

## Introducción

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2005) en su publicación, *“El impacto de los desastres naturales en el desarrollo: documento metodológico básico para estudios nacionales de caso”*, define al riesgo como: «El resultado de la interacción de tres factores: peligro, vulnerabilidad y exposición. Esta interacción determina la generación de daños o pérdidas tanto económicas, físicas, sociales o ambientales en ciertos sectores de la sociedad».

De acuerdo a lo anterior, definimos un sitio con riesgo como aquel en donde se conoce el peligro, la vulnerabilidad y su exposición ante un fenómeno perturbador, por lo que se esperan daños, pérdidas económicas, físicas, sociales y ambientales.

La Secretaría de Protección Civil del Distrito Federal (SPC, 2014) definió 20 sitios con riesgo por fenómenos de remoción en masa, hundimiento, fracturamiento y minas, en los cuales se deben realizar estudios de las condiciones y características del subsuelo por medio de tomografías eléctricas. Uno de esos sitios es el Paraje Ixtlahualtongo, objeto del presente informe.

## Antecedentes de la Secretaría de Protección Civil (SPC)

La SPC identificó este sitio con riesgo de la siguiente manera:

Las viviendas se desplantan en terrazas o cortes antropogénicos al filo de la pared de la barranca. El terreno presenta inestabilidad, alto grado de erosión y deslizamiento constante de material del talud. Las condiciones de inestabilidad de la barranca se acentúan en temporada de lluvia; las viviendas presentan fuertes afectaciones en patios y desplantes de las construcciones debido a hundimientos y desprendimientos de terreno.

## Objetivo general

Conocer las características y condiciones en que se encuentran los materiales en el subsuelo del sitio con riesgo Paraje Ixtlahualtongo, por medio de métodos indirectos (tomografía eléctrica).

## Objetivo específico

Identificar los materiales que conforman el talud de la barranca del Paraje Ixtlahualtongo.

## Definición del problema geológico

**Derrumbe:** Fenómeno geológico que consiste en la caída libre y en el rodamiento de materiales en forma abrupta, a partir de cortes verticales o casi verticales de terrenos en desnivel. Se diferencia de los deslizamientos por ser la caída libre su principal forma de movimiento y por no existir una bien marcada superficie de deslizamiento. Los derrumbes pueden ser tanto de rocas como de suelos. Los derrumbes de suelos no son generalmente de gran magnitud, ya que su poca consolidación impide la formación de cortes de suelo de gran altura; en cambio, los de rocas sí pueden producirse en grandes riscos y desniveles [6].

**Deslizamiento:** Aplicado a suelos y a material superficial, se refiere a movimiento plástico lento hacia abajo. Aplicado a sólidos elásticos, alude a deformación permanente a causa de algún esfuerzo [19].

## Metodología de trabajo

Una vez identificados los fenómenos que se manifiestan en el Paraje Ixtlahualtongo, para el desarrollo del proyecto se siguió la siguiente metodología:

**Descripción del marco de referencia y geología de la zona.** Se realizó una descripción del marco de referencia y geología de la zona, con el fin de conocer la ubicación y acceso al sitio, e indagar las condiciones geológicas que generan o favorecen los fenómenos que se manifiestan en el Paraje Ixtlahualtongo.

**Fundamentos del Método Geofísico.** En esta etapa se abordaron los principios físicos y matemáticos que sustentan el método utilizado en la prospección.

**Recorrido de campo.** Se visitó el polígono identificado por la SPC y se observaron las condiciones de peligro y vulnerabilidad en la que se encuentra la población.

**Determinación de la zona de la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE).** Después del recorrido de campo se identificó el sitio ideal para realizar la TRE, el cual cumplió las condiciones ideales para el desarrollo e identificación de las condiciones en las que se encuentran los materiales en el subsuelo. Una vez que se seleccionó la zona para la TRE se describió el equipo a utilizar para el levantamiento.

**Diseño del levantamiento o secuencia de la TRE.** En esta etapa se ingresaron en el equipo los datos del sitio, longitud y separación entre electrodos. Una vez aprobado el diseño de la TRE, se verificaron las condiciones de los electrodos y cables para proceder a transmitir la corriente y levantar el registro.

**Procesamiento de datos.** Se descargaron los datos de la memoria del equipo hacia la computadora, y se inició el procesamiento de los datos con los programas adecuados para obtener un modelo geoelectrico en 2D.

**Interpretación de datos (modelo geoelectrico 2D).** En esta etapa se relacionaron las propiedades resistivas de los materiales geológicos del modelo 2D.

## Desarrollo del proyecto

### Descripción del marco de referencia y geología de la zona

#### Localización

El sitio con riesgo del Paraje Ixtlahualtongo se localiza en la parte noroeste de la Delegación La Magdalena Contreras, entre las calles Ixtlahualtongo y Ojito de agua (Figura 1). El acceso principal al lugar es por la avenida Ex-hacienda de Eslava.

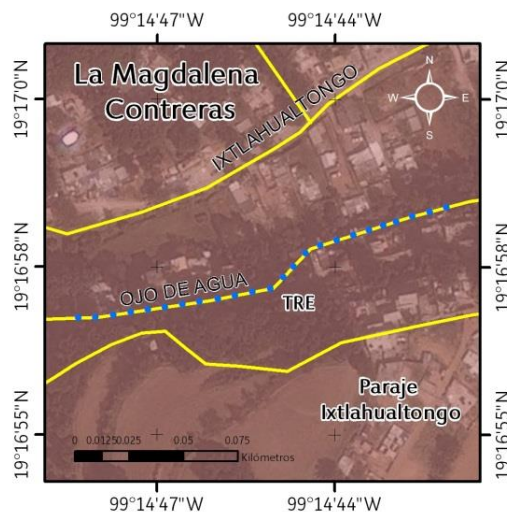


Figura 1. Mapa de localización del sitio con riesgo Paraje Ixtlahualtongo, localización de la TRE (los puntos en color azul marcan la ubicación de los electrodos), el área rellena (color salmón) es el polígono propuesto por la SPC

## Geología de la zona de estudio

### Relieve

El *Atlas de Riesgo de la Delegación La Magdalena Contreras* (ARDLMC, 2011) describe el relieve de la zona de lomeríos, la cual representa cerca del 50% del territorio delegacional y que está integrado por barrancos de forma rectilínea-sinuosa, de manera transversal y longitudinal respectivamente, con una pendiente que va de 3-8 grados.

### Litología

La actividad volcánica del plioceno y del pleistoceno desarrolló extensos derrames de lava y domos volcánicos de composición andesítica-dacítica de afinidad calcoalcalina, intercalados con oleadas y flujos piroclásticos de bloques y cenizas, pómez, depósitos de caída, flujo de detritos y lodo, así como colapsos que originaron depósitos de avalanchas de escombros (Kaiser, 2014).

De acuerdo con el *Atlas de Riesgo de la Delegación La Magdalena Contreras* (2011), los materiales que afloran en el área son derrames de lava, flujos piroclásticos, depósitos laháricos, conglomerados y suelo desarrollado.

La andesita corresponde a roca con composición intermedia, con textura microlítica. Los minerales presentes son plagioclasas, piroxeno y hornblenda, asociados a biotita, cuarzo, magnetita y esfena (*Atlas de Riesgo de la Delegación La Magdalena Contreras*, 2011).

### Estratigrafía

Romero-Terán (2001) incluye a un conjunto de materiales de composición intermedia entre andesitas y dacitas bajo el término de *Formación Las Cruces*. En el *Léxico Estratigráfico de México* (2013) se divide a la Formación en Miembro Brecha Piroclástica Cantimplora (*Cantimplora Pyroclastic Breccia Member*) y Miembro Lava Dacítica Apilulco (*Apilulco Dacitic Lava Member*). Romero (2001) propone elevar el rango de la unidad a grupo, al argumentar que los productos volcánicos que comprenden la zona provienen de diferentes fuentes que tuvieron actividad en diferente tiempo y depositaron intercalaciones que caracterizan a la Formación La Nopalera, San Martín, Piedra Grande y La Cima.

Vázquez y Jaimes (1989) reportan que la formación Las Cruces cubre con discordancia erosiva rocas del mioceno y rocas del plioceno, mientras que subyace a la Formación Tarango y al Grupo Chichinautzin al sur de la Ciudad de México.

La descripción litológica en el *Léxico Estratigráfico de México* (2013) presenta el estudio de Velázquez (1989) donde enuncia la presencia a grandes rasgos de depósitos piroclásticos de pómez pliniana, secuencias de *surges* planares o masivos, cristalinos, vítreos y en ocasiones con pómez, cubiertos por flujos piroclásticos generalmente no consolidados compuestos por cenizas cristalinas, vítreas y de pómez, que pueden presentar o no bloques accidentales y/o juveniles. La interestratificación es poco común y está cubierta por material aluvial y paleocanales fluviales.

Delgado y Martín (1993) describen que el Miembro Brecha Piroclástica Cantimplora está compuesto por depósitos de lahares, bloques y lluvia de ceniza conocidos como *ash flow* inmersos en una brecha piroclástica que incluyen fragmentos de lapilli y bloques a un metro de longitud y de composición dacítica. Los depósitos de lahar no consolidados están compuestos por bloques angulares a subangulares con promedio de 20 a 30 centímetros, pero pueden alcanzar hasta un metro de diámetro. Delgado y Martín (1993) indican 150 metros de espesor para el Miembro Brecha Piroclástica Cantimplora.

Respecto al Miembro Lava Dacítica Apilulco, Delgado y Martín (1993) mencionan que tiene un espesor de 400 metros y una composición principal de flujos de lava dacítica, compuestos por plagioclasa (oligoclasa-andesina), hornblenda y cristales de hipersteno en una matriz microcristalina de plagioclasa apatita y minerales opacos (cristales pequeños de titanomagnetita intergranular, hematita, magnetita e ilmenita), que presenta lavas con fenocristales de ortopiroxeno y augita embebidas en una matriz de plagioclasa microlítica, así como unidades laháricas interestratificadas con lava.

El espesor máximo de la unidad de la sierra de las Cruces en el Cerro de San Miguel es de 990 metros (Vázquez y Jaimes, 1989).

De acuerdo con Mooser (1972 en Romero-Terán, 2001), el Plioceno es caracterizado por un clima árido que originó abanicos volcánicos y escasos depósitos fluviales mientras que durante el Pleistoceno existieron periodos de glaciación que modelaron las barrancas de formación reciente, en valles y en forma de U.

Schlaepfer (1968) consideró a la Formación Las Cruces de edad mioceno-plioceno. Delgado y Martín (1993) la consideran de edad plioceno cuaternario temprano. Mora *et. al.* (1987) sugieren una edad plioceno tardío-pleistoceno con base en fechamientos obtenidos mediante el método K-Ar cuyas edades están entre  $1.79 \pm 0.1$  Ma y  $2.87 \pm 0.15$  Ma.

La estructura volcánica descansa discordantemente en la zona sur sobre calizas del Cretácico y sobre rocas volcánicas de la secuencia máfica basal en su afloramiento más reciente, lo que lo hace más joven que la formación de Tepoztlán del Mioceno (Kaiser, 2014). Al norte de la Sierra de las Cruces descansa sobre estructuras volcánicas del Mioceno medio que corresponden a la formación Sierra de Guadalupe y la Sierra Muerta del Plioceno tardío.

La Formación Xochitepec subyace a la Formación Las Cruces, ésta aflora en la parte S-SE de la Delegación La Magdalena Contreras, la cual se conforma por una serie de derrames lávicos de composición andesítico-dacítico con variación hasta riolacitas, cuya fuente proviene del cerro Zacazontetla de composición andesítica. La Formación Zempoala cubre la porción norte de la delegación con un flujo piroclástico de varias secuencias en una dirección preferencial W-E, cuya fuente provino de los eventos explosivos del cerro Teopazulco compuesto por tobas andesíticas y flujos de lahares. Los derrames de lava basáltica de la Formación Ajusco subyacen a depósitos aluviales del holoceno y que representan la acumulación progresiva de sedimentos generados por la dinámica de la modelación geomorfológica (Servicio Geológico México, 2002).

## Fundamentos del Método Geofísico

Los métodos geofísicos exploran de manera indirecta las propiedades físicas existentes en los materiales que componen el subsuelo. Entre las propiedades estudiadas se encuentran la resistividad eléctrica, es decir, la oposición que presentan los materiales al flujo de una corriente eléctrica a través de ellos. La resistividad varía en función del contenido de agua, la salinidad y la distribución de ambas en los poros, de la presión y de la temperatura (Serrano, 2009).

Las rocas presentan minerales semiconductores y entre sus poros pueden existir fluidos, los cuales pueden contener electrolitos que hacen que se comporten como conductores iónicos de resistividad muy variable. Llamamos resistividad ( $\rho$ ) a la resistencia específica de cada material y en nuestro caso está dada por la siguiente fórmula (Auge, 2008):

$$\rho = k * (\Delta v/I)$$

Donde:

$\Delta v$ , es la diferencia de potencial y se mide en volts.

$I$ , es la corriente eléctrica y se mide en amperes.

$k$ , es la constante geométrica.

Para obtener  $k$  usamos la siguiente fórmula:

$$k = \pi n a(n + 1)(n + 2)$$

Donde:

$\pi$ , es la constante matemática con valor de 3.141592...

$a$ , es la separación que existe entre electrodos y es constante.

$n$ , es el número de niveles en el cual se profundiza.

Esta fórmula sólo se aplica para el método de Dipolo-Dipolo (Mussett, 2000).

## Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

La tomografía de resistividad eléctrica es un método de resistividad multielectródico, basado en la modelación 2D de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas (elementos finitos o diferencias finitas) para generar imágenes denominadas

pseudosecciones (Serrano, 2003). Por el número de datos obtenidos, éste es un método geofísico de alta resolución (Constantino, 2011).

Para la realización de la TRE se usó el siguiente arreglo:

**Arreglo Dipolo-Dipolo.** El método Dipolo-Dipolo al igual que otras variables de prospección eléctrica utiliza un arreglo dado por cuatro electrodos (tetraelectrónico), dos de corriente ( $C_A$  y  $C_B$ ) y dos de potencial ( $P_M$  y  $P_N$ ) separados por una distancia  $nD$  (Orellana, 1972; *ELECTRE Pro software Help, Iris Instruments, 2012*; Figura 2).



Figura 2. Disposición de los electrodos de corriente ( $C_A$ ,  $C_B$ ) y los electrodos de potencial ( $P_M$ ,  $P_N$ ) (*ELECTRE Pro software Help, Iris Instruments, 2012*).

Los electrodos de potencial se mueven de la siguiente manera: el electrodo  $P_M$  ocupará el lugar del electrodo  $P_N$ , y  $P_N$  avanzará una distancia  $D$  (Figura 3).

Para determinar la profundidad del punto de atribución o cuadripolo, que es un valor de  $\rho_a$  que se obtiene con un dispositivo dipolar, suele atribuirse a un punto de intersección de dos semirrectas que parten desde los centros de cada dipolo con un ángulo de  $45^\circ$  (Perdomo, 2009; Figura 3).

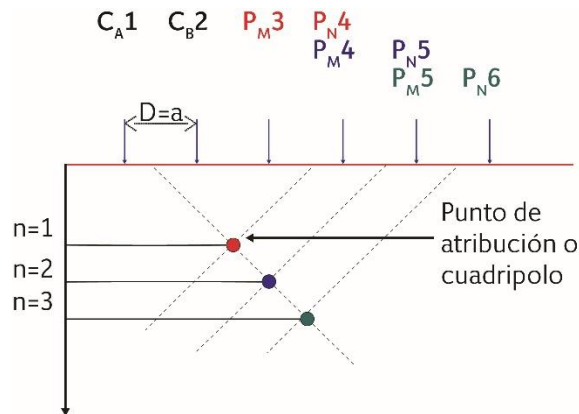


Figura 3. Muestra la secuencia de ocupación de los electrodos de potencial durante se desarrollan las mediciones (*ELECTRE Pro software Help, Iris Instruments, 2012*).

El electrodo de corriente  $C_A$  se moverá extendiendo su separación con el electrodo  $C_B$  al doble de la distancia inicial ( $D=2a$ ) (Figura 4).

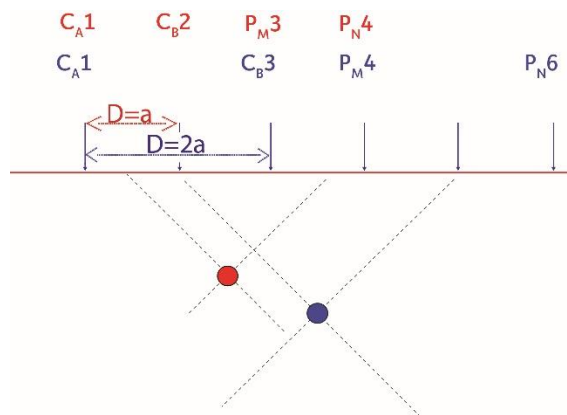


Figura 4. Secuencia del movimiento de los electrodos de corriente; los 4 electrodos ( $C_{A1}$ ,  $C_{B2}$ ,  $P_{M3}$ ,  $P_{N4}$ ) para obtener el punto de atribución rojo se denotan en el mismo color; y de la igual manera para el cuadrípulo azul ( $C_{A1}$ ,  $C_{B3}$ ,  $P_{M4}$ ,  $P_{N6}$ ) (ELECTRE Pro software Help, Iris Instruments, 2012).

## Recorrido de campo

Durante el recorrido de campo en el sitio con riesgo Paraje Ixtlahualtongo se observó que los materiales de las laderas son suelos limo-arcillosos, estos materiales son deleznable y altamente erosionables por su exposición. Las laderas del Paraje Ixtlahualtongo presentan una pendiente pronunciada y en algunas zonas se presenta basura acumulada, lo que altera al suelo y sus procesos naturales (Figura 5).



Figura 5. Fotografía de una barranca, donde se observa la pendiente pronunciada en una de las laderas y acumulación de basura sobre la misma. Al frente se observan construcciones sobre la otra pared de la barranca (19.283280° N; 99.242428° W. Calle: Ojo de Agua).

Se han construido viviendas sobre las paredes de la barranca que son una zona inestable tanto por el material geológico que las constituye como por la pendiente a la que se encuentran sometidos dichos materiales. Durante la temporada de lluvias los materiales que constituyen el suelo son arrastrados hacia las partes más bajas de la ladera, por lo que los habitantes colocan costales llenos de material fino con el objetivo de aminorar o anular dicho proceso (Figura 6).



Figura 6. Viviendas situadas en la pared de la barranca, donde los pobladores utilizan costales apilados para nivelar la construcción, los cuales se encuentran afectadas a causa del intemperismo (19.2835° N; 99.2453° W. Calle: Ojo de Agua).

La inclinación que presentan los árboles en la zona de riesgo es un buen indicador del movimiento de materiales como muestra la Figura 7.

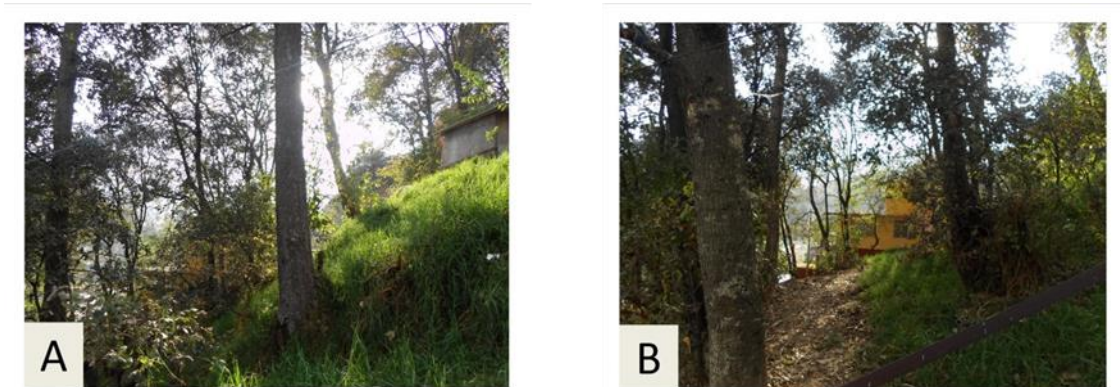


Figura 7. Fotografías que muestra la inclinación de los árboles ubicados en diferentes partes de la ladera de la barranca (19.2842° N; 99.2444° W. Calle: Andador 43).

Como obra de mitigación provisional, los pobladores colocan mantas plásticas con el objetivo de evitar que los materiales que componen el talud se sobresaturen y sean erosionados (Figura 8).

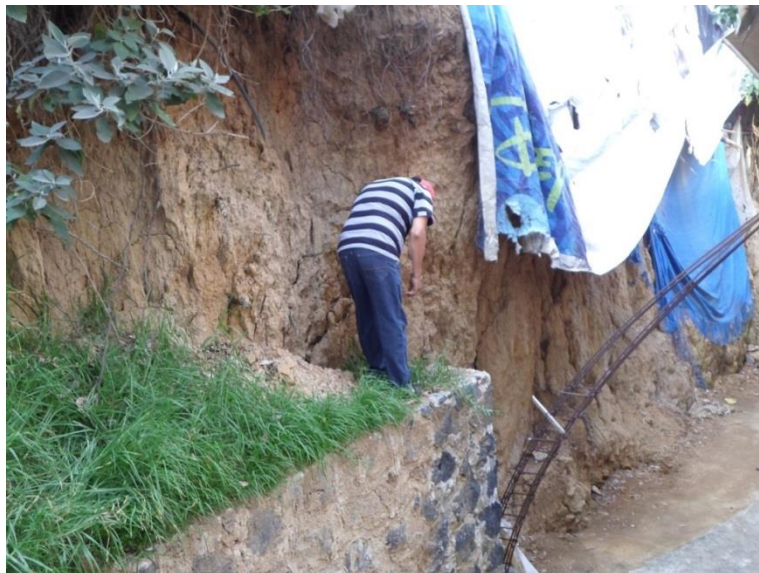


Figura 8. Fotografía que muestra una zona donde se colocaron mantas plásticas, que evitan que el material deleznable que compone la pared se sobresature en época de lluvia (19.2842° N; 99.2444° W. Calle: Andador 43).

## Determinación de la zona de la TRE

Se determinó realizar la TRE en la calle de Ojo de Agua debido a que es la única calle que cumple con los siguientes requisitos indispensables:

- La línea de ubicación de electrodos debe contar con una longitud mínima, que es determinada por el número de electrodos multiplicada por la separación entre cada uno de ellos. En nuestro caso el número de electrodos es 47 y la separación entre ellos es de 3 m, la longitud de la línea de ubicación de electrodos es de 138 m.
- La línea de la TRE puede ser continua, y tener cierta linealidad.

- La línea es cercana al talud donde se encuentran las casas que han presentado el fenómeno de remoción en masa.

## Descripción del equipo

El equipo utilizado para el estudio geofísico (TRE) es el siguiente:

Resistivímetro automático multielectrodo *Syscal Pro*, el cual es un sistema de resistividad y polarización inducida (IP) para estudios eléctricos y perfiles de 10 canales. Combina un transmisor, un receptor (sus características se describen en la Tabla 1) y una unidad de conmutación en una sola carcasa.

Transmisión		Recepción	
Potencia	250 W	Impedancia de entrada	100 MΩ
Voltaje	800–1,000 V	Voltaje máxima por canal	1 : 15V
Corriente	2.5 A	Tipo de precisión	0,2 %
Conversión de potencia	DC/CD ext	Resolución	1 microV (μV)

Tabla 1. Características del equipo *Syscal Pro* (fuente: [www.iris-instruments.com](http://www.iris-instruments.com)).

Accesorios:

- Fuente: batería externa de 12 V
- 48 electrodos impolarizables
- 4 carretes de cables de superficie de 12 conexiones cada una con espaciamientos de 10 m
- Computadora portátil que cuente con los programas de *ELECTRE Pro* y *Prosys II*, *EarthImager*, *Surfer 9* y *ComsysPro*
- Navegador GPS
- Rotomartillo
- Conos de señalamientos
- Cronómetro
- Cinta métrica
- Marro
- Lápiz
- Libreta

## Pruebas de calibración

De acuerdo a Sepúlveda (2009) existen dos formas de diseño de equipos para medir resistividad:

- 1) Equipos que entregan un voltaje o una corriente invariable en el tiempo (CD) a la salida de sus terminales (A y B).
- 2) Equipos que obtienen un voltaje o una corriente alterna con forma de onda cuadrada a la salida de sus terminales A y B. El problema con estos equipos es que se necesita contar con un medidor de potencial y de corriente que pueda medir señales cuadradas de pequeñas frecuencias, proceso llamado *prueba de calibración*.

El equipo *Syscal Pro* corresponde al primer grupo. De acuerdo a las instrucciones del manual de uso del fabricante la opción de calibración de los canales del equipo se debe realizar después de la actualización de *firmware*, también si se tiene una duda sobre los niveles de voltaje recibidos (*Syscal Pro User's Manual*, 2012).

## Diseño del levantamiento o secuencia

Una vez determinada la zona donde se realizará la TRE, se diseña el levantamiento, que incluye establecer la separación entre electrodos, el número de electrodos usados, la continuidad y la alineación de los mismos (Figura 9).



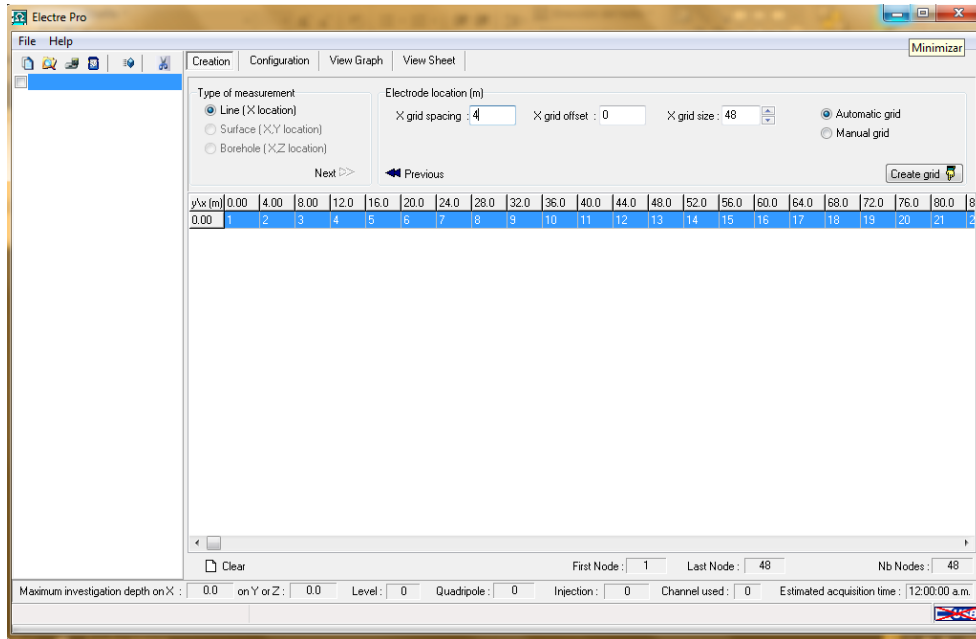


Figura 9. Ventana de asignación de separación entre electrodos (ELECTRE Pro software, Iris Instruments, 2012).

- Configuración del levantamiento con el software *ELECTRE Pro*.

En este paso se determina el tipo de arreglo a usarse, el voltaje inyectado, número de mediciones y el factor de calidad (Figura 10).

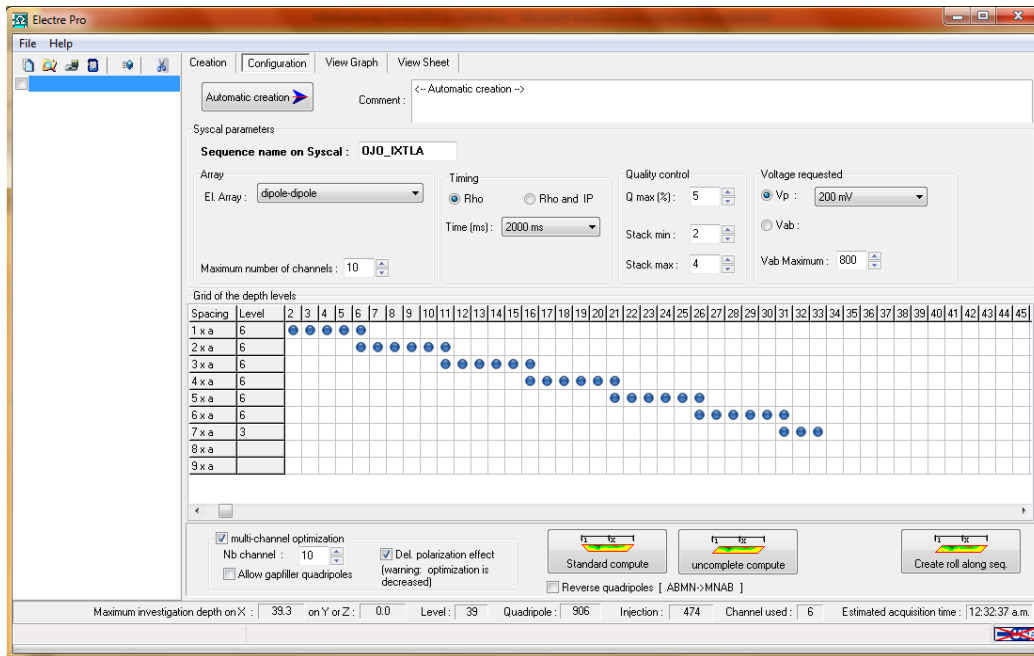


Figura 10. Ventana de configuración, en ella se introducen los parámetros de inyección de voltaje, el tipo de arreglo, el nombre que tendrá el levantamiento, entre otros (ELECTRE Pro software, Iris Instruments, 2012).

- Obtención de gráfica preliminar.

Con los parámetros determinados por el usuario, el software *ELECTRE Pro* construye una gráfica preliminar, que permite verificar si el diseño del levantamiento es el adecuado (Figura 11).

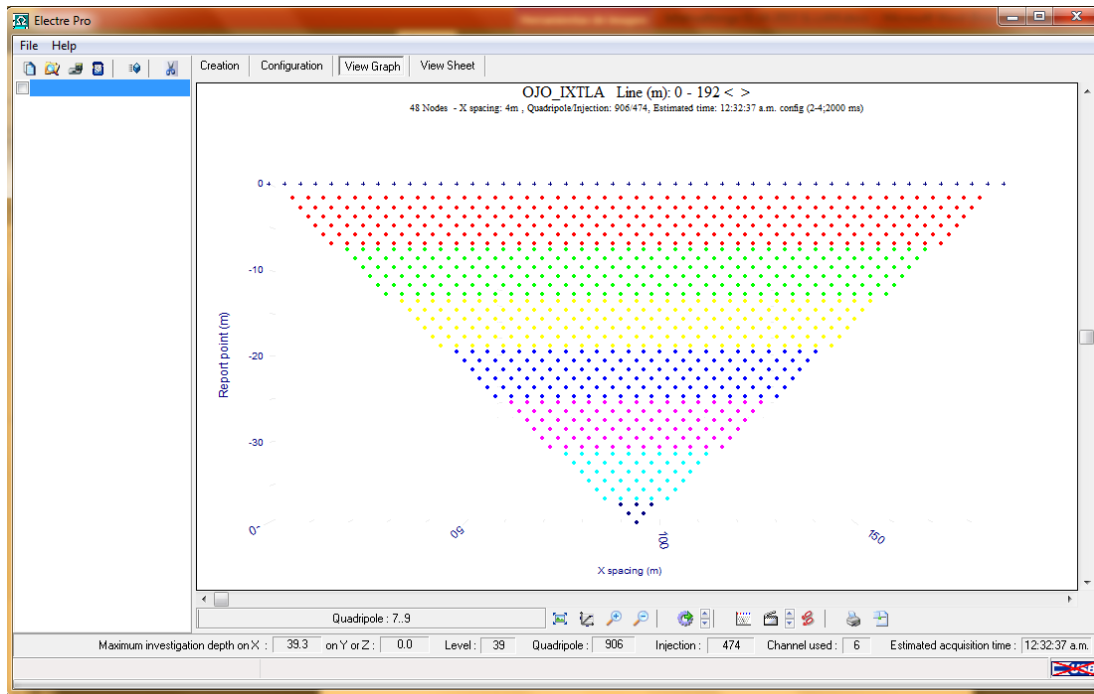


Figura 11. Ventana que muestra la gráfica preliminar del levantamiento; en la parte superior se puede observar el nombre del levantamiento y el número de electrodos a utilizarse, el espaciamiento entre ellos; en la parte media se encuentra una representación de los cuadripolos; en la parte inferior (de izquierda a derecha): el nivel máximo de investigación, niveles, total de cuadripolos, canales utilizados y el tiempo estimado (ELECTRE Pro software, Iris Instruments, 2012).

Una vez verificado que el diseño del levantamiento sea el adecuado, se introduce al equipo. Las características de este levantamiento o secuencia fueron las siguientes (Tabla 2):

<b>Longitud del levantamiento</b>	138 m
<b>Número de electrodos utilizados</b>	47
<b>Separación entre electrodos</b>	3 m
<b>Profundidad máxima de investigación</b>	39.3 m
<b>Total de puntos de atribución</b>	906
<b>Puntos de inyección</b>	472

Tabla 2. Datos del levantamiento (Fuentes: Datos obtenidos en campo y EarthImager 2D).

Durante el levantamiento en campo de la TRE, se aplicó la siguiente metodología:

1. Ubicación y medición de las líneas de tomografía.
2. Perforación en cada uno de los puntos donde se ubicaron los electrodos.
3. Colocación de electrodos a 3 m de distancia entre cada uno.
4. Verificación de que cada electrodo que hicieran contacto con el material del subsuelo.
5. Instalación de los conectores del cable principal hacia los electrodos. Se verificó que el cable no estuviera enrollado o doblado a fin de que el flujo de electricidad no sufriera interrupción.
6. Colocación el equipo *Syscal Pro* entre los electrodos 24 y 25. Se utilizó una batería de 12 V como fuente externa.
7. Comprobación preliminar del paso de corriente en cada uno de los electrodos y medición preliminar de la resistencia de la puesta a tierra de los dipolos.
8. Recopilación de datos con el equipo, durante la cual se observó que el cableado no fuese movido o el flujo de corriente pudiese haber sufrido interrupción por causas externas.

9. Verificación del correcto guardado de los datos en la memoria del equipo concluido el tiempo de levantamiento.



Figura 12. A) Colocación de la consola del equipo Syscal Pro durante el levantamiento. B) Electrodo colocado en contacto con el material del suelo. (19.2825° N; 99.2459° W. Calle: Ojo de Agua).

**Ubicación de los electrodos**

En la Tabla 3 se muestran las coordenadas de los de los puntos donde se colocaron electrodos nones.

No. de electrodo	X	Y	Distancia (m)
1	474070	2132096	0
3	474078	2132097	6
5	474086	2132098	12
7	474094	2132099	18
9	474102	2132100	24
11	474110	2132101	30
13	474118	2132102	36
15	474126	2132104	42
17	474134	2132105	48
19	474142	2132107	54
21	474150	2132108	60
23	474158	2132110	66
25	474164	2132115	72
27	474169	2132120	78
29	474174	2132126	84
31	474181	2132130	90

33	474189	2132132	96
35	474196	2132134	102
37	474204	2132137	108
39	474210	2132139	114
41	474216	2132140	120
43	474224	2132143	126
45	474231	2132145	132
47	474239	2132147	138

Tabla 3. Ubicación de electrodos nones en coordenadas UTM (fuente: datos de campo).

### Justificación del tipo de arreglo de la TRE

El arreglo Dipolo-Dipolo, es altamente sensitivo a los cambios horizontales (estructuras verticales) y ofrece una mayor densidad de puntos de atribución (Constantino, *óp. cit.*); razones por las que se optó por usar este arreglo. En la Figura 13, se muestra un ejemplo del modelo de puntos de atribución obtenidos con el método Dipolo-Dipolo; la flecha indica la dirección de la medición; se usan dos electrodos de inyección de corriente (color rojo) y 4 o 6 electrodos de potencial (color azul); el distanciamiento entre puntos de atribución es corto, por lo que la resolución es mayor.

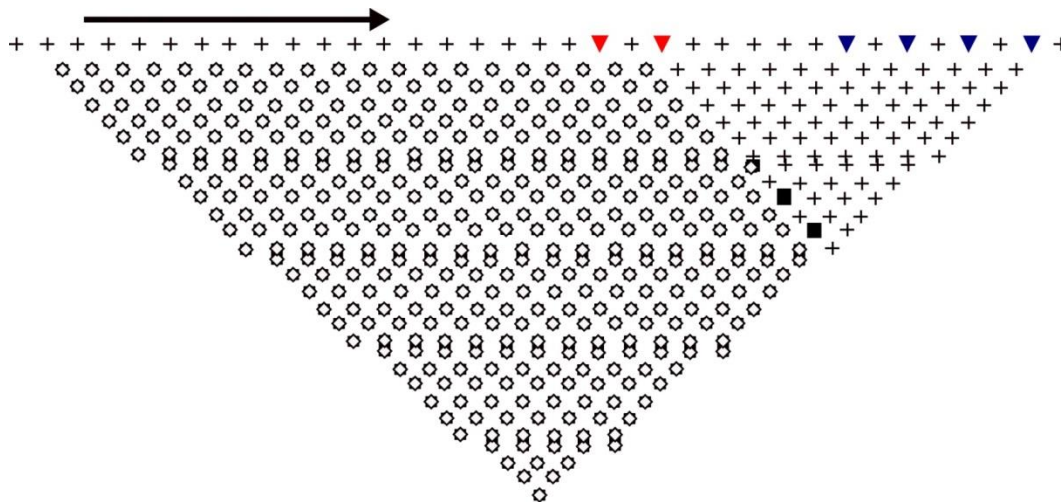


Figura 13. Modelo de puntos de atribución. Triángulos rojos, electrodos de inyección de corriente; triángulos azules, electrodos de potencial; cuadros huecos, puntos de atribución ya medidos; y cuadros negros, puntos de atribución en los que se está realizando la medición en ese momento. Las cruces son los puntos de atribución que aún no han sido medidos (Iris Instruments, Software ELECTRE Pro, 2012).

### Procesamiento de datos

Los datos del levantamiento o datos de campo se extraen del equipo con el software *Prosys II*, en un archivo (.txt). La obtención de datos de manera manual con el equipo *Syscal Pro* no es posible, dada la rapidez de ejecución del equipo durante el levantamiento.

El software *Prosys II*, nos muestra una ventana que contiene los siguientes apartados: número, tipo de arreglo, *Spa 1* (electrodo CA), *Spa 2* (electrodo CB), *Spa 3* (electrodo PN), *Spa 4* (electrodo PM), *Rho*, *Dev*, *Sp* (potencial espontáneo), *Stack* (número de apilamiento), *Rs-Check* (resistividad aparente superficial) y fecha (Figura 14).

#	Etaray	Spa.1	Spa.2	Spa.3	Spa.4	Rho	Dev.	Sp	Vp	In	Stack	Re-Check	Name
1	Dipole Dipole	0.00	4.00	8.00	12.00	272.85	0.0	-57.3	-209.921	58.052	2	1.05	DIT_GUD
2	Dipole Dipole	0.00	4.00	12.00	16.00	213.78	0.0	74.8	-41.149	58.052	2	0.62	DIT_GUD
3	Dipole Dipole	0.00	4.00	16.00	20.00	255.45	0.0	-6.5	-19.868	58.052	2	0.86	DIT_GUD
4	Dipole Dipole	0.00	4.00	20.00	24.00	223.04	0.1	-29.3	-69.919	397.687	2	0.57	DIT_GUD
5	Dipole Dipole	0.00	4.00	24.00	28.00	258.33	0.1	-46.3	-38.928	397.687	2	0.45	DIT_GUD
6	Dipole Dipole	0.00	4.00	28.00	32.00	215.06	0.1	-3.4	-20.255	397.687	2	0.61	DIT_GUD
7	Dipole Dipole	0.00	8.00	32.00	40.00	161.18	0.1	-17.0	-37.976	355.301	2	0.47	DIT_GUD
8	Dipole Dipole	0.00	8.00	40.00	48.00	147.28	0.3	58.4	-17.351	355.301	2	0.56	DIT_GUD
9	Dipole Dipole	0.00	8.00	48.00	56.00	170.45	1.1	-84.4	-11.474	355.301	2	0.49	DIT_GUD
10	Dipole Dipole	0.00	8.00	56.00	64.00	156.37	0.3	-5.2	-25.570	356.021	2	0.72	DIT_GUD
11	Dipole Dipole	0.00	8.00	64.00	72.00	153.60	0.8	-33.4	-13.525	356.021	2	0.50	DIT_GUD
12	Dipole Dipole	0.00	8.00	72.00	80.00	196.58	0.7	54.6	-10.385	356.021	2	0.46	DIT_GUD
13	Dipole Dipole	0.00	12.00	80.00	88.00	163.56	1.0	84.0	-21.802	465.710	2	1.46	DIT_GUD
14	Dipole Dipole	0.00	12.00	88.00	96.00	167.46	1.4	-84.4	-11.734	465.710	2	1.80	DIT_GUD
15	Dipole Dipole	0.00	12.00	96.00	104.00	156.02	0.5	35.3	-15.230	470.698	2	0.51	DIT_GUD
16	Dipole Dipole	0.00	12.00	104.00	112.00	183.42	0.1	-104.1	-10.903	470.698	2	0.56	DIT_GUD
17	Dipole Dipole	0.00	12.00	112.00	120.00	152.95	0.1	-57.1	-13.036	470.698	2	0.47	DIT_GUD
18	Dipole Dipole	0.00	12.00	120.00	128.00	192.32	1.5	49.1	-9.685	470.698	2	0.73	DIT_GUD
19	Dipole Dipole	0.00	16.00	128.00	136.00	183.37	1.8	39.0	-12.706	417.361	2	1.40	DIT_GUD
20	Dipole Dipole	0.00	16.00	136.00	144.00	148.00	3.8	87.3	-5.960	417.361	2	0.39	DIT_GUD
21	Dipole Dipole	0.00	16.00	144.00	152.00	181.11	0.7	-28.3	-10.830	419.160	2	0.48	DIT_GUD
22	Dipole Dipole	0.00	16.00	152.00	160.00	136.93	0.4	97.7	-4.800	419.160	2	0.37	DIT_GUD
23	Dipole Dipole	0.00	16.00	160.00	168.00	176.39	1.0	-18.5	-9.096	417.035	2	0.49	DIT_GUD
24	Dipole Dipole	0.00	16.00	168.00	176.00	165.71	2.4	-47.6	-7.521	420.966	2	1.39	DIT_GUD
25	Dipole Dipole	0.00	20.00	176.00	184.00	125.58	2.2	136.8	-6.461	437.976	2	1.09	DIT_GUD
26	Dipole Dipole	0.00	20.00	184.00	192.00	80.63	0.4	-128.2	-2.421	437.976	2	1.16	DIT_GUD
27	Dipole Dipole	0.00	20.00	192.00	200.00	129.83	0.1	12.5	-5.945	437.976	2	0.50	DIT_GUD
28	Dipole Dipole	0.00	20.00	200.00	208.00	107.80	1.8	-64.0	-4.469	442.914	2	0.44	DIT_GUD
29	Dipole Dipole	0.00	20.00	208.00	216.00	109.96	0.9	-2.0	-4.111	444.736	2	0.53	DIT_GUD
30	Dipole Dipole	0.00	24.00	216.00	224.00	102.75	4.9	-24.9	-3.445	442.436	4	0.86	DIT_GUD
31	Dipole Dipole	0.00	24.00	224.00	232.00	115.02	3.7	42.3	-5.143	493.445	2	0.33	DIT_GUD
32	Dipole Dipole	0.00	24.00	232.00	240.00	96.91	7.7	-33.9	-3.825	478.711	4	0.26	DIT_GUD
33	Dipole Dipole	0.00	24.00	240.00	248.00	111.16	1.5	-23.9	-4.126	493.362	2	0.18	DIT_GUD
34	Dipole Dipole	0.00	24.00	248.00	256.00	115.66	4.5	38.0	-3.925	492.955	2	0.45	DIT_GUD
35	Dipole Dipole	0.00	24.00	256.00	264.00	115.77	0.7	125.6	-3.639	497.655	2	0.38	DIT_GUD

Figura 14. Ventana que muestra una sección de datos del levantamiento (software Prosys II, Iris Instruments, 2012).

El software Prosys nos genera, a partir de los datos de levantamiento, una gráfica preliminar que corresponde a la resistividad aparente  $\rho_a$ , que puede contener datos anómalos (Figura 15).

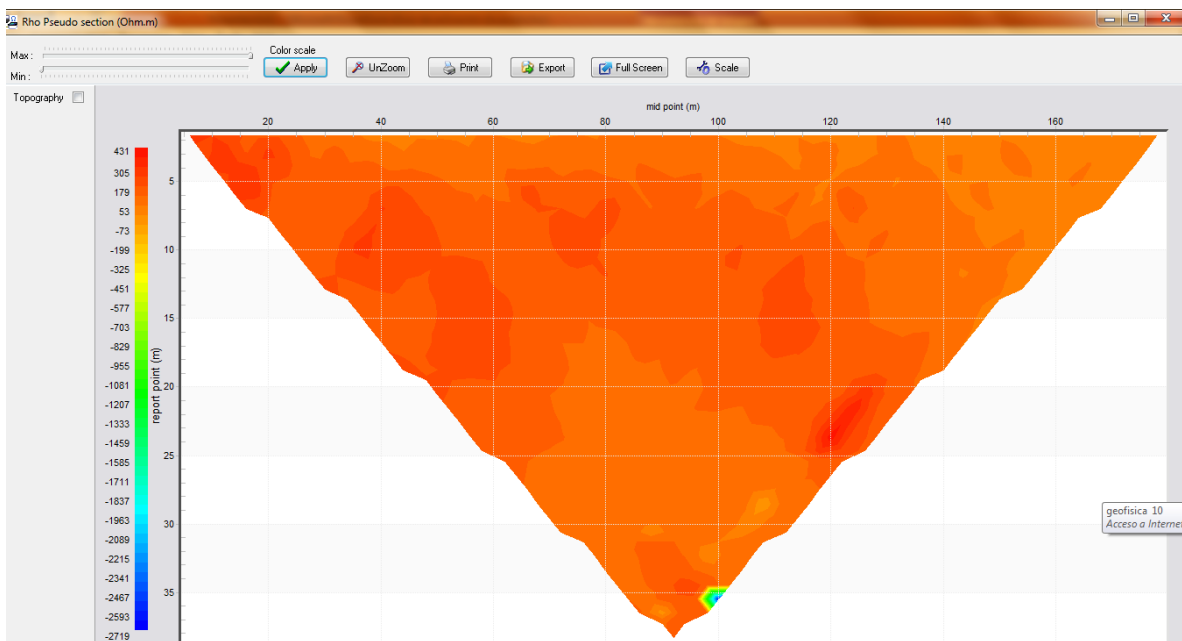


Figura 15. Gráfica de resistividad aparente sin proceso de inversión de datos (software Prosys II, Iris Instruments, 2012).

### Correcciones topográficas

Una vez obtenida la ubicación espacial de los electrodos, se extrae la altimetría correspondiente al perfil de la TRE, en el levantamiento topográfico realizado en la zona por el equipo de topografía (Figura 16).

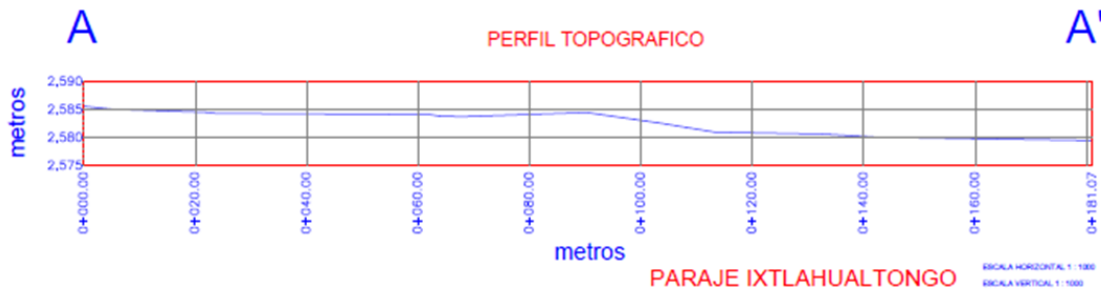


Figura 16. Perfil topográfico de la línea donde se realizó TRE.

Los datos de altimetría se integran a un archivo (.txt) que se ingresa al programa *EarthImager*, con el fin de que el modelo que se obtiene después de la inversión se adapte a las condiciones topográficas reales del terreno (Figura 17).

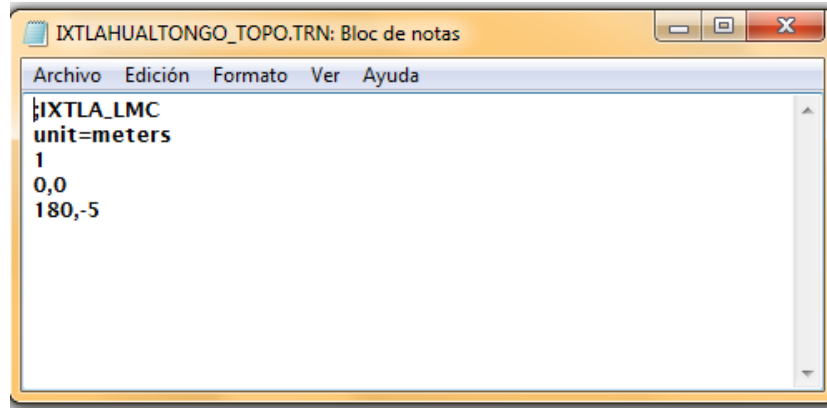


Figura 17. Archivo de topografía que se ingresa al programa *EarthImager* durante el proceso de inversión de datos.

### Inversión de datos

Con los datos del archivo (.txt) obtenidos con el software *Prosys II*, se crea un archivo universal de resistividad, (.urf), el cual será modelado en el programa *EarthImager*.

El modelado (también llamado proceso de inversión) sirve para la interpretación de los datos obtenidos en campo, debido a que ninguna ecuación se relaciona con mediciones múltiples (como las realizadas en este estudio) y no pueden resolverse con una respuesta única. Se recurre a esta técnica porque es una forma matemática de estimar una respuesta, verificarla en función de las observaciones y modificarla hasta que sea aceptable (Barclay, 2008).

El proceso de inversión de datos comienza con la propuesta de un modelo directo, que parte de las propiedad del suelo. En la Tabla 4 se muestran los parámetros que constituyen el modelo directo propuesto para este estudio.

MinVoltage=0.2	Voltaje mínimo.
MinAppRes=0.1	Resistividad aparente mínima.
MaxAppRes=1,000	Resistividad aparente máxima.
MaxRepeatErr=3	Error de repetición máximo.
MaxRecipErr=6	Error de repetición recíproco.
RemoveNegERT=1	Remover valores negativos de la TRE.

Tabla 4. Parámetros para construir el modelo directo del proceso de inversión de datos (fuente: software *EarthImager*, 2009).

En la gráfica cruzada de *resistividad aparente del modelo directo vs resistividad aparente medida*, en el eje de las abscisas se encuentran los datos de resistividad medida y en el eje de las ordenadas la resistividad aparente del modelo propuesto; en la parte inferior el número de iteraciones; la raíz media cuadrática y el espaciamiento entre electrodos. Podemos estimar que nuestro modelado alcanzó parámetros adecuados, y por ello los resultados son aceptables (Figura 18).

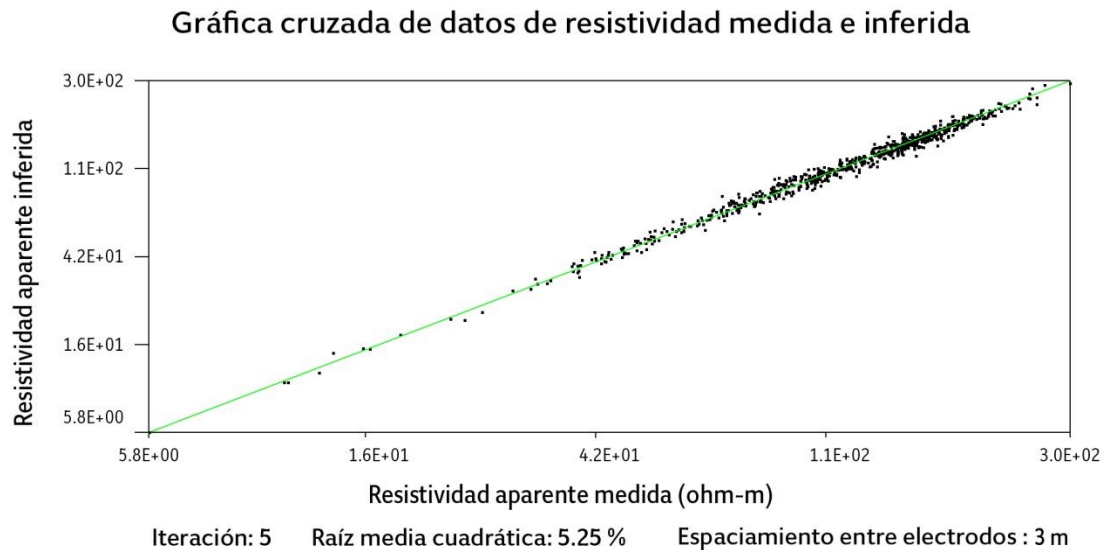


Figura 18. Gráfica cruzada de resistividad aparente del modelo directo vs resistividad aparente medida (software EarthImager, 2009).

### Interpretación de datos (Modelo geoelectrico 2D)

Con los resultados de la TRE se procedió a identificar las diferentes capas resistivas, espesores y profundidad de acuerdo a la gráfica de valores de resistividad mediante la relación entre la geología y los valores de resistividad propuestos para diferentes rocas y minerales (Figura 19).

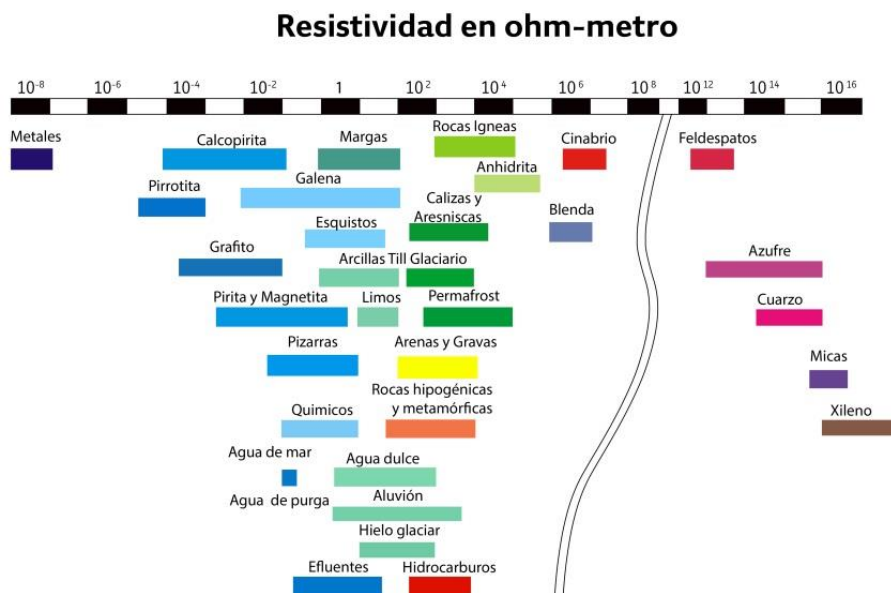


Figura 19. Gráfica de los valores de resistividad de diferentes rocas y minerales ([www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=897](http://www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=897)).

Una vez obtenido un ajuste aceptable del modelo propuesto y los datos de campo se obtuvo el siguiente modelo geoelectrico 2D (Figura 20).

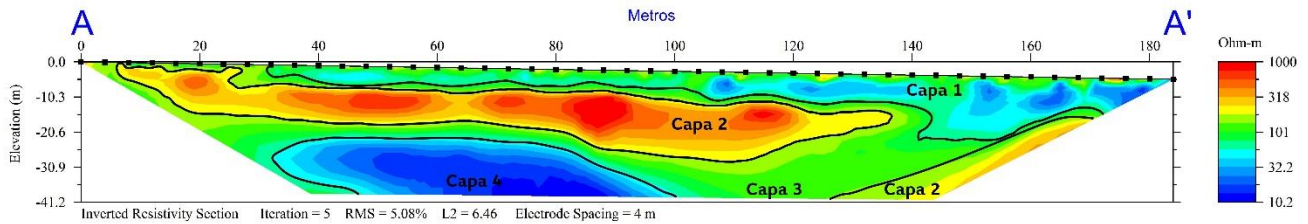


Figura 20. TRE obtenida en la calle Ojo de Agua, Delegación La Magdalena Contreras.

Por su resistividad, profundidad y de acuerdo a la gráfica de los valores de resistividad de diferentes rocas y minerales (Figura 25) la TRE se dividió en cuatro capas, las cuales se describen a continuación:

### Capa 1

Inicia en la superficie, su profundidad varía de los 5 a los 15 m; su resistividad se encuentra en un rango de 50 a 150  $\Omega$ m; se puede asociar a suelos de origen ígneo y secos presentes en la zona (Figura 21). Dentro de esta capa se aprecian zonas de baja resistividad que llegan a los 10  $\Omega$ m, que se pueden asociar a zonas de infiltración de agua superficial y flujo subsuperficial.

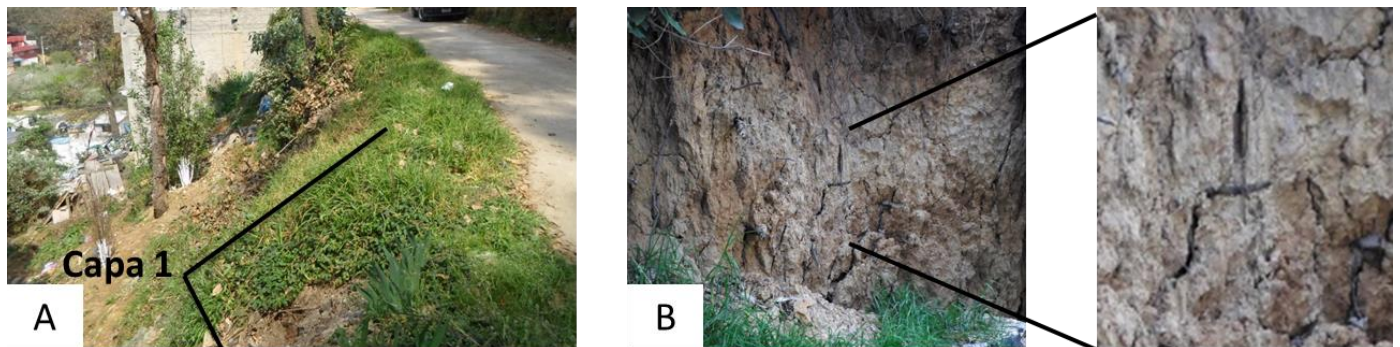


Figura 21. Fotografías que muestran la capa 1, Imagen A. En la Imagen B podemos observar un estrato mayor conformado del material predominante en el suelo de la zona, se aprecian zonas secas estrías y la granulometría fina.

### Capa 2

Inicia en la superficie y profundiza hasta 20 m; su resistividad varía de 300 a 1000  $\Omega$ m, en la imagen resistiva se muestra en la zona de amarillo-rojo; de acuerdo a la geología de la zona se puede asociar a una colada de lava y material degradado de la misma.

### Capa 3

Rodea a la capa 2 y se puede asociar a material degradado de la misma, por su resistividad que va de los 50 a 150  $\Omega$ m,

Las capas 1, 2, 3 constituyen la zona no saturada, la cual permite el tránsito de aire y agua (Mendoza, *et al.*, 2014); en la parte más somera está constituida por el suelo, que en algunas partes cuenta con la cubierta vegetal; sin embargo en otras se encuentra expuesto a la intemperie, lo que contribuye a su degradación y alteración. El suelo también permite el paso de nutrientes y materia orgánica a estratos inferiores.

### Capa 4

Es una capa con muy baja resistividad cerca de los 10  $\Omega$ m; por esta característica se puede asociar a zonas de acumulación hídrica (acuífero). Inicia a una profundidad aproximada de los 20 m y se extiende más allá de los 40 m.



## Conclusiones

Partiendo del análisis de las capas de la TRE y lo observado en campo concluimos que las viviendas se encuentran asentadas en una zona inestable por lo siguiente (Figura 22):

- Su conformación por materiales deleznales y poco consolidados que permite la filtración de agua y gases.
- La pendiente topográfica del terreno.
- El flujo de agua subsuperficial y la acumulación de la misma (en la imagen resistiva, se observa como un área en tonalidades azules, dentro de la capa 1).
- El flujo constante de agua desde la superficie hacia las capas internas, es un proceso dinámico que arrastra consigo partículas finas del suelo.
- La alteración antropogénica de la capa superficial del suelo lo expone al intemperismo.

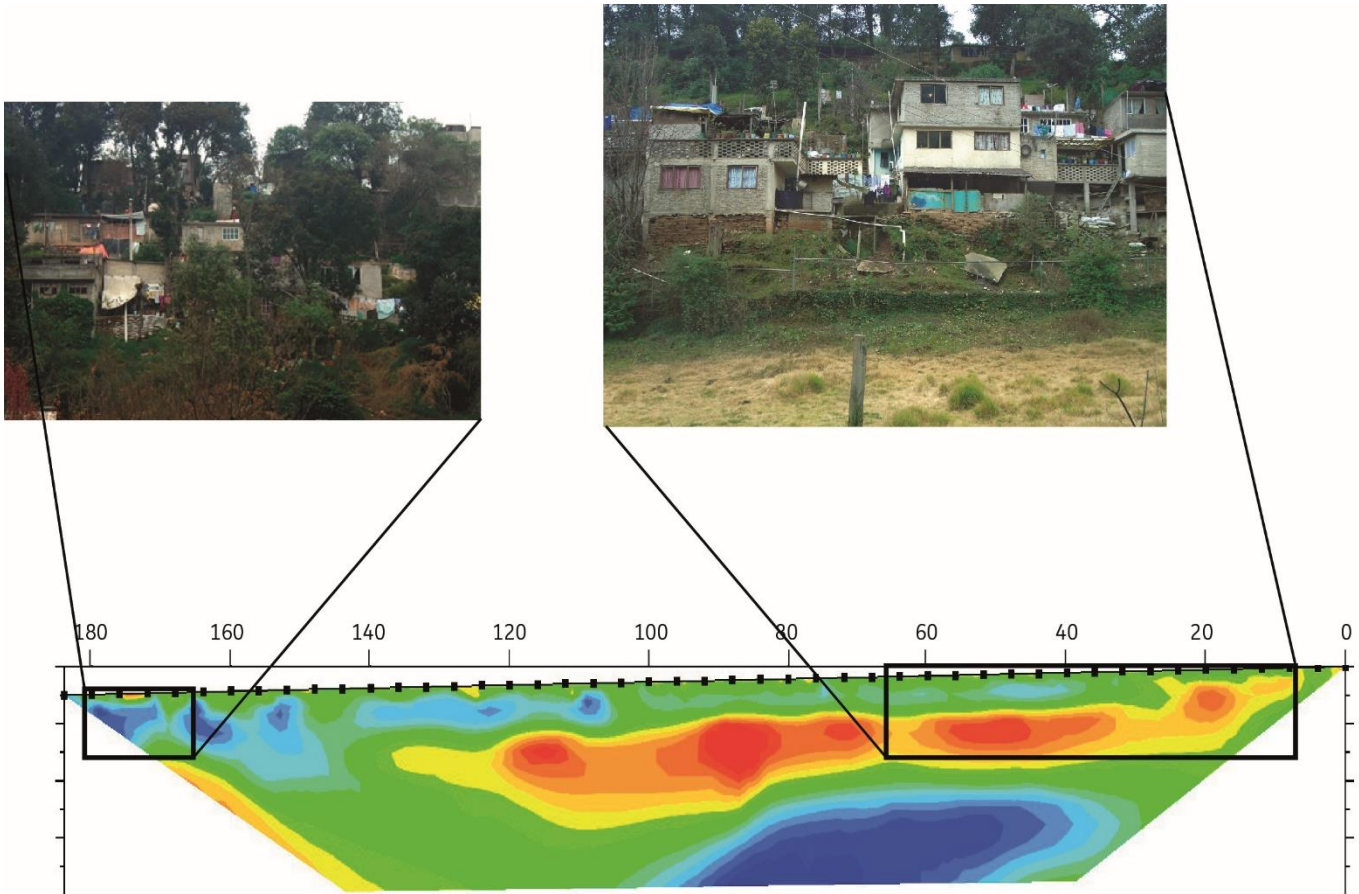


Figura 22. Ubicación de las viviendas en relación con las capas de la TRE.

## Glosario de términos

**Alteración:** Sinónimo de intemperismo. Proceso de transformación y destrucción de los minerales y las rocas en la superficie de la Tierra a poca profundidad, bajo la acción de agentes físicos químicos y orgánicos. (...) Como resultado de esta actividad se forma la corteza de intemperismo, misma que representa la porción menos consolidada del material poroso consistente en detritos de rocas y minerales nuevos, resistentes en condiciones de temperaturas y bajas presiones: con frecuencia es una formación arcillosa [1].

**Aluvi3n:** Dep3sitos sedimentarios formados por corrientes fluviales en el cauce y llanura de inundaci3n de los valles. La composici3n granulom3trica y mineral3gica, as3 como caracter3sticas estructural-texturales var3an ampliamente en funci3n del r3gimen de los r3os, de la resistencia de las rocas a la erosi3n, de la cuenca hidrogr3fica y de las condiciones geomorfol3gicas generales [1].

**Andesita:** Roca 3gnea efusiva de composici3n intermedia, color oscuro, compuesta de cristales de plagioclasa intermedia, minerales m3ficos y frecuentemente vidrio volc3nico, com3n en las monta3as de los Andes. Junto con el basalto forma las masas principales de rocas efusivas en las regiones de volcanismo joven y actual. Se presenta en general, en las zonas de subducci3n correspondientes a la margen de los continentes y los arcos insulares. Origina una amplia variedad de formas del relieve volc3nico y al transformarse por la erosi3n es com3n que se formen valles y laderas empinadas y una red fluvial de tipo dendr3tico [1].

**Arcillas lacustres:** Suelo constituido por agregados de silicatos de aluminio hidratados procedentes de la descomposici3n de minerales de aluminio. Surge de la descomposici3n de rocas que contienen feldespato, originada en un proceso natural que dura decenas de miles de a3os. El di3metro de las part3culas de la arcilla es inferior a 0,002 mm [12].

**Asfalto:** Es una mezcla s3lida y compacta de hidrocarburos y de minerales que mayormente es empleada para construir el pavimento de las calzadas [4].

**Avalancha de escombros:** Proceso gravitacional que puede originarse de dos maneras. La primera por la ca3da o deslizamiento de un cuerpo rocoso con movimiento progresivo y p3rdida de cohesi3n que lo convierte en derrubios y se transforma en un flujo de tipo avalancha. La segunda, por el movimiento de un dep3sito de derrubios que se transforma en avalancha [1].

**Barranco:** Forma lineal negativa del relieve, estrecha, con laderas abruptas, con frecuencia se ramifica hacia la cabecera. En longitud llega a alcanzar algunos kil3metros, y en anchura y profundidad, algunas decenas de metros. Los barrancos se forman generalmente en rocas incoherentes o f3cilmente erosionables, como los loess, dep3sitos pirocl3sticos y conglomerados, por escurrimiento de temporada de las aguas pluviales y nivales [1].

**Basalto:** Roca 3gnea efusiva de composici3n b3sica y color oscuro, consistente principalmente en plagioclasas b3sicas, augita y con frecuencia olivino. Generalmente es una roca compacta y porosa. Presenta estructuras de derrame; forma mesas de lava de cientos o miles de kil3metros cuadrados. Entre las formas de relieve caracter3sticas est3n los volcanes de lava y sus derrames asociados, del tipo de Haw3i e Islandia. Cubre tambi3n extensiones gigantescas del fondo oce3nico, mismo que incluye la planicie abisal, monta3as submarinas y las dorsales [1].

**Basamento:** Conjunto de rocas que subyacen con discordancia a la cobertura de rocas sedimentarias; posee un estilo tect3nico definido y han sido afectadas por metamorfismo y deformaciones, aunque 3stas pueden estar ausentes [1].

**Biotita:** f. Silicato de hierro y magnesio de color negro, marr3n o verde oscuro, del que se extraen l3minas delgadas [4].

**Brecha volc3nica:** Roca consistente en detritos angulosos mal clasificados debido a que sufrieron un transporte reducido. Constituida de ceniza y lapilli, y de clastos volc3nicos. Se puede formar directamente a causa de una erupci3n explosiva, por remoci3n posterior del material volc3nico o por un hundimiento superficial [1].

**Calizas:** Roca sedimentaria consistente en calcita o residuos calc3reos de organismos, raras veces de aragonita. Con frecuencia contiene minerales de dolomita, part3culas arcillosas y arenosas [1].

**Caolinitas:** Arcillas minerales cuya composici3n es de 3xido de aluminio hidratado, formado generalmente a partir de la hidr3lisis de feldespato pot3sico y otros minerales aluminosilicatados [2].

**Carbonataci3n:** Reacci3n qu3mica del 3cido carb3nico del agua de lluvia, agua del suelo y agua subterr3neas con los minerales, afecta intensamente a los minerales y rocas carbonatas, como la caliza o el m3rmol; es una actividad de la meteorizaci3n qu3mica [2].

**Cauce:** Porci3n inferior de un valle fluvial ocupada por la corriente. Se caracteriza por la anchura, la profundidad y la superficie del agua, factores que var3an de manera continua [1].

**Ceniza:** Part3culas de roca volc3nica, cristales o vidrio volc3nico, generado durante las erupciones (di3metro menor a 2 mm) [3].

**Colada de lava:** Forma en que fluye y se dispone la lava en la superficie terrestre. Sus dimensiones dependen de la viscosidad, del volumen y velocidad de salida del magma a la superficie, y de la pendiente del terreno. Los de tipo 3cido son generalmente cortos (1-10 km) y de fuerte grosor (m3s de 25 m). Los derrames de lava o coladas de lava bas3lticos, especialmente los de estructura

ondulada, son muy largos, de decenas de kilómetros. La mayor velocidad que se conoce para el escurrimiento de lavas fluidas es de 70 km / h [1].

**Coluvión:** Detritos rocosos producto del intemperismo, desplazados ladera abajo por la acción de la fuerza de gravedad. Se depositan en las laderas con aspecto de capas delgadas y al pie de ellas. El tamaño de los detritos es muy variable, son angulosos y sin clasificación, es sinónimo de derrubios [1].

**Conglomerado:** Roca sedimentaria compuesta de granos redondeados del tamaño de la grava [3].

**Conglomerado:** Roca sedimentaria compuesta de cantos rodados, cementados en una matriz fina (arena, limo, arcilla), algunas veces la matriz puede ser calcárea o silicosa y en ocasiones en que el conglomerado ha sido sometido a fuertes presiones y temperaturas la matriz puede hallarse fundida. Los conglomerados se forman en las cuencas aluviales, fluvio-glaciales, grandes conos aluviales, áreas próximas a los litorales y en las márgenes de los ríos [4].

**Cono volcánico:** Forma de relieve que se origina por la acumulación del material volcánico alrededor de la chimenea; su forma depende de la proporción de lavas y material no consolidado que lo constituye; generalmente posee un cráter en la cima. El cono se forma por el depósito gradual de material piroclástico y escoria cerca de la chimenea, adquiriendo una pendiente fuerte en sus laderas, de 30° a 35° cuando es material fino, y 40° y más cuando el material es grueso, depositado cerca del cráter; con el tiempo, el perfil de las laderas evoluciona por la acción de los procesos exógenos [1].

**Corrosión:** Es la pérdida o deterioro de las propiedades físicas y/o químicas de un metal, sobre todo el hierro, al interactuar con su medio. Sucede naturalmente, transformándose el metal en un óxido, (reacción anódica, donde ocurre la disolución del metal) que es un compuesto más estable, por el cual el metal vuelve a su estado anterior u original, que es el que tenía antes del proceso metalúrgico.

**Cuarzo:** Mineral compuesto por dióxido de silicio, constituyente esencial de las rocas ígneas félsicas y uno de los principales componentes de la arena y arenisca [2].

**Cuenca:** Depresión de la superficie terrestre, de forma y origen diversos. Puede ser exorreica (con un desagüe que permite que las aguas circulen y sean expulsadas de la cuenca y endorreica (sin desagüe). Independientemente de sus dimensiones y profundidad, puede estar ocupada por el agua (lagos, mares). Es una porción de la tierra firme con un sistema centrípeto de laderas y corrientes fluviales. Se denomina con más precisión cuenca fluvial o hidrográfica. Está delimitada por divisorias desde las cuales escurren aguas superficiales o subterráneas hacia un río principal. La cabecera de una cuenca fluvial montañosa presenta un canal con pequeños afluentes [1].

**Dacitas:** Roca ígnea ácida de grano fino, compuesta de microlitos de plagioclasa, vidrio, cuarzo y, con menor frecuencia, hornblenda, biotita, piroxeno y otros minerales. Su equivalente en roca intrusiva es la granodiorita. Las formas de relieve de la dacita son derrames de lava de corta extensión, debido a la viscosidad del magma, de grosor considerable y con bordes escarpados; también originan agujas de lava [1].

**Degradación:** A nivel ecológico y natural, la degradación significa que un producto u objeto ya completo y fabricado comienza a ser degradado por la naturaleza para poder absorberlo, acción para la cual necesita simplificarlo y alterarlo físicamente [5].

**Depósitos de caída:** Fragmentos piroclásticos que han caído de una nube eruptiva [3].

**Discordancia:** Superficie de contacto entre dos grupos de estratos que por su edad y estructura refleja que hubo un tiempo prolongado (puede ser superior a una era geológica) en la formación de las capas que separan la discordancia [1].

**Domo volcánico:** Lava con forma de cúpula que crece en el fondo del cráter o en la cumbre de un volcán. Es propiamente el cono que se forma por la acumulación de material expulsado a través del cráter y la forma es determinada por las proporciones de lava y elementos piroclásticos en el material de su composición [3].

**Drenaje:** La red de drenaje de una cuenca está integrada por un cauce principal y una serie de tributarios cuyas ramificaciones se extienden hacia las partes más altas de las cuencas [3].

**Electrodo:** Cuerpo conductor en contacto con un medio del que se recibe o al que transmite una corriente eléctrica [4].

**Escarpe:** Ladera abrupta o a desplome, de altura variable, que puede formarse por distintas causas: tectónicas, procesos exógenos, principalmente gravitacionales [1].

**Esgurrimiento:** Es el agua proveniente de la precipitación, circula sobre o bajo la superficie terrestre y llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca [3].

**Esfena:** También denominada titanita, puede ser un mineral primario o secundario en rocas ígneas. En el segundo caso puede formarse a partir de otros minerales ricos en titanio, como la ilmenita o durante la cloritización de micas ferromagnesianas ricas en titanio. Suele ser un accesorio frecuente en rocas alcalinas. Se caracteriza por su relieve alto, color variable de incoloro a marrón y birrefringencia intensa, muchas veces enmascaradas por los colores propios del mineral. Las secciones con terminaciones en forma de cuña son muy características, especialmente las de forma de diamante [17].

**Erosión:** Es el desgaste que se produce en la superficie de un cuerpo por la acción de agentes externos (pueden ser el viento, las corrientes de agua, los cambios de temperatura o hasta la acción de seres vivos) o por la fricción continua de otros cuerpos [7].

**Falla:** Desplazamiento de un bloque rocoso con respecto a otro colindante a éste o de ambos bloques, a través de un plano denominado «plano de falla». Las fallas son producto de esfuerzos tectónicos, producto de la epirogenesis, orogenia, diastrofismo, tectónica de placas o cualquier otro tipo de desplazamiento de parte de la corteza. Una falla ocasiona discontinuidad de las estructuras geológicas. Los esfuerzos pueden ser: tensionales, compresionales, verticales (en ambos sentidos) o inclinados, dando lugar a diversos tipos de fallas. Los elementos de una falla son: plano de falla, bloque superior o techo, bloque inferior o piso, desplazamiento de la falla o rechazo, espejo de falla, etc. El reconocimiento de las fallas se hace más fácilmente en las rocas sedimentarias y en las metamórficas de origen sedimentario debido a la discontinuidad de las capas o estratos. En las rocas ígneas la identificación es más difícil y solo es posible su reconocimiento observando detenidamente los espejos de falla o planos de fricción, o cuando existen diques o filones que señalan su desplazamiento a través del plano de falla. El estudio de las fallas es de suma importancia para la definición de la geología estructural o de la tectónica de la región. Del punto de vista práctico es de suma utilidad en geología minera para definir la posición o desplazamiento de las vetas mineralizadas o de los cuerpos mineralizados. También es de suma importancia para el estudio de los yacimientos petrolíferos. Tipos de fallas: Oblicua, cruzada, longitudinal, transversal, paralela al plano de estratificación, etc. [11].

**Flujo de lodo.** Mezcla de materiales sólidos de diferentes tamaños y agua que se desplazan por efecto de las pendientes del terreno [6].

**Flujos piroclásticos:** Mezclas de materiales volcánicos fragmentados y gases a altas temperaturas (de 300 a 1200 °C), que generalmente se producen por colapso de la columna eruptiva que emerge de los cráteres durante un episodio de actividad volcánica. Las velocidades de los flujos piroclásticos han sido estimadas en un espectro cinético de entre 10 y 200 m/s, siendo la velocidad más comúnmente registrada, aquella que fluctúa alrededor de los 20 m/s. La extensión de las áreas que suele afectar este tipo de flujos, puede ser muy variable, y asciende desde unos 70 hasta varios cientos de kilómetros cuadrados [5].

**Fosa Tectónica:** Zona de hundimiento tectónico delimitado por fallas paralelas, de longitud considerablemente mayor que la anchura. Las dimensiones de una fosa tectónica son muy variables. Puede ser simétrica o asimétrica, consistente en una depresión alargada y delimitada a ambos lados por elevaciones (el pilar u *horst*). La erosión se produce transversal a las laderas, formando barrancos y por acumulación, abanicos aluviales en la desembocadura, en la planicie de la fosa tectónica [1].

**Fractura:** Ruptura de las rocas sin desplazamiento de los bloques que separa. Se usa también como sinónimo de falla [14].

**Geofísica:** Ciencia que destina su estudio e investigación a estudiar el planeta Tierra desde un ángulo físico justamente. Aborda cuestiones como ser la estructura, las condiciones físicas y la evolución de la tierra [5].

**Hidratación:** Proceso del intemperismo químico que consiste en la adsorción y absorción del agua por los coloides en los canales de la red cristalina de los minerales; un mineral se transforma en otro por influencia del agua [1].

**Hipersteno:** Mineral presente en rocas volcánicas o metamórficas. Se presenta exclusivamente en masas laminares o trozos de exfoliación de color verde oscuro a negro, con brillo vítreo y una iridiscencia o reflejos de color cobrizo [16].

**Hornblenda:** Mineral de la clase de los silicatos. Contiene silicio, oxígeno, calcio, sodio, potasio, magnesio, hierro, aluminio y flúor. Algunas hornblendas de rocas volcánicas pueden contener también titanio. Desde el punto de vista estructural pertenece al sistema monoclinico. Se presenta en cristales incompletos o alargados que en ocasiones aparecen con secciones casi hexagonales y con caras terminadas en formas que parecen romboedros. Brillo vítreo con dureza considerable y bastante pesada [16].

**Hundimiento:** Dislocación de la corteza terrestre que da lugar a la remoción en sentido vertical de fragmentos de la misma [13].

**Hundimiento regional y agrietamiento:** Fenómenos de naturaleza geológica cuya presencia se debe a los suelos blandos, en los cuales se producen pérdidas de volumen como consecuencia de la extracción de agua del subsuelo [13].

**Interestratificación:** Intercalación de unidades dentro de la estructura de los silicatos, ya sean laminares o en láminas de unidades distintas en otro mineral [11].

**Lahar:** Palabra indonesia con la cual se denomina a una especie de flujo de lodo formado por una mezcla de agua (meteórica o cratérica) y ceniza que baja por las pendientes de un volcán arrastrando otras rocas y formando avalanchas de gran poder destructivo. Puede producirse no sólo durante las erupciones volcánicas, sino también muchos meses después, debido a las lluvias y a la liberación de agua del cráter [6].

**Limo:** Partículas de 0.002 a 0.02 mm de diámetro. Son mayores que las arcillas y menores que las arenas [1]

**Máfico:** Adjetivo referente a la composición de un magma o una roca caracterizada por un alto contenido de magnesio y hierro. Las rocas de la corteza oceánica tienden a tener una composición máfica [7].

**Magnetita:** Mineral óxido de hierro, muy pesado, de color negro, que atrae el hierro y otros metales; imán. [4].

**Mampostería:** Sistema de construcción que consiste en levantar muros a base de bloques que pueden ser de arcilla cocinada, piedra o concreto entre otros. Actualmente se unen utilizando un mortero de cemento y arena con un poco de agua, en las proporciones adecuadas [6].

**Mapa Geomorfológico:** Representa el relieve terrestre con base en la morfología y la génesis del mismo, además de otros parámetros, como geomorfometría, litología y edad [1].

**Mioceno:** Término debido a Lyell (1832) para designar la época posterior al Oligoceno y anterior al Plioceno, del periodo Neógeno (Terciario tardío) [1].

**Montmorillonita:** Mineral arcilloso derivado por alteración química de los minerales silíceos de diversas rocas ígneas; se expande fuertemente cuando absorbe agua [2].

**Oxidación:** Uno de los procesos del intemperismo químico que incluye reacciones de combinación con oxígeno, especialmente con minerales de hierro en presencia de agua. El estado ferroso pasa a férrico, con formación de películas y cortezas de color amarillo a pardo que se disgregan fácilmente. Un ejemplo es la transformación de pirita en limonita [1].

**Piroclastos:** Fragmentos de magma arrojados durante las erupciones volcánicas de tipo explosivo. De acuerdo con su tamaño se clasifican en cenizas (menor a 2 mm), lapilli (2 a 64 mm) y mayor a 64 mm son bombas (de forma ovoide) y bloques (angulosos) [1].

**Piroxeno:** Los piroxenos son una familia de los silicatos de composición variable, y a la vez muy compleja; teniendo en cuenta el sistema de cristalización, se pueden distinguir de los rómbicos, denominados ortopiroxenos, y los monoclinicos, o clinopiroxenos. Estos últimos se dividen a su vez en aluminíferos y no aluminíferos según contengan o no aluminio en sustitución de silicio en los tetraedros. [16]

**Plagioclasa:** Feldespato de la serie calco-sódica que presenta solución sólida de los términos extremos albita y anortita. Los términos ricos en sodio son más frecuentes en rocas ácidas, mientras que los más cálcicos lo son en rocas básicas. Sus características distintivas más relevantes son la extinción oblicua, el desarrollo de un maclado polisintético con múltiples individuos, colores de birrefringencia grises y frecuente alteración a un agregado microcristalino rico en micas [16].

**Plioceno:** Es la segunda época del Neógeno, el quinto periodo del Terciario, posterior al Mioceno. La duración del Plioceno se calcula en unos 5 Ma, y debe haber terminado hace aproximadamente 2 Ma. En este lapso tuvo un desarrollo gran parte del relieve actual de la Tierra, en especial de regiones jóvenes como México y Centroamérica [1].

**Procesos exógenos:** Procesos geológicos producidos por fuerzas externas de la Tierra, se originan en la superficie de ella y en las capas superiores de la litosfera. Están condicionados principalmente por la energía de la radiación solar, la fuerza de la gravedad y actividad de los organismos [1].

**Procesos fluviales:** Procesos que modifican la superficie terrestre por medio del agua de escurrimiento lineal (temporal y permanente) y en manto. Crean formas de relieve fluvial de erosión y acumulación [1].

**Puntales:** Término que se emplea a un elemento que se coloca por lo general en manera de plano inclinado para apuntalar un elemento constructivo que corre el riesgo de fallar [7].

**Red de Drenaje:** Todos los sistemas de drenaje están compuestos por una red interconectada de corrientes que, juntas, forman modelos concretos. Estos modelos de drenaje responden a los tipos de rocas o modelos estructurales de fallas y pliegues presentes. Los tipos de modelos de drenaje son dendríticos, rectangulares, enrejados o radiales [3].

**Reducción:** Reacción química en la que un átomo o ión, toma uno o más electrones, o acrecienta su densidad electrónica por desplazamiento de los mismos [1].

**Resistividad eléctrica:** Resistencia que se obtiene en un centímetro cúbico de una sustancia, tomado en forma de cubo, a la corriente eléctrica dirigida perpendicularmente en una de las aristas de ese cubo. Se mide en Ohm metro u ohm centímetro [9].

**Resistivímetro:** Es un instrumento de resistividad diseñado para trabajos de resistividad como comprobación eléctrica de tierra-cuadrícula, prueba de resistividad del subsuelo utilizando el método Wenner de electrodos [8].

**Subsuelo:** Término aplicado al horizonte B de un perfil de suelo. [3]

**Surges:** Son mezclas de ceniza fina, gases volcánicos y aire caliente, que forman una nube densa que puede viajar fácilmente sobre los flancos del volcán a más de 100 km/h. Estas nubes alcanzan temperaturas de 200 °C y pueden carbonizar fácilmente cualquier material orgánico que encuentren a su paso. Las oleadas piroclásticas se crean también durante erupciones freatomagmáticas, cuando éstas tienden a ser menos calientes pero igualmente destructivas. Mientras estos flujos se mueven, van depositando los fragmentos más grandes, sin perder mucho calor. En un momento dado, se vuelven más ligeros que el aire y se elevan para formar una nube muy alta, conocida como «Nube fénix» que puede transportar ceniza a enormes distancias [10].

**Tectónica de placas.** Teoría que explica la dinámica de grandes porciones de la litósfera y su relación con la ocurrencia de sismos, volcanes y deformaciones corticales [8].

**Textura microlítica (Hipocristalina):** Cuando la roca está compuesta en parte por vidrio y en parte por cristales, sin que ninguno de los dos términos supere el 90% en volumen. Esta textura refleja dos ritmos de enfriamiento diferentes, uno más lento para formar los cristales y otro mucho más rápido que conlleva la formación de vidrio por solidificación del fundido sin tiempo a que los componentes químicos se ordenen en una estructura cristalina simétrica [17].

**Voltaje:** Es la cantidad de voltios que actúan en un aparato o en un sistema eléctrico. La presión que una fuente de suministro de energía eléctrica o fuerza electromotriz ejerce sobre las cargas eléctricas o electrones en un circuito eléctrico cerrado. De esta forma, se establece el flujo de una corriente eléctrica [7].

## Abreviaturas y símbolos utilizados

Abreviatura	Significado
CD/DC	Corriente Directa / Direct Current (Por sus siglas en inglés.)
Dev.	Desviación Estándar.
E	Este.
<i>et al.</i>	(Del latín <i>et. alia</i> ) y otros.
ext	Externo.
GPS	Sistema de Posicionamiento Global (por sus siglas en inglés Global Positioning System).
N	Norte.
O	Oeste.
<i>óp. cit.</i>	(Del latín <i>operare citato</i> ) En la obra citada.

RMS	Raíz Cuadrada Media (Por sus siglas en inglés Root Mean Square).
Rho	Resistividad.
S	Sur.
Sp	Potencial Espontáneo (Por sus siglas en inglés spontaneous potential).
TRE	Tomografía de Resistividad Eléctrica.
.txt	Extensión de un archivo de texto.
UTM	Por sus siglas en inglés Universal Transversal de Mercator.
.urf	Extensión de un archivo de resistividad universal (Por sus siglas en inglés Universal Resistivity File).

### **Símbolo**

### **Significado**

$\pi$	Constante matemática con valor de 3.141592...
°	Grados.
°C	Grados Celsius.
>	Mayor que.
<	Menor que.
$\mu V$	Micro volt.
2D	Modelación en dos dimensiones.
$\Omega$ -m	Ohms metros.
%	Porcentaje.
$\rho_a$	Resistividad Aparente.
[ ]	Referencias Bibliográficas.
$\Omega$	Rho, letra del alfabeto griego usada para designar a la Resistividad Eléctrica.
A	Amperes.
cm	Centímetros.
km	Kilómetros.
km/h	Kilómetros sobre horas.
m	Metros.
m <sup>2</sup>	Metros cuadrados.
msnm	Metros sobre el nivel del mar.
m/s	Metros sobre segundo.
mm	Milímetros.

Ma Millones de años.

M Mega.

s Segundo.

W Watts.

V Voltios.



## Bibliografía

- Atlas de Peligros y/o Riesgos Naturales de la Delegación La Magdalena Contreras (2011). Artic Consultores S de RL de CV, México, Distrito Federal.
- Auge, M. (2008). Métodos eléctricos para la prospección de agua subterránea. Argentina: Universidad de Buenos Aires.
- Barklay, F. Inversión sísmica: Lectura entre líneas. Oilfield Review: 44-66. Verano 2008.
- CEPAL (2005), El impacto de los desastres naturales en el desarrollo: documento metodológico básico para estudios nacionales de caso. México: CEPAL.
- Constantino-Rodríguez, L.D. (2011). Método de tomografía eléctrica para determinar estructuras volcánicas, México. Tesis inédita de Licenciatura: UNAM.
- Geofrik (s.f.) Recuperado el 24/01/2015 de <http://geofrik.com/2013/08/20/principio-de-la-horizontalidad-original-y-la-continuidad-lateral-de-los-estratos/>.
- Iakubovskii, I. V. y Liajov, L. L. (1980). Exploración Eléctrica. Reverte: Moscú.
- IRIS intruments, *ELECTRE Pro software Help* (CD-ROM). Francia: (2012).
- IRIS intruments, *Prosys Help* (CD-ROM). Francia: (2012).
- IRIS intruments. (2012). *SYSCAL Pro, User's Manual*. Francia.
- Kaiser Consultores Ambientales (2014). Manifestación de Impacto ambiental en su modalidad particular para el proyecto "Encauzamiento del río Anzaldo, San Jerónimo 1010" en la Delegación Magdalena Contreras del Distrito Federal.
- Lugo, H. (2011). Diccionario geomorfológico. Instituto de Geografía. México; UNAM.
- Mapa de Zonificación Geotécnica, Servicio Geológico Metropolitano. Escala 1:1000000. México: UNAM-DGPCDF.
- Marsal, R.J. y Mazari, M. (1959). The Subsoil of Mexico City. Contribution to the First Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation. Engineering, Ciudad de México. México.
- Musset, A. & Khan, M. (2000). Looking into the earth. An introduction to Geological Geophysics. Cambridge. United States of America.
- Orellana, E. (1972). Prospección geoeléctrica en corriente continua. España. Paraninfo.
- PAOT. (2008) Situación de la áreas verdes barrancas y zonas de transición entre el suelo de conservación en el Distrito Federal. México, D.F.
- Perdomo, S. (2009) Tomografía eléctrica en apoyo de la investigación Arqueológica. Tesis de Grado. Universidad Nacional de la Plata.
- Reykjavik (2011). "Patreksfjörður to Reykjane\_travel notes 4". UVA MLA Howland Fellowship 2011: Landscapes of Power.
- Strahler, A.N. (1988). Geografía Física. Ediciones Omega, S.A. Barcelona.
- Sepúlveda E, L. (2009). Diseño de un resistivímetro de corriente directa para realizar estudios de geoeléctricos en los valles centrales: Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional. Oaxaca, México.
- Serrano Ontiveros, Javier. (2003). *Caracterización geofísica de filtraciones de agua en el subsuelo*: tesina. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Servicio Geológico Mexicano. Léxico Estratigráfico de México. SGM.

Strahler, A.N. (1988). Geografía Física. Ediciones Omega, S.A. Barcelona.

Suzuki K., Higashi S. (2001). Groundwater flow after heavy rain landside-slope area from 2-D inversion of resistivity monitoring data. *Geophysics*, 66(3), pp. 733-743.

Tarbutck, L. (2008). Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física. Ed. Pearson-Prentice Hall. 8ª ed. Madrid.

Vera Torres, J.A. (1994). "Estratigrafía. Principios y métodos". Ed. Rueda. 806 pp.

## Bibliografía para el glosario

[1] Lugo H, J. I. (2008). *Diccionario Geomorfológico*. Instituto de Geografía. México: UNAM.

[2] Strahler, A. y Strahler, A. (1989). *Geografía Física*. Barcelona: Ediciones Omega. S.A.

[3] Tarbutck y Lutdgers. (2005). *Ciencias de la Tierra. Introducción a la Geología Física*, Madrid: Ed. Pearson-Prentice Hall.

[4] Wordreference (s.f.). Recuperado el 22 julio de 2014 de <http://www.wordreference.com/definicion/asfalto>.

[5] definición ABC (s.f.). Recuperado el 22 julio de 2014 de <http://www.definicionabc.com/geografia/geofisica.php>.

[6] constructoracmproyectos (s.f.). Recuperado el 22 julio de 2014 de <http://constructoracmproyectos.com/que-es-mamposteria-en-construccion/>.

[7] Definición. De (s.f.). Recuperado el 22 julio de 2014 de <http://definicion.de/puntal>.

[8] Agiusa (s.f.). Recuperado el 22 julio de 2014 de <https://www.agiusa.com/ministing.sp.shtml>.

[9] Iakubovskii, I. V. y Liajov, L. L. (1980). *Exploración Eléctrica*. Moscú: Reverte.

[10] Glosario CENAPRED 2010 (consulta en línea). Consultado el 10 de julio 2014.

[11] Dávila B., J. (2011). *Diccionario geológico*. Perú: INGEMMET.

[12] <http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/3425.html>.

[13] Protección Civil, Secretaría de Gobernación (consulta en línea). <Http://www.proteccioncivil.gob.mx>, consultado el día 10 de julio 2014.

[14] Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano. (2014). *Bases para la Estandarización en la Elaboración de Atlas de Riesgos y Catálogo de Datos Geográficos para Representar el Riesgo*. México: SEDATU.

[15] <http://deconceptos.com/ciencias-naturales/corrosion###ixzz3RvyoLBvD>.

[16] <http://www.segemar.gov.ar/bibliotecainstemin/MINERALES>.

[17] Andrés P. y R. Rodríguez. (2008). "Evaluación y Prevención de Riesgos Ambientales en Centroamérica" Editorial Documenta Universitaria. España.

[18] Geyh, M. (2000). *Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico: Principios y Aplicaciones*. Hannover, Alemania: W. G. MOOK.