

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 **Tlacoyaque** (definido así por la SPC, 2014) en peligro por el fenómeno 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 en riesgo por remoción en masa, las viviendas desplantadas cerca de taludes inestables en algunos casos desplantadas en terrazas habilitadas a partir de cortes antropogénicos en las laderas. Con un aproximado de 40 viviendas, de las cuales el 90% son de tipo consolidado y el 10% de las viviendas son de tipo precario.

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 Tlacoyaque (colonia Lomas de la Era).

Objetivo específico

Identificar los materiales que conforman las paredes de la barranca en el sitio con riesgo Tlacoyaque.

Definición del problema geológico

En Tlacoyaque hay presencia de derrumbes y deslizamientos continuos

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 Tlacoyaque, 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, etapa 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 Tlacoyaque.

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 Tlacoyaque se localiza entre las calles Emiliano Zapata, Arboledas y de la Cruz (Figura 1).

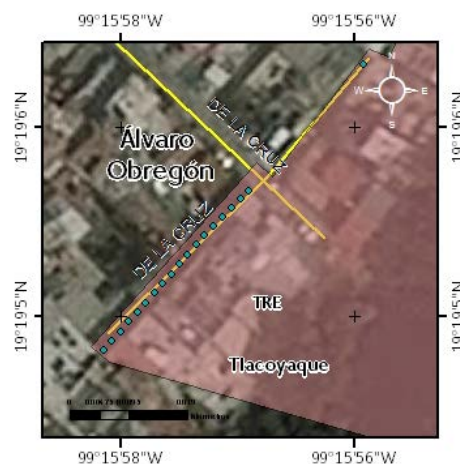


Figura 1. Mapa de localización del sitio con riesgo Tlacoyaque, ubicación de la TRE (los puntos en color azul marcan la ubicación de los electrodos), el área rellena (color salmón) es el polígono propuesto por la SPC.

Geología de la zona de estudio

Relieve

De acuerdo con Lugo *et al.* (1995) la Delegación Álvaro Obregón se sitúa en el suroeste de la Ciudad de México. Tiene una altitud que va desde 2,240 hasta 3,800 msnm en las cimas de la Sierra de Las Cruces.

El relieve se puede subdividir en tres unidades principales: las laderas montañosas, el piedemonte y la planicie lacustre.

Las **laderas montañosas** son superficies con gran inclinación (más de 15°) y se presentan en general a partir de los 2,700 msnm. Se constituyen de rocas volcánicas andesíticas con una cubierta de material piroclástico de grosor variable.

El contacto de las laderas con el piedemonte (Mooser *et al.*, 1986) es reconocible por un cambio de pendiente de 15-30 a unos 6°. Se divide en una porción inferior (de los 2,250 a los 2,400 msnm, con piedemonte menor de 4°) y otra superior (de 2,400 a 2,700 msnm). Se constituye principalmente de material volcánico de caída (pómez y piroclastos finos) además de derrame piroclástico. En menor proporción existen acumulaciones de lahar, corriente de lodo y de cauce fluvial.

El **piedemonte** se encuentra cortado por una serie de barrancos profundos, de laderas empinadas y de fondo estrecho que se han formado principalmente por erosión remontante reconocida en las cabeceras menos elevadas. Existen dos tipos de barrancos: mayores y secundarios.

Los mayores son paralelos, consecuentes, con corrientes permanentes y de formación antigua. Están controlados por fallas. Las laderas de los barrancos mayores son generalmente estables. De sur a norte, se reconocen siete barrancos principales: La Malinche (Contreras-Magdalena), San Ángel Inn (Guadalupe), Puerta Grande, Mixcoac, Becerra y Tacubaya. La erosión vertical ha creado profundidades mayores a 40 m, donde se ha desarrollado una vegetación arbórea que mitiga los procesos erosivos en estas superficies. En su mayoría, las laderas están urbanizadas.

Los barrancos secundarios, son mayoritariamente pequeños y poco profundos, con corrientes temporales, más activos en lo que corresponde a su crecimiento, en especial en las cabeceras; originados principalmente en tiempos históricos. Se encuentran en etapas iniciales de desarrollo, con profundidades de 2-10 m los más someros y hasta 20-40 m los más profundos. El crecimiento se da principalmente en época de lluvias, aunado a la no consolidación del material y las modificaciones antropogénicas del relieve.

Los cauces y llanuras de inundación, de 50 a 175 m de anchura, son provocados en gran parte por presas que cuando frenan el flujo del agua confinan el depósito de sedimentos corriente arriba, rellenando el fondo del valle.

Algunas laderas del piedemonte, modeladas por la erosión fluvial, presentan barrancos menores.

La **planicie** de nivel base, urbanizada totalmente, es la porción más baja de la delegación. Los problemas que ahí existen son inundaciones por encharcamiento, y en algunas localidades, por el desborde de presas e insuficiencia del drenaje.

Se identifican tres tipos de planicie:

- Inclinada, extendida en un nivel inferior al piedemonte, con una pendiente de 1.5 a 3°, entre los 2,280 y 2,260 msnm. Originada por acumulación de material volcánico y fluvial en las desembocaduras de los arroyos, se encuentra urbanizada actualmente y las formas de relieve están modificadas y cubiertas.
- De inclinación débil, de 0.5° a 1.5°, entre los 2,250 y 2,260 msnm, está urbanizada y es una extensión del piedemonte hacia la planicie lacustre.
- La más baja, representa una zona de antigua acumulación de los arroyos en su desembocadura en la ribera del lago, con una altitud de entre 2,250 y 2,240 msnm; está urbanizada totalmente e inclinada ligeramente al oriente y norte.

En el extremo meridional, se presenta una de las formas más jóvenes del relieve: una colada de lava, originada por el volcán Xictli, hace unos 2,200 años. Debido a su juventud y alta permeabilidad, no presenta alteraciones por intemperismo y erosión. Es muy estable, y abarca aproximadamente 70 km² de superficie y pertenece a las delegaciones Tlalpan, Coyoacán y Álvaro Obregón. Está inclinada hacia el norte, con pendientes débiles en su base, de 2 a 3° y pendiente fuerte hacia la parte alta con 10° o más. La zona estuvo deshabitada hasta la mitad del siglo XX, cuando gracias a la tecnología se construyó la colonia Pedregal de San Ángel, Ciudad Universitaria, además de otras zonas habitacionales.

Litología y Estratigrafía

De acuerdo a Lugo-Hupb *et al.* (1995) en la Delegación Álvaro Obregón afloran rocas cuaternarias; el piedemonte está constituido por la Formación Tarango (compuesta por depósitos de lahar, flujos de lodo y depósitos aluviales; Segerstrom, 1962), de aproximadamente 300 m de grosor.

En la sierra de Las Cruces, Mooser *et al.* (1992) reconocieron las siguientes unidades litológicas: derrames piroclásticos, arenas azules, erupciones piroclásticas Xolopo, tres erupciones plinianas de pómez, derrames piroclásticos Cuquita y erupciones de nubes ardientes de polvo fino.

La litología de piedemonte, de acuerdo a Lugo-Hupb *et al.* (1995) se integra por seis unidades litológicas:

- **Piroclastos finos** (cenizas) de color amarillo claro a pardo, en partes de un tono rosado. Su espesor varía entre los 50 cm a 50 m.
- **Ceniza con clastos angulosos** mal clasificados, con tamaños máximos de 70 cm, en promedio de 15 cm; es un material andesítico de colores rojo y gris. La capa tiene un grosor que va de los 0.5 a 2 m. Asociada con la toba de piroclastos pumíticos finos, con fragmentos de lava.
- **Cenizas con pómez**, el grosor de la capa varía de 0.5 a 1.5 m. La pómez es de color blanco, con fragmentos bien redondeados que van de los 0.5 a 5 cm.
- **Pómez**. Es un depósito común, continuo en el subsuelo a poca profundidad. Existen hasta tres capas de pómez separadas por ceniza, ceniza con pómez y/o depósito de derrame piroclástico. Los tipos de pómez son:
 - En capas casi horizontales, con grosor que va de 0.5 a 5 m, en promedio 1.5 m, son materiales de color amarillo claro.
 - Pómez fina, de color blanco, constituida por fragmentos pequeños de 3 a 5 mm. Se presenta en lentes de 10 a 15 cm.
 - Pómez rosa. Se agrupa en estratos cuyo espesor va de 1 a 3 m, con fragmentos que tienen diámetros de 1 a 15 cm, con promedio de 10 cm.
- **Depósitos de derrames piroclásticos**, los principales son:
 - Clastos mal clasificados, angulosos, cuyo tamaño va de 2 a 5 cm, con un máximo de 15 cm, son de color gris azulado aunque ocasionalmente pueden ser de tono rosa a pardo rojizo, poco consolidados. Se agrupan en capas de 5 m de grosor.
 - Clastos angulosos bien clasificados, con tamaño de 1 a 5 cm, bien cementados, generalmente sobre pómez.
 - Sedimentos volcánicos de color gris azulado; con clastos angulosos bien clasificados, con tamaño que va de algunos milímetros a 3 cm, poco consolidados.
- **Depósitos de lahar (derrame piroclástico)** con grosor de 35 m, con bloques de andesita hasta 1.5 m; su clasificación es mala y el tamaño variable, los más comunes son de 10 a 20 cm. Tienen una compactación regular, cementados con piroclastos finos de pómez.
- **Depósitos de derrame de lodos**. Consisten en bloques angulosos subredondeados con una clasificación regular y con tamaños máximos de 1 m de diámetro, medios de 10 a 20 cm y menores de 1 a 5 cm.
- **Conglomerados**: se componen de cantos bien clasificados, redondeados, de tamaño mínimo de 1 a 5 cm y máximo de 2 a 5 m.
- **Lavas del volcán Xictli**, de varios metros, sobre capa de pómez.

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):

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

Donde:

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:

$$K = \frac{2\pi a(a+n)}{n}$$

Donde:

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 Polo-Dipolo (Osella y Lanata, 2006).

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 Polo-Dipolo.

Donde:

C_A y C_B , son electrodos de corriente

P_M y P_N son electrodos de potencial

C_A , es un electrodo remoto (colocado lejos de los electrodos C_B , P_M y P_N)

$P_M P_N = D$ ("distancia de X" para el primer espaciamiento)

$C_B P_M = nD$,

n , es la relación de las distancias entre $C_B P_M$ y $P_M P_N$ (relacionado con el nivel de profundidad).

Lo anterior se ejemplifica en la Figura 2, donde se muestra la disposición inicial de los electrodos. La distancia del electrodo C_A debe ser cinco veces mayor que la distancia usada de $C_B P_M$.



Figura 2. Muestra la disposición de los electrodos en campo, donde se nota el espaciamiento de C_A con respecto a los demás electrodos. (ELECTRE Pro software Help, Iris instruments).

Recorrido de campo

Durante el recorrido en el sitio con riesgo se encontró lo siguiente:

Los accesos a la barranca se encuentran bloqueados con muros elaborados de varios materiales tales como malla ciclónica y mampostería (Figura 3) o madera y lámina (Figura 4).



Figura 3. Se observa una obra circundante a la barranca con muros de mampostería y malla ciclónica, que bloquea el acceso a la barranca (19.3239° N; 19.3239° W. Calle: Lázaro Cárdenas.)



Figura 4. Fotografía que muestra acceso bloqueado con madera y láminas metálicas (19.3136° N; 99.2688° W. Calle: 10 de mayo).

Se recorrió el cauce del río, ubicado en la zona baja de la barranca; donde se observaron obras de mitigación, para contener el material fino procedente de las partes altas como son: muros de costales rellenos de materiales finos (arenas o arcillas; Figura 5A); muros de mampostería con mortero y gaviones (Figura 5B); este últimos proporciona el control de la creciente y evitan la erosión fluvial en las paredes de la barranca.



Figura 5. Se observan obras de mitigación. A) Muro de contención hecho con costales rellenos de material fino, los materiales contenidos se saturan de agua y rompen el saco que los contiene, sumando material fino que puede arrastrarse hacia la parte baja de la barranca. B) Muro de mampostería adherido con mortero (base), y muro de gaviones de 2.30 m de altura, esta obra de contención permite el paso del agua, impidiendo que el material arenoso se vaya hacia las partes más bajas (19.3205° N, 99.2643° W. Calle: Emiliano Zapata).

La inestabilidad de las paredes de la barranca ha propiciado que los muros de contención fallaran, observándose estos fracturados (Figura 6) o materiales que los conformaron sobre las laderas de las barranca (Figuras 7, 8).



Figura 6. Muro de mampostería y mortero que presenta fracturas y colapso en la parte del cauce de la barranca; el peso de los materiales sólidos se incrementan con el agua proveniente de la parte superior (19.3205° N, 99.2643° W. Calle: Emiliano Zapata).



Figura 7. Muro colocado en un acceso a la barranca hecho con madera y lámina, en la ladera sobre la que se encuentra se observan materiales que anteriormente constituían esta barda (19.3136° N, 99.2688° W. Calle: 10 de mayo).



Figura 8. Se muestra un muro hecho a base de costales rellenos de materiales finos los cuales presentan deterioro del saco contenedor permitiendo que dicho material sea llevado por procesos gravitacionales ladera abajo (19.3117° N, 99.2706° W. Calle: 29 de octubre).

Un problema común en las laderas de la barranca es la saturación y arrastre de materiales por saltación en época de lluvia, como obra de mitigación los pobladores del lugar utilizan lonas plásticas para evitar que el agua de lluvia tenga contacto con los materiales térreos, los sature y haya lugar a deslizamiento de lodos o detritos (Figura 9).



Figura 9. Pared de la barranca donde se ha implementado el uso de lonas plásticas para evitar que la lluvia sature los materiales que constituyen las paredes y socaven la zona donde se desplanta la vivienda (19.3205° N, 99.2643° W. Calle: Emiliano Zapata).

Determinación de la zona de la TRE

Se determinó realizar la tomografía en la calle de la Cruz por estar ubicada cerca de la barranca, y ser paralela a la misma

- 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 36 y la separación entre ellos es de 1 m, la longitud de la línea de ubicación de electrodos es de 35 m.
- La línea de la TRE puede ser continua, y tener cierta linealidad.
- La ubicación del electrodo remoto debe estar en línea con los demás electrodos.
- En la calle De la Cruz se cumple con el *principio de continuidad lateral* planteado por Nicolás Steno (citado en Reykjavik, 2011), que nos ha llevado a la idea actual que considera a las superficies de estratificación como superficies isócronas (superficies que unen puntos de igual edad); y por lo tanto comparten similitudes geológicas en ambas paredes de la barranca.

Descripción del equipo

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

Resistímetro 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).

Accesorios:

- Fuente: batería externa de 12 V
- 49 electrodos impolarizables
- 1 carrete de cable de 200 m para electrodo remoto
- 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 11).



Figura 11. 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 12).

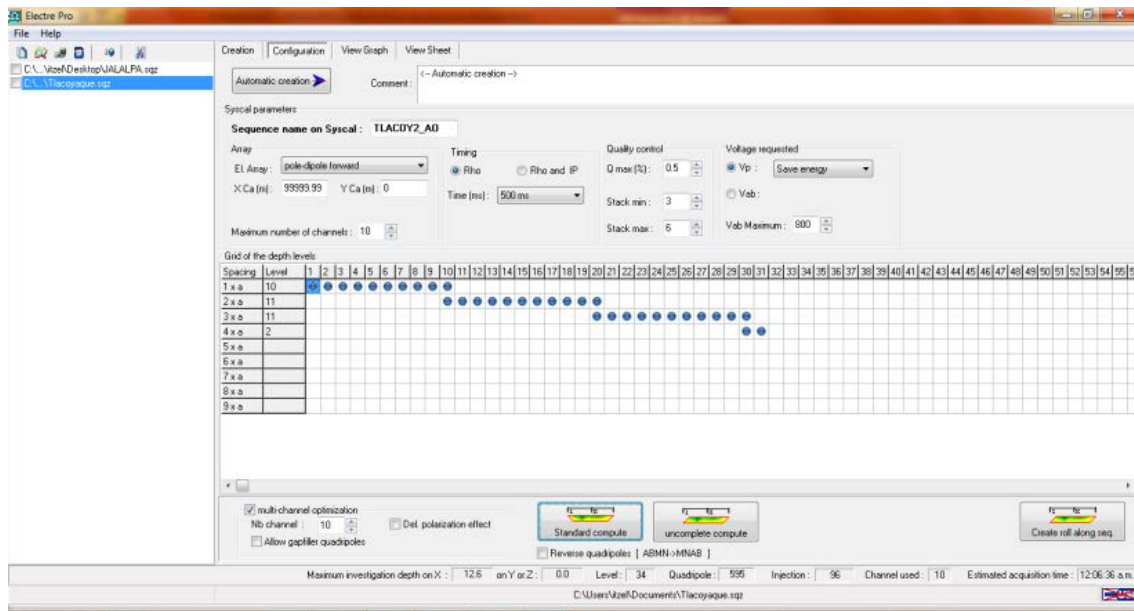


Figura 12. Ventana de configuración, en ella se introducen los parámetros de inyección de voltaje, el tipo de arreglo, el nombre que tendrá el levantamiento, entre otros (ELECTRE Pro software, Iris Instruments, 2012).

- 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 13).

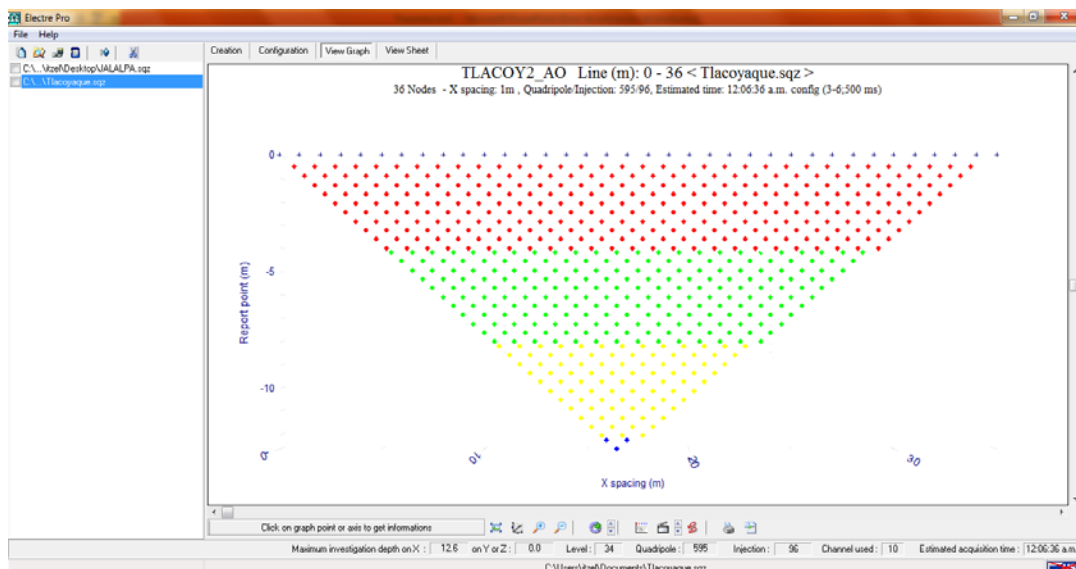


Figura 13. Ventana que muestra la gráfica preliminar del levantamiento; en la parte superior se puede observar el nombre del levantamiento y el número de electrodos a utilizarse, el espaciamiento entre ellos; en la parte media se encuentra una representación de los cuadrípolos; en la parte inferior (de 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	35 m
Número de total de electrodos utilizados	36
Numero de electrodos remotos	1
Separación entre electrodos	1 m
Profundidad máxima de investigación	12 m
Total de puntos de atribución	595
Puntos de inyección	426

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 1 m de distancia entre cada uno.
4. Colocación del electrodo remoto, el cual debe estar situado lo suficientemente lejos de la línea de estudio.
5. Verificación de que cada electrodo que hicieran contacto con el material del subsuelo.
6. 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.
7. Colocación el equipo *Syscal Pro* entre los electrodos 24 y 25. Se utilizó una batería de 12 V como fuente externa.
8. 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.
9. 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.
10. Verificación del correcto guardado de los datos en la memoria del equipo concluido el tiempo de levantamiento.



Figura 13. Fotografías que muestran los electrodos durante el levantamiento en el sitio con riesgo Tlacoyaque (19.3181° N, 99.2658° W. Calle: Cerrada de la Cruz).

Ubicación de los electrodos

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

No de Electrodo	X	Y	Distancia (m)
1	496799	2141853	0
3	496843	2141821	2
5	496830	2141830	4
7	496823	2141835	6
9	496834	2141828	8
11	496839	2141825	10
13	496814	2141842	12
15	496847	2141819	14
17	496852	2141815	16
19	496856	2141813	18
21	496861	2141809	20
23	496865	2141806	22
25	496869	2141803	24
27	496873	2141800	26
29	496881	2141793	28
31	496889	2141788	30
33	496893	2141786	32
35	496896	2141782	34

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

Justificación del tipo de arreglo de la TRE

El tipo de arreglo Polo – Dipolo tiene también una buena cobertura horizontal, una mayor intensidad de la señal comparado con el arreglo dipolo-dipolo y no es tan sensitivo al ruido telúrico. La penetración de la señal hacia el interior del terreno es de mayor profundidad.

En la Figura 14 se muestra un ejemplo del modelo de puntos de atribución obtenidos con el método Polo-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.

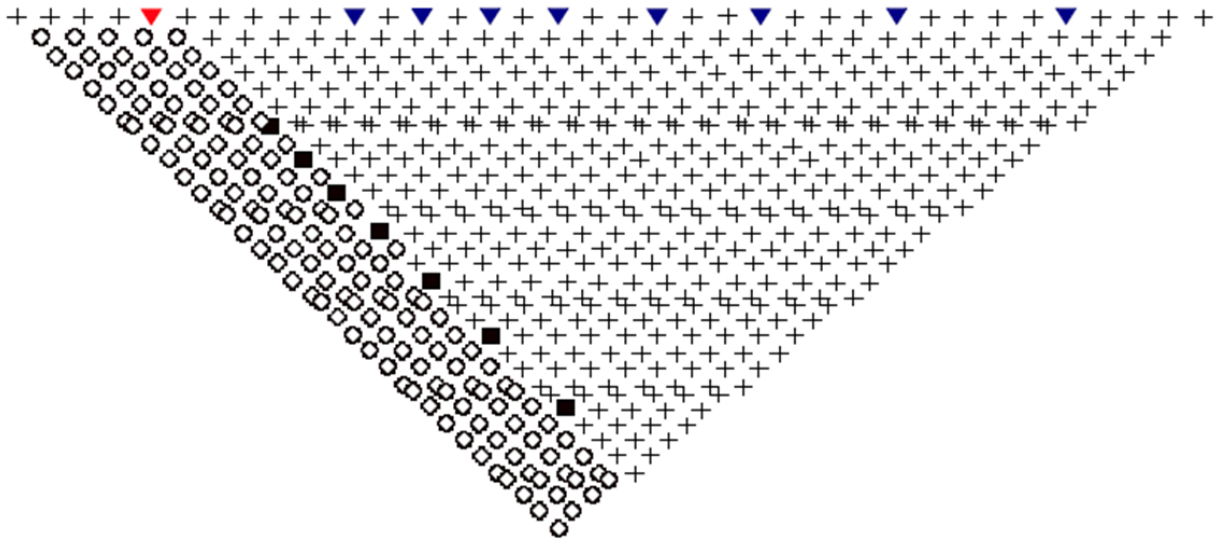


Figura 14. Modelo de puntos de atribución. Triángulos rojos, electrodos de inyección de corriente; triángulos azules, electrodos de potencial; cuadros huecos, puntos de atribución ya medidos; y cuadros negros, puntos de atribución en los que se está realizando la medición en ese momento. Las cruces son 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 15).

#	Elarray	Spa1	Spa2	Spa3	Spa4	Rho	Dev	Sp	Vp	In	Stack	Rs-Check	Name
1	Pole Dipole	99999.99	0.00	1.00	2.00	85.87	0.3	-12.9	-262.592	985.222	6	1.84	TLACQV2_AD
2	Pole Dipole	99999.99	0.00	2.00	3.00	57.65	0.3	216.9	-864.289	985.222	6	4.36	TLACQV2_AD
3	Pole Dipole	99999.99	0.00	3.00	4.00	20.23	0.4	-234.8	-151.862	985.222	6	3.43	TLACQV2_AD
4	Pole Dipole	99999.99	0.00	4.00	5.00	12.43	0.3	-34.2	-65.887	985.222	6	0.99	TLACQV2_AD
5	Pole Dipole	99999.99	0.00	5.00	6.00	28.57	0.3	39.2	-85.684	985.222	6	0.99	TLACQV2_AD
6	Pole Dipole	99999.99	0.00	6.00	7.00	20.95	0.3	-23.7	-44.876	985.222	6	0.74	TLACQV2_AD
7	Pole Dipole	99999.99	0.00	7.00	8.00	19.60	0.2	14.7	-31.488	985.222	6	0.90	TLACQV2_AD
8	Pole Dipole	99999.99	0.00	8.00	9.00	13.23	0.4	-19.7	-16.536	985.222	6	1.51	TLACQV2_AD
9	Pole Dipole	99999.99	0.00	9.00	10.00	21.03	2.0	135.5	-21.024	985.222	6	20.02	TLACQV2_AD
10	Pole Dipole	99999.99	0.00	10.00	11.00	19.48	3.6	-36.5	-15.529	985.222	6	19.14	TLACQV2_AD
11	Pole Dipole	99999.99	0.00	10.00	12.00	26.81	0.1	-73.8	-40.970	980.400	6	18.88	TLACQV2_AD
12	Pole Dipole	99999.99	0.00	12.00	14.00	57.67	0.1	-41.6	-43.419	980.400	6	0.95	TLACQV2_AD
13	Pole Dipole	99999.99	0.00	14.00	16.00	76.14	0.1	11.3	-62.796	980.400	6	1.14	TLACQV2_AD
14	Pole Dipole	99999.99	0.00	16.00	18.00	115.29	0.1	16.9	-73.959	980.400	6	1.51	TLACQV2_AD
15	Pole Dipole	99999.99	0.00	18.00	20.00	141.58	0.1	-3.9	-72.856	980.400	6	1.58	TLACQV2_AD
16	Pole Dipole	99999.99	0.00	20.00	22.00	30.04	0.9	-19.1	-12.614	980.400	6	1.35	TLACQV2_AD
17	Pole Dipole	99999.99	0.00	22.00	25.00	676.52	0.1	22.2	-340.070	980.400	6	1.23	TLACQV2_AD
18	Pole Dipole	99999.99	0.00	25.00	28.00	217.23	0.2	80.8	-86.040	980.400	6	1.05	TLACQV2_AD
19	Pole Dipole	99999.99	0.00	28.00	31.00	-1203.27	0.1	-494.4	304.160	980.400	6	0.76	TLACQV2_AD
20	Pole Dipole	99999.99	0.00	31.00	35.00	415.20	0.0	30.4	141.396	980.400	6	0.98	TLACQV2_AD
21	Pole Dipole	99999.99	0.00	11.00	13.00	34.64	0.0	-33.0	-15.576	202.022	3	1.46	TLACQV2_AD
22	Pole Dipole	99999.99	0.00	13.00	15.00	89.56	0.0	-18.4	-29.534	202.022	3	1.47	TLACQV2_AD
23	Pole Dipole	99999.99	0.00	15.00	17.00	66.35	0.1	8.0	-16.721	202.022	3	1.15	TLACQV2_AD
24	Pole Dipole	99999.99	0.00	17.00	19.00	141.94	0.0	-7.1	-20.880	202.022	3	1.46	TLACQV2_AD
25	Pole Dipole	99999.99	0.00	19.00	21.00	143.18	0.1	-25.4	-20.076	202.022	3	1.32	TLACQV2_AD
26	Pole Dipole	99999.99	0.00	21.00	24.00	421.34	0.1	30.3	-60.629	202.022	3	1.40	TLACQV2_AD
27	Pole Dipole	99999.99	0.00	24.00	27.00	967.78	0.1	-13.5	-84.517	202.022	3	1.46	TLACQV2_AD
28	Pole Dipole	99999.99	0.00	27.00	30.00	-1098.12	0.1	-18.3	120.051	202.022	3	0.88	TLACQV2_AD
29	Pole Dipole	99999.99	0.00	30.00	33.00	-643.02	0.1	2.4	63.236	202.022	3	0.70	TLACQV2_AD
30	Pole Dipole	99999.99	0.00	20.00	23.00	282.52	0.3	13.7	-16.302	65.903	3	1.16	TLACQV2_AD
31	Pole Dipole	99999.99	0.00	23.00	26.00	1326.23	0.0	-25.3	-69.795	65.903	3	0.91	TLACQV2_AD
32	Pole Dipole	99999.99	0.00	26.00	29.00	-1642.69	0.0	23.0	68.549	65.903	3	0.85	TLACQV2_AD
33	Pole Dipole	99999.99	0.00	29.00	32.00	-452.65	0.3	130.7	15.302	65.903	3	0.76	TLACQV2_AD
34	Pole Dipole	99999.99	0.00	30.00	34.00	593.93	0.3	68.3	15.624	42.148	3	0.76	TLACQV2_AD
35	Pole Dipole	99999.99	1.00	2.00	3.00	126.99	0.1	225.0	-4659.567	461.072	3	4.35	TLACQV2_AD

Figura 15. 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 16).

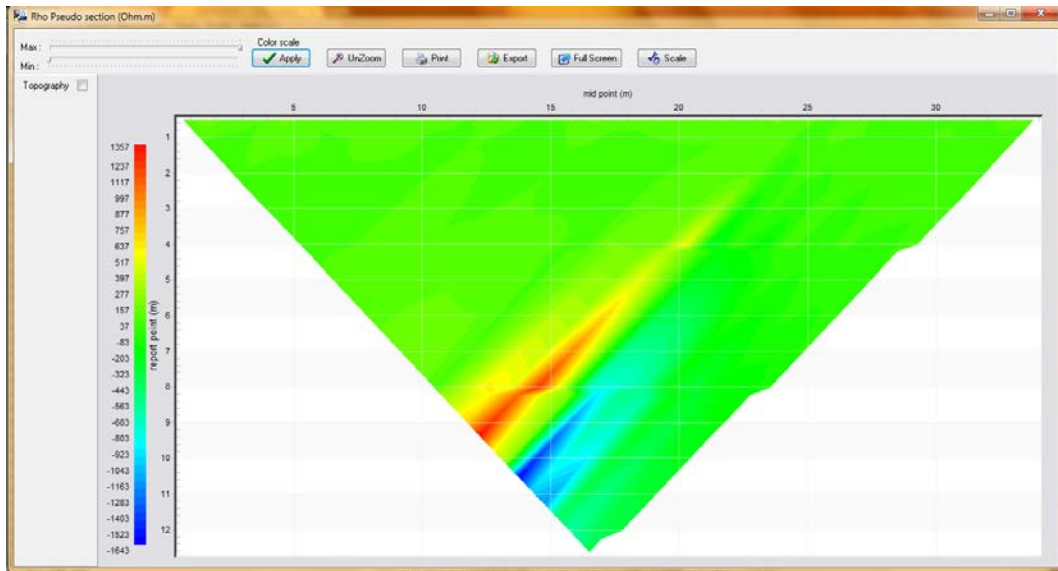


Figura 16. Gráfica de resistividad aparente sin proceso de inversión de datos (software Prosys II, Iris Instruments, 2012).

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 17).

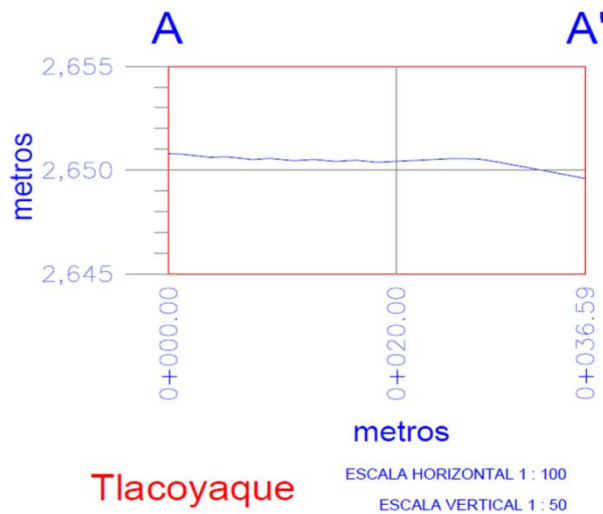


Figura 17. Perfil topográfico de la línea donde se realizó TRE.

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 18).

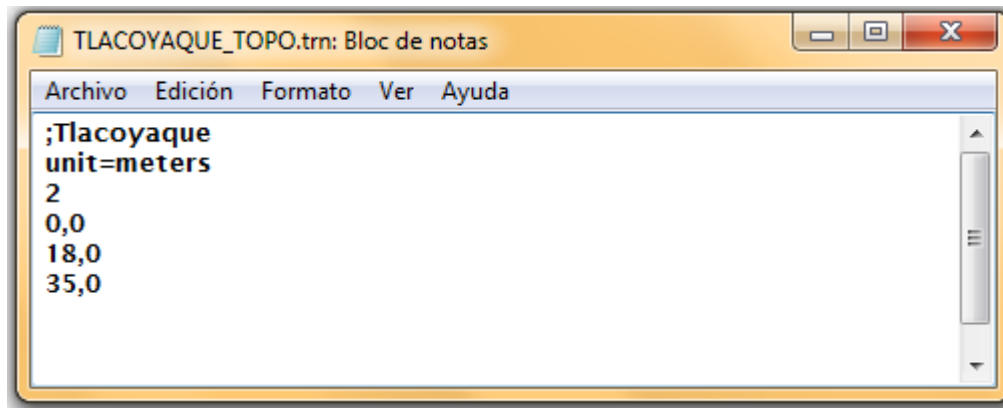


Figura 18. Archivo de topografía que se ingresa al programa EarthImager durante el proceso de inversión de datos.

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 19).

Gráfica cruzada de datos de resistividad medida e inferida

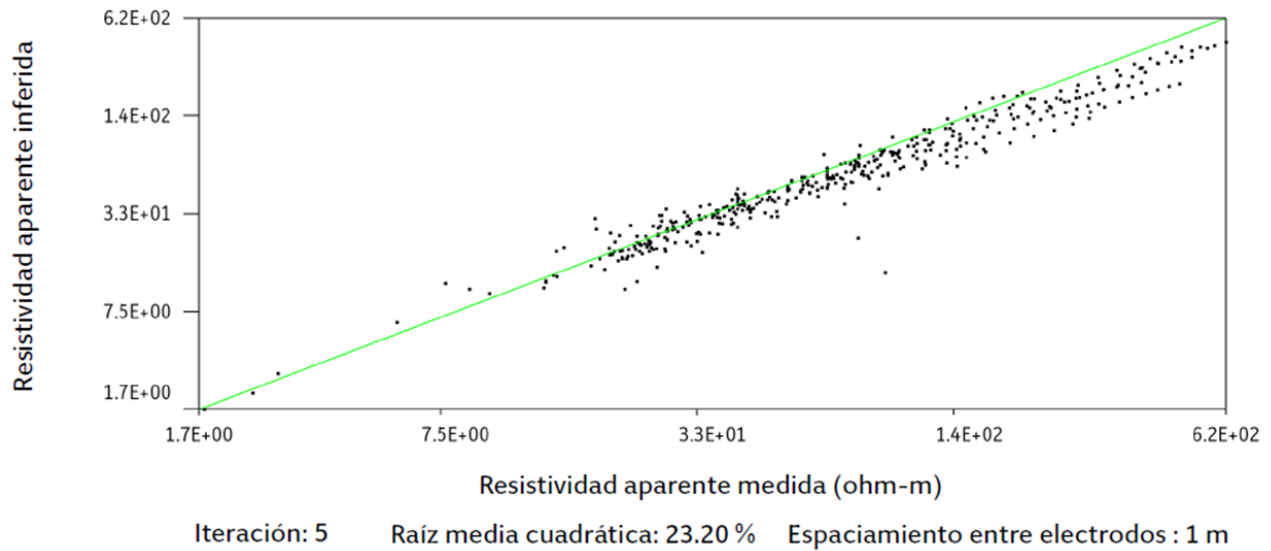


Figura 19. Gráfica cruzada de resistividad aparente del modelo directo vs resistividad aparente medida (software EarthImager, 2009).

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 20).

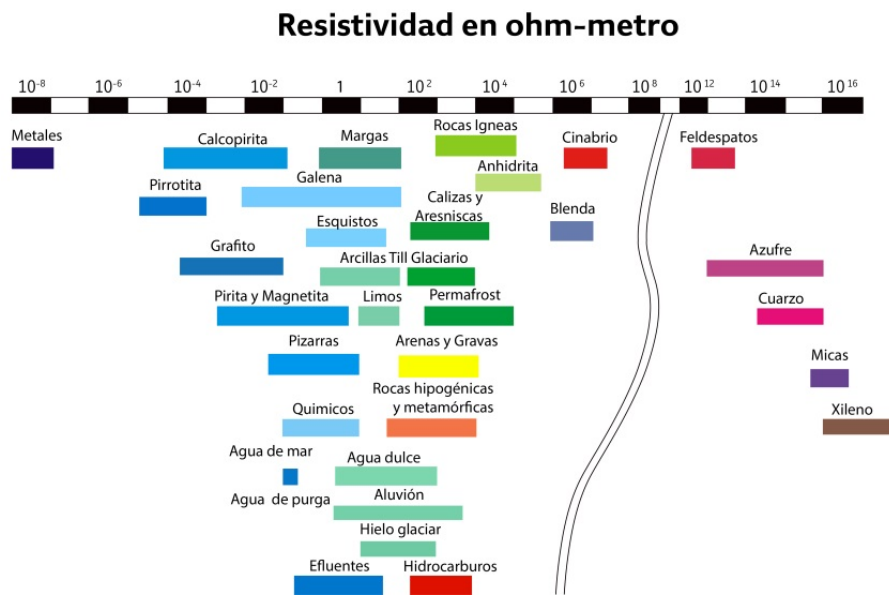


Figura 20. Gráfica de los valores de resistividad de diferentes rocas y minerales (www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=897).

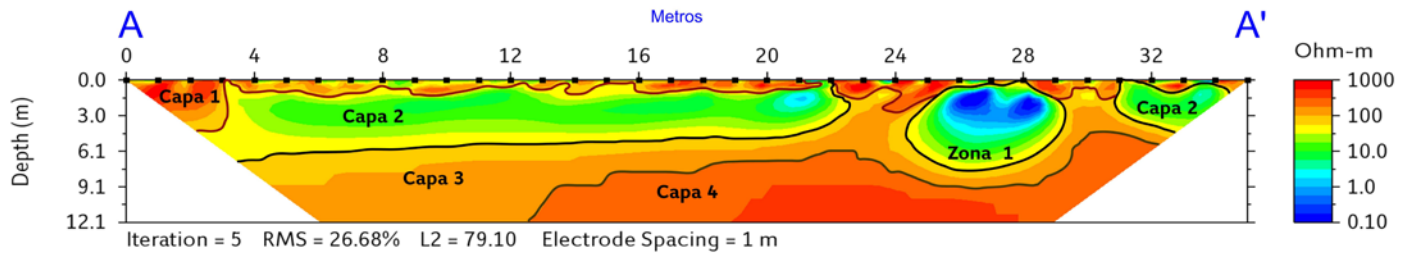


Figura 21. TRE obtenida en la calle De la Cruz, Tlacoyaque.

Para su análisis la TRE se ha dividido en 4 capas:

Capa 1

Se trata de una zona por debajo del recubrimiento asfáltico, que se extiende hasta una profundidad máxima de 3 m, siendo la media 1.5 m. su resistividad tiene un rango 300 a 1,000 Ωm de acuerdo a lo observado en campo se puede tratar de una zona con alta influencia antrópica, por lo que podemos encontrar rellenos de materiales como son arena y grava; o con material compactado por el peso de las construcciones. Si grosor es aproximadamente 1.5 m.

Capa 2.

Inicia a una profundidad media de 2 m; tiene un espesor de 6 m en promedio; alcanza una profundidad máxima de 8 m. Su resistividad es menor que la capa superior, se encuentra en un intervalo que va de los 5 a los 50 Ωm , en las paredes de la barranca se observa un material similar en la parte superior de la pared hasta su base; por lo que podemos inferir que se trata de una zona que presenta acumulación de agua. En la misma se distingue una zona que describimos a continuación.

Zona 1

Tiene un longitud de 4 m y una altura de 3 m aproximadamente; inicia a una profundidad aproximada de 1.5 m; su resistividad es muy baja encontrándose por debajo de los 10 Ωm ; se infiere que se trata de una zona con una alta saturación de agua, de acuerdo a las condiciones del lugar se puede tratar de una pérdida de la continuidad de la red hidráulica.

Capa 3

Inicia a una profundidad aproximada de 3 m; su profundidad máxima llega hasta base del estudio y la más somera a solo a 6 m; el rango de resistividad que se observa es aproximadamente de 50 a 300 Ωm ; se infiere que se trata de un capa con material de mayor compactación, esto debido a que su resistividad aumenta significativamente con respecto al estrato superior, no obstante en la paredes de la barranca no se observa un cambio de litología.

Capa 4

Inicia a una profundidad de 9 m extendiéndose hasta la base del estudio; su resistividad se encuentra en un rango que oscila de los 300 a 1000 Ωm ; es la capa con mayor competencia con respecto a las anteriores; por su resistividad y de acuerdo a la geología del lugar lo podemos asociar a material arenoso.

Conclusiones

El riesgo de un proceso de remoción en masa se ve favorecido por los siguientes factores:

La capa 1 y 2 permiten el flujo de agua, desde la superficie a zonas de menor altitud, y la acumulación de la misma esto favorece el deslizamiento de material cuando existe una saturación de agua propiciando un empuje hidrostático (Figura 22).

Aunado a las condiciones naturales del lugar la influencia antrópica se puede observar por:

- Tala de árboles (Figura 22A).

- Una sobrecarga por la infraestructura urbana sobre las capas inestables, ya que existen una gran urbanización aleadaña a la barranca (Figura 22B).

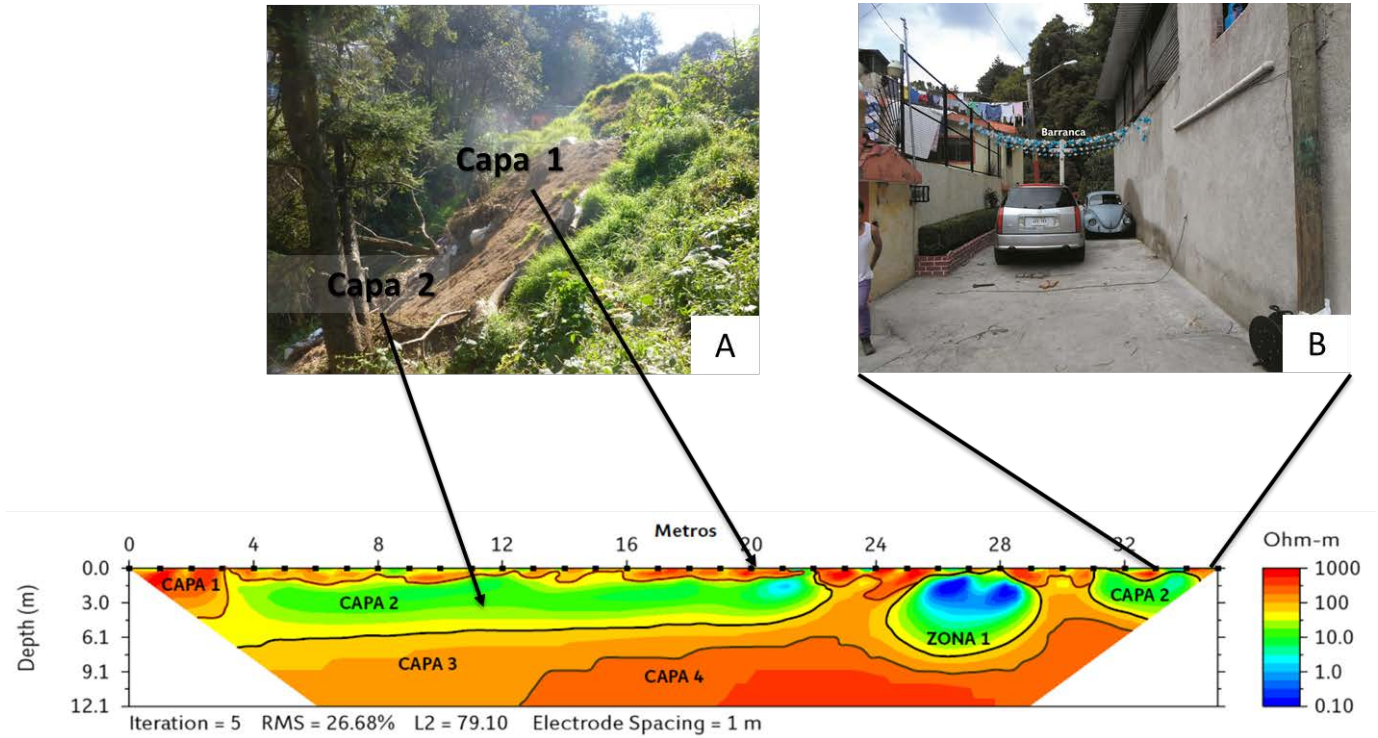


Figura 22. Modelo que relaciona las observaciones en campo con la TRE obtenida en la calle De la Cruz.

- Depósito de basura sobre las laderas, esto favorece la acumulación de agua y la erosión del suelo (Figura 23).
- La existencia de instalaciones hidrosanitarias que vierten su contenido hacia la parte baja, lo cual favorece la socavación del pie de talud (Figura 23).
- Modificaciones a la ladera con cortes verticales (Figura 23).



Figura 23. Se muestra el uso de plásticos como obra de mitigación, además de un sistema hidrosanitario precario (19.3174° N, 99.2661° W. Calle: Jacarandas).

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].

Aluvión: Depósitos sedimentarios formados por corrientes fluviales en el cauce y llanura de inundación de los valles. La composición granulométrica y mineralógica, así como características estructural-texturales varían ampliamente en función del régimen de los ríos, de la resistencia de las rocas a la erosión, de la cuenca hidrográfica y de las condiciones geomorfológicas generales [1].

Andesita: Roca ígnea efusiva de composición intermedia, color oscuro, compuesta de cristales de plagioclasa intermedia, minerales máficos y frecuentemente vidrio volcánico, común en las montañas 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 subducción correspondientes a la margen de los continentes y los arcos insulares. Origina una amplia variedad de formas del relieve volcánico y al transformarse por la erosión es común que se formen valles y laderas empinadas y una red fluvial de tipo dendrítico [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 aluminosilicatos [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].

Escurrimiento: 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 quínetico 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 orca 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

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.

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.

García P., A. *et al.* (2008). El arreglo morfoestructural de la Sierra de Las Cruces, México Central. *Revista mexicana de ciencias geológicas*. XXV (1) pág. 158-178.

Geofrik (s.f.) Recuperado el 24/10/2014 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 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.

Mussett, A. y 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.

Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del D.F. (2008) *Situación de la áreas verdes barrancas y zonas de transición entre el suelo de conservación en el Distrito Federal. México, D.F.* PAOT. México.

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 geoeléctricos en los Valles Centrales.* (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico Nacional. Oaxaca, México.

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.

Suzuki K., Higashi S. (Mayo-Junio 2001). Groundwater flow after heavy rain landside-slope area from 2-D inversion of resistivity monitoring data. *Geophysics*, Vol. 66, No. 3, 733-743.

Tarbuck, L. (2008). *Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física.* Ed. Pearson-Prentice Hall: Madrid.

Servicio Geológico Mexicano. (2014). *Léxico Estratigráfico de México.* SGM: México.

Vera Torres, J.A. (1994). *Estratigrafía. Principios y métodos.* Ed. Rueda: Madrid.

Bibliografía para el glosario de términos

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

[2] 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] <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/bibliotecaintemin/MINERALES>.

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