

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 la **Unidad Habitacional (U.H.) Popular Ermita Zaragoza** (definido así por la SPC) en peligro por el fenómeno de hundimiento y fracturamiento, objeto del presente informe.

Antecedentes de la Secretaría de Protección Civil (SPC)

La SPC (2014) describe al fenómeno como un «sistema de agrietamiento por contacto geológico de la zona de transición baja con el antiguo Lago de Texcoco».

Objetivo general

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

Objetivo específico

Realizar una imagen resistiva que cruce perpendicularmente la zona de hundimiento y tenga una alta resolución.

Definición del problema geológico

Hundimiento: Descenso o movimiento vertical de una porción de suelo y/o roca que cede debido a procesos de disolución de las rocas y a los cambios de temperatura; otras veces debido a 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]

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].

Fractura: Se refiere a una superficie de ruptura en rocas a lo largo de la cual no ha habido movimiento relativo, de un bloque respecto del otro. [14]

Metodología de trabajo

Una vez identificados los fenómenos que se manifiestan en el sitio con riesgo U.H. Popular Ermita Zaragoza, 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 U.H. Popular Ermita Zaragoza.

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 denominado por la SPC como U. H. Popular Ermita Zaragoza, se localiza al noreste de la Delegación Iztapalapa, en el límite con el Estado de México; entre avenida Texcoco, Siervo de la Nación, Generalísimo Morelos y Sentimientos de la Nación. La ubicación de la TRE en este sitio con riesgo es en la calle Anselmo de Adán y Retorno de Niño Artillero (Figura 1).

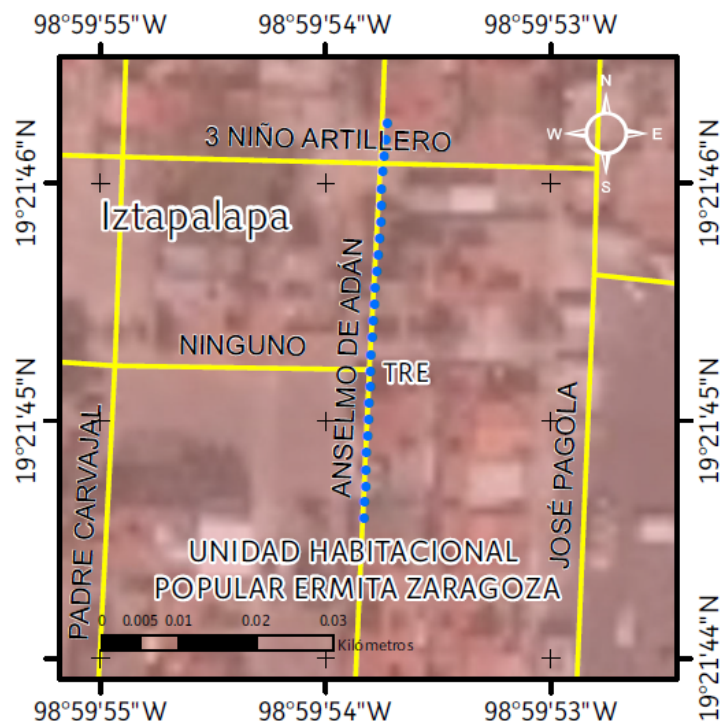


Figura 1. Croquis de localización de la TRE (los puntos en color azul marcan la ubicación de los electrodos).

Geología de la zona de estudio

Relieve

El origen de la planicie lacustre es exógena acumulativa, se generó desde el cuaternario a partir de la acumulación de sedimentos provenientes de las montañas por medio de las corrientes de agua, desde la zona de los depósitos piroclásticos originados en los eventos explosivos recientes de las estructuras volcánicas de los alrededores. Estas unidades volcánicas presentan una altitud promedio de 2,241 msnm y ocupan el mayor porcentaje del terreno de la Delegación Iztapalapa, de acuerdo al *Atlas de Riesgos y Peligros de la Delegación Iztapalapa* (ARPD, 2011).

En 1959 Marsal y Mazari establecieron la secuencia estratigráfica para Iztapalapa en tres zonas: lago, transición y lomas. La zona del lago se encuentra representada por secuencias de arcilla, limos y arenas con diferentes grados de consolidación. La zona de transición se encuentra entre el lago y las lomas, está dividida en abrupta, gradual y estratificada. La zona de lomas incluye elevaciones correspondientes a los edificios volcánicos compuestos por andesitas, basaltos y rocas piroclásticas del Plioceno que afloran en la Sierra de Santa Catarina, Cerro de la Estrella y Peñón del Marqués.

Litología

Los materiales que afloran en la Delegación Iztapalapa se conforman por la interacción resultante a lo largo del tiempo geológico entre movimientos tectónicos regionales (fallamiento y procesos fluvio-lacustres) y actividad volcánica dentro de la Faja Volcánica Transmexicana (ARPD, 2011).

En el estudio elaborado por la Dra. Celia Carreón Freyre (2011) bajo el título *Identificación y caracterización de los diferentes tipos de fracturas que afectan el subsuelo de la Delegación Iztapalapa del Distrito Federal*, se describe que en la parte subyacente de la secuencia sedimentaria del área de estudio predominan los sedimentos lacustres y en las zonas cercanas a las estructuras volcánicas se encuentran depósitos aluviales y coluviales a diferentes profundidades.

El *Atlas de Riesgos y Peligros de la Delegación Iztapalapa* (2011) menciona que las depresiones topográficas localizadas entre las edificaciones volcánicas presentan relleno sedimentario en el subsuelo, además de secuencias de piroclastos con diferente grado de consolidación intercaladas con rocas volcánicas.

Un mineral arcilloso común en las cuencas lacustres de zonas volcánicas es la montmorillonita, perteneciente a la familia de las esmectitas. Estas arcillas retienen grandes cantidades de agua en su estructura y presentan altos valores de plasticidad. Las condiciones favorables para el desarrollo de esmectitas se presentan en zonas de lago con drenaje restringido bajo condiciones salinoalcalinas (Carreón, 2011). En este mismo ambiente se acumula óxido de hierro, que en condiciones de reducción es soluble y se desplaza formando un complejo arcilloso inter-estratificado. Sin embargo, la actividad volcánica puede ser contemporánea a la de los depósitos sedimentarios, lo cual acelera la alteración de ceniza volcánica y pómez y genera suelos ricos en alofano e imogolita, minerales arcillosos de bajo orden que habían sido considerados como amorfos y de textura coloidal (Carreón *et al.*, 2006).

Estratigrafía

La superficie de la Delegación Iztapalapa es relativamente plana y los sedimentos lacustres tienen un espesor aproximado de 700 m, se considera que estos sedimentos fueron llevados por cauces que descendían de las sierras. La planicie es interrumpida por elevaciones correspondientes a conos volcánicos tales como los cerros de la Estrella, El Peñón del Marqués y la Sierra de Santa Catarina (Vera y López 2010).

En la secuencia estratigráfica somera predominan los sedimentos de ambientes lacustres y en algunas zonas aledañas a las estructuras volcánicas se encuentran depósitos volcánicos, aluviales y coluviales (ARPD, 2011).

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).

THE NEW ZEALAND LAW SOCIETY'S PRACTICE MANAGEMENT SYSTEM



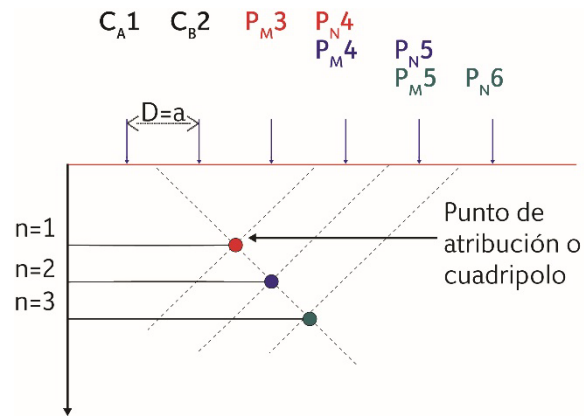


Figura 3. Muestra la secuencia de ocupación de los electrodos de potencial durante se desarrollan las mediciones (ELECTRE Pro software Help, Iris Instruments, 2012).

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

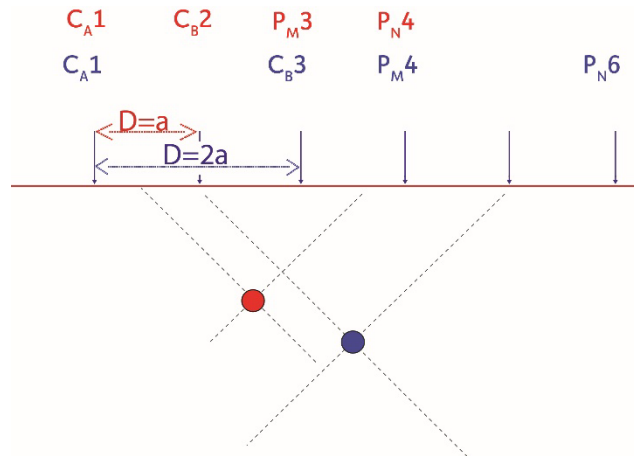


Figura 4. Secuencia del movimiento de los electrodos de corriente; los 4 (C_{A1} , C_{B2} , P_{M3} , P_{N4}) electrodos para obtener el punto de atribución rojo se denotan en el mismo color; y de la igual manera para el cuadripolo azul (C_{A1} , C_{B3} , P_{M4} , P_{N6}) (ELECTRE Pro software Help, Iris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

Recorrido de campo

Durante el recorrido de campo en el sitio con riesgo U. H. Popular Ermita Zaragoza se apreciaron los fenómenos de hundimientos locales y fracturas, los cuales afectan a las viviendas, aceras y calles. Una muestra de las afectaciones asociadas a los fenómenos mencionados en las calles y aceras se puede observar en la Figura 5.



Figura 5. Fotografía que muestra una zona afectada por el hundimiento local, que ocasionó múltiples fracturas y un desplazamiento vertical en el pavimento afectando también las viviendas (19.3627° N, 98.9985° W. Calles: Retorno de Niño Artillero y Padre Carbajal).

Por otra parte las viviendas localizadas sobre la estructura de hundimiento presentan afectaciones como hundimientos y asentamientos hacia alguno de los costados y entre ellas (Figuras 6 y 7).



Figura 6. Fotografía que muestra dos edificaciones. La de la derecha sufre un hundimiento con respecto a la otra que se puede apreciar en la altura de las ventanas y que además provocó que la junta constructiva sufriera una separación de aproximadamente 10 cm (19.3625° N, 98.9980° W. Calles: José Pagola y Niño Artillero).



Figura 7. Fotografía que muestra la estructura de hundimiento en la calle que provoca que la vivienda tenga un hundimiento hacia su lado izquierdo, esto da lugar a que la junta constructiva tenga una longitud mayor en la parte superior (19.3627° N, 98.9985° W. Calles: Retorno de Niño Artillero y Padre Carbajal).

En campo se pudo observar que el fenómeno de hundimiento local daña a los diferentes elementos estructurales de los inmuebles y ocasiona que estos fallen y lleguen a presentar colapsos parciales, como el inmueble que se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Fotografía que muestra una edificación que presenta colapsos parciales debido a que la zona presenta un hundimiento local que ocasionó que la vivienda sufriera múltiples fracturas diagonales en muros y que los diferentes elementos estructurales fallaran (19.3626° N, 98.9983° W. Calles: Anselmo de Adán y Niño Artillero).

En las Figuras 9 y 10 se muestran algunas obras de mitigación que se han realizado en los inmuebles que presentan fracturas a consecuencia del hundimiento. Sin embargo estas obras no han sido suficiente y actualmente ambos inmuebles se encuentran deshabitados.



Figura 9. Fotografía que muestra una vivienda en la que se usaron puntales (que tienen la función de transmitir las cargas de la losa hacia el suelo) y vigas de madera (que sostienen las cargas de la losa del entrespiso); pese a las obras de mitigación la estructura del inmueble falló (19.3626° N, 98.9983° W. Calles: Anselmo de Adán y Niño Artillero).



A



B

Figura 10. Fotografías de un inmueble donde se observan un mayor hundimiento en la parte izquierda (Fotografía A), fracturas horizontales en los muros, desprendimiento del acabado en la parte de la losa y un puntal de acero que funciona como una columna para soportar las cargas estructurales (Fotografía B) (19.3626° N, 98.9983° W. Calles: Anselmo de Adán y Niño Artillero).

El hundimiento y fracturamiento afectan las vialidades con daños como hundimientos verticales de la carpeta asfáltica, cambio de nivel del terreno y las fracturas en las aceras, lo cual afecta la circulación de los vehículos y de los transeúntes (Figura 11).



Figura 11. Fotografías que muestran el hundimiento y su afectación a la vialidad, acera y estacionamiento. La Fotografía A muestra un cambio de nivel de aproximadamente 50 cm, por lo que se añadieron escalones. En el borde de la acera se ven fracturas de mayores dimensiones. La Fotografía B ilustra la prolongación del cambio de nivel en el área del estacionamiento, esto provocó una fractura que fue cubierta con carpeta asfáltica (19.3625° N, 98.9980° W. Calles: José Pagola y Niño Artillero).

También se observó que el sistema constructivo de algunos inmuebles ha fallado debido a que este no ha sido el adecuado o no ha respondido a las condiciones del terreno (Figura 12).



Figura 12. Fotografía que muestra un inmueble que sufre múltiples fracturas en forma diagonal y vertical. En campo se observó que por la parte inferior del inmueble pasa una fractura que se asocia a los daños estructurales. La fachada de la vivienda presenta una fractura en la esquina y en la parte inferior de la losa, estas fracturas también pudieron ser ocasionadas porque la vivienda no tiene un buen confinamiento (19.3624° N, - 98.9977° W. Calles: Dionisio Rojas y Niño Artillero).

Determinación de la zona de la TRE

Con la cartografía del peligro, los datos estructurales y el recorrido de campo se determinó que la zona para realizar la exploración geoelectrica sería la calle Anselmo de Adán esquina con Retorno de Niño Artillero, debido a que es el lugar donde se presentan las mayores afectaciones y el desnivel del terreno es más contrastante.

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	800–1000 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 13).

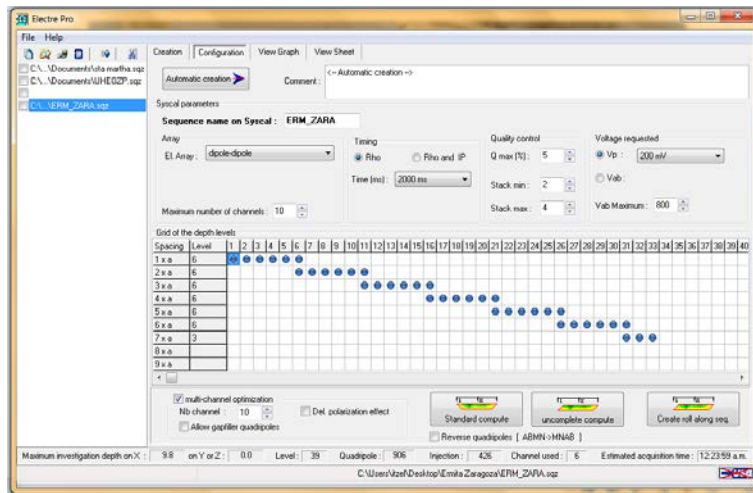


Figura 13. Ventana de asignación de separación entre electrodos (ELECTRE Pro software, Iris Instruments, 2012).

- 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 14).

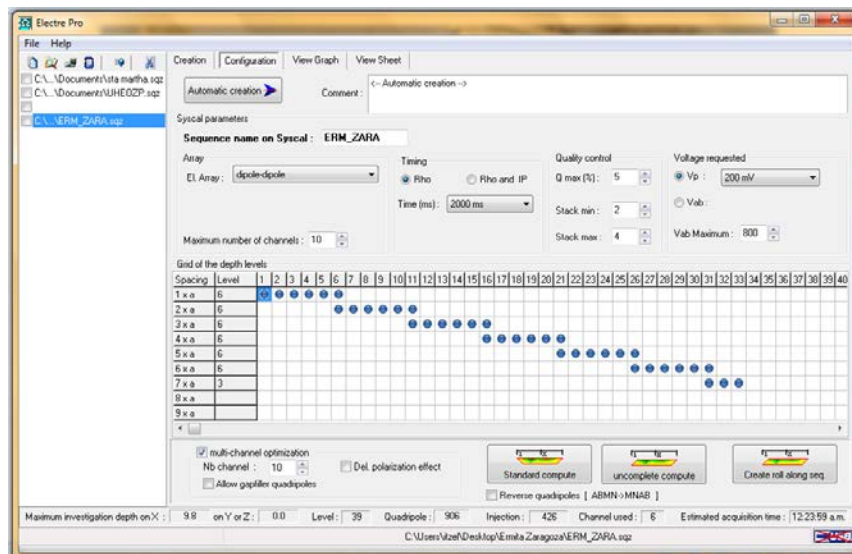


Figura 14. Ventana de configuración, en ella se introducen los parámetros de inyección de voltaje, el tipo de arreglo, el nombre que tendrá el levantamiento, entre otros (ELECTRE Pro software, Iris Instruments, 2012).

- 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 15).

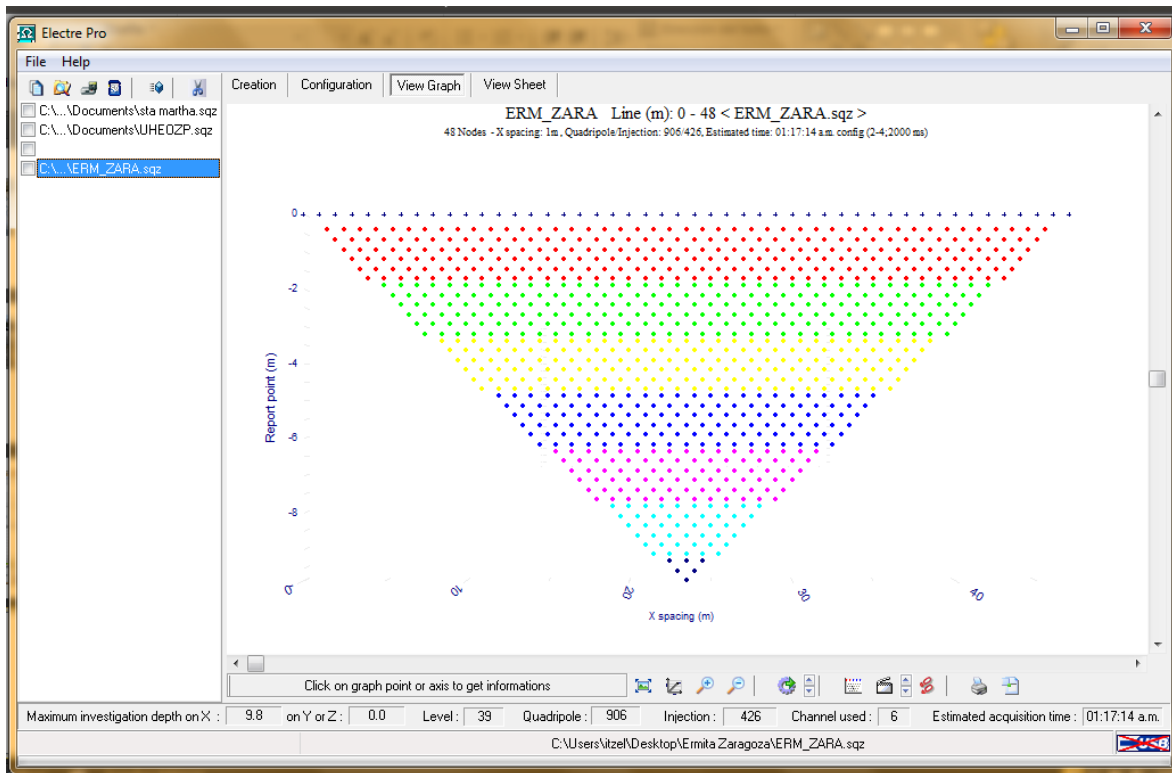


Figura 15. Ventana que muestra la gráfica preliminar del levantamiento; en la parte superior se puede observar el nombre del levantamiento y el número de electrodos a utilizarse, el espaciamiento entre ellos; en la parte media se encuentra una representación de los cuadrípolos; en la parte inferior (de 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	47 m
Número de electrodos utilizados	48
Separación entre electrodos	1 m
Profundidad máxima de investigación	10 m
Total de puntos de atribución	906
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 (Figura 16).
4. Verificación de que cada electrodo que hicieran contacto con el material del subsuelo (Figura 17A).
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 (Figura 17B).

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 16. Colocación de los electrodos y el cable durante el levantamiento (19.3626° N, 98.9983° W. Calles: Anselmo de Adán y Niño Artillero).



Figura 17. A) Electrodos colocados en contacto con el material del suelo .B) Colocación de la consola del equipo Syscal Pro durante el levantamiento (19.3626° N, 98.9983° W. Calles: Anselmo de Adán y Niño Artillero).

Ubicación de los electrodos

En la tabla 3 se muestra la localización en coordenadas geográficas de los electrodos nones.

N° de electrodo	X	Y
1	500183	2140976
3	500183	2140974
5	500183	2140972
7	500182	2140970
9	500182	2140968
11	500182	2140966
13	500182	2140964
15	500182	2140962
17	500182	2140959
18	500182	2140957
19	500181	2140955
21	500181	2140953
23	500181	2140951
25	500181	2140949
27	500181	2140947
29	500181	2140945
31	500181	2140942
33	500181	2140940
35	500181	2140938
37	500180	2140936
39	500180	2140934
41	500180	2140932
43	500180	2140930

45	500180	2140927
47	500180	2140925

Tabla 3.- Localización de cada uno de los electrodos nones en coordenadas geográficas.

Justificación del tipo de arreglo de la TRE

El arreglo Dipolo-Dipolo, es altamente sensitivo a los cambios horizontales (estructuras verticales) y ofrece una mayor densidad de puntos de atribución (Constantino, *óp. cit.*); razones por las que se optó por usar este arreglo. En la Figura 18, se muestra un ejemplo del modelo de puntos de atribución obtenidos con el método Dipolo-Dipolo; la flecha indica la dirección de la medición; se usan dos electrodos de inyección de corriente (color rojo) y 4 o 6 electrodos de potencial (color azul); el distanciamiento entre puntos de atribución es corto, por lo que la resolución es mayor.

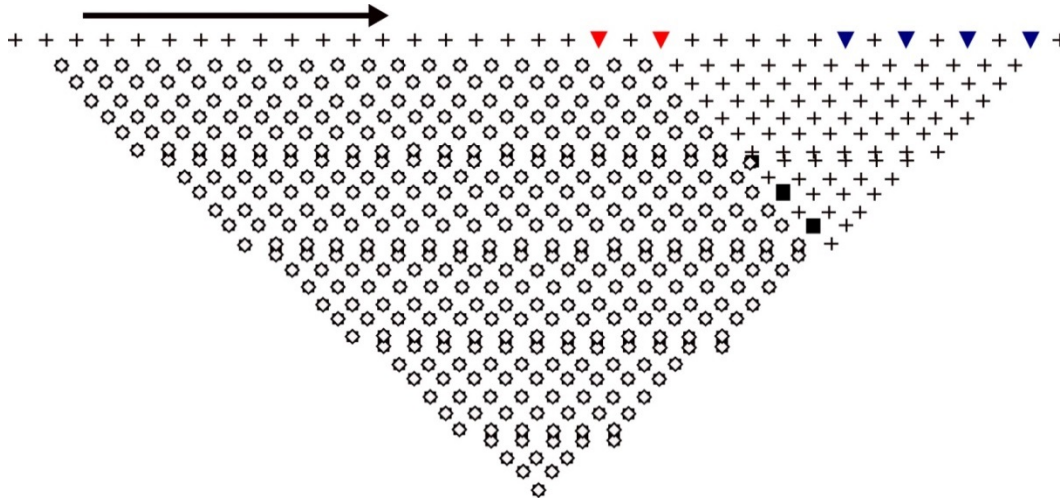


Figura 18. Modelo de puntos de atribución. Triángulos rojos, electrodos de inyección de corriente; triángulos azules, electrodos de potencial; cuadros huecos, puntos de atribución ya medidos; y cuadros negros, puntos de atribución en los que se está realizando la medición en ese momento. Las cruces son 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 19).

#	Elarray	Spa.1	Spa.2	Spa.3	Spa.4	Rho	Dev.	M	Sp	Vp	In	Stack	Rs-Check	Name	Temp.
1	Dipole Dipole	0.00	1.00	2.00	3.00	25.27	0.2	0.00	136.7	-858.807	640.731	2	0.56	ERM_ZARA	22.6
2	Dipole Dipole	0.00	1.00	3.00	4.00	27.76	0.2	0.00	98.8	-235.875	640.731	2	1.83	ERM_ZARA	22.6
3	Dipole Dipole	0.00	1.00	4.00	5.00	31.56	0.4	0.00	146.5	-107.293	640.731	2	1.68	ERM_ZARA	22.6
4	Dipole Dipole	0.00	1.00	5.00	6.00	23.96	0.2	0.00	-207.0	-40.715	640.731	2	0.40	ERM_ZARA	22.6
5	Dipole Dipole	0.00	1.00	6.00	7.00	8.25	0.4	0.00	83.6	-8.009	640.731	2	0.37	ERM_ZARA	22.6
6	Dipole Dipole	0.00	1.00	7.00	8.00	10.46	2.3	0.00	4.2	-6.347	640.731	2	0.47	ERM_ZARA	22.6
7	Dipole Dipole	0.00	2.00	8.00	10.00	7.47	0.3	0.00	-187.9	-14.368	725.143	2	0.54	ERM_ZARA	22.6
8	Dipole Dipole	0.00	2.00	10.00	12.00	10.71	3.9	0.00	317.6	-10.302	725.143	2	1.00	ERM_ZARA	22.6
9	Dipole Dipole	0.00	2.00	12.00	14.00	7.69	14.6	0.00	299.5	-4.226	725.143	2	2.14	ERM_ZARA	22.6
10	Dipole Dipole	0.00	2.00	9.00	11.00	8.61	0.4	0.00	59.1	-11.589	732.556	2	0.52	ERM_ZARA	23.1
11	Dipole Dipole	0.00	2.00	11.00	13.00	8.96	0.3	0.00	73.5	-6.490	732.556	2	0.69	ERM_ZARA	23.1
12	Dipole Dipole	0.00	2.00	13.00	15.00	6.03	3.3	0.00	76.7	-2.621	732.556	2	0.68	ERM_ZARA	23.1
13	Dipole Dipole	0.00	3.00	14.00	17.00	4.42	2.8	0.00	-362.8	-3.109	642.807	2	1.36	ERM_ZARA	23.1
14	Dipole Dipole	0.00	3.00	17.00	20.00	3.11	0.4	0.00	1.1	-1.204	642.807	2	0.18	ERM_ZARA	23.1
15	Dipole Dipole	0.00	3.00	15.00	18.00	4.03	1.0	0.00	-90.3	-2.306	646.595	2	0.35	ERM_ZARA	22.6
16	Dipole Dipole	0.00	3.00	18.00	21.00	3.46	1.6	0.00	-48.3	-1.132	646.595	2	0.25	ERM_ZARA	22.6
17	Dipole Dipole	0.00	3.00	16.00	19.00	3.11	2.3	0.00	196.5	-1.461	648.041	2	0.23	ERM_ZARA	22.6
18	Dipole Dipole	0.00	3.00	19.00	22.00	3.66	6.6	0.00	-208.6	-1.017	648.041	2	0.53	ERM_ZARA	22.6
19	Dipole Dipole	0.00	4.00	20.00	24.00	2.99	16.0	0.00	39.8	-0.960	483.444	4	1.03	ERM_ZARA	23.1
20	Dipole Dipole	0.00	4.00	24.00	28.00	3.25	43.3	0.00	57.0	-0.595	483.444	4	1.42	ERM_ZARA	23.1
21	Dipole Dipole	0.00	4.00	21.00	25.00	3.40	4.0	0.00	23.0	-0.945	486.873	2	0.30	ERM_ZARA	23.1
22	Dipole Dipole	0.00	4.00	25.00	29.00	3.08	9.5	0.00	84.5	-0.501	486.873	2	0.90	ERM_ZARA	23.1
23	Dipole Dipole	0.00	4.00	22.00	26.00	2.66	7.2	0.00	37.9	-0.652	495.240	4	0.96	ERM_ZARA	23.1
24	Dipole Dipole	0.00	4.00	23.00	27.00	2.98	5.8	0.00	0.0	-0.959	501.993	4	0.52	ERM_ZARA	23.1
25	Dipole Dipole	0.00	5.00	26.00	31.00	3.47	11.9	0.00	101.3	-1.167	715.879	4	0.94	ERM_ZARA	23.1
26	Dipole Dipole	0.00	5.00	31.00	36.00	1.57	47.3	0.00	58.3	-0.308	715.879	4	1.52	ERM_ZARA	23.1
27	Dipole Dipole	0.00	5.00	27.00	32.00	2.69	7.9	0.00	59.6	-0.817	724.836	4	1.06	ERM_ZARA	23.1
28	Dipole Dipole	0.00	5.00	28.00	33.00	2.57	7.3	0.00	12.7	-0.702	730.133	4	0.98	ERM_ZARA	23.1
29	Dipole Dipole	0.00	5.00	29.00	34.00	2.66	8.5	0.00	3.3	-0.659	736.520	4	1.36	ERM_ZARA	23.6
30	Dipole Dipole	0.00	5.00	30.00	35.00	1.59	72.4	0.00	-66.4	-0.358	741.357	4	1.34	ERM_ZARA	23.6
31	Dipole Dipole	0.00	6.00	32.00	38.00	1.89	25.3	0.00	16.9	-0.559	817.610	4	1.09	ERM_ZARA	23.6
32	Dipole Dipole	0.00	6.00	33.00	39.00	2.31	12.1	0.00	-58.9	-0.630	825.987	4	0.91	ERM_ZARA	23.6
33	Dipole Dipole	0.00	6.00	34.00	40.00	2.29	14.7	0.00	-40.3	-0.573	832.908	4	0.76	ERM_ZARA	23.6
34	Dipole Dipole	0.00	6.00	35.00	41.00	1.96	7.2	0.00	43.3	-0.451	837.993	4	0.53	ERM_ZARA	23.6
35	Dipole Dipole	0.00	6.00	36.00	42.00	2.32	27.9	0.00	15.9	-0.494	843.417	4	1.10	ERM_ZARA	24.1

Figura 19. 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 20).

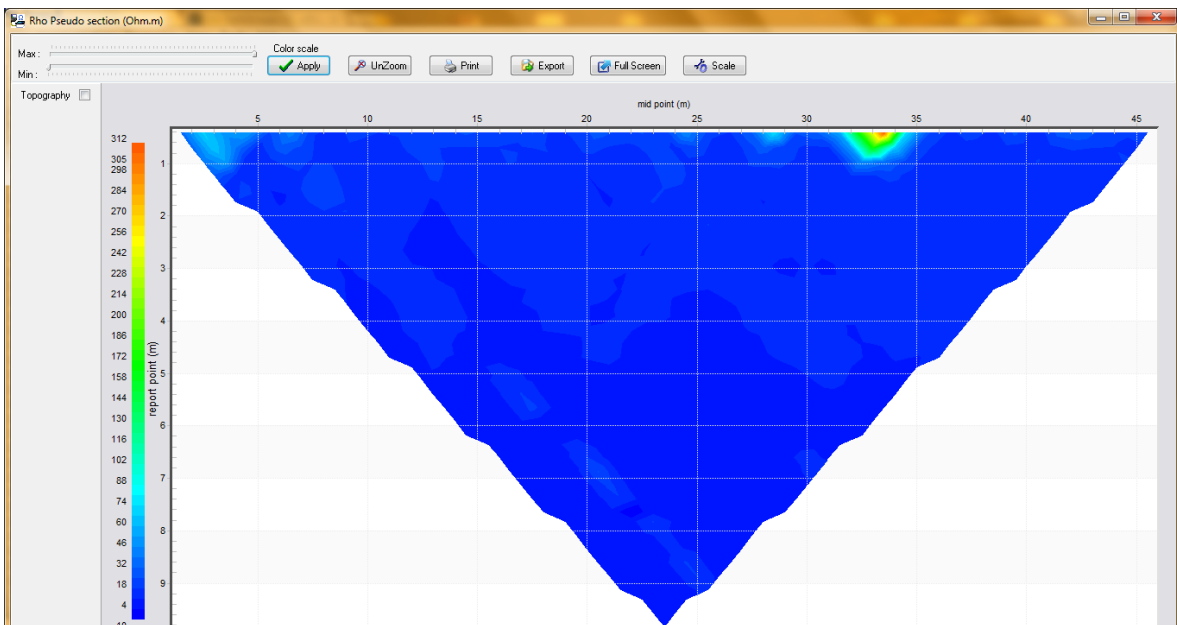


Figura 20. Gráfica de resistividad aparente sin proceso de inversión de datos (software Prosys II, Iris Instruments, 2012).

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 21).

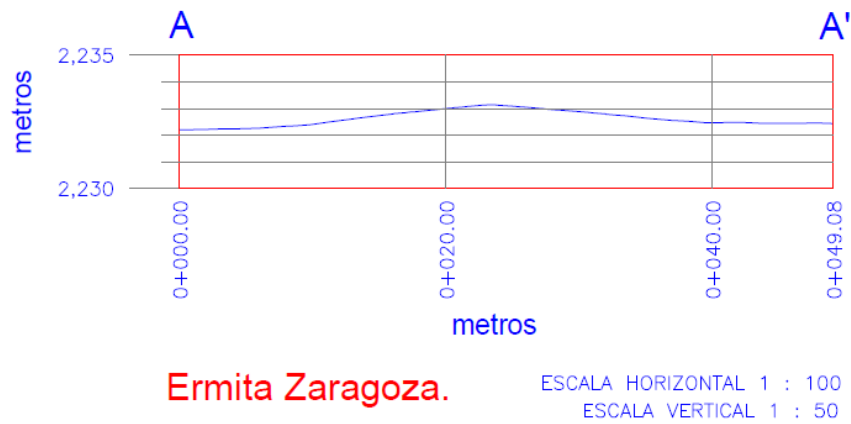


Figura 21. Perfil topográfico de la línea donde se realizó TRE.

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 22).

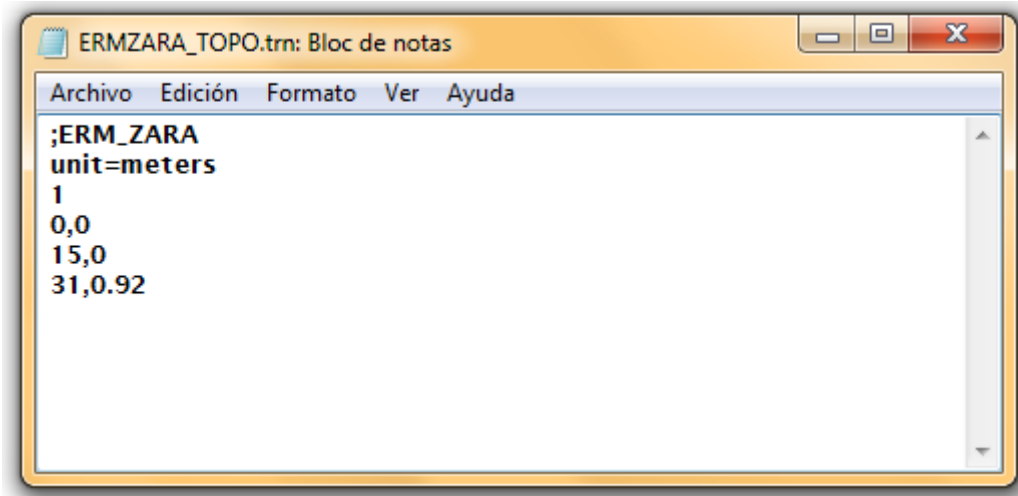


Figura 22. Archivo de topografía que se ingresa al programa *EarthImager* durante el proceso de inversión de datos.

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=0.01	Resistividad aparente mínima.

MaxAppRes=100	Resistividad aparente máxima.
MaxRepeatErr=10	Error de repetición máximo.
MaxRecipErr=5	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 23).

Gráfica cruzada de datos de resistividad medida e inferida

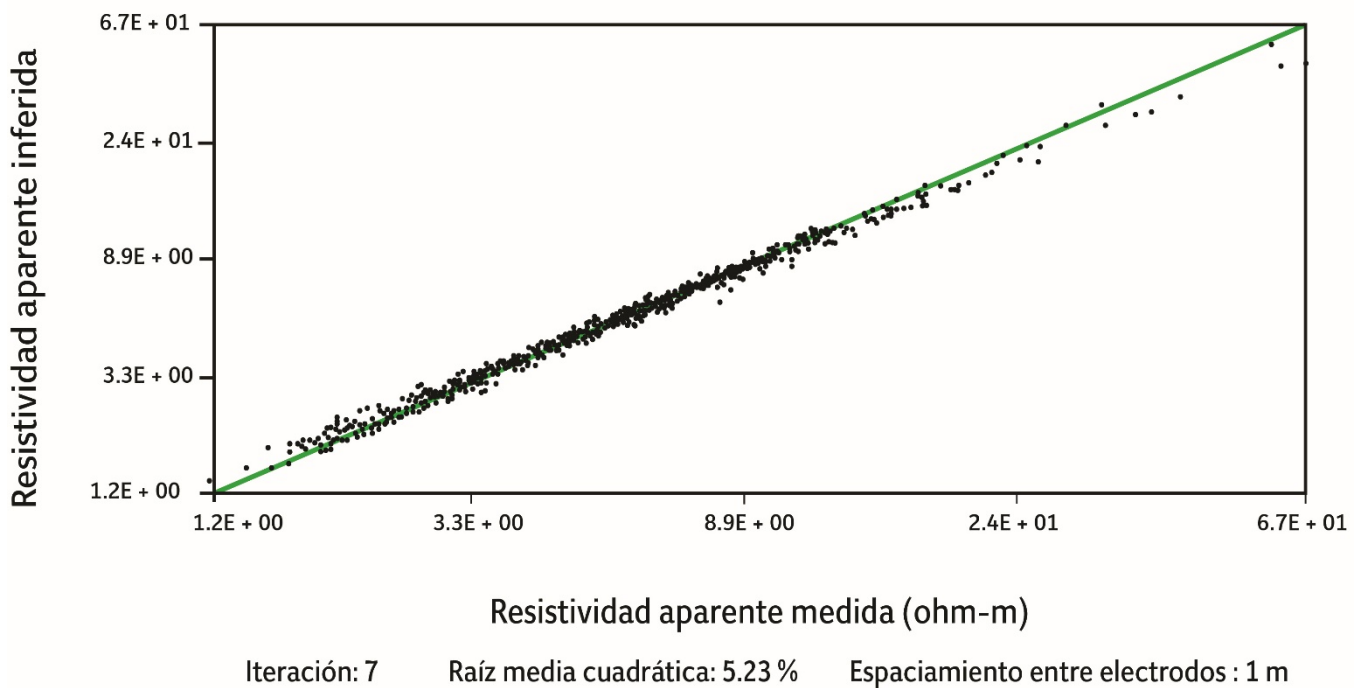


Figura 23. Gráfica cruzada de resistividad aparente del modelo directo vs resistividad aparente medida (software EarthImager, 2009).

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 24).

Resistividad en ohm-metro

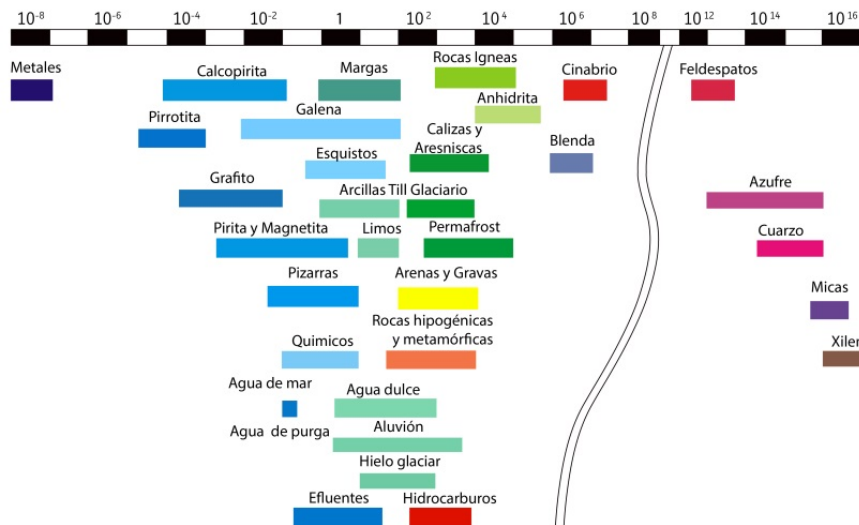


Figura 24. Gráfica de los valores de resistividad de diferentes rocas y minerales (www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=897).

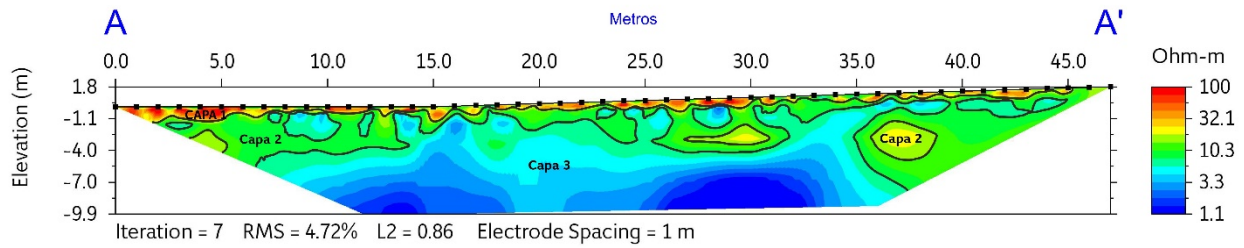


Figura 25. Tomografía eléctrica con las Capas 1, 2 y 3, de acuerdo a sus respectivas resistividades eléctricas.

Capa 1

La Capa 1 tiene un espesor aproximado de 1 m de profundidad, está compuesta de relleno (cascajo), basura, gravas y arcilla. Presenta resistividades que van de los 30 a los 100 Ohm-m. Empieza enseguida del asfalto y se observa un desnivel de 90 cm aproximadamente. Como se muestra en las Figuras 26 y 27, la granulometría de la Capa 1 permite que se filtre el agua.



Figura 26. Fotografía obtenida en una zanja que muestra las Capas 1 y 2. En la parte superior se encuentra la capa de asfalto, en la parte media de color café la Capa 1, donde se observa la granulometría que podría permitir la filtración del agua.

Capa 2

La Capa 2 tiene un espesor que varía entre los 3 y 7 m, es de origen volcánico de acuerdo a las condiciones geológicas (Figura 26), está compuesta de depósitos volcánicos muy alterados, arcillas y limos, presenta resistividades entre 10 a 30 Ohm-m. Se diferencia de la Capa 3 debido a que la resistividad decrece considerablemente al término de la Capa 2 (Figura 27).

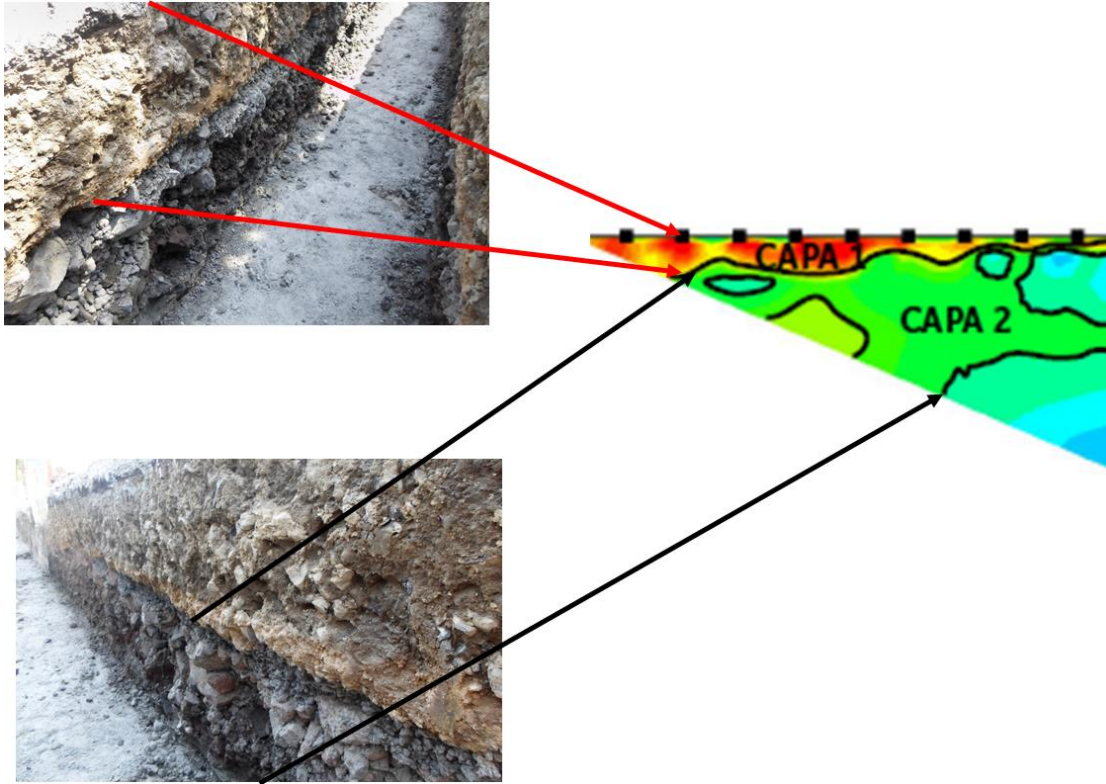


Figura 27. Imagen que muestra la división entre las Capas 1 y 2, donde se correlacionan los resultados observados en la tomografía de resistividad eléctrica con la geología del lugar.

Capa 3

La Capa 3 está compuesta de arcillas, con resistividades que varían entre los 1 y 4 Ohm-m, se observa una alta conductividad debido al agua filtrada que sobresatura los materiales arcillosos y conforman lo que sería el acuífero superficial (Figura 25).

Conclusiones

Los resultados obtenidos a partir de la imagen de la tomografía eléctrica muestra la efectividad de esta técnica para inferir los fenómenos que se manifiestan en la capa superficial arcillosa, que pertenece a la zona lacustre de la Cuenca de México.

El motivo para realizar el estudio en el sitio Unidad Habitacional (U. H.) Popular Ermita Iztapalapa fue caracterizar el subsuelo, con el fin de evaluar las zonas que son más susceptibles a colapsos o agrietamientos de zonas inestables situadas en esta área con base en la cantidad de agrietamientos en el pavimento, fracturas en las viviendas, además del hundimiento en la zona (Figura 28).

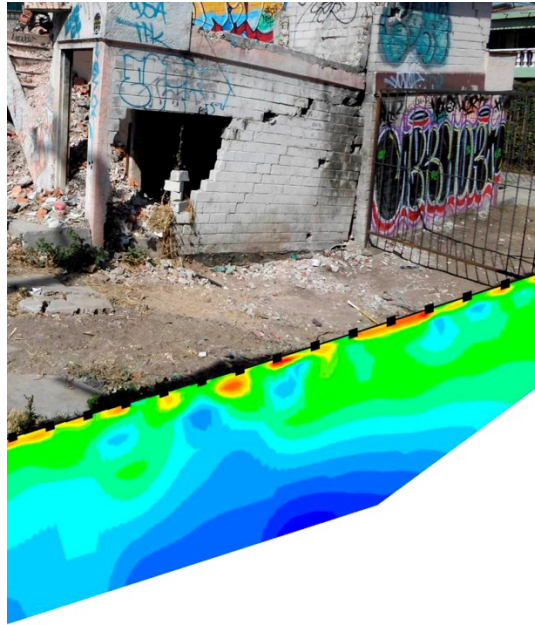


Figura 28. En esta imagen se muestra la tomografía, relacionando los daños que tiene la vivienda con lo que se infiere en el subsuelo. La vivienda se ha fracturado y hundido debido a las condiciones de los materiales sobre los que se ha hecho la construcción.

La Figura 29 muestra las dimensiones de la vivienda y la longitud que abarcó la tomografía con un espaciamiento de 1 metro entre cada electrodo, de manera que se relacionan las condiciones de la vivienda con lo mostrado en la tomografía.

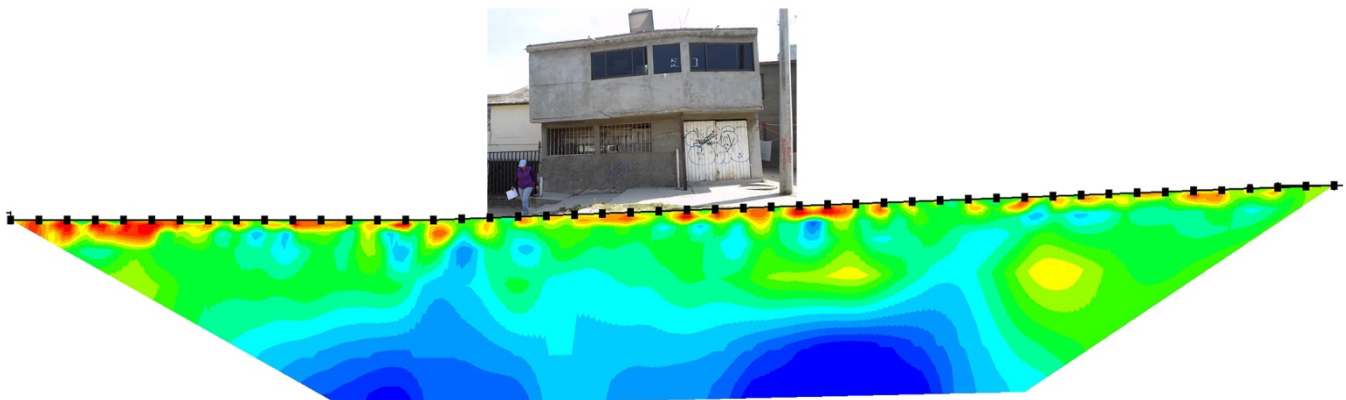


Figura 29. La imagen muestra otra de las viviendas de la zona que presenta daños considerables, debido al hundimiento, con la tomografía se infiere que estas construcciones flotan sobre materiales saturados de agua.

Se infiere que el agua se filtra a través de las Capas 1 y 2 ocasionando que los materiales tengan un comportamiento inestable debido a la sobresaturación. El flujo del agua a través de las capas, se infiere que provoca la deformación del terreno, afectando las estructuras de la superficie.

De esta manera, se deduce que las viviendas presentan fracturas y hundimientos porque el material de las Capas 1 y 2 está flotando sobre las arcillas sobresaturadas en agua de la Capa 3. Éstas últimas presentan una gran plasticidad, lo que provoca que los materiales de las capas superiores se introduzcan, se levanten o se queden estáticos. Lo anterior se dedujo de la morfología irregular que presenta el contacto entre la Capa 2 y la Capa 3.

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 descomposici3n de minerales de aluminio. Surge de la descomposici3n de rocas que contienen feldespato, originada en un proceso natural que dura decenas de miles de a3os. El di3metro de las part3culas de la arcilla es inferior a 0,002 mm [12].

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Colada de lava: Forma en que fluye y se dispone la lava en la superficie terrestre. Sus dimensiones dependen de la viscosidad, del volumen y velocidad de salida del magma a la superficie, y de la pendiente del terreno. Los de tipo 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 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].

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.
Ω -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 geoelectrónicos 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.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

[12] 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/bibliotecaintemin/MINERALES>

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