a los modelos de tomografía de refracción gracias a la inversión sísmica tipo WET.

Los TRS permiten obtener la distribución de velocidades de onda compresional (V_p), en el plano contenido entre los geófonos y los puntos de tiro a lo largo del tendido, a partir de los registros obtenidos es posible identificar los tiempos de arribo de las ondas sísmicas, para su análisis posterior a través de paquetería de computo. En la **Figura 21** se observa el resultado de la inversión de una tomografía de refracción sísmica

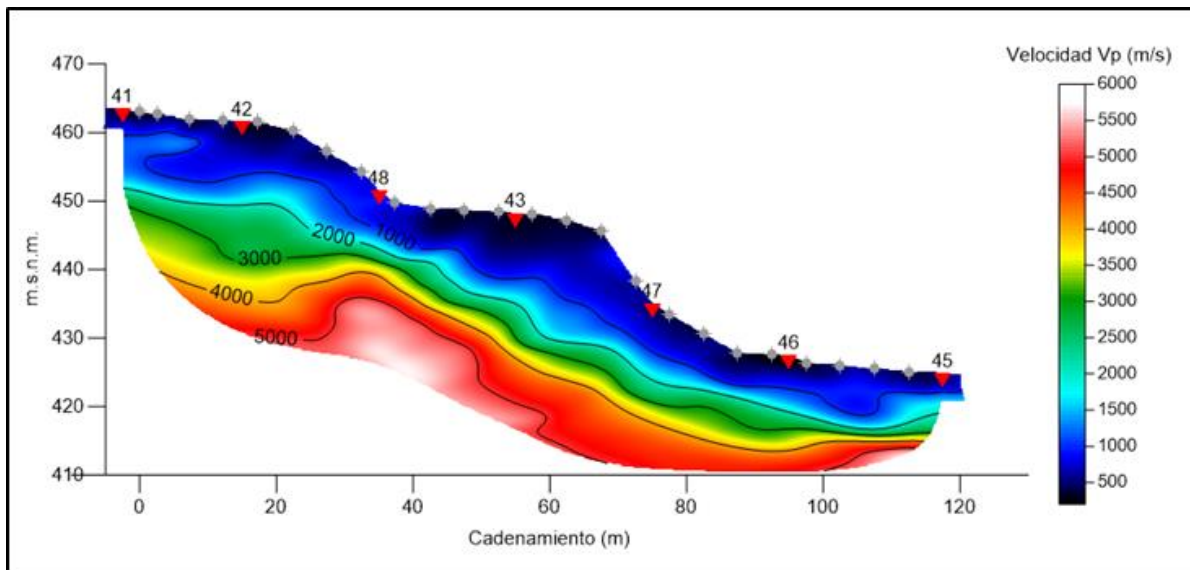


Figura 21. Ejemplo de un modelo 2D, obtenido a partir del proceso de inversión de un TRS

9. Análisis e Interpretación de Resultados

Procesamiento de Datos

A partir de los datos adquiridos con las técnicas de TRE y TRS se llevó a cabo el procesamiento de los mismos, el cual consistió en generar una base de datos, posteriormente, se generaron los modelos geoelectrónicos y sísmicos del subsuelo respecto a la profundidad, utilizando algoritmos de inversión matemática, los cuales están basados en el ajuste de mínimo error entre los datos adquiridos en campo respecto a un modelo teórico calculado. A continuación, se describen de manera general las actividades de gabinete por cada técnica geofísica empleada.

Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

Para el procesamiento de datos de TRE, se generó el análisis estadístico de los datos adquiridos: diferencia de potencial (V), inyección de corriente (A) y resistividad aparente (Ωm); con esta información fue posible excluir aquellos datos estadísticamente anómalos. Posterior a la verificación de la calidad de los datos, se generaron las imágenes de resistividad real del subsuelo respecto a la profundidad, esto se realizó empleando el programa de cómputo EarthImager-2D. En la **Figura 22** se muestra el resultado de una TRE obtenida del procesamiento de datos descrito.

TRE 2

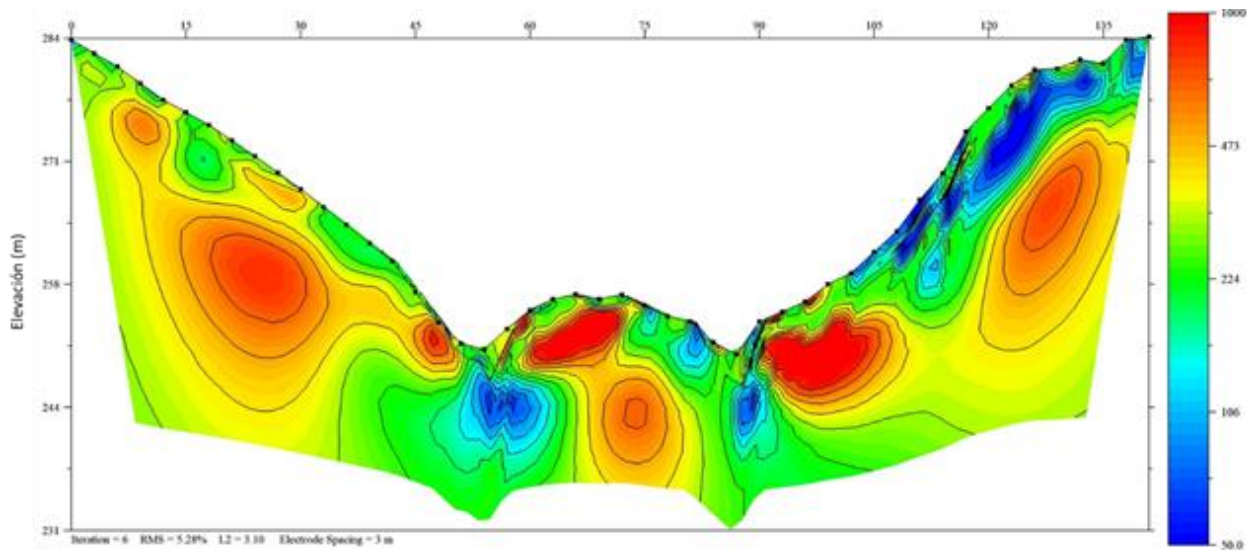


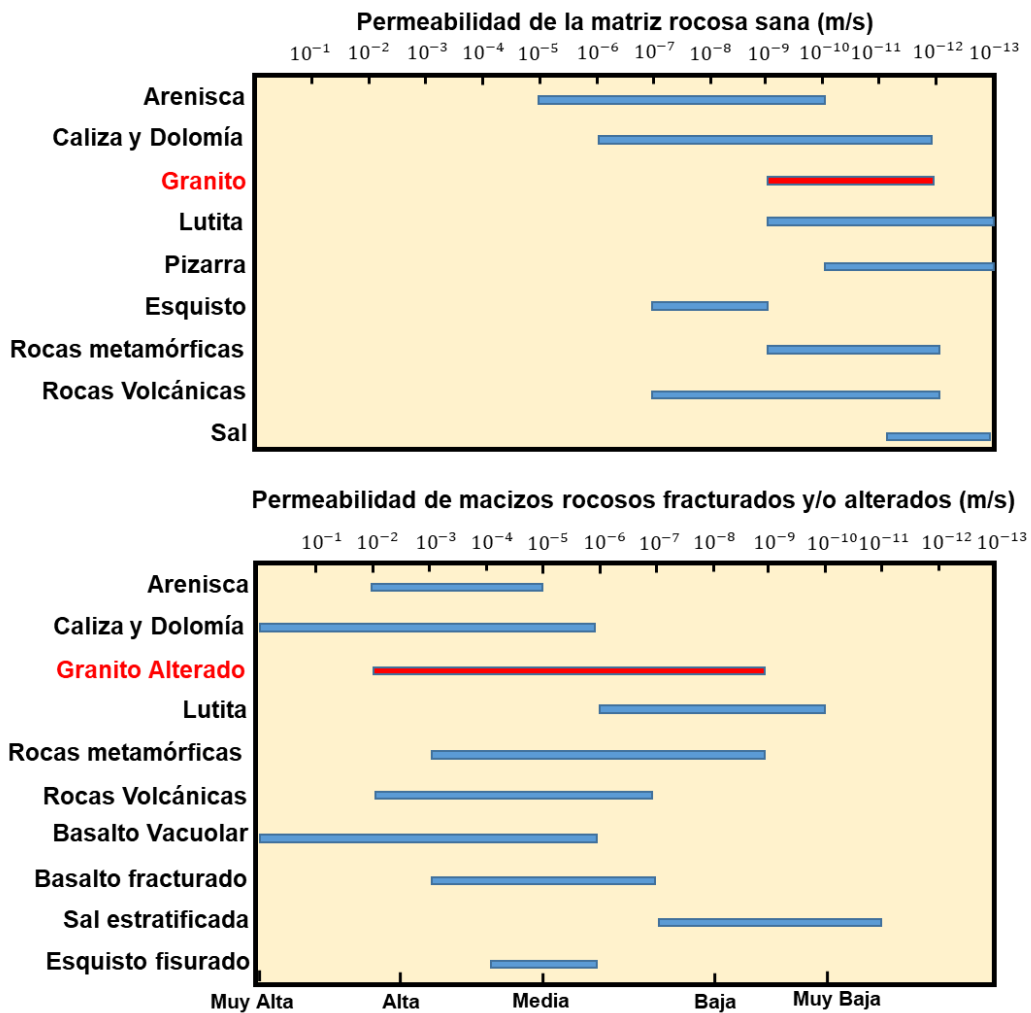
Figura 22. Imagen resultante de la TRE 2, obtenida con la aplicación del software EarthImager 2D

Con respecto a los valores de la resistividad eléctrica resultantes, dentro del rango de 50 a 1000 Ωm , se infiere que las bajas resistividades corresponden con los materiales de talud y roca muy alterada, así mismo se infiere que las mayores resistividades corresponden con la roca granítica, moderadamente sana a sana.

Con la finalidad de realizar la correlación de los valores de resistividad con la roca granítica presente en el sitio, además de la exploración geofísica, se consultó los valores de la permeabilidad del granito sano y también en condiciones de fracturamiento y alteración, de acuerdo con (Vallejo, 2002), véase la **Tabla 2**.

Con respecto a los valores de permeabilidad, descritos, para el granito sano de 10^{-9} a 10^{-12} m/s, se le considera muy baja permeabilidad, sin embargo, cuando el granito se encuentra fracturado y alterado, sus valores aumentan de 10^{-9} a 10^{-2} m/s, por lo cual, se estima que conforme su alteración y fracturamiento es mayor, su permeabilidad será cada vez más alta, y por lo tanto, su resistividad eléctrica disminuye.

Tabla 2. Permeabilidad del granito y otros materiales



Tomografía de Refracción Sísmica

El procesamiento de TRS consistió en el ordenamiento de los archivos obtenidos en campo respecto a la posición del punto de tiro en la superficie del terreno, utilizando el programa de cómputo Rayfract, posteriormente se identificaron los primeros arribos de la onda P, con los cuales se determinó el modelo inicial requerido para llevar a cabo la inversión matemática de datos, ajustando los tiempos de viaje de las ondas sísmicas observados con relación a los calculados. Finalmente, se aplicó la inversión sísmica generalizada con el algoritmo Wavepath Eikonal Traveltime (WET), con la cual fue posible obtener los modelos 2D que muestran la distribución de los valores de velocidad de Vp en el subsuelo. En la **Figura 23**, se muestra una TRS obtenida con el procesamiento de datos descritos.

Finalmente, se elaboraron 6 secciones que conservan la misma disposición de la LEG. Estas secciones integran información geoelectrónica y sísmica del subsuelo que permitió determinar el modelo geofísico en dicha zona de estudio.

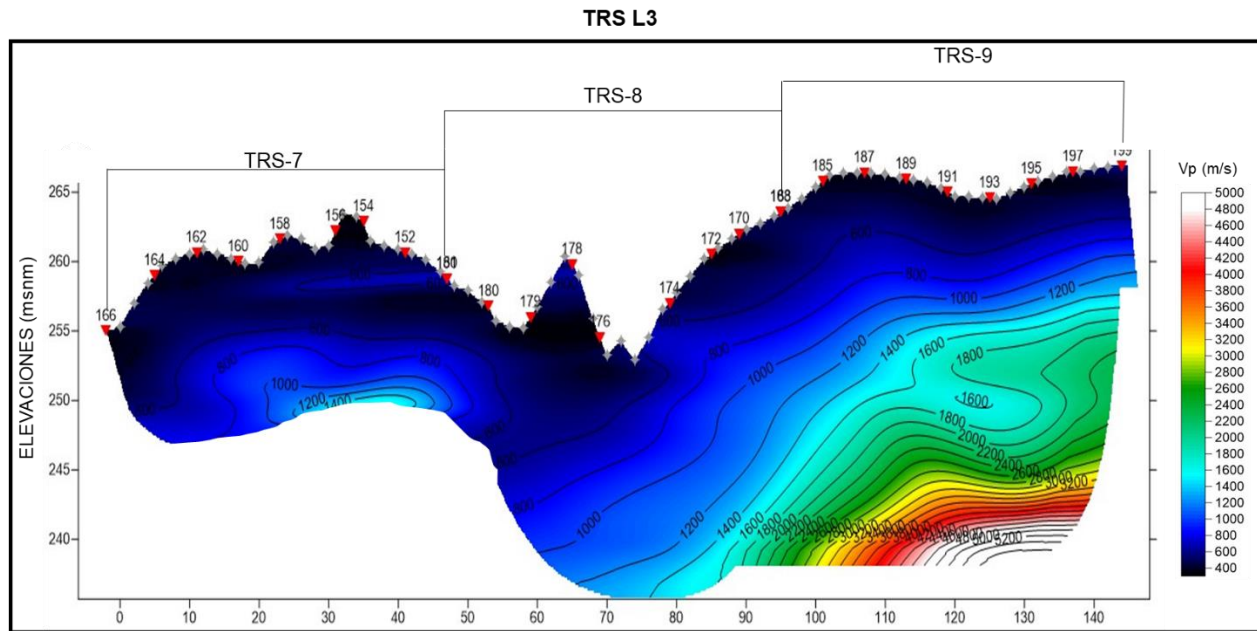


Figura 23. Resultado de las TRS 7, 8 y 9, ejecutadas en la línea L3, obtenido con la aplicación del software Rayfract.

Con relación a los valores resultantes de velocidad de onda P (V_p) que se encuentran dentro del orden de 400 a 3800 m/s, se infiere que las bajas velocidades menores a 900 m/s corresponden con el depósito de talud, roca muy fracturada y muy alterada; los valores de 900 a 3800 m/s se correlacionarían con la roca granítica fracturada y alterada, a la roca sana, respectivamente.

Para efectos de ripabilidad del granito, presente en la zona de estudio, se tiene la siguiente clasificación de (Caterpillar, 2006), con base en las velocidades de onda P (V_p), de los distintos macizos rocosos, véase la **Figura 24**.

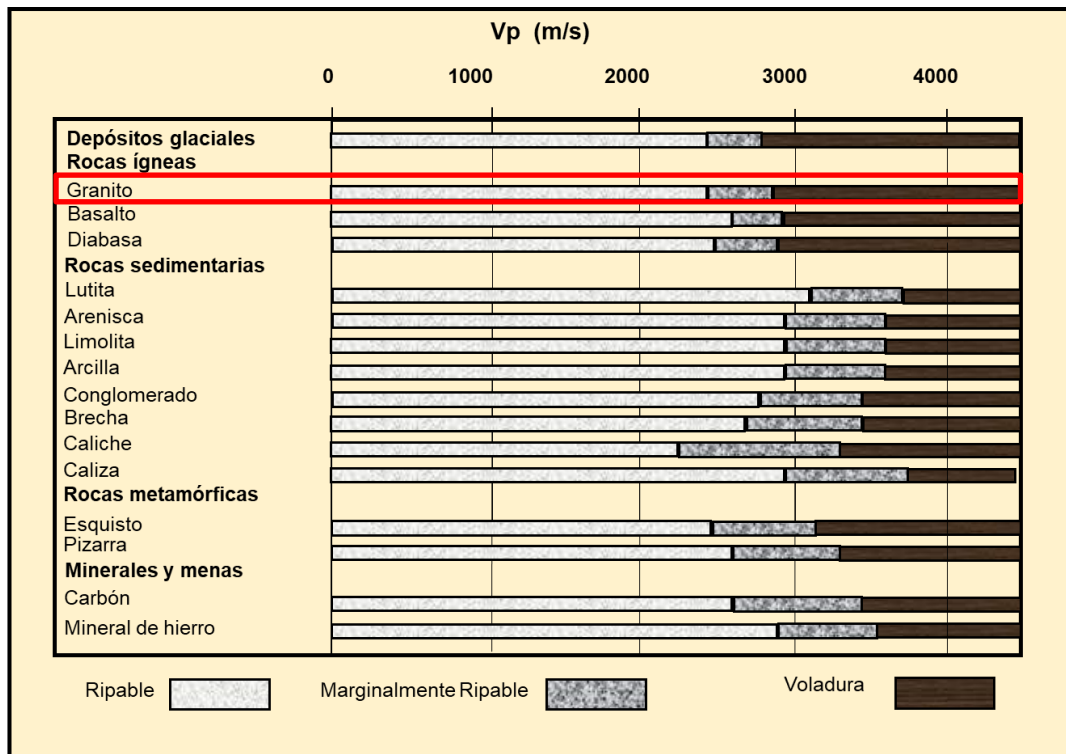


Figura 24. Ripabilidad de distintos macizos rocosos con respecto a su velocidad de onda P

De acuerdo con la **Figura 24**, específicamente para el caso del granito, se considera que puede ser excavado mediante maquinaria siempre y cuando presente de manera general una velocidad V_p menor a 2400 m/s, así mismo, se utilizara algún tipo de explosivo para fragmentarlo si presenta una velocidad V_p mayor a 2800 m/s.

En relación a la ripabilidad, además de la velocidad de onda P, se toman en cuenta otros parámetros para definir si un macizo rocoso es o no ripable, según (Galindo & Román, 2011) expone la clasificación de Weaver de 1989, en donde menciona otros parámetros a considerar, por ejemplo, la dureza, alteración, así como, el espaciado, continuidad y relleno de juntas, por último, la orientación y dirección del buzamiento, véase la **Tabla 3** en donde se muestra dicha clasificación.

Tabla 3. Clasificación de Weaver para macizos rocosos

CLASE DE ROCA	I	II	III	IV	V
DESCRIPCIÓN	Roca muy buena	Roca buena	Roca media	Roca mala	Roca muy mala
VELOCIDAD SÍSMICA (m/s)	>2500	2100 - 2500	1800 - 2100	1500 - 1800	<1500
DUREZA	Roca extra dura	Roca muy dura	Roca dura	Roca blanda	Roca muy blanda
ALTERACIÓN	Sana	Ligeramente Sana	Alterada	Muy alterada	Completamente alterada
ESPACIADO DE JUNTAS (mm)	>3000	3000 - 1000	1000 - 300	300 - 50	< 50
CONTINUIDAD DE JUNTAS	Discontinuas	Poco continuas	Continuas sin relleno	Continua con algún relleno	Continua con relleno
RELLENO DE LAS JUNTAS	Cerradas	Algo separadas	Separación < 1mm	Relleno < 5mm	Relleno > 5mm
ORIENTACIÓN DE DIRECCIÓN Y BUZAMIENTO	Muy desfavorable	Desfavorable	Poco favorable	Favorable	Muy Favorable
VALORACIÓN TOTAL	100 - 90	90 - 70	70 - 50	50 - 25	< 25
VALORACIÓN DE LA RIPABILIDAD	Voladura	Ext. difícil de repar. Voladura	Muy difícil de repar	Difícil de repar	Fácilmente ripable

Además de la permeabilidad y ripabilidad también se consideró la meteorización del granito descrita por Oyanguren y Monge, (2004), para realizar la clasificación de unidades geofísicas, con respecto a la geología del sitio, véase la **Tabla 4** y la **Figura 25**.

Tabla 4. Tabla de meteorización del granito

Grado de meteorización	Denominación	Criterios de reconocimiento
V	Completamente meteorizada	Roca intensamente meteorizada con aspecto de suelo, que puede romperse y desmenuzarse a mano, pero se puede reconocer todavía la textura original de la roca.
IV	Muy meteorizada	Meteorización acusada del conjunto, pero con resistencia tal que piezas aproximadamente de 25 cm^2 de sección transversal no pueden romperse a mano.
III	Moderadamente meteorizada	Claramente meteorizada a través de la textura de la roca. La alteración se manifiesta por manchas de óxidos de hierro y ligera descomposición de los feldespatos, sin embargo, la resistencia es muy similar a la de la roca sana.
II	Sana con Juntas teñidas de óxidos	Las caras de las juntas están manchadas o cubiertas con hematites y limonita, pero el bloque de roca entre juntas no está meteorizado.
I	Sana	Roca no meteorizada. Las micas y los feldespatos están lustrosos.

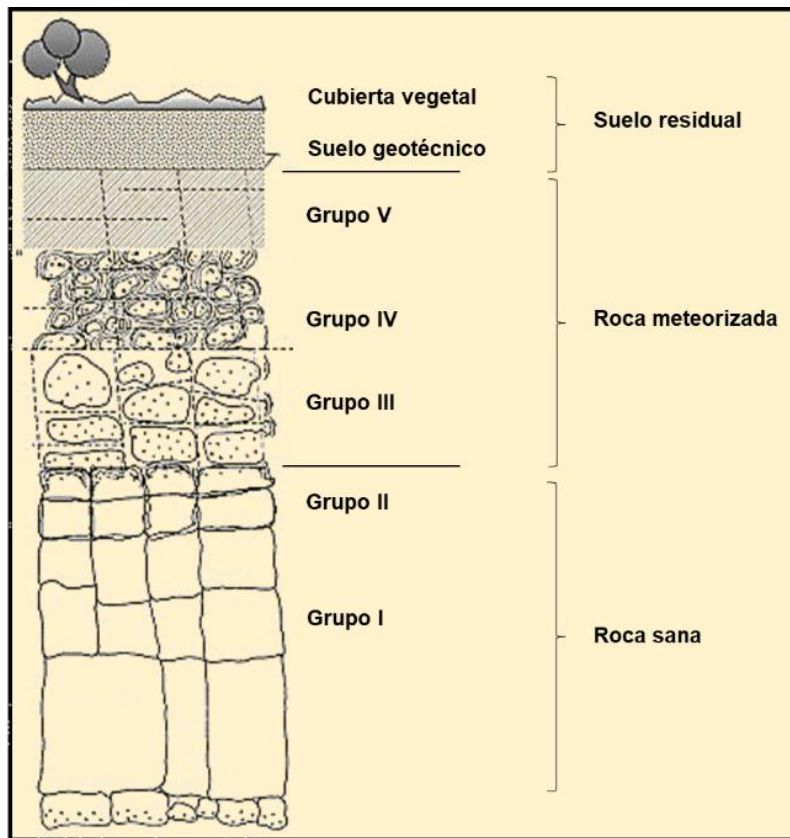


Figura 25. Esquema de meteorización del granito

Con base en el análisis integral de las imágenes 2D tanto geoelectricas como sísmicas obtenidas en la exploración indirecta, la asociación con las tablas de valores de permeabilidad, ripabilidad y meteorización del granito, así como también de la integración geológico-geofísica, fue posible definir los contactos entre unidades tomando en cuenta la distribución de los valores de resistividad eléctrica y velocidad de onda P en el subsuelo, con los cuales se interpretaron dos unidades geofísicas en el sitio de estudio denominadas como U1 y U2.

A continuación, se describen las características generales de dichas unidades, que se refieren a los valores de resistividad y velocidad de Vp, así como su espesor interpretado y correlación con los materiales asociados.

Unidad U1

Corresponde a la capa más superficial, presenta valores de resistividad eléctrica que varían en el intervalo de 50 a 400 Ωm , mientras que los valores de Vp oscilan en el rango de 400 a 900 m/s; el espesor determinado varía de 0.5 a 17 metros. Esta unidad se correlaciona con diversos materiales: suelo residual, depósitos de talud, relleno y/o granito muy alterado.

Unidad U2

Subyace a la U1, con base en los valores de resistividad eléctrica y de velocidad de Vp esta unidad se subdividió en U2a, U2b y U2c. A continuación, se describe cada una de ellas.

Subunidad U2a

Subyace a la unidad U1 y en ocasiones se ubica en la parte superficial, presenta valores de resistividad que oscilan en el rango de 200 a 1000 Ωm , mientras que sus valores de velocidad de onda P determinados varían entre 901 y 1400 m/s. Su espesor se encuentra en el intervalo de 1 a 17 m. Los materiales de esta unidad se asocian con granito fracturado y moderadamente alterado.

Subunidad U2b

La cubre la U2a, sus valores de resistividad eléctrica se encuentran en el rango de 250 a 1000 Ωm , así mismo, sus valores de velocidad de onda P se ubican en el intervalo de 1400 a 2600 m/s. Su espesor varía desde 3 a 19 m. Los materiales que integran esta unidad se correlacionan con granito medianamente fracturado.

Subunidad U2c

Subyace a la U2b, presenta valores de resistividad que varían de 200 a 1000 Ωm , mientras que sus valores de Vp oscilan en el intervalo de 2600 a 3000 m/s. Su espesor observado de acuerdo con el alcance de la exploración es de 15 m, sin embargo, este puede ser mayor ya que no fue posible determinar su límite inferior. Los materiales que integran esta subunidad se correlacionan con granito poco fracturado a sano.

En la **Tabla 5**, se presenta un resumen de los parámetros geoelectrónicos y sísmico de las unidades anteriormente descritas.

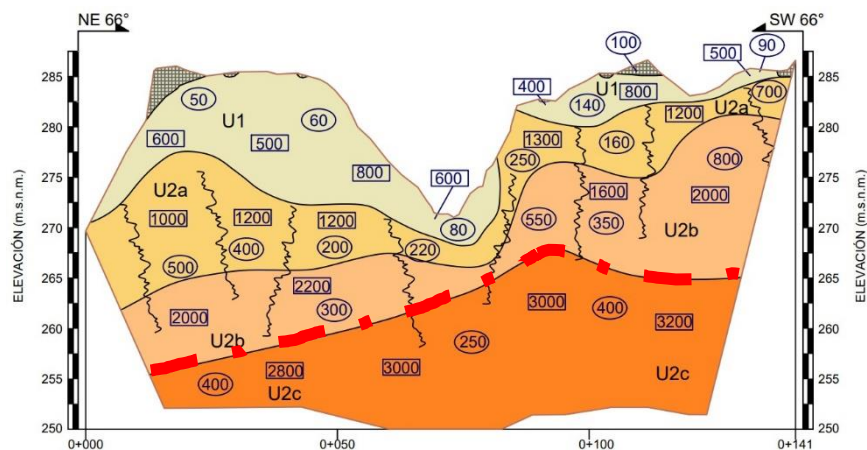
Tabla 5. Resumen de las unidades geofísicas obtenidas

Unidad Geofísica	Velocidad Vp (m/s)	Resistividad (Ω m)	Espesor (m)	Correlación con el tipo de materiales presentes
U1	400 - 900	50 – 400	0.5 – 17.0	Suelo residual, depósitos de talud, relleno y/o granito muy alterado
U2	U2a	901 - 1400	200 – 1000	Granito fracturado y alterado
	U2b	1401 - 2600	250 – 1000	Granito fracturado y alterado a Granito moderadamente fracturado
	U2c	2600 - 3000	200 – 1000	Granito moderadamente fracturado a Granito sano

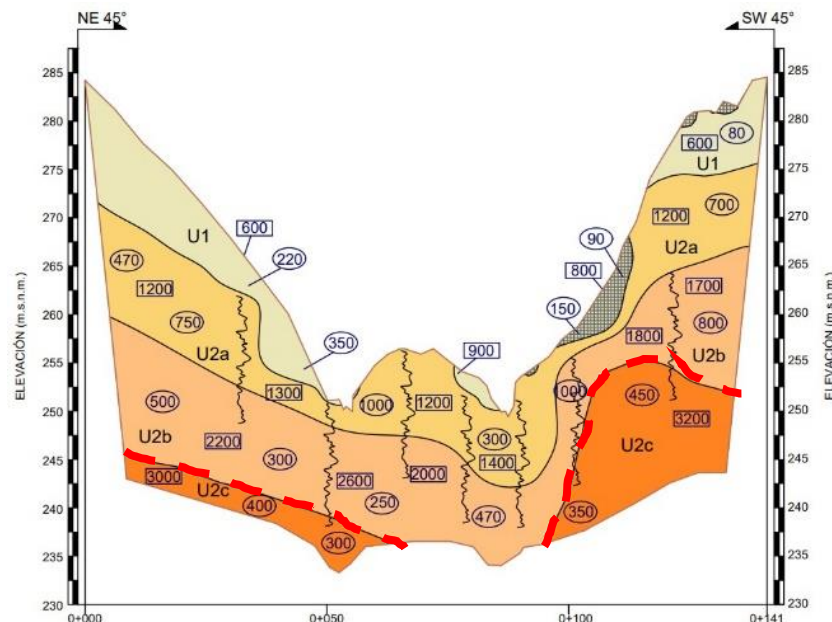
Una vez definidas las unidades geofísicas, se elaboraron 6 secciones las cuales son coincidentes con las LEG's. En cada una de ellas, se interpretó la distribución de las unidades geofísicas en el subsuelo, que en general exhiben un medio, con variaciones en su espesor principalmente en la U1. En la mayoría de las secciones se observaron contrastes de las propiedades geoeléctricas y sísmicas, en la U2, lo que permitió diferenciarla en tres subunidades denominadas como: U2a; U2b y U2c, siendo las dos primeras donde se identificó el mayor número de anomalías geofísicas en el subsuelo (ver Figuras 26, 27 y 28).

En las secciones elaboradas se marcaron interfaces geofísicas que identifican los contrastes laterales tanto en resistividad como en velocidad de onda P, estos pueden estar relacionados con fallas, fracturas, cambios litológicos o mayor y menor proporción de materiales alterados y fracturados. Así mismo, se colocó un contacto geofísico inferido que se determina en ocasiones con el aumento considerable en la velocidad y se le proporcione cierta continuidad.

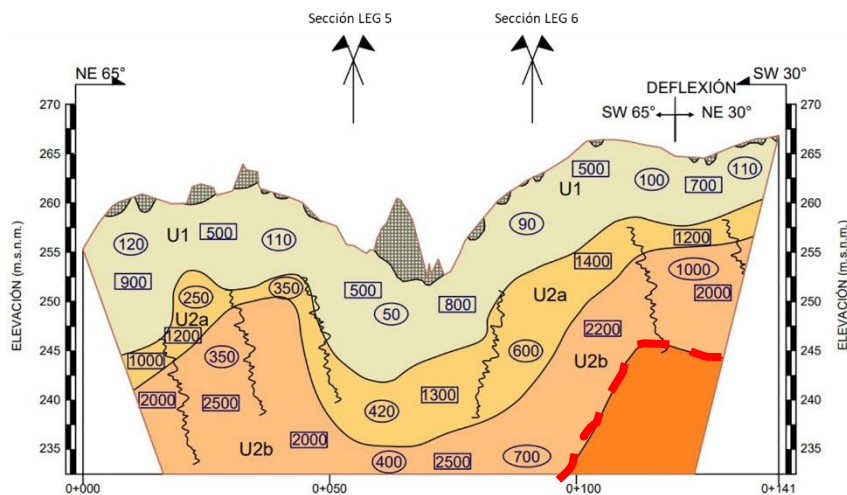
Sección LEG 1



Sección LEG 2



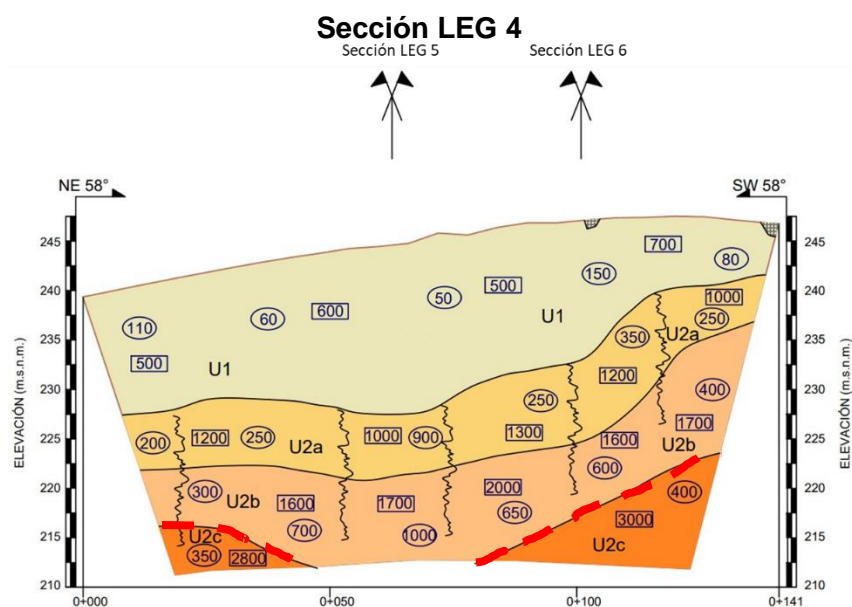
Sección LEG 3



Unidad Geofísica	Velocidad Vp (m/s)	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)	Correlación con el tipo de materiales presentes
U1	400 - 900	50 - 400	0.5 - 17.0	Suelo residual, depósitos de talud, relleno y/o granito muy alterado
U2a	901 - 1400	200 - 1000	1.0 - 17.0	Granito fracturado y alterado
U2b	1401 - 2600	250 - 1000	3.0 - 19.0	Granito fracturado y alterado a Granito moderadamente fracturado
U2c	2600 - 3000	200 - 1000	Indeterminado	Granito moderadamente fracturado a Granito sano

- 1200 Velocidad de onda P en m/s
- 400 Resistividad eléctrica en Ω m
- Bloques por deslizar
- Interface geofísica
- Contacto geofísico inferido

Figura 26. Secciones LEG 1, LEG 2 y LEG 3



Unidad Geofísica	Velocidad Vp (m/s)	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)	Correlación con el tipo de materiales presentes
U1	400 - 900	50 - 400	0.5 - 17.0	Suelo residual, depósitos de talud, relleno y/o granito muy alterado
U2	U2a	901 - 1400	1.0 - 17.0	Granito fracturado y alterado
	U2b	1401 - 2600	3.0 - 19.0	Granito fracturado y alterado a Granito moderadamente fracturado
	U2c	2600 - 3000	200 - 1000	Granito moderadamente fracturado a Granito sano

1200 Velocidad de onda P en m/s

400 Resistividad eléctrica en Ω m

Bloques por deslizar

Interface geofísica

Contacto geofísico inferido

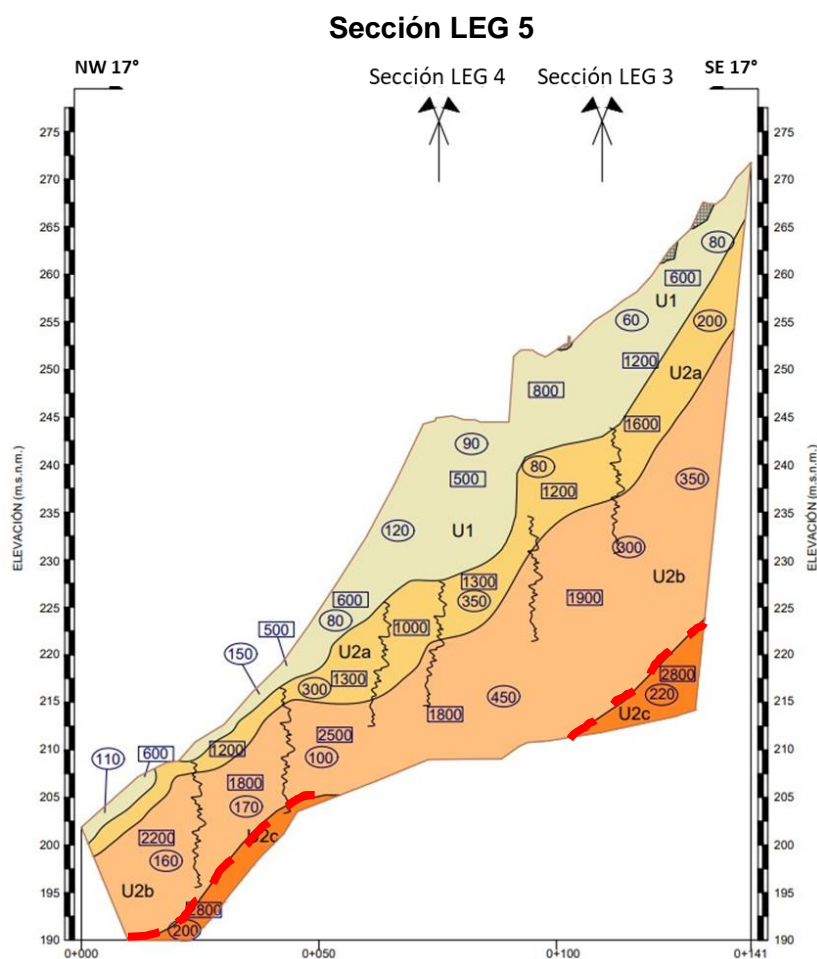
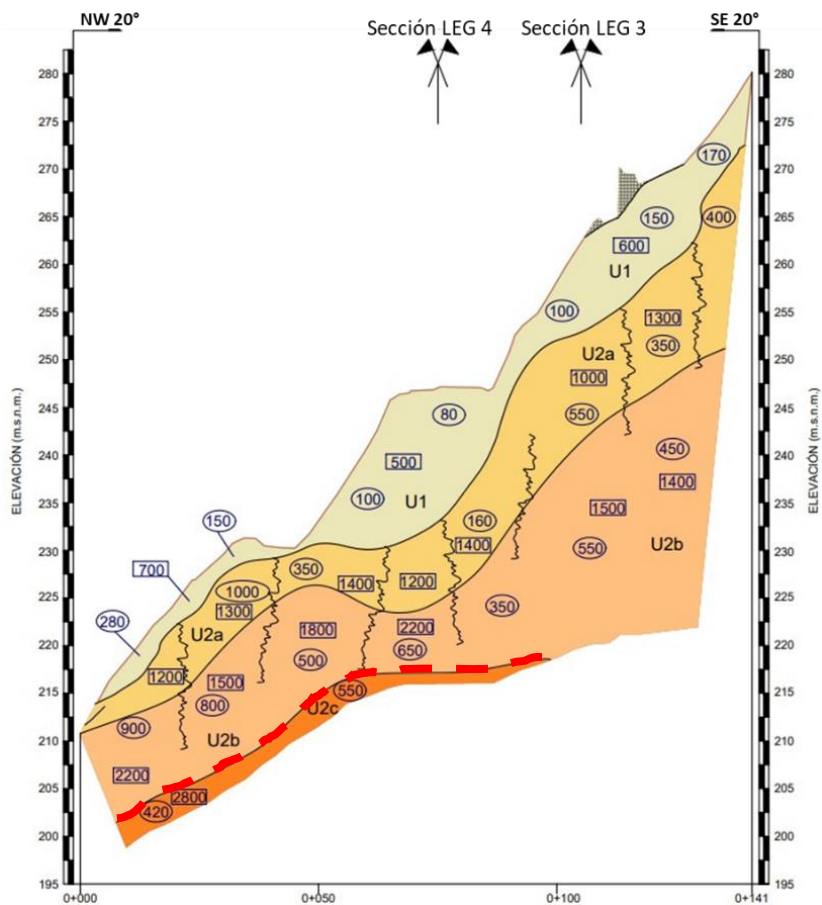


Figura 27. Secciones LEG 4 y LEG 5

Sección LEG 6



Unidad Geofísica	Velocidad Vp (m/s)	Resistividad (Ωm)	Espesor (m)	Correlación con el tipo de materiales presentes
U1	400 - 900	50 - 400	0.5 - 17.0	Suelo residual, depósitos de talud, relleno y/o granito muy alterado
U2	U2a	901 - 1400	1.0 - 17.0	Granito fracturado y alterado
	U2b	1401 - 2600	250 - 1000	Granito fracturado y alterado a Granito moderadamente fracturado
	U2c	2600 - 3000	200 - 1000	Granito moderadamente fracturado a Granito sano

- 1200 Velocidad de onda P en m/s
- 400 Resistividad eléctrica en Ω m
- Bloques por deslizar
- Interface geofísica
- Contacto geofísico inferido

Figura 28. Sección LEG 6

Como resultado del análisis e interpretación de las secciones descritas, se elaboró un modelo, ver **Figura 29**, en el cual se observó la disposición espacial de las unidades. Con base en este modelo, fue posible reconocer un medio heterogéneo, en el que las fronteras entre las unidades son irregulares, siguiendo de forma general el relieve del terreno, mismo que conserva una pendiente descendente desde la porción N, que corresponde a la parte más alta del talud, hacia la porción S en dirección al río.

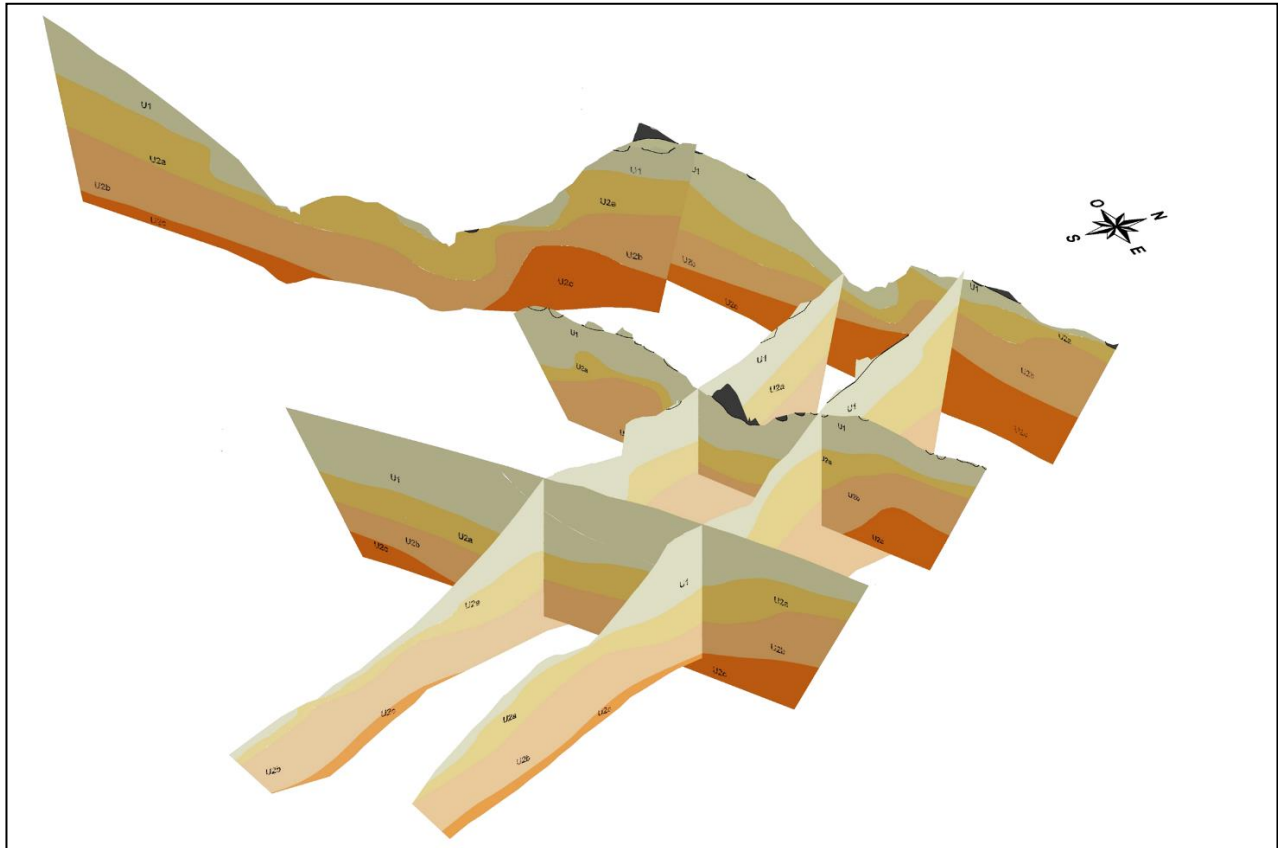


Figura 29. Modelo Geofísico para la zona de estudio

Se observó que U1 es la capa más superficial y se distribuye a lo largo de todo el modelo, donde su espesor de manera general se conserva constante, desde la parte superior del talud hasta el camino de acceso; siendo este sitio donde se determinó el espesor máximo del material sin consolidar que integra esta unidad; así mismo hacia la porción S del modelo este espesor disminuye súbitamente en dirección al cauce del río. En lo que corresponde a la U2, esta subyace a la U1 conservando esta disposición en todo el modelo, como se mencionó anteriormente, debido a los contrastes en sus propiedades

geofísicas, la U2 se subdividió en U2a, U2b y U2c, donde los mayores espesores observados corresponden a las subunidades U2a y U2b, los cuales se sitúan en la porción más alta del talud y disminuyen gradualmente rumbo al cauce del río. Para el caso de la U2c, el espesor máximo observado conforme al alcance de la exploración realizada, principalmente se ubica en la porción N y S hacia la parte superior y al pie del talud respectivamente. Cabe mencionar que se observaron anomalías geofísicas principalmente en las subunidades U2a y U2b, que indican cambios súbitos en las propiedades geoeléctricas y sísmicas del medio, los cuales podrían asociarse a la presencia de alguna estructura geológica y/o cambios litológicos en el subsuelo.

Sobre la base de todo lo anterior, se considera que la U1, debido a su disposición respecto al camino de acceso a la Central, así como a sus propiedades geoeléctricas y sísmicas determinadas en este estudio, es la que representa mayor peligro para la infraestructura durante posibles deslizamientos de tierra generados por abundante lluvia y/o la ocurrencia un evento sísmico importante.

10. Conclusiones

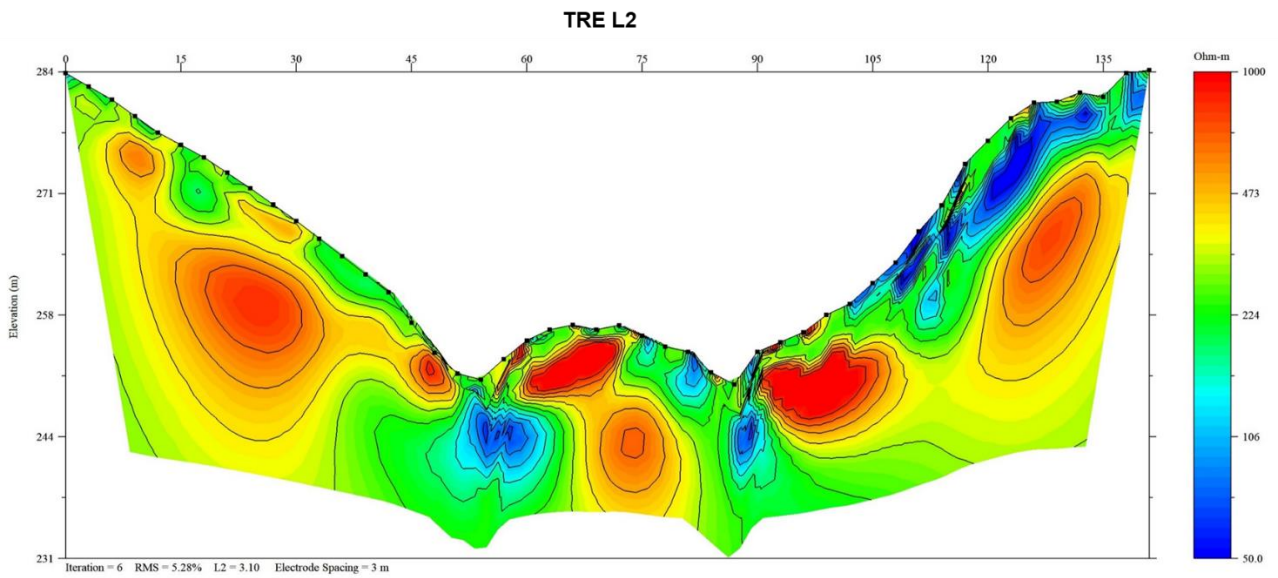
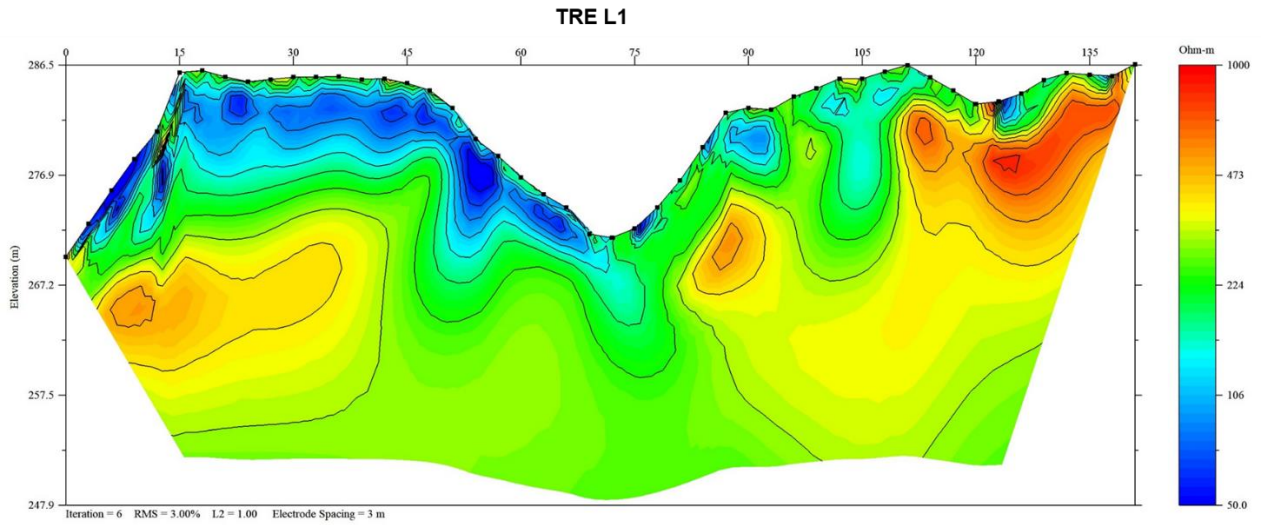
Como resultado del Estudio de Caracterización Geofísica realizado en la zona de estudio ubicada en la ladera de margen derecha, aguas abajo respecto a la Central, fue posible determinar la distribución de los valores geoeléctricos y sísmicos del subsuelo, con lo cual se interpretó un medio pseudo-estratificado, heterogéneo, compuesto por dos unidades las cuales presentan una continuidad en la zona de estudio.

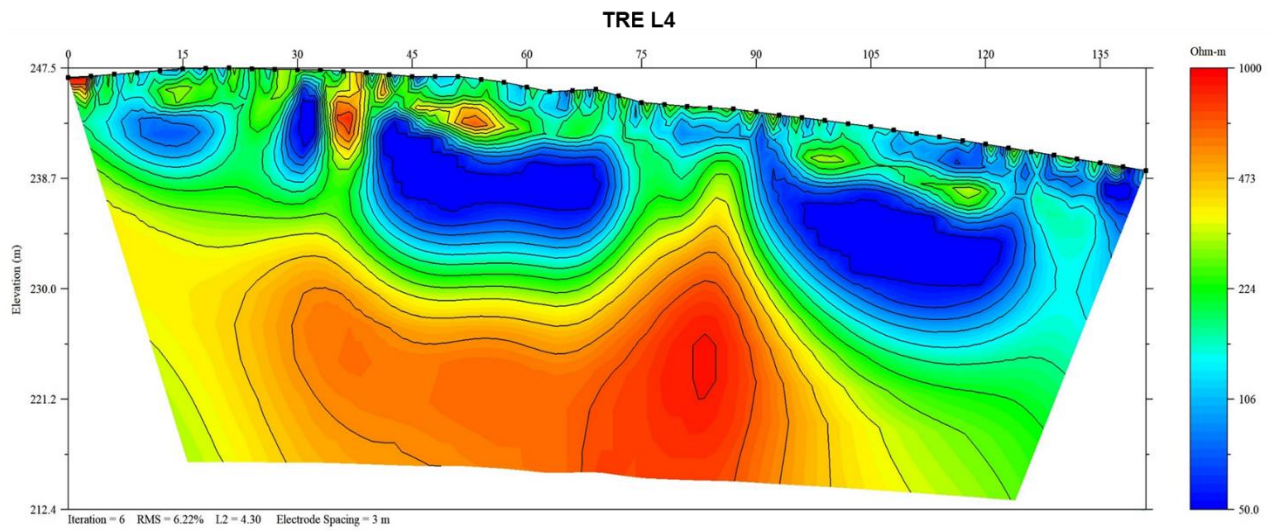
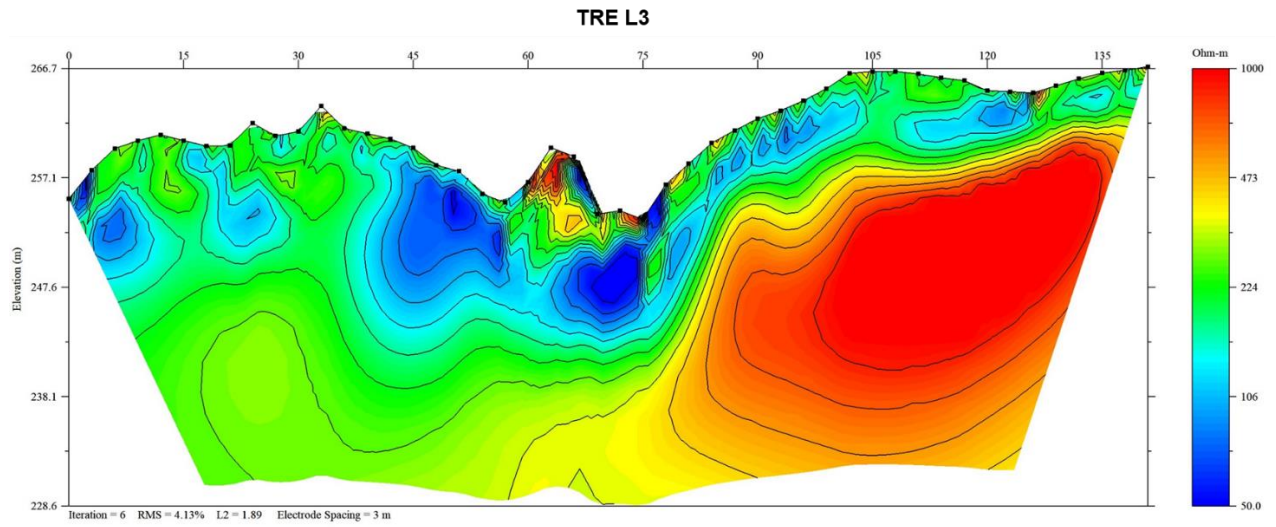
Con base en las secciones elaboradas se definió un modelo geofísico, el cual evidenció dos unidades (U1 y U2) las cuales se distribuyen a lo largo de todo el modelo, donde su espesor disminuye desde la porción N hacia la porción S en dirección al cauce del río, observado principalmente en las secciones 5 y 6, así mismo, se reconocieron contrastes laterales de resistividad y velocidad, que se limitaron mediante interfaces geofísicas en las secciones, ubicados en las subunidades U2a y U2b, que podrían asociarse con la presencia de estructuras geológicas, cambios litológicos en el subsuelo o una mayor o menor proporción de materiales alterados y fracturados.

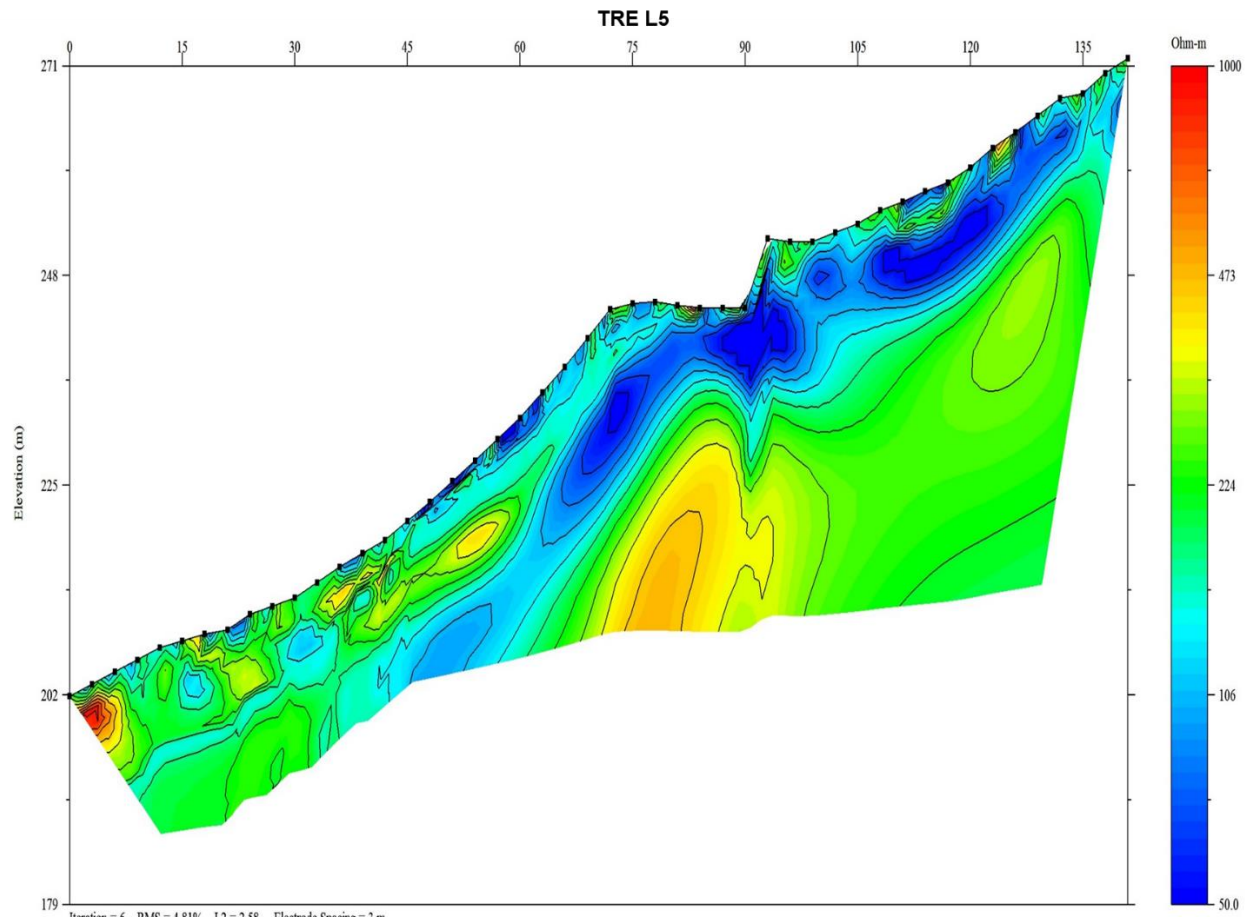
Debido a sus propiedades geoeléctricas y magnitudes de la velocidad compresional (V_p), determinadas en este estudio, se considera que U1 representa a los depósitos de talud, el relleno y la roca muy alterada y fracturada, que estarían más susceptibles a sufrir deslizamientos. Estos materiales en su conjunto presentan espesores desde 0.5 a 17 metros, encontrándose los máximos espesores sobre la sección L3 y L4 camino de acceso a la cortina de la central.

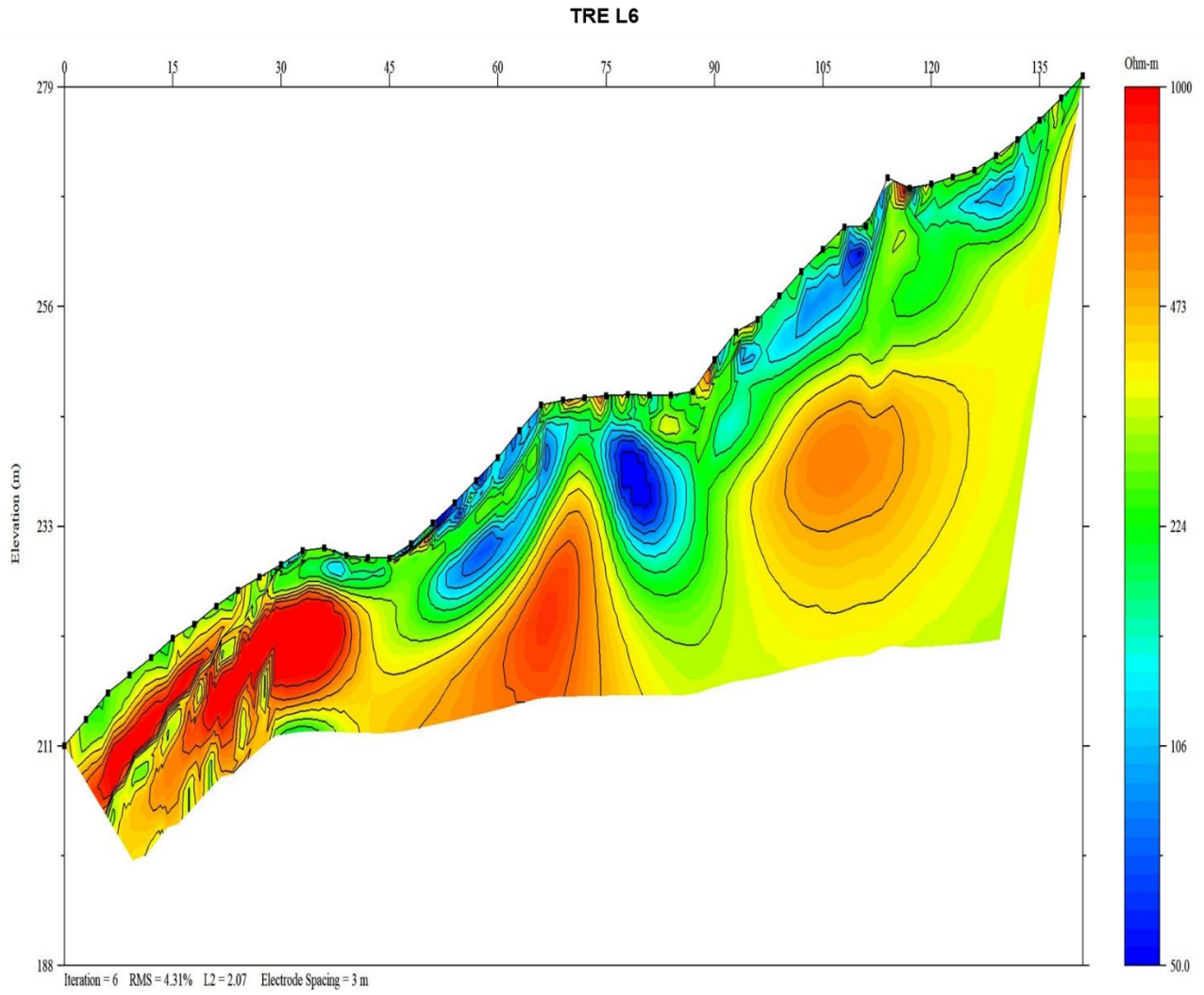
Con respecto a la subunidad U2a, relacionada con el granito fracturado y alterado, se recomienda, se verifique mediante exploración directa la profundidad de su contacto con U1, además, se deja a consideración del área de ingeniería civil si es conveniente darle un tratamiento de mejoramiento para el empotramiento de obras civiles de contención.

Anexo 1 Imágenes resultantes de Tomografía de Resistividad Eléctrica

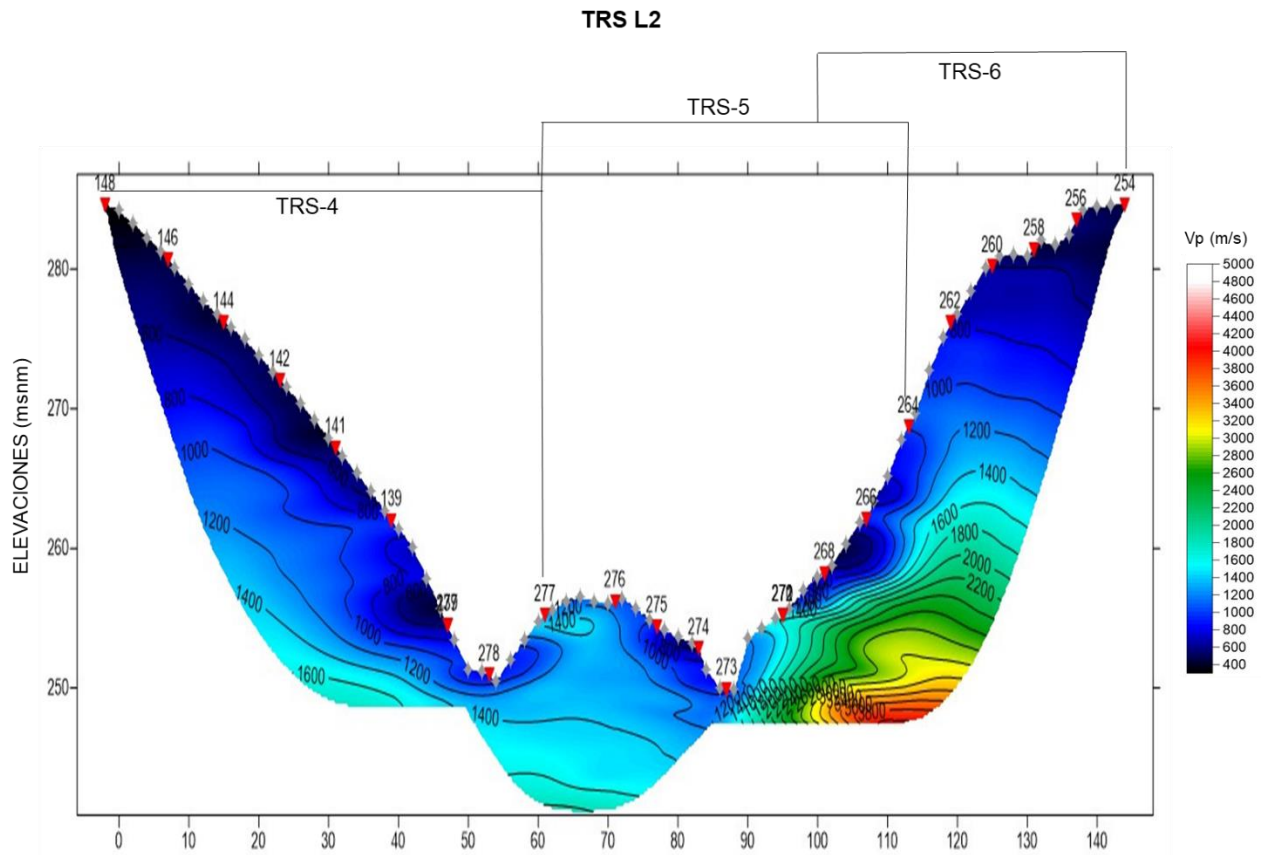
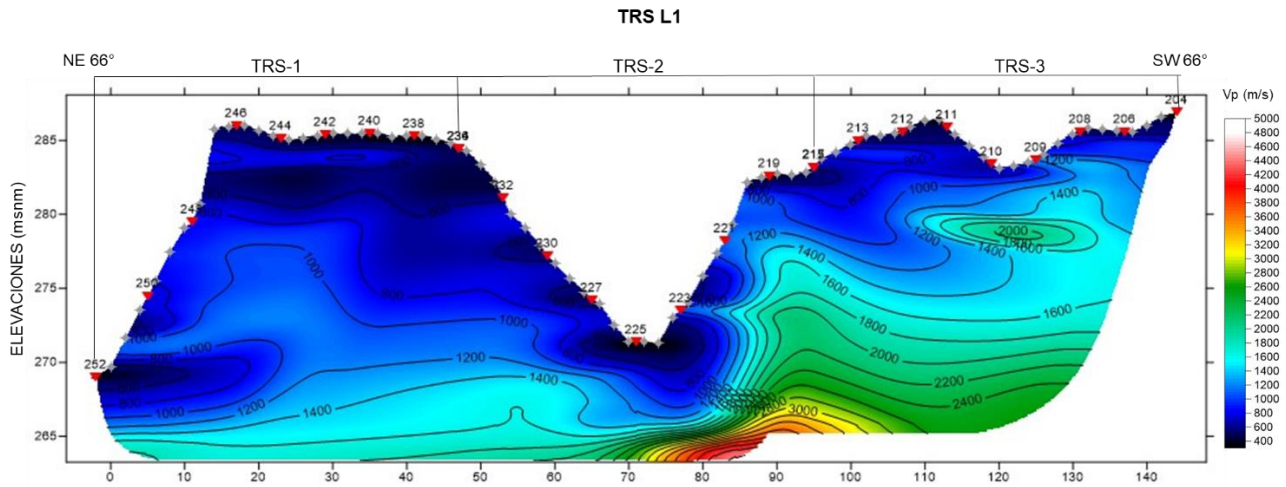


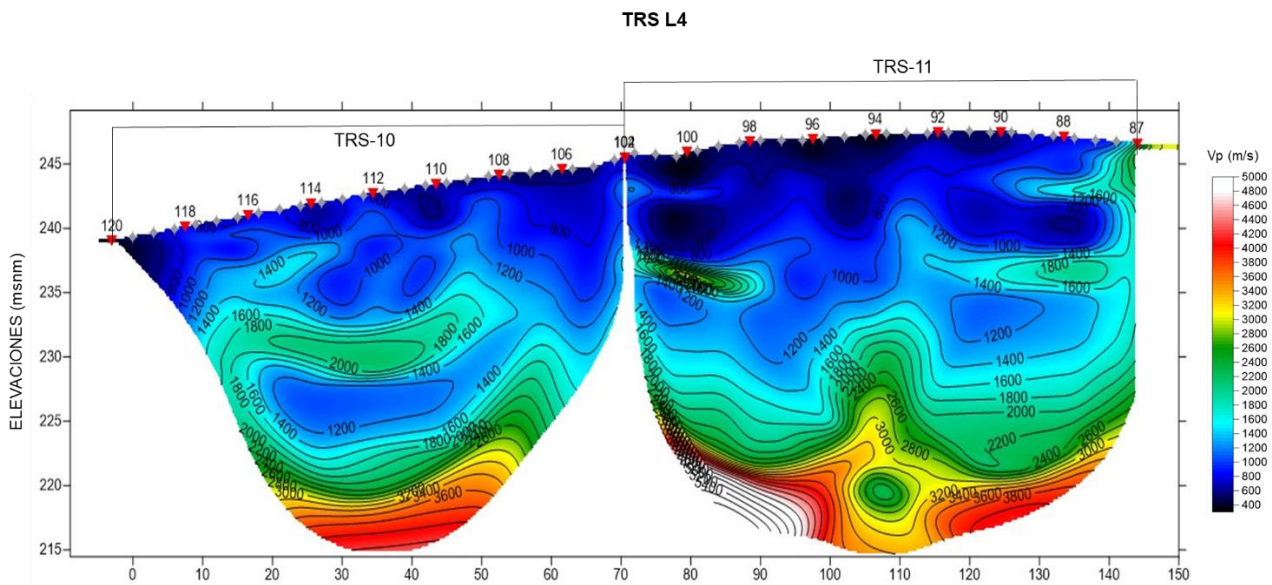
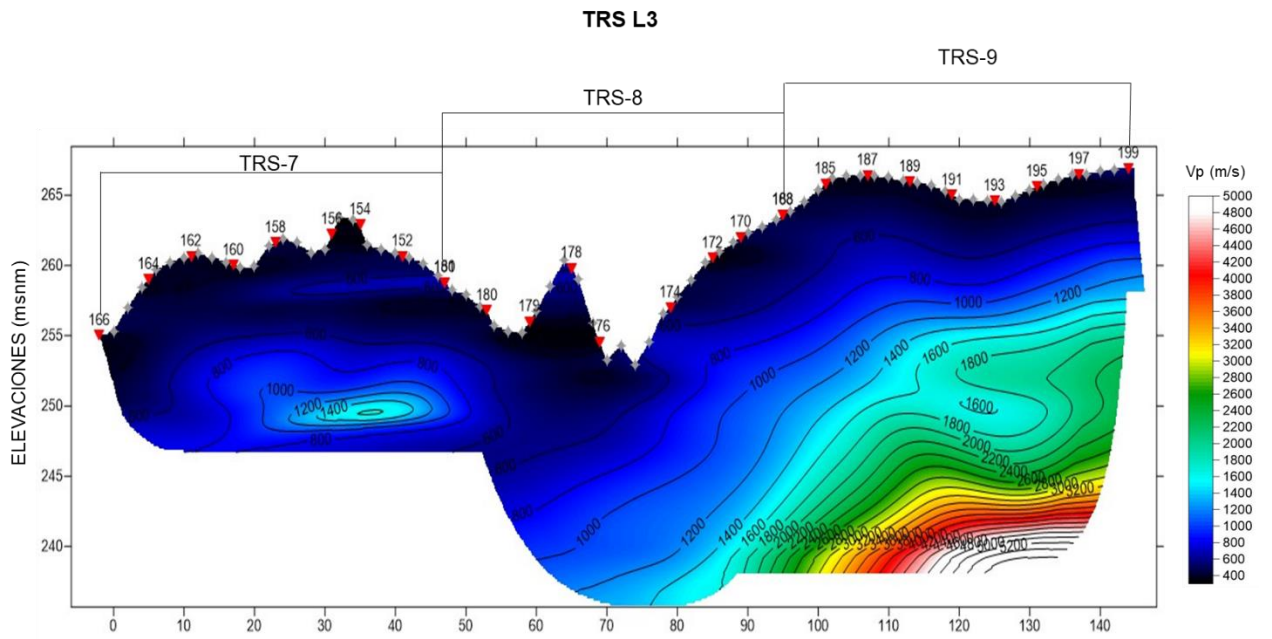


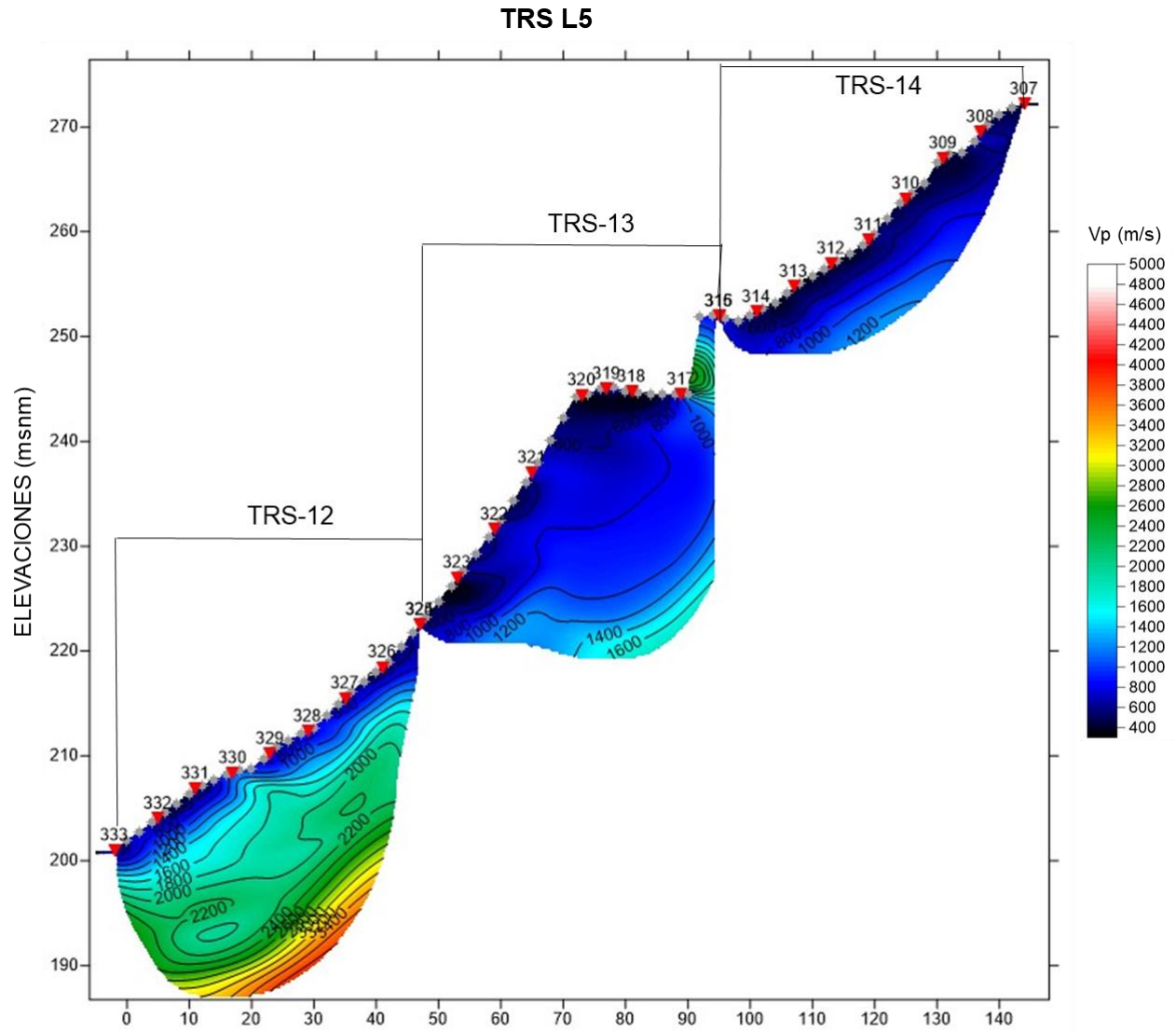


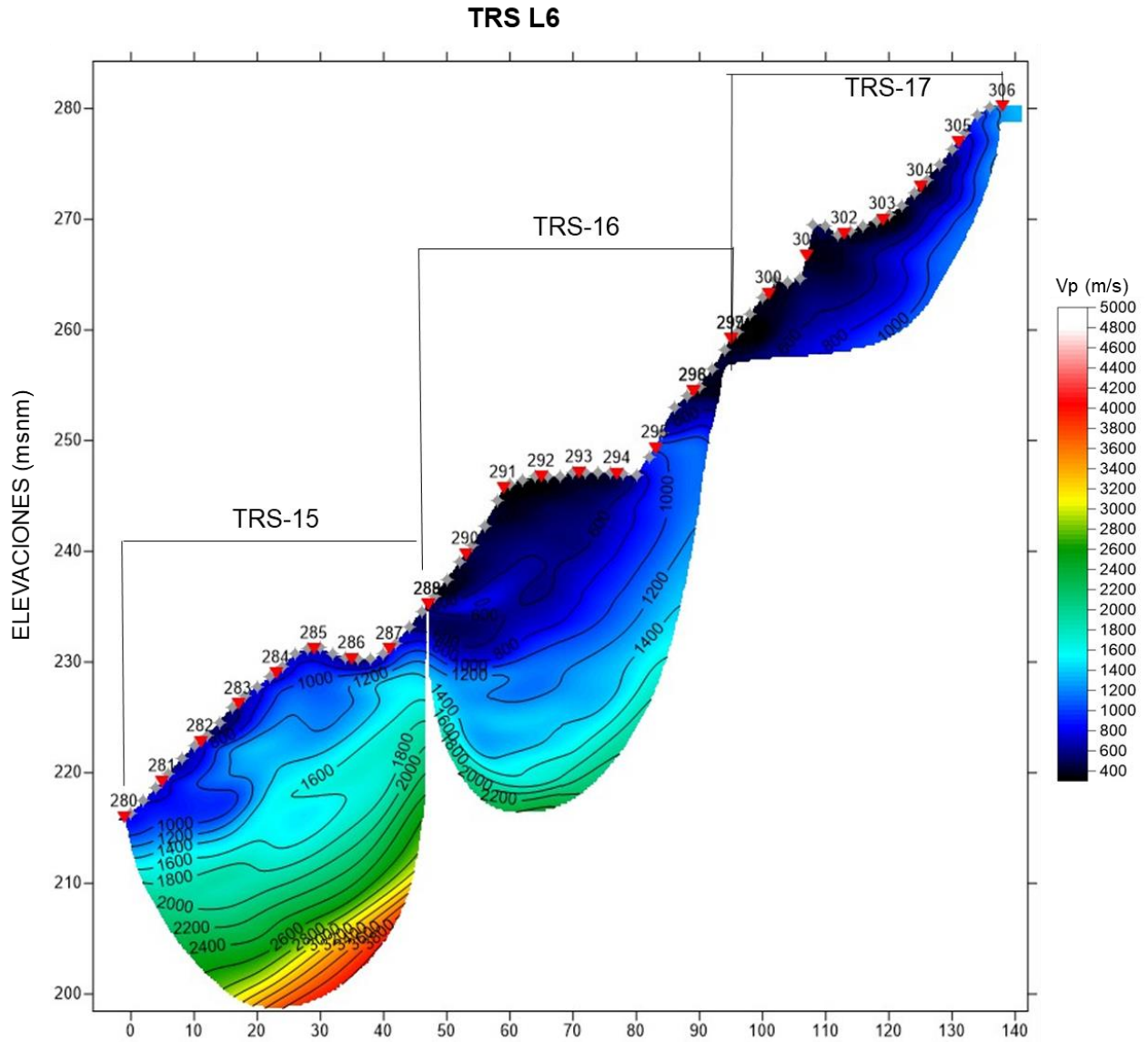


Anexo 2 Imágenes resultantes de Tomografía de Refracción Sísmica









11. Bibliografía

Caterpillar, P. I. (2006). *Caterpillar Performance Handbook*.

Encyclopædia Britannica, I. (1911). *Encyclopædia Britannica*. U.S.A: Encyclopædia Britannica, Inc.

Galindo, R., & Román, F. (2011). Criterios de excavabilidad de macizos rocosos. Factores de corrección. *IV INTERNATIONAL SEMINAR: EARTHWORKS IN EUROPE*.

Loke, Chambers and Wikinson, M. (2012). *Journal of Applied Geophysics*. USA.

Loke, M. y. (1996). *Practical techniques for 3D re-sistivity surveys and data inversion. Geophysical Prospecting*.

Orellana, E. (1982). *Prospección Geoeléctrica en corriente continua*. Madrid: Paraninfo.

Palmer, D. (1980). *The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation*. Society of Exploration Geophysicists.

Sheriff and Geldart, R. (1995). *Exploration Seismology*. USA: Cambridge.

Telford, Geldart, Sheriff, W. (1990). *Applied Geophysics*,. Cambridge: Cambridge University.

Tippens, P. E. (2011). *Física Conceptos y Aplicaciones*. Ciudad de México: Mc Graw Hill.

Vallejo, L. I. (2002). *Ingeniería Geológica*. Prentice Hall.