

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 Tierra Colorada** (definido así por la SPC, 2014) en peligro por los fenómenos de inestabilidad de taludes y procesos de remoción en masa, objeto del presente informe.

Antecedentes de la Secretaría de Protección Civil (SPC)

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

Sitio con riesgo por remoción en masa, asentamiento desarrollado sobre una ladera con pendiente mayor a los 50°, irregularidad topográfica, geológica, las viviendas están sufriendo los efectos del desequilibrio realizado antropogénicamente en el suelo del lugar (cortes y excavaciones mal proyectadas, descargas de hidrosanitarias hacia la base y hombro de los taludes, deforestación, etc.).

Estos efectos aunados a los escurrimientos pluviales, se pueden resumir en la progresiva erosión y socavación del suelo afectando la estabilidad del terreno, el trazo y estructura de los andadores, brechas y las cimentaciones de las viviendas, muros y retención con costales rellenos.

Objetivo general

Por medio de métodos indirectos (tomografía eléctrica), conocer las características y condiciones en que se encuentran los materiales en el subsuelo del sitio con riesgo **Paraje Tierra Colorada**.

Objetivo específico

Identificar los materiales que conforman las paredes de la ladera en el sitio con riesgo Paraje Tierra Colorada.

Definición del problema geológico

En el sitio con riesgo **Paraje Tierra Colorada** hay presencia de derrumbes y deslizamientos continuos de los materiales que componen las paredes.

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 [17].

Metodología de trabajo

Una vez identificados los fenómenos que se manifiestan en el sitio con riesgo Paraje Tierra Colorada, 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 sitio con riesgo Paraje Tierra Colorada.

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 Paraje Tierra Colorada se localiza en la parte norte de la Delegación La Magdalena Contreras, entre las calles Metropolitana, Jazmín, Jacarandas y Pirul (Figura 1). Donde el acceso principal es por la calle Metropolitana.

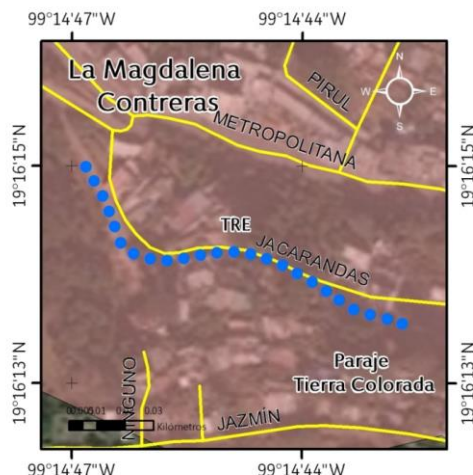


Figura 1. Mapa de localización del sitio con riesgo Paraje Tierra Colorada y localización de la TRE (los puntos en color azul marcan la disposición de los electrodos), el área rellena (color salmón) es el polígono propuesto por la SPC.

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 (Káiser, 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 (ARDLMC, 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 ± 0.1 Ma y 2.87 ± 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 (Káiser, 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 riocitas, 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 (ρ) a la resistencia específica de cada material y en nuestro caso está dada por la siguiente fórmula (Auge, 2008):

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

Dónde:

Δv , 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:

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

Dónde:

π , 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 multielectrónico, 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 Wenner-Schlumberger. Es un híbrido entre el método Schlumberger y el método Wenner; en un principio los electrodos de corriente (C_A y C_B) y los electrodos de potencial (P_M y P_N) se acomodan como si se tratara de un método Wenner; es decir, la distancia entre ellos es igual (Figura 2.1). (Orellana, 1972; *ELECTRE Pro software Help, Iris Instruments, 2012*; Figura 2).

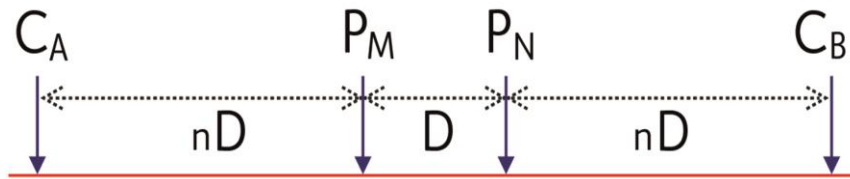


Figura 2.1 Colocación inicial de los electrodos para el arreglo Wenner-Schlumberger; el cual es similar a un arreglo Wenner. (*ELECTRE Pro software Help, Iris instruments*).

Posteriormente la separación se aproximará al modelo propuesto por Schlumberger, y cuando la distancia entre C_A y C_B sea 5 veces la distancia de P_M y P_N , la separación entre estos últimos P_M y P_N cambiará (Figura 2.2)

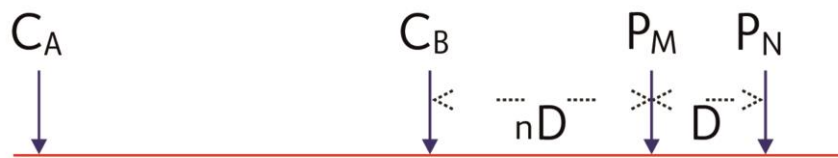


Figura 2.2. Muestra la disposición de los electrodos a partir del segundo espaciamiento. (*ELECTRE Pro software Help, Iris instruments*).

Recorrido de campo

En el recorrido de campo se observan derrumbes en la zona, donde los propietarios de las viviendas usan costales rellenos y plásticos como obras de mitigación.

El talud presenta mucha pendiente y se compone por materiales no consolidados, mismos que al humedecerse en temporada de lluvias acrecientan el fenómeno de derrumbes.

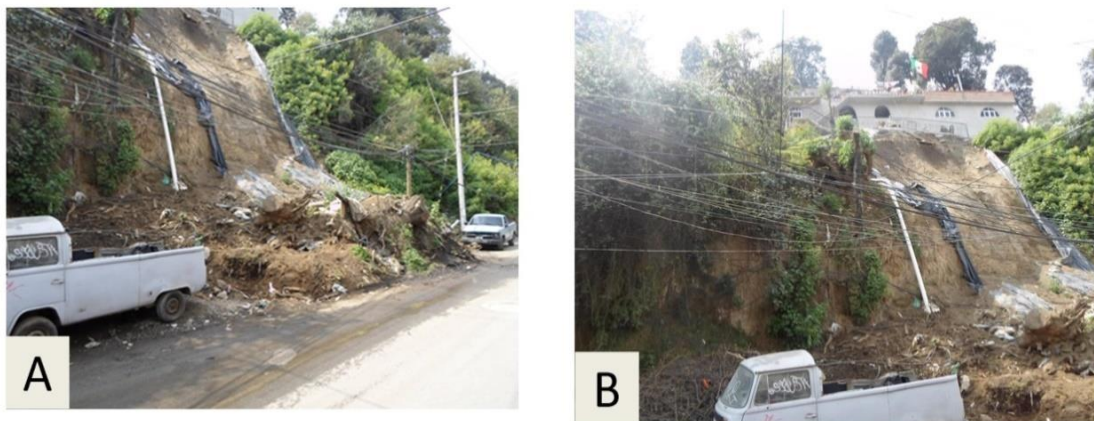


Figura 3. Fotografía que muestra el derrumbe sobre la avenida principal con lonas que se usan como obra de mitigación (19.2706° N, 99.2453° W. Calle: Metropolitana).



Figura 4. Recorrido realizado sobre la calle Jacarandas, se muestran grietas en la calle y materiales provenientes ladera arriba a un costado de la calle (19.2707° N, 99.2457° W. Calle: Jacarandas).



Figura 5. Construcción rudimentaria con obras de mitigación a base de costales rellenos, deterioradas a causa del intemperismo; se observa un pestaño hecho de concreto para protección de costales rellenos desviando el agua pluvial (19.2698° N, 99.2454° W. Calle: Azucena).



Figura 6. Construcciones rudimentarias desplantas sobre una ladera, propensa a arrastre de materiales, esto es notable por la presencia de erosión en el área circundante a la vivienda (19.2704° N, 99.2455° W. Calle: Jacarandas).

Determinación de la zona de la TRE

Se determinó realizar la TRE en la calle de Jacarandas 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 48 y la separación entre ellos es de 3 m, la longitud de la línea de ubicación de electrodos es de 141 m.
- La línea de la TRE puede ser continua, ya que la calle es casi recta.
- La línea es cercana al talud donde se expresa el derrumbe.

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	800–1000 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).

Accesorios:

- Fuente: batería externa de 12 V
- 48 electrodos impolarizables
- 4 carretes de cables de superficie de 12 conexiones cada una con espaciamentos 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 7).

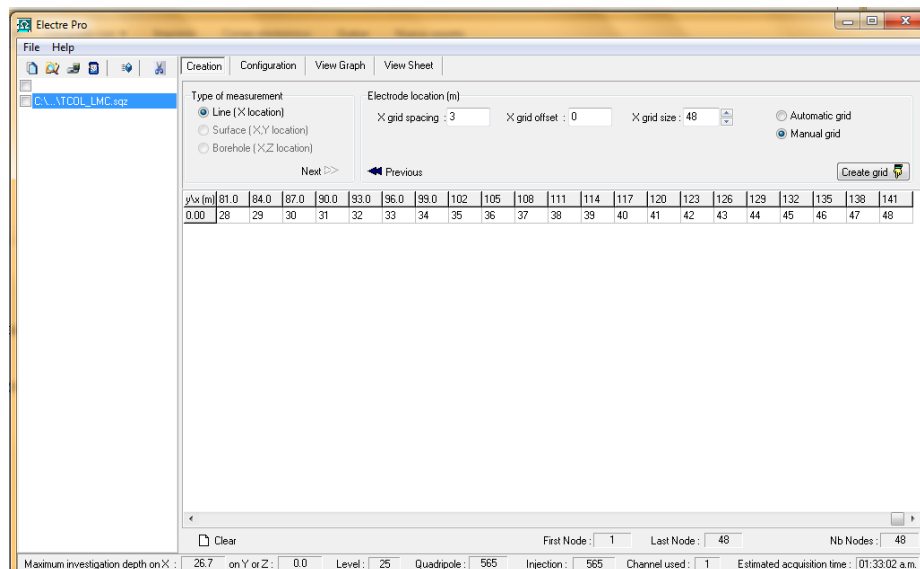


Figura 7. Ventana de asignación de separación entre electrodos (ELECTRE Pro software, Iris Instruments, 2012).

- 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 8).

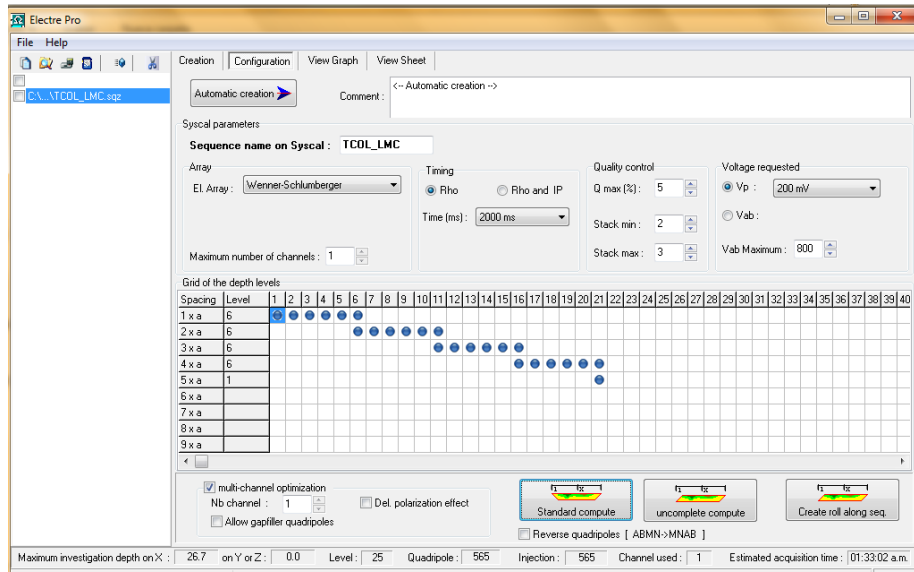


Figura 8. Ventana de configuración, en ella se introducen los parámetros de inyección de voltaje, el tipo de arreglo, el nombre que tendrá el levantamiento, entre otros (ELECTRE Pro software, Iris Instruments, 2012).

- 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 9).

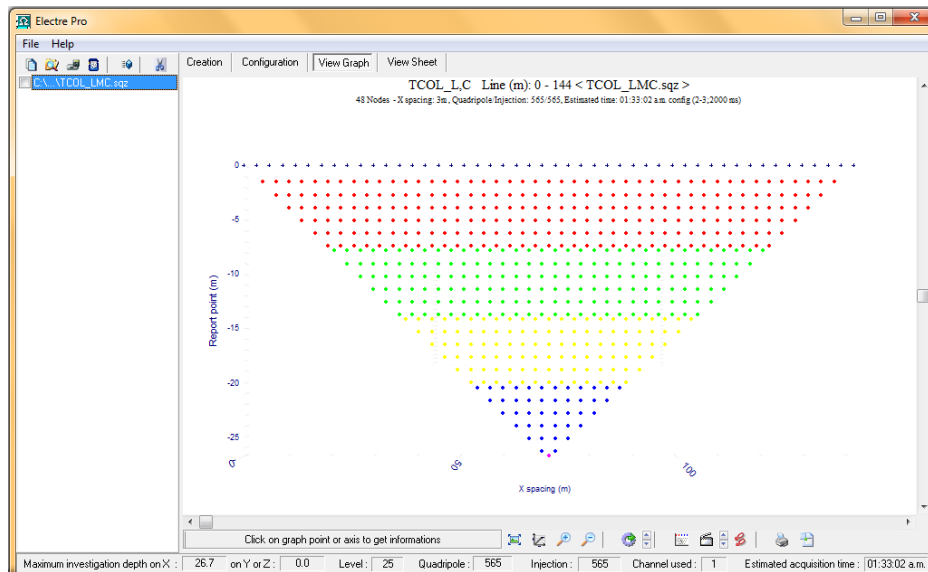


Figura 9. Ventana que muestra la gráfica preliminar del levantamiento; en la parte superior se puede observar el nombre del levantamiento y el número de electrodos a utilizarse, el espaciamiento entre ellos; en la parte media se encuentra una representación de los cuadrípolos; en la parte inferior (de izquierda a derecha): el nivel máximo de investigación, niveles, total de cuadrípolos, 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):

Longitud del levantamiento	138 m
Número de electrodos utilizados	48
Separación entre electrodos	3 m
Profundidad máxima de investigación	26.7 m
Total de puntos de atribución	565
Puntos de inyección	565

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 10. Fotografía que muestra la consola SYSCAL Pro y el tendido del cable durante el levantamiento de la TRE (19.2702° N, 99.2452° W. Calle: Jacarandas).

Ubicación de los electrodos

Durante el levantamiento se obtuvo la ubicación de los electrodos, el cual se muestra a continuación en la (Tabla 3).

No de Electrodo	X	Y	Distancia (m)
1	474109	2130813	0
3	474112	2130808	6
5	474115	2130803	12
7	474117	2130797	18
9	474119	2130797	24
11	474122	2130786	30
13	474126	2130782	36
15	474132	2130780	42
17	474138	2139780	48
19	474144	2130781	54
21	474150	2130782	60
23	474156	2130783	66
25	474162	2130783	72
27	474168	2130782	78
29	474173	2130781	84
31	474179	2130778	90
33	474184	2130775	96
35	474190	2130772	102
37	474195	2130769	108
39	474199	2130766	114
41	474204	2130762	120
43	474210	2130761	126
45	474216	2130759	132
47	474222	2130758	138

Tabla 3. Ubicación en coordenadas UTM de los electrodos nones (fuente: Datos obtenidos en campo).

Justificación del tipo de arreglo de la TRE

El arreglo Wenner-Schlumberger, es híbrido de los arreglos Schlumberger y Wenner, permite una profundidad de investigación de aproximadamente 30% de la longitud total del tendido, la señal presenta una buena intensidad, muestra gran sensibilidad a cambios horizontales y verticales, ligeramente mejor cobertura horizontal que el arreglo Wenner.

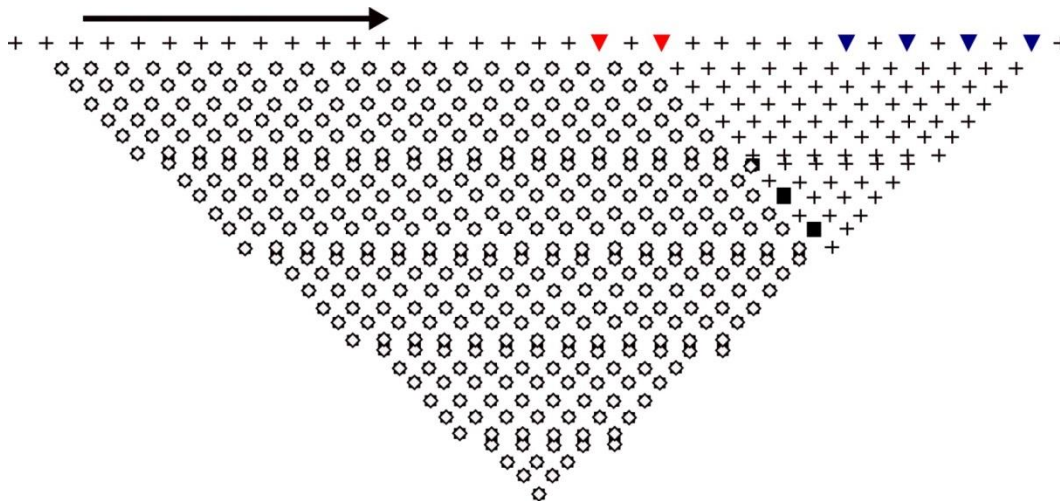


Figura 11. Modelo de puntos de atribución. Triángulos rojos, electrodos de inyección de corriente; triángulos azules, electrodos de potencial; cuadros huecos, puntos de atribución ya medidos; y cuadros negros, puntos de atribución en los que se está realizando la medición en ese momento. Las cruces son los puntos de atribución que aún no han sido medidos (Iris instrumentos, 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 12).

#	Ekaray	Spa.1	Spa.2	Spa.3	Spa.4	Rho	Dev.	M	Sp	Vp	In	Name
774	Schum. VES	0.00	9.00	3.00	6.00	95.11	0.04	0.00	27.82	210.923	41.804	TCOL_LLC
775	Schum. VES	0.00	15.00	6.00	9.00	35.78	16.20	0.00	325.45	15.250	241.63	TCOL_LLC
776	Schum. VES	0.00	21.00	9.00	12.00	44.42	0.24	0.00	257.06	212.227	540.358	TCOL_LLC
777	Schum. VES	0.00	27.00	12.00	15.00	45.92	0.27	0.00	419.05	104.129	427.471	TCOL_LLC
778	Schum. VES	0.00	33.00	15.00	18.00	37.94	1.08	0.00	391.74	34.251	255.262	TCOL_LLC
779	Schum. VES	0.00	39.00	18.00	21.00	46.81	0.21	0.00	-325.71	63.460	536.842	TCOL_LLC
780	Schum. VES	0.00	42.00	18.00	24.00	47.91	0.08	0.00	29.34	115.750	551.201	TCOL_LLC
781	Schum. VES	0.00	48.00	21.00	27.00	51.78	0.06	0.00	-233.00	114.716	657.760	TCOL_LLC
782	Schum. VES	0.00	54.00	24.00	30.00	56.31	0.83	0.00	-41.89	53.175	356.005	TCOL_LLC
783	Schum. VES	0.00	60.00	27.00	33.00	65.86	0.17	0.00	13.87	40.870	289.490	TCOL_LLC
784	Schum. VES	0.00	66.00	30.00	36.00	62.23	0.46	0.00	3.98	51.771	470.475	TCOL_LLC
785	Schum. VES	0.00	72.00	33.00	39.00	55.99	0.26	0.00	180.65	44.494	529.950	TCOL_LLC
786	Schum. VES	0.00	75.00	33.00	42.00	63.73	0.36	0.00	209.09	46.413	352.366	TCOL_LLC
787	Schum. VES	0.00	81.00	36.00	45.00	77.63	0.47	0.00	-18.79	73.216	533.364	TCOL_LLC
788	Schum. VES	0.00	87.00	39.00	48.00	86.25	0.03	0.00	-67.89	100.792	763.632	TCOL_LLC
789	Schum. VES	0.00	93.00	42.00	51.00	90.20	0.14	0.00	57.67	44.207	366.462	TCOL_LLC
790	Schum. VES	0.00	99.00	45.00	54.00	99.86	0.39	0.00	250.76	68.784	573.029	TCOL_LLC
791	Schum. VES	0.00	105.00	48.00	57.00	106.69	0.14	0.00	160.28	68.890	616.698	TCOL_LLC
792	Schum. VES	0.00	108.00	48.00	60.00	98.25	0.36	0.00	-58.32	63.360	486.219	TCOL_LLC
793	Schum. VES	0.00	114.00	51.00	63.00	104.28	0.95	0.00	23.29	59.936	483.483	TCOL_LLC
794	Schum. VES	0.00	120.00	54.00	66.00	93.42	0.46	0.00	-161.75	70.422	600.932	TCOL_LLC
795	Schum. VES	0.00	126.00	57.00	69.00	102.07	0.04	0.00	-51.51	68.832	694.380	TCOL_LLC
796	Schum. VES	0.00	132.00	60.00	72.00	114.06	0.37	0.00	-149.48	66.381	696.484	TCOL_LLC
797	Schum. VES	0.00	138.00	63.00	75.00	114.83	0.51	0.00	-330.35	70.594	760.507	TCOL_LLC
798	Schum. VES	0.00	141.00	63.00	78.00	114.13	0.47	0.00	-97.69	78.702	709.686	TCOL_LLC
799	Schum. VES	3.00	12.00	6.00	9.00	71.33	0.09	0.00	15.77	203.376	55.332	TCOL_LLC
800	Schum. VES	3.00	18.00	9.00	12.00	49.96	0.30	0.00	-529.94	414.942	479.246	TCOL_LLC
801	Schum. VES	3.00	24.00	12.00	15.00	46.81	0.46	0.00	316.16	196.126	473.886	TCOL_LLC
802	Schum. VES	3.00	30.00	15.00	18.00	38.07	0.23	0.00	-309.34	107.567	532.957	TCOL_LLC
803	Schum. VES	3.00	36.00	18.00	21.00	43.05	0.46	0.00	352.61	73.058	479.845	TCOL_LLC
804	Schum. VES	3.00	42.00	21.00	24.00	47.14	0.00	0.00	-327.20	64.579	542.293	TCOL_LLC
805	Schum. VES	3.00	45.00	21.00	27.00	43.17	0.45	0.00	-205.64	112.409	517.065	TCOL_LLC
806	Schum. VES	3.00	51.00	24.00	30.00	56.01	0.03	0.00	48.76	91.366	484.284	TCOL_LLC
807	Schum. VES	3.00	57.00	27.00	33.00	61.40	0.24	0.00	-8.44	126.892	779.107	TCOL_LLC
808	Schum. VES	3.00	63.00	30.00	36.00	59.45	0.41	0.00	-153.67	65.752	516.016	TCOL_LLC
809	Schum. VES	3.00	69.00	33.00	39.00	53.77	0.12	0.00	219.03	54.063	688.959	TCOL_LLC
810	Schum. VES	3.00	75.00	36.00	42.00	65.79	0.24	0.00	97.63	35.293	356.000	TCOL_LLC

Figura 12. 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 ρ_a , que puede contener datos anómalos (Figura 13).

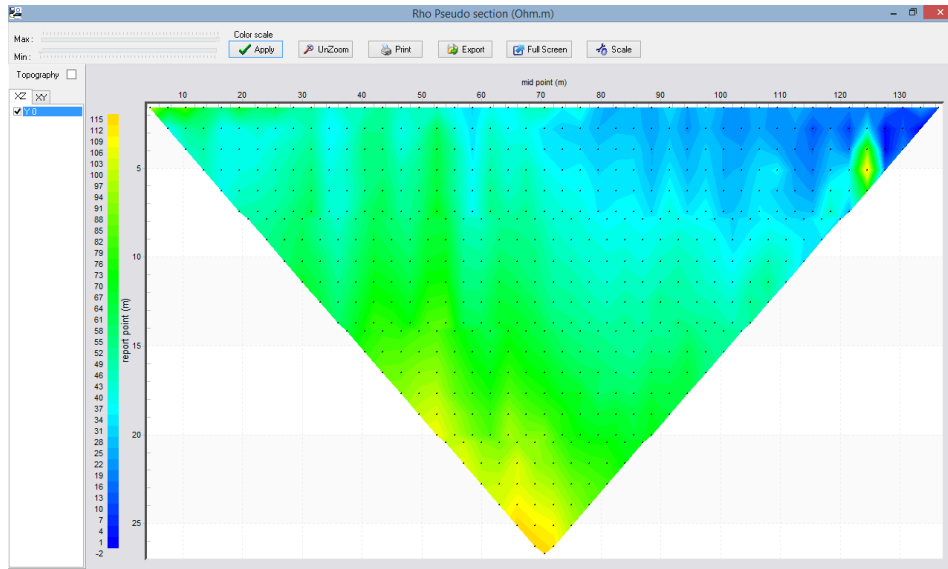


Figura 13. Gráfica de resistividad aparente sin proceso de inversión de datos (software Prosys II, Iris Instruments, 2012).

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 14).

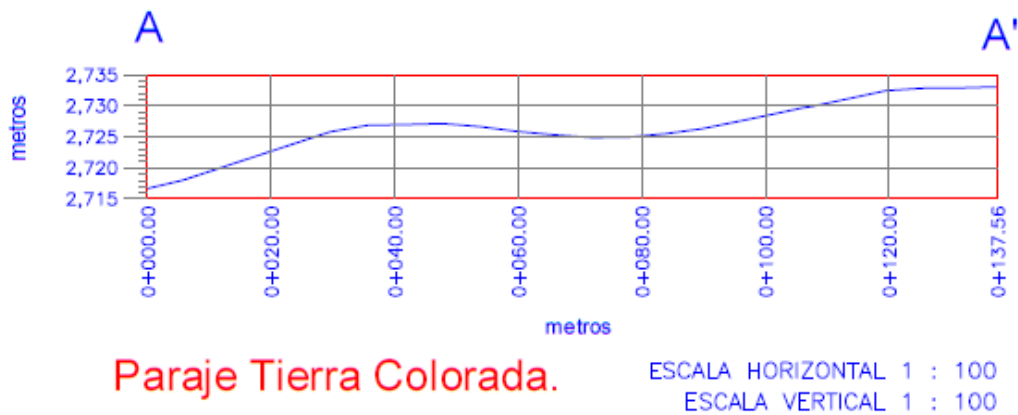


Figura 14. Perfil topográfico de la línea donde se realizó TRE.

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 15).

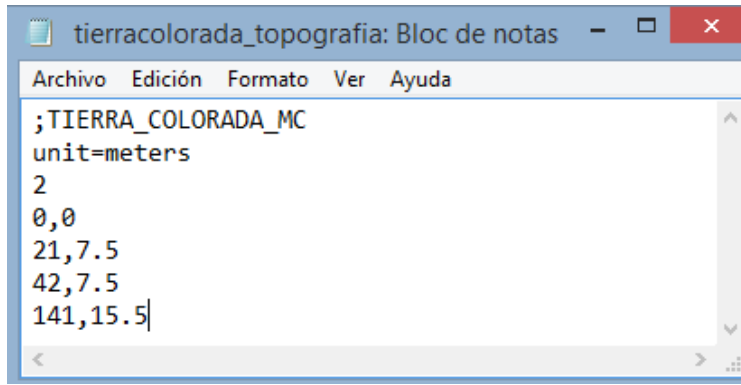


Figura 15. Archivo de topografía que se ingresa al programa EarthImager durante el proceso de inversión de datos.

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 propiedades del suelo. En la Tabla 4 se muestran los parámetros que constituyen el modelo directo propuesto para este estudio.

MinVoltage=-0.1	Voltaje mínimo.
MinAppRes=0.01	Resistividad aparente mínima.
MaxAppRes=1000	Resistividad aparente máxima.
MaxRepeatErr=10	Error de repetición máximo.
MaxRecipErr=3	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 16).

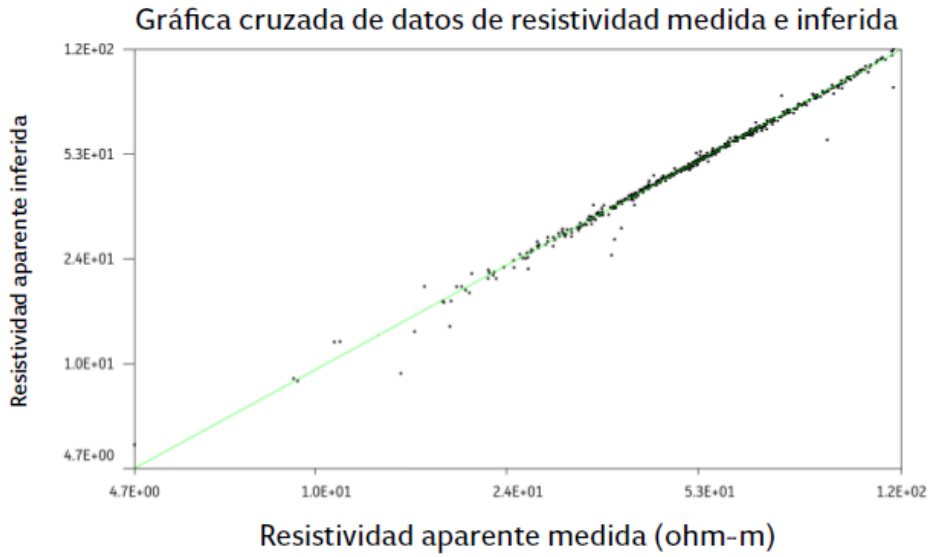


Figura 16. Gráfica cruzada de resistividad aparente del modelo directo vs resistividad aparente medida. (software EarthImager, 2009).

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 17).

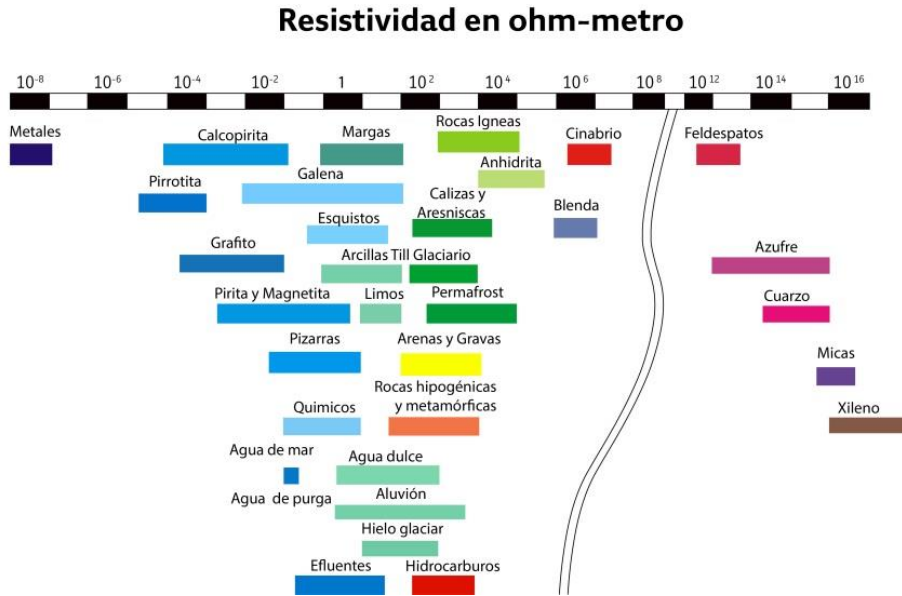


Figura 17. Gráfica de los valores de resistividad de diferentes rocas y minerales (www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=897).

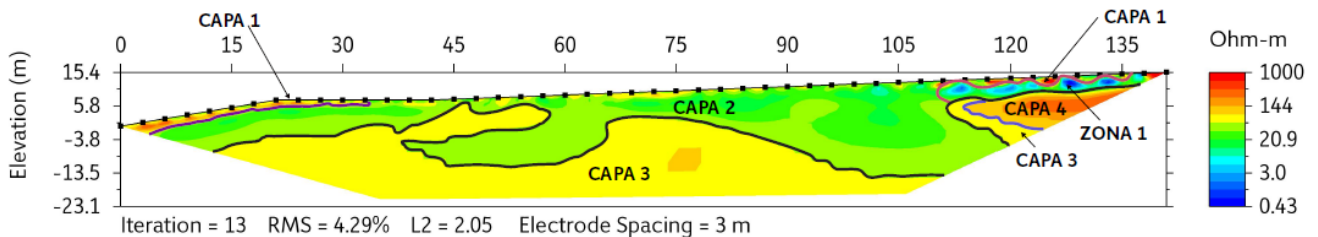


Figura 18. TRE obtenida en la calle Jacarandas, Paraje Tierra Colorada.

En la TRE se observan cuatro tipos de materiales divididos en cuatro capas: 1, 2, 3 y 4.

Capa 1

La Capa uno muestra resistividades entre los 100 y 120 Ωm , que se asocian limos y arcillas de origen volcánico, con un espesor de aproximadamente de 4 m, se infiere que son suelos degradados de rocas ígneas.

Capa 2

En esta capa se deduce la presencia de arcillas con un grado medio de saturación, presenta resistividades entre los 15 y 30 Ωm , y tiene un espesor de 13 m en la parte más gruesa.

Zona 1

En esta zona se tienen resistividades menores a los 3 Ωm asociadas a un depósito de arcillas sobresaturadas de agua por su alta conductividad, zona que presenta un espesor de aproximadamente 4 m.

Capa 3

Esta capa presenta resistividades entre los 100 y los 120 Ωm , que se asocia a depósitos volcánicos compactos con espesor de aproximadamente 20 m.

Capa 4

Se asocia a una roca fracturada, con un espesor de aproximadamente 6 m y presenta resistividades que van de los 200 a 400 Ωm .

Conclusiones

El motivo para realizar la tomografía en el sitio con riesgo Paraje Tierra Colorada fue caracterizar el subsuelo, para evaluar las zonas más susceptibles a sufrir procesos de remoción en masa, de acuerdo a la litología presente y el contenido de agua.

La capa uno presenta zonas de acumulación hídrica subsuperficial, por su relación con la pendiente que presenta el lugar estas zonas pueden ser proclives al arrastre de materiales de granulometría fina. Este fenómeno ocurre de manera casi imperceptible hasta que se manifiesta con pequeñas oquedades entre las raíces de las plantas o de las estructuras (Figura 19 A)

En la TRE las capas dos y tres poseen materiales de baja resistividad, alcanzan una profundidad mayor a 23m. Correlacionando las capas dos y tres de la TRE con lo que se observa en la ladera se trata de materiales arcillosos y depósitos volcánicos muy intemperizados, ambos son muy permeables y en época de lluvias se sobresaturan con agua.

Los materiales arcillosos y depósitos volcánicos son deleznable y pueden fácilmente ser arrastrados por el agua, cuando se les quita la cubierta vegetal o se les exponen a la intemperie, como se puede observar en la Figura 19 B.

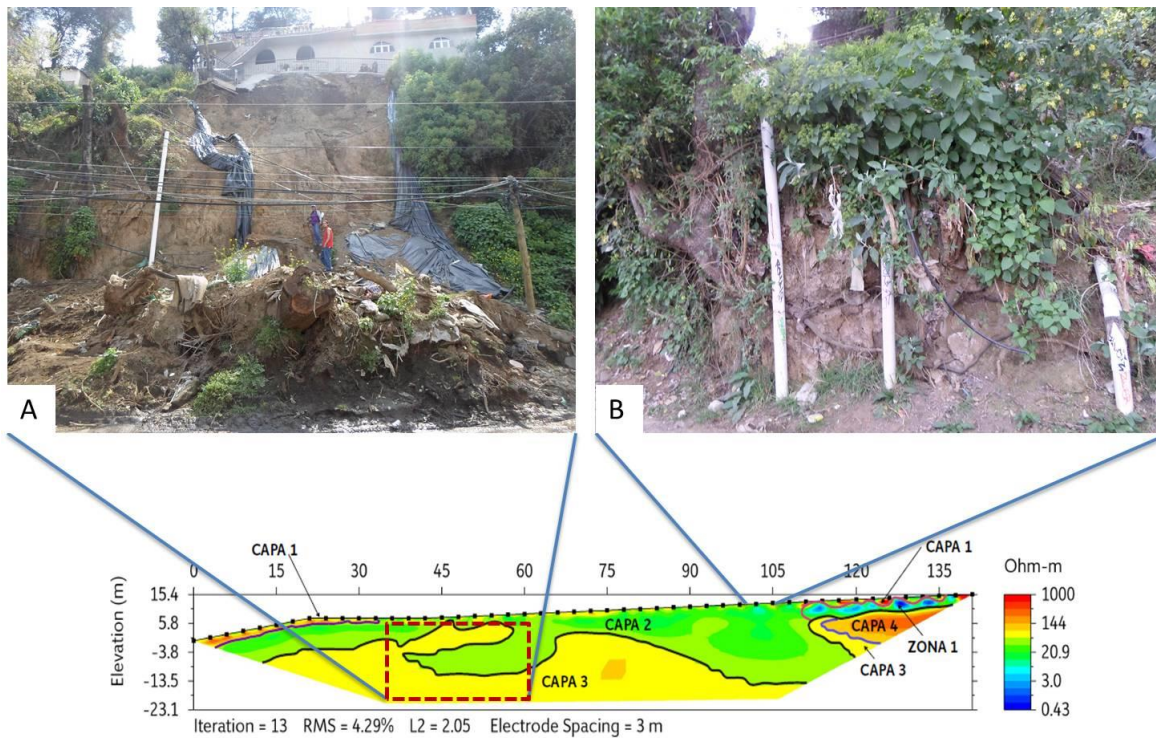


Figura 19. Derrumbe del talud sobre avenida (19.2706°N, 99.2453°W. Calle: Metropolitana).

Como se observa en la Figura 19 A, se han usado lonas y plásticos como obras de mitigación para intentar frenar la sobre saturación de los materiales que componen el suelo y el arrastre de los mismos; no obstante la ocurrencia de procesos de remoción en masa es inevitable.

Otros factores que favorecen los derrumbes son:

- Los cortes de talud que desproveen de suelos a los árboles y plantas (Figura 19 B), y por lo tanto contribuyen a la pérdida de la cubierta vegetal, propiciando un flujo de agua inadecuado, la rápida absorción y sobresaturación hídrica del suelo.
- Las tuberías no flexibles en la red hidrosanitaria sumado a la inestabilidad del terreno favorecen las fugas de líquidos que se vierten directamente al suelo (Figura 19).
- La inexistencia de muros de contención de los materiales pocos consolidados frente a los taludes.
- El desplante de viviendas cerca o sobre la cabeza del talud (Figura 19 A) incrementan el peso que deben soportar la ladera.

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 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 descomposición de minerales de aluminio. Surge de la descomposición de rocas que contienen feldespato, originada en un proceso natural que dura decenas de miles de años. El diámetro de las partículas de la arcilla es inferior a 0.002 mm [12].

Asfalto: Es una mezcla sólida 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 caída o deslizamiento de un cuerpo rocoso con movimiento progresivo y pérdida de cohesión que lo convierte en derrubios y se transforma en un flujo de tipo avalancha. La segunda, por el movimiento de un depósito 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 kilómetros, y en anchura y profundidad, algunas decenas de metros. Los barrancos se forman generalmente en rocas incoherentes o fácilmente erosionables, como los loess, depósitos piroclásticos y conglomerados, por escurrimiento de temporada de las aguas pluviales y nivales [1].

Basalto: Roca ígnea efusiva de composición básica y color oscuro, consistente principalmente en plagioclasas básicas, 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 kilómetros cuadrados. Entre las formas de relieve características están los volcanes de lava y sus derrames asociados, del tipo de Hawái e Islandia. Cubre también extensiones gigantescas del fondo oceánico, mismo que incluye la planicie abisal, montañas submarinas y las dorsales [1].

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

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

Brecha volcánica: Roca consistente en detritos angulosos mal clasificados debido a que sufrieron un transporte reducido. Constituida de ceniza y lapilli, y de clastos volcánicos. Se puede formar directamente a causa de una erupción explosiva, por remoción posterior del material volcánico o por un hundimiento superficial [1].

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

Caolinitas: Arcillas minerales cuya composición es de óxido de aluminio hidratado, formado generalmente a partir de la hidrólisis de feldespato potásico y otros minerales aluminosilicatados [2].

Carbonatación: Reacción química del ácido carbónico del agua de lluvia, agua del suelo y agua subterráneas con los minerales, afecta intensamente a los minerales y rocas carbonatas, como la caliza o el mármol; es una actividad de la meteorización química [2].

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

Ceniza: Partículas de roca volcánica, cristales o vidrio volcánico, generado durante las erupciones (diámetro 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 ácido son generalmente cortos (1-10 km) y de fuerte grosor (más de 25 m). Los derrames de lava o coladas de lava basálticos, 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].

Esguerramiento: 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 titanios. 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 epirogénesis, 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 [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 1,200 °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 quinético 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 cubico 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].

Resistímetro: 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

π	Constante matemática con valor de 3.141592...
°	Grados.
°C	Grados Celsius.
>	Mayor que.
<	Menor que.
μV	Micro volt.
2D	Modelación en dos dimensiones.
$\Omega\text{-m}$	Ohms metros.
%	Porcentaje.
ρ_a	Resistividad Aparente.
[]	Referencias Bibliográficas.
Ω	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^2	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

- 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.
- Carreón F. (2011) *Identificación y caracterización de los diferentes tipos de fracturas que afectan el subsuelo de la Delegación Iztapalapa del Distrito Federal*. Distrito Federal: Instituto de Ingeniería.
- Carreón F. (2011). *Caracterización geomecánica de los suelos de Iztapalapa, México, para evaluar el fracturamiento causado por deformación diferencial*. Pan-AM CGS Geotechnical Conference.
- CEPAL (2005). *El impacto de los desastres naturales en el desarrollo: documento metodológico básico para estudios nacionales de caso*. México: CEPAL.
- Constantino R., L. D. (2011). *Método de tomografía eléctrica para determinar estructuras volcánicas, México*. (Tesis inédita de Licenciatura). UNAM. México, D. F.
- Espinosa Villalpando, L.A. (2011). *Mediciones de microtemores para estimar el origen del agrietamiento en la Delegación Iztapalapa, D.F., México*. (Tesis inédita de licenciatura). UNAM. México.
- Iakubovskii, I. V. y Liajov, L. L. (1980). *Exploración Eléctrica*. Reverte: Moscú.
- Iris Instruments, *ELECTRE Pro software Help* (CD-ROM). Francia: (2012).
- Iris Instruments, *Prosys Help* (CD-ROM). Francia: (2012).
- Iris Instruments. (2012). *Syscal Pro, User's Manual*. Francia.
- 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. y Khan, M. (2000). *Looking into the earth. An introduction to Geological Geophysics*. Cambridge. United States of America.
- Orellana, E. (1972). *Prospección geoelectrica en corriente continua*. España: Paraninfo.
- Protección Civil, Secretaría de Gobernación (consulta en línea). <http://www.proteccioncivil.gob.mx>, consultado el día 10 de julio 2014.
- Perdomo, S. (2009) *Tomografía eléctrica en apoyo de la investigación arqueológica*. (Tesis de Grado). Universidad Nacional de la Plata. Argentina.
- Sepúlveda E, L. (2009). *Diseño de un resistivímetro de corriente directa para realizar estudios de geoelectricos en los Valles Centrales*. (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico Nacional. Oaxaca.
- Serrano O., J. (2003). *Caracterización geofísica de filtraciones de agua en el subsuelo*. (Tesina). Universidad Politécnica de Cataluña. España.
- Strahler, A.N. (1988). *Geografía Física*. Barcelona: Ediciones Omega, S.A.
- Tarback, L. (2008). *Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física*. Madrid: Ed. Pearson-Prentice Hall.
- Terracon Ingeniería. (2011). *Atlas de Riesgos Naturales de la Delegación Iztapalapa, México, DF*. Terracon Ingeniería: México, D.F.

Bibliografía para el glosario de términos

- [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] Tarbuck y Lutdgens. (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] Secretaría de Protección Civil del Gobierno del Distrito Federal. (s.f.) *Norma técnica complementaria al reglamento de la ley de P. C. del D F NTC-002-SPCDF-PV-2010*. Recuperado el 10 de julio de 2014 en <http://cgservicios.df.gob.mx>
- [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*. SEDATU: México.
- [15] <http://deconceptos.com/ciencias-naturales/corrosion###ixzz3RvyoLBvD>
- [16] <http://www.segemar.gov.ar/biblioteca/temin/MINERALES>
- [17] Andrés P. y R. Rodríguez. (2008). *Evaluación y Prevención de Riesgos Ambientales en Centroamérica*. Editorial Documenta Universitaria. España.