

## 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 **Colonia del Mar** (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 identificó este sitio con riesgo de la siguiente manera:

«Una grieta geológica que atraviesa diagonalmente la calle Pez Vela; existe fracturamiento del subsuelo, banquetas, guarniciones, carpeta asfáltica y asentamiento diferencial en la zona, así como afectaciones estructurales en los inmuebles. Debido al sistema de agrietamiento que corresponde a los ex lagos de Xochimilco, Chalco y Texcoco, la zona urbana ha incrementado la extracción de agua del subsuelo, lo que conlleva a problemas de hundimiento y formación de grietas».

## Objetivo general

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

## Objetivo específico

Realizar una imagen resistiva que cruce perpendicularmente la zona de hundimiento y tenga una resolución de 0.5 a 1 m.

## Definición del problema geológico

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

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

## Metodología de trabajo

Una vez identificados los fenómenos que se manifiestan en el sitio con riesgo Colonia del Mar 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 Colonia del Mar.

**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 Colonia del Mar, se encuentra al noroeste de la Delegación Tláhuac entre las calles Piraña, Turba, Pez Vela y Camarones. La zona donde se realizó la TRE está en la avenida Océano, entre las calles Pingüino y Gitana (Figura 1).

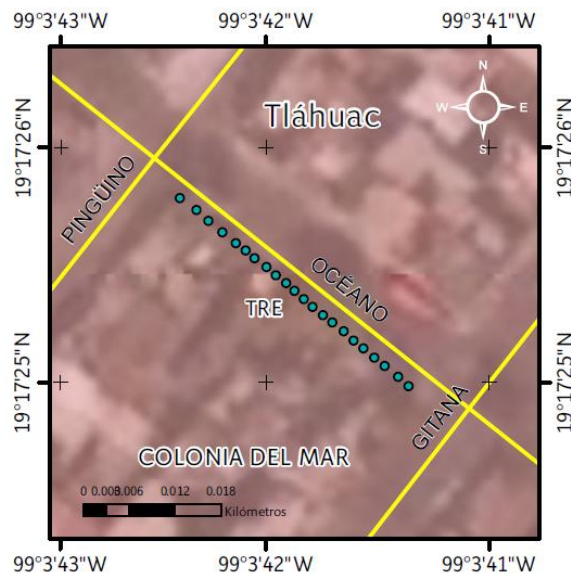


Figura 1. Croquis de localización del sitio con riesgo Colonia del Mar y localización de la TRE (los puntos en color azul marcan la ubicación de los electrodos).

## Geología de la zona de estudio

### Relieve

Las antiguas zonas lacustres en donde actualmente se localiza la Delegación Tláhuac eran parte de un conjunto de lagos que conformaban el sistema hidráulico de Anáhuac, que se formó por actividad volcánica a finales del Terciario (hace 700,000 años aproximadamente) y que generó el sistema montañoso de la Sierra de Chichinautzin, cuyas elevaciones más prominentes son el Volcán Guadalupe (El Borrego), con una elevación de 2,280 msnm, el Volcán Teuhtli, con una elevación de 2,710 msnm, el Volcán Xaltepec y el Cerro Tetecón, con elevaciones de 2,500 y 2,470 msnm respectivamente.

De acuerdo con la información del INEGI (2010), las topeformas imperantes en la demarcación son: vaso lacustre (77 %), lomerío basáltico (11 %), vaso lacustre de piso rocoso o cementado (9 %), y vaso lacustre salino (2 %)

### Litología

Tláhuac forma parte de la región fisiográfica de la Altiplanicie Mexicana; específicamente a la Faja Volcánica Trans–Mexicana y a la subprovincia de los Lagos y Volcanes de Anáhuac. De acuerdo con el Programa Delegacional de Desarrollo Urbano de la Delegación Tláhuac (PDDU–Tláhuac, 2008), esta cordillera volcánica es una estructura de 20 a 70 km de ancho y 900 km de largo. La cuenca se cerró en la formación de la Sierra del Chichinautzin hace 700 mil años, conformándose entonces como una cuenca endorreica, lo que ocasionó la formación de un sistema de grandes lagos que proporcionó el relleno de la cuenca con materiales aluviales, que actualmente conforman el sustrato geológico de esta demarcación. Hacia el sur, se encuentra el Volcán Teuhtli, con una altura de 2,710 msnm y al norte se encuentra la Sierra de Santa Catarina, que está constituida por un grupo de conos cineríticos. Las rocas que predominan son basaltos y andesitas; las lavas surgieron de diferentes focos volcánicos: unas formaron conos escoráceos y otros cineríticos.

De acuerdo con Padilla y Sánchez (1989), el basamento de esta demarcación es el mismo que para el resto del valle de México; se encuentra representado por una unidad de roca caliza de edad cretácica a una profundidad aproximada de 2000 m. Sobre esta unidad de caliza se encuentra una secuencia de rocas conglomeráticas heterogéneas con clastos caliza y fósiles del Cretácico, a la que Oviedo de León (1970) asigna el nombre de conglomerado Texcoco. Esta secuencia sedimentaria se considera la base. La secuencia estratigráfica de la cuenca fue descrita en una perforación llevada a cabo por el Instituto Mexicano del Petróleo denominada pozo Texcoco–1. Cabe resaltar que esta unidad no se encuentra expuesta en la superficie de la extensión territorial de la delegación.

De acuerdo al PDDU (2008) de la Delegación Tláhuac, la secuencia estratigráfica está representada por una planicie que consta de varias capas lacustres de material arcilloso, caliza y productos volcánicos. Más superficialmente se encuentran productos de la descomposición de la flora lacustre; se calcula que este paquete sedimentario tiene un espesor de 700 m. La base está constituida por un sustrato volcánico del Mioceno. Estas características geológicas han desarrollado una hidroestructura compuesta por acuíferos semipermeables y permeables.

El tipo de suelo lacustre y aluvial representan el 56.64 % y 14.45 %; el suelo lacustre se localiza en el centro de la delegación y está urbanizado en un 60 %; mientras que en el suelo aluvial, el 60 % se mantiene aún desocupado (PDDU–Tláhuac, 2008).

Durante las fases volcánicas del Plioceno–Pleistoceno, abanicos aluviales y arenas fluviales fueron depositados en la cuenca; estos sedimentos tienen edades que van desde el Pleistoceno hasta la época reciente. Antes de la formación de estos volcanes, la cuenca del Valle de México tenía un desagüe natural hacia el Río Balsas, pero la aparición del Volcán del Ajusco ocasionó que se volviera una cuenca endorreica, es decir, sin salida del cauce natural fuera de la cuenca, lo que propició la formación del Lago de Texcoco y contribuyó sin duda a la modificación de los ecosistemas del sur del Distrito Federal (PDDU–Tláhuac, 2008).

Con base en el PDDU se estima que la distribución litológica superficial está representada de la siguiente manera: materiales ígneos extrusivos (46 %), de los cuales: las rocas ígneas representan un total del 29 % de la superficie, andesita 7.51 %, basalto 2.89 % y rocas piroclásticas 18.51 %, mientras que en la parte sur, este, oeste y centro, predominan suelos (54 %) con granulometrías de arcilla, arena y limo; en la zona norte es frecuente hallar depósitos piroclásticos y grava.

## Estratigrafía

De acuerdo a la localización del sitio con riesgo Colonia del Mar, éste se encuentra asentado en la zona lacustre, es decir, Zona III del ex lago, la cual, según Martínez (2011), presenta grandes depósitos de arcillas de alta plasticidad y muy compresibles. La región urbanizada sobre los depósitos lacustres se caracteriza por presentar suelos con la siguiente estratificación:

- Depósitos areno-arcillosos o limosos o bien rellenos artificiales de hasta 10 m de espesor.
- Arcillas de origen volcánico (producto de la degradación de las cenizas volcánicas) altamente compresibles, con intercalación de pequeños lentes de arena.
- La primera capa dura, de 3 m de espesor, constituida por materiales arcillo-arenosos o limo-arcillosos muy compactos.
- Esta capa suele localizarse a una profundidad del orden de los 33 m.
- Estratos alternados de arena con grava y limo o arcilla-arenosa.

## Fundamentos del Método Geofísico

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

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

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

Donde:

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

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

$k$ , es la constante geométrica.

Para obtener  $k$  usamos la siguiente fórmula:

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

Donde:

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

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

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

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

## Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

La tomografía de resistividad eléctrica es un método de resistividad multielectródico, basado en la modelación 2D de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas (elementos finitos o diferencias finitas) para generar imágenes denominadas pseudosecciones (Serrano, 2003). Por el número de datos obtenidos, éste es un método geofísico de alta resolución (Constantino, 2011).

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

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



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

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

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

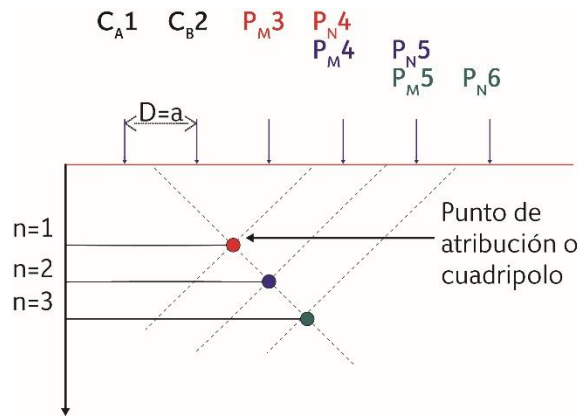


Figura 3. Muestra la secuencia de ocupación de los electrodos de potencial durante se desarrollan las mediciones (ELECTRE Pro software Help, Iris Instruments, 2012).

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

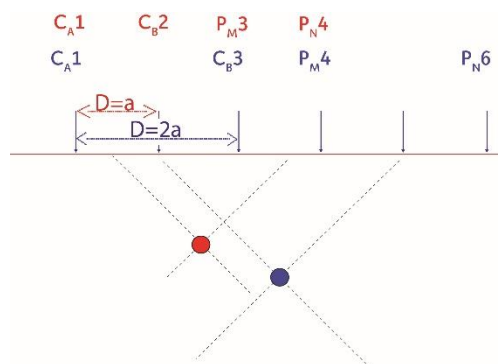


Figura 4. Secuencia del movimiento de los electrodos de corriente; los 4 ( $C_{A1}$ ,  $C_{B2}$ ,  $P_{M3}$ ,  $P_{N4}$ ) electrodos para obtener el punto de atribución rojo se denotan en el mismo color; y de la igual manera para el cuadrípulo azul ( $C_{A1}$ ,  $C_{B3}$ ,  $P_{M4}$ ,  $P_{N6}$ ) (ELECTRE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

## Recorrido de campo

Durante el recorrido por las calles que componen al sitio con riesgo se encontraron las siguientes afectaciones:

En la calle Pez Vela se encuentra un hundimiento con desplazamiento vertical de 38 cm, azimut de 8° NE y un echado de 8° SE (Figura 5).



*Figura 5. Fotografía que ilustra la zona de hundimiento con un desplazamiento vertical de 38 cm. Al fondo se observa la acera deformada y la vivienda con daño en sus muros (19.2896° N; 99.0623° W. Calle: Pez Vela).*

En la vivienda ubicada entre la esquina de Pez Vela y Pingüino se pudieron observar afectaciones en muros (Figura 6; no se permitió el ingreso a la vivienda). Los daños son importantes debido al asentamiento diferencial producido y que se evidencia con la fractura diagonal a 45° como lo muestra la Figura 6.



*Figura 6. Fotografía que muestra las afectaciones en la vivienda. Los daños son importantes debido al asentamiento diferencial producido y que se evidencia con la fractura diagonal a 45° que comienza en el castillo de confinamiento y concluye en la ventana donde se observa que no tiene confinamiento. La falta de cadena de cierre permitió que la losa se separara de los muros teniendo la necesidad de apuntalar provisionalmente parte de la construcción (19.2897° N; 99.0624° W. Calle: Pez Vela).*

En la calle Océano, entre Pingüino y Gitana, se observa la continuación de la estructura de hundimiento con un desplazamiento vertical de 13 cm, una dirección de 2° NE y un echado de 9° SE.

En la calle Océano se observa la continuación de la estructura con un desplazamiento vertical de 22 cm y una dirección de 9° NNE con un echado de 38°SE. Aquí se observó una vivienda con basculamiento que genera deformación en sus juntas constructivas (Figura 7).



A



B

*Figura 7. Fotografías que muestran el desplazamiento vertical y los daños causados por el mismo cercano al drenaje, fotografía A. Las dimensiones del desplazamiento vertical se observan en la fotografía B (19.2908° N; 99.0615° W. Calle: Océano).*

En la Calle Pez Gumari continúa la estructura de hundimiento, no se observaron daños en viviendas, sin embargo el fenómeno expresado en el pavimento presenta un desplazamiento vertical de 30 cm, un azimut 9° NE y un echado de 22° SE (Figura 8).



*Figura 8. Fotografía que muestra la manifestación de la estructura de hundimiento en el pavimento, donde el desplazamiento vertical es de 30 cm (19. 2914° N; 99.0614° W. Calle: Pez Gurami).*

Por último, el fenómeno se identificó en un deportivo ubicado en la esquina de las calles Pez Gorami y Pez Cardenal, donde la cancha del mismo presenta fracturamiento sin que se muestre un desplazamiento vertical (Figura 9).





Figura 9. Fotografía que muestra los daños en la cancha deportiva; no presenta desplazamiento vertical (19. 2919° N; 99.0612° W. Calle: Pez Cardenal).

### Determinación de la zona de la TRE

La zona donde se realizó el estudio se determinó de acuerdo con la cartografía del peligro, la dirección de la estructura y las condiciones de vulnerabilidad en las que se encuentran las viviendas afectadas. Por lo anterior se determinó que la calle Océano como la idónea para hacer el estudio, esto debido a que cumplió con las siguientes características: la zona de hundimiento tiene una longitud aproximada de 20 m, la traza urbana permite hacer un tendido aproximado de 24 m (lo que permite profundizar 5 m), la estructura de hundimiento está bien definida, es perpendicular a la calle y al tendido de la tomografía, y existen afectaciones visibles en superficie. Es por todo lo anterior que se determinó que la tomografía se realice en esta calle, que nos permite alcanzar los objetivos del estudio.

### 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](http://www.iris-instruments.com)).

Accesorios:

- Fuente: batería externa de 12 V
- 48 electrodos impolarizables
- 4 carretes de cables de superficie de 12 conexiones cada una con 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 10).

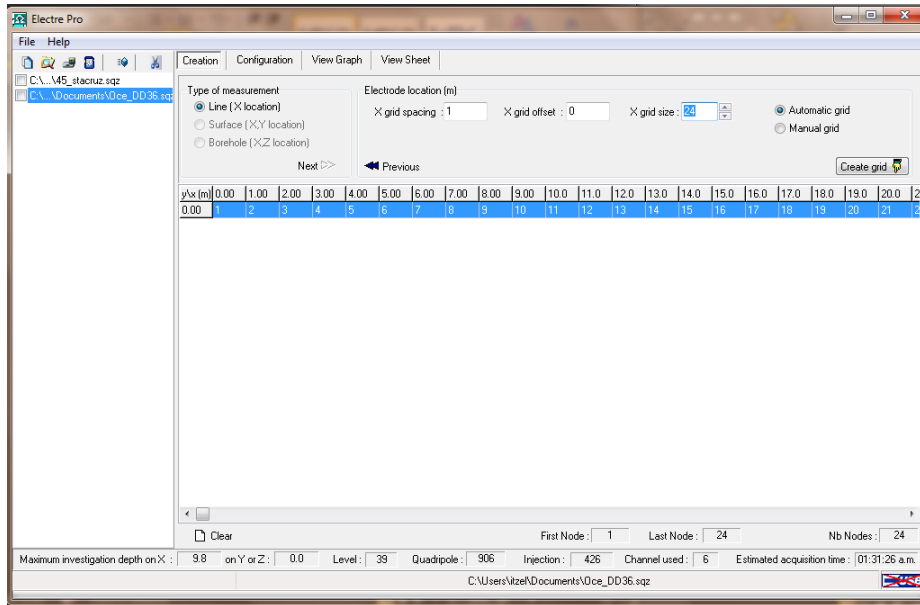


Figura 10. Ventana de asignación de separación entre electrodos (ELECTRE Pro software, Iris Instruments, 2012).

### 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 11).

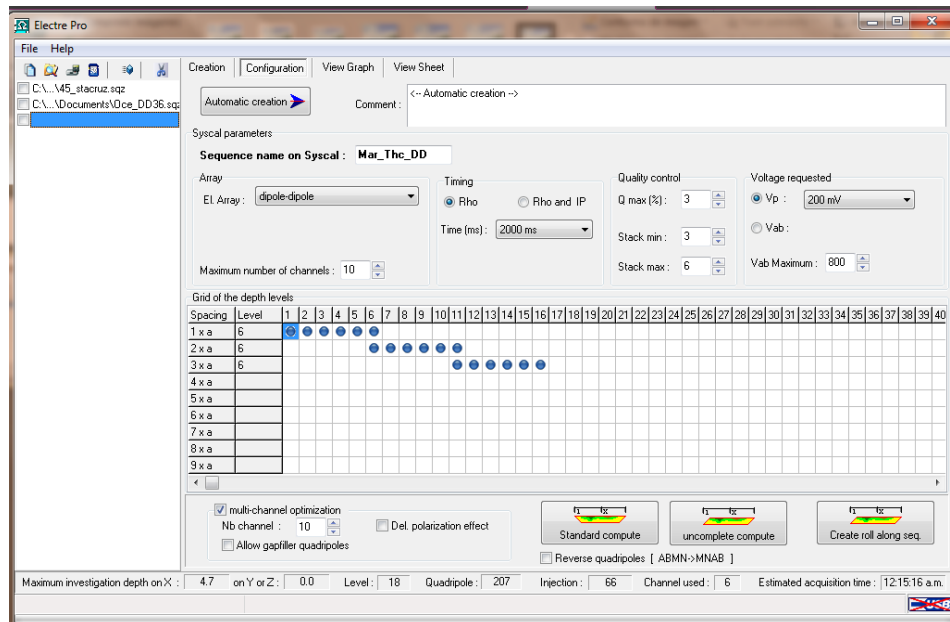


Figura 11. Ventana de configuración, en ella se introducen los parámetros de inyección de voltaje, el tipo de arreglo, el nombre que tendrá el levantamiento, entre otros (ELECTRE Pro software, Iris Instruments, 2012).

### 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 12).

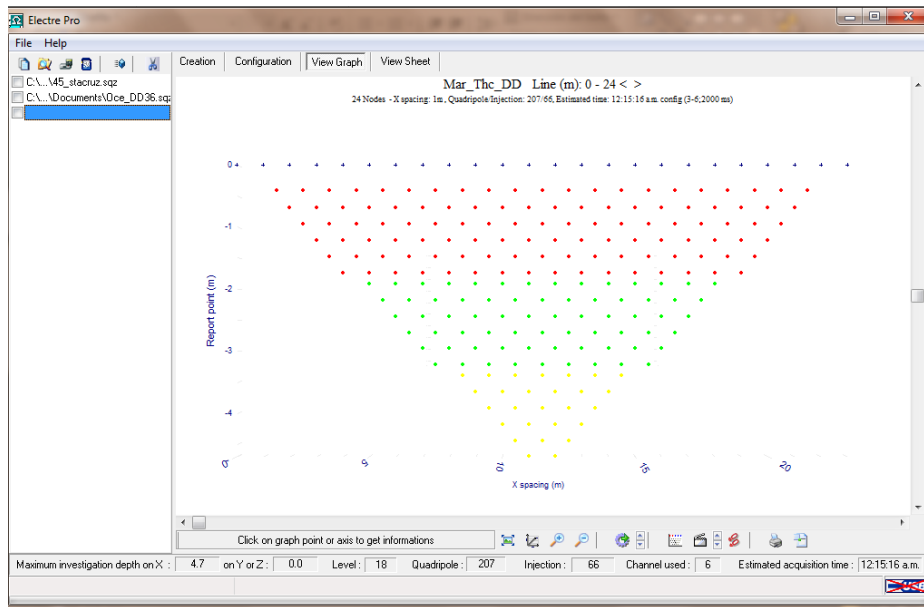


Figura 12. Ventana que muestra la gráfica preliminar del levantamiento; en la parte superior se puede observar el nombre del levantamiento y el número de electrodos a utilizarse, el espaciamiento entre ellos; en la parte media se encuentra una representación de los cuadrípolos; en la parte inferior (de 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):

<b>Longitud del levantamiento</b>	24 m
<b>Número de electrodos utilizados</b>	24
<b>Separación entre electrodos</b>	1 m
<b>Profundidad máxima de investigación</b>	5 m
<b>Total de puntos de atribución</b>	207
<b>Puntos de inyección</b>	66

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. Verificación de que cada electrodo que hicieran contacto con el material del subsuelo.
5. Instalación de los conectores del cable principal hacia los electrodos. Se verificó que el cable no estuviera enrollado o doblado a fin de que el flujo de electricidad no sufriera interrupción.
6. Colocación el equipo *Syscal Pro* entre los electrodos 24 y 25. Se utilizó una batería de 12 V como fuente externa.
7. Comprobación preliminar del paso de corriente en cada uno de los electrodos y medición preliminar de la resistencia de la puesta a tierra de los dipolos.
8. Recopilación de datos con el equipo, durante la cual se observó que el cableado no fuese movido o el flujo de corriente pudiese haber sufrido interrupción por causas externas.
9. Verificación del correcto guardado de los datos en la memoria del equipo concluido el tiempo de levantamiento.



Figura 13. Fotografía que muestra la colocación de la consola del resistímetro Syscal Pro durante el levantamiento (19.2903° N; 99.0616° W. Calle: Océano).

### Ubicación de los electrodos

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

N° de Electrodo	X	Y
<b>1</b>	493531	2132951
<b>3</b>	493530	2132952
<b>5</b>	493528	2132953
<b>7</b>	493527	2132954
<b>9</b>	493526	2132955
<b>11</b>	493525	2132956
<b>13</b>	493524	21329575
<b>15</b>	493522	2132958
<b>17</b>	493521	2132959
<b>19</b>	493520	2132960
<b>21</b>	493518	2132962
<b>23</b>	493517	2132963

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

## Justificación del tipo de arreglo de la TRE

El arreglo 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 14, 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.

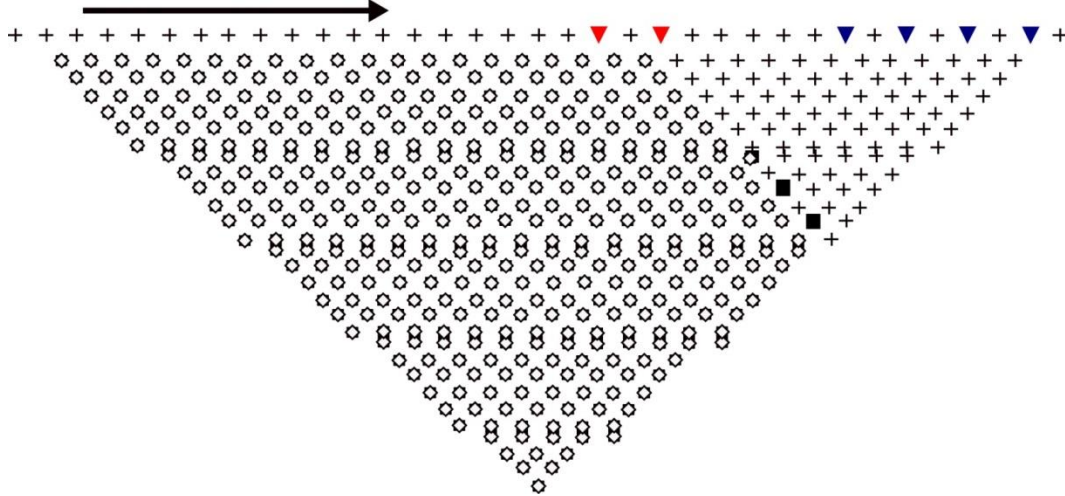


Figura 14. Modelo de puntos de atribución. Triángulos rojos, electrodos de inyección de corriente; triángulos azules, electrodos de potencial; cuadros huecos, puntos de atribución ya medidos; y cuadros negros, puntos de atribución en los que se está realizando la medición en ese momento. Las cruces son los puntos de atribución que aún no han sido medidos (Iris 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 15).

#	Elarray	Spa 1	Spa 2	Spa 3	Spa 4	Rho	Dev	M	Sp	Vp	In	Stack	RsCheck	Name	Temp.
136	Dipole Dipole	12.00	13.00	14.00	15.00	17.90	0.2	0.00	-68.9	964.970	1016.025	3	0.81	Oce_D036	27.0
137	Dipole Dipole	12.00	13.00	15.00	16.00	9.95	0.2	0.00	6.2	-125.959	1016.025	3	0.82	Oce_D036	27.0
138	Dipole Dipole	12.00	13.00	16.00	17.00	7.50	0.2	0.00	0.6	-40.434	1016.025	3	0.60	Oce_D036	27.0
139	Dipole Dipole	12.00	13.00	17.00	18.00	5.53	0.3	0.00	3.5	-14.895	1016.025	3	0.53	Oce_D036	27.0
140	Dipole Dipole	12.00	13.00	18.00	19.00	4.65	1.3	0.00	-36.5	-7.163	1016.025	3	2.99	Oce_D036	27.0
141	Dipole Dipole	12.00	13.00	19.00	20.00	4.36	3.0	0.00	12.5	-4.212	1016.025	3	3.70	Oce_D036	27.0
142	Dipole Dipole	12.00	14.00	20.00	22.00	5.37	0.2	0.00	2.4	-12.625	885.933	3	2.43	Oce_D036	27.0
143	Dipole Dipole	12.00	14.00	22.00	24.00	1.54	2.9	0.00	-0.7	-1.805	885.933	3	2.00	Oce_D036	27.0
144	Dipole Dipole	12.00	14.00	24.00	26.00	4.79	1.1	0.00	-68.1	-3.218	885.933	3	0.92	Oce_D036	27.0
145	Dipole Dipole	12.00	14.00	21.00	23.00	5.23	1.1	0.00	-185.5	-8.538	887.903	3	3.24	Oce_D036	27.0
146	Dipole Dipole	12.00	14.00	23.00	25.00	0.26	26.9	0.00	59.0	0.229	887.903	3	2.37	Oce_D036	27.0
147	Dipole Dipole	12.00	14.00	25.00	27.00	6.54	3.3	0.00	67.4	-3.448	887.903	3	1.79	Oce_D036	27.0
148	Dipole Dipole	12.00	15.00	26.00	29.00	27.83	0.3	0.00	67.7	-17.735	882.385	3	1.69	Oce_D036	27.0
149	Dipole Dipole	12.00	15.00	29.00	32.00	3.98	1.0	0.00	-30.5	-1.395	882.385	3	1.80	Oce_D036	27.0
150	Dipole Dipole	12.00	15.00	27.00	30.00	31.15	0.1	0.00	65.2	-17.037	618.648	3	3.74	Oce_D036	27.0
151	Dipole Dipole	12.00	15.00	30.00	33.00	3.91	1.4	0.00	-34.2	-1.223	618.648	3	3.11	Oce_D036	27.0
152	Dipole Dipole	12.00	15.00	28.00	31.00	7.15	1.4	0.00	-12.1	-3.394	637.696	3	3.52	Oce_D036	27.0
153	Dipole Dipole	12.00	15.00	31.00	34.00	3.71	1.4	0.00	-2.9	-1.012	637.696	3	1.17	Oce_D036	27.0
154	Dipole Dipole	13.00	14.00	15.00	16.00	11.33	0.3	0.00	-476.4	-514.082	855.236	3	0.88	Oce_D036	27.0
155	Dipole Dipole	13.00	14.00	16.00	17.00	9.20	0.1	0.00	-0.2	-104.305	855.236	3	0.61	Oce_D036	27.0
156	Dipole Dipole	13.00	14.00	17.00	18.00	6.24	0.2	0.00	-1.0	-28.296	855.236	3	0.53	Oce_D036	27.0
157	Dipole Dipole	13.00	14.00	18.00	19.00	5.12	0.2	0.00	-31.6	-11.618	855.236	3	3.00	Oce_D036	27.0
158	Dipole Dipole	13.00	14.00	19.00	20.00	4.14	1.7	0.00	15.0	-5.388	855.236	3	3.71	Oce_D036	27.0
159	Dipole Dipole	13.00	14.00	20.00	21.00	5.45	4.3	0.00	85.6	-4.413	855.236	3	2.11	Oce_D036	27.0
160	Dipole Dipole	13.00	15.00	21.00	23.00	8.00	0.5	0.00	-168.3	-13.695	645.111	3	3.22	Oce_D036	27.0
161	Dipole Dipole	13.00	15.00	23.00	25.00	-7.56	0.6	0.00	45.3	6.467	645.111	3	2.36	Oce_D036	27.0
162	Dipole Dipole	13.00	15.00	25.00	27.00	15.98	1.2	0.00	67.0	-7.812	645.111	3	1.80	Oce_D036	27.0
163	Dipole Dipole	13.00	15.00	22.00	24.00	-4.25	0.5	0.00	3.0	5.128	856.126	3	2.01	Oce_D036	27.0
164	Dipole Dipole	13.00	15.00	24.00	26.00	3.98	1.3	0.00	55.3	-6.476	856.126	3	0.91	Oce_D036	27.0
165	Dipole Dipole	13.00	15.00	26.00	28.00	42.49	0.5	0.00	58.7	-16.550	856.126	3	3.32	Oce_D036	27.0
166	Dipole Dipole	13.00	16.00	27.00	30.00	84.48	0.8	0.00	54.5	-62.503	892.432	3	3.74	Oce_D036	27.0
167	Dipole Dipole	13.00	16.00	30.00	33.00	5.92	0.7	0.00	-36.4	-3.181	892.432	3	3.11	Oce_D036	27.0
168	Dipole Dipole	13.00	16.00	28.00	31.00	16.03	0.4	0.00	-9.9	-12.797	902.699	3	3.52	Oce_D036	27.0
169	Dipole Dipole	13.00	16.00	31.00	34.00	5.51	0.1	0.00	-2.7	-2.512	902.699	3	1.17	Oce_D036	27.0
170	Dipole Dipole	13.00	16.00	29.00	32.00	6.99	2.6	0.00	-29.9	-4.641	916.419	3	1.81	Oce_D036	27.0

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  $\rho_a$ , que puede contener datos anómalos (Figura 16).

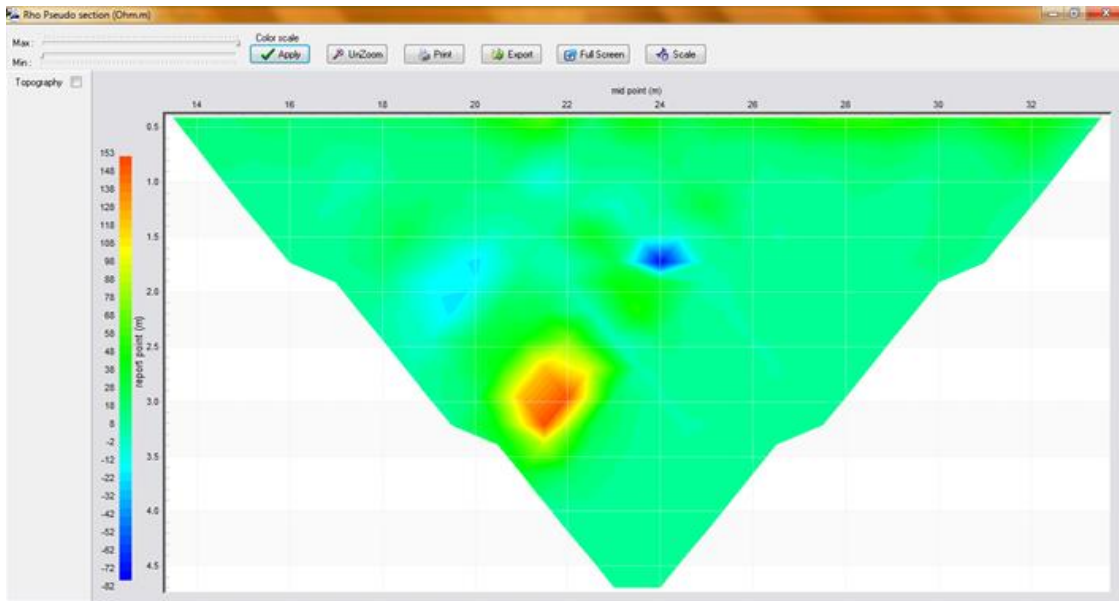


Figura 16. Gráfica de resistividad aparente sin proceso de inversión de datos (software *Prosys II*, Iris Instruments, 2012).

### 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).

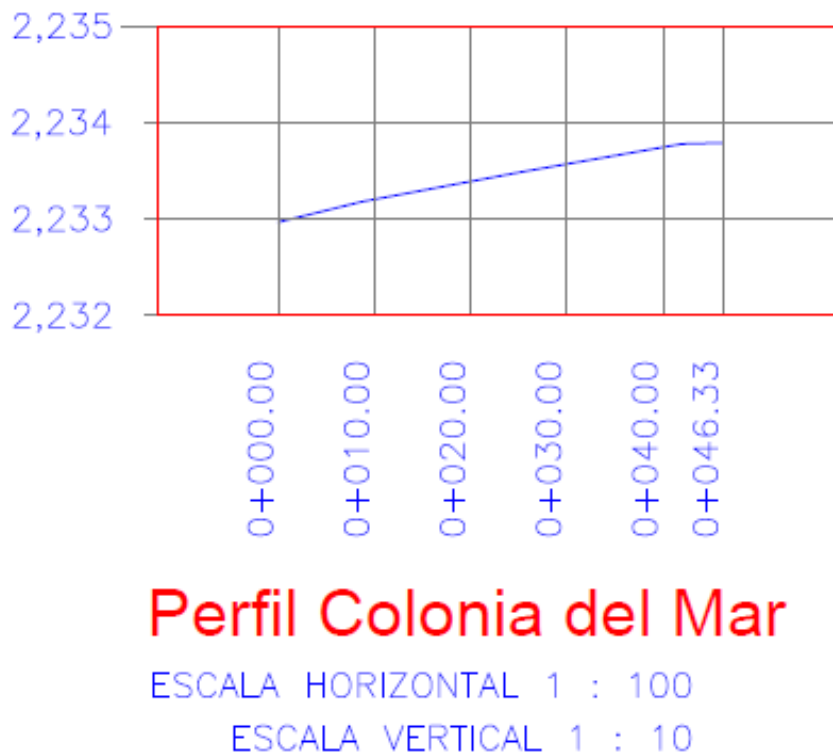


Figura 17. Perfil topográfico de la línea donde se realizó TRE.

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).

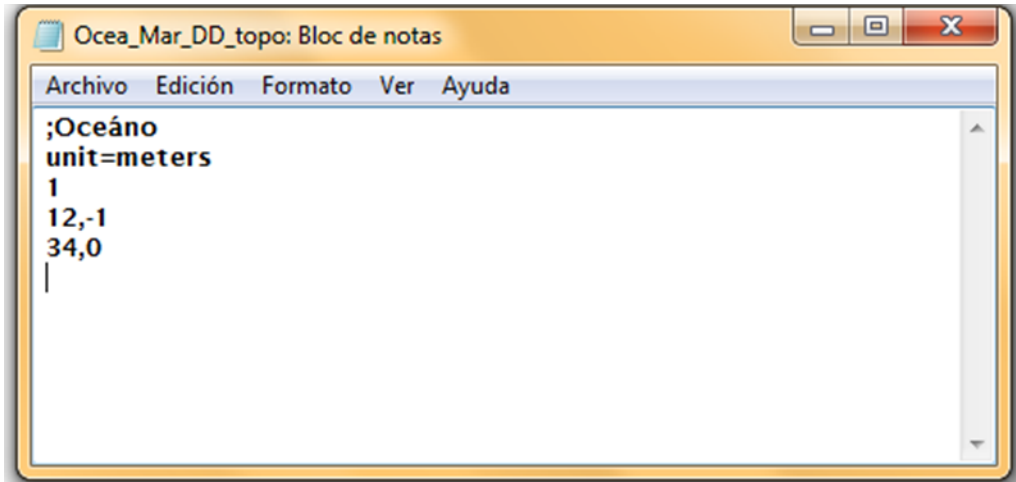


Figura 18. Archivo de topografía que se ingresa al programa *EarthImager* durante el proceso de inversión de datos.

### 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=0.01	Resistividad aparente mínima.
MaxAppRes=100	Resistividad aparente máxima.
MaxRepeatErr=10	Error de repetición máximo.
MaxRecipErr=1	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 espaciamento 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 y predicha

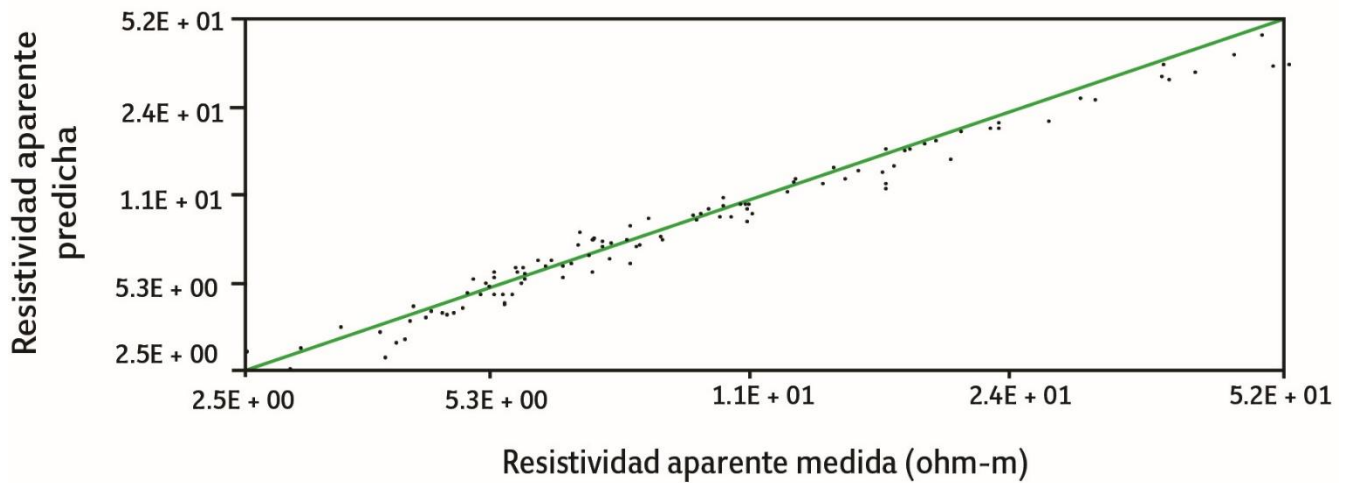


Figura 19. Gráfica cruzada de resistividad aparente del modelo directo vs resistividad aparente medida (software EarthImager, 2009).

## 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).

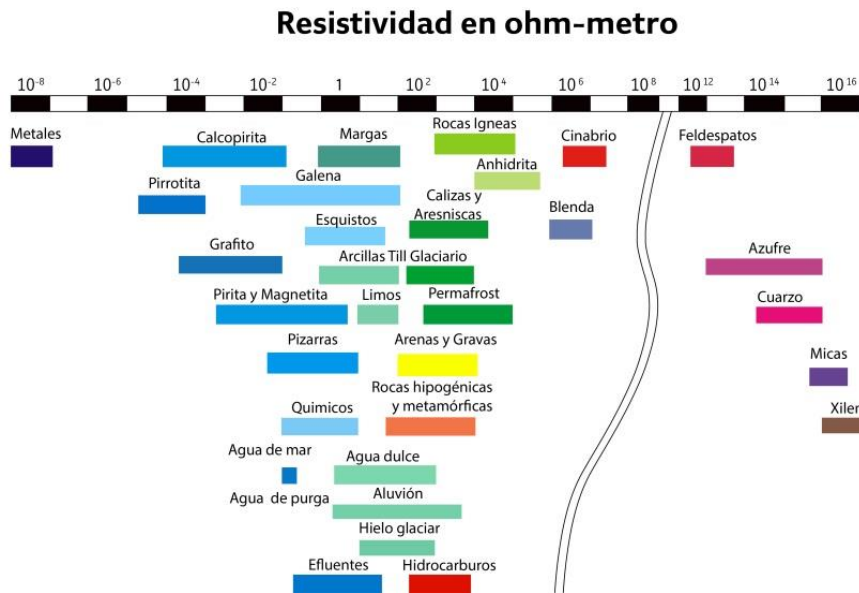


Figura 20. Gráfica de los valores de resistividad de diferentes rocas y minerales ([www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=897](http://www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=897)).

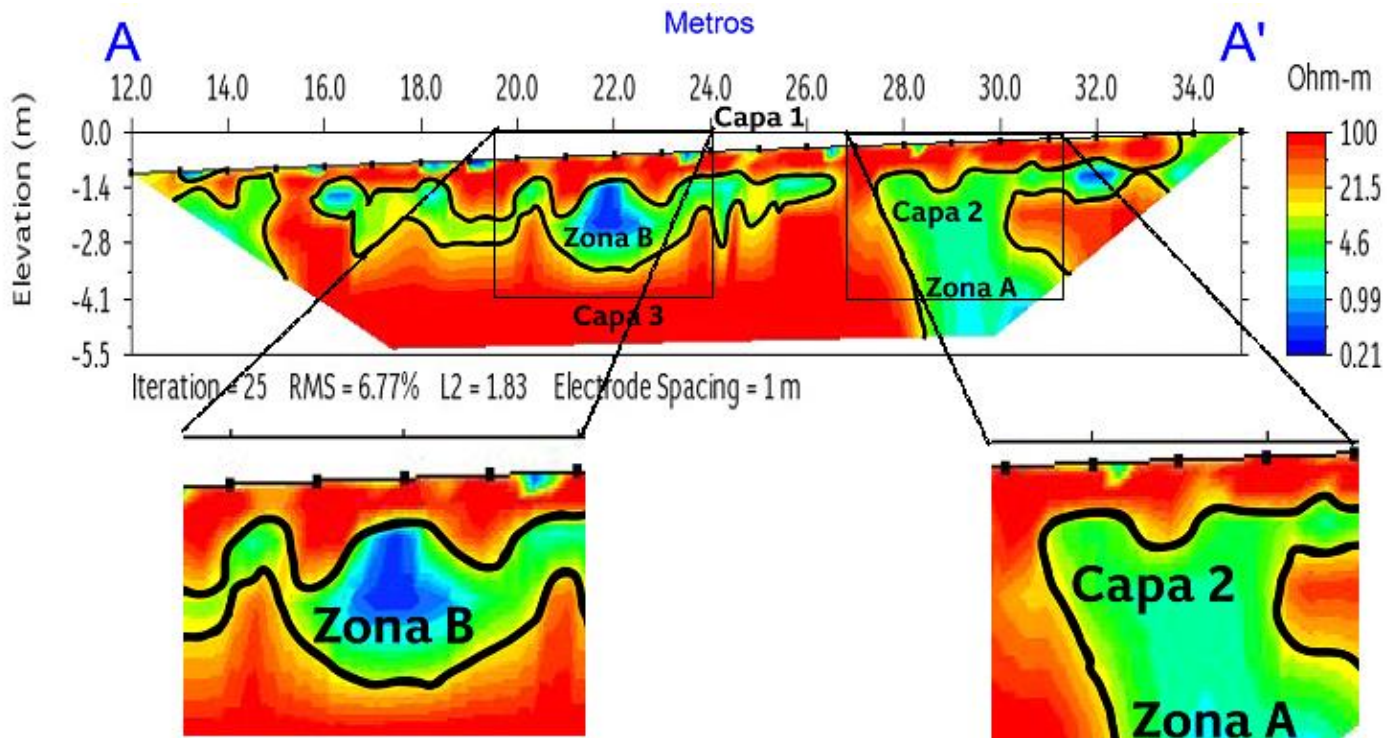


Figura 21. TRE obtenida en la Calle Océano, Colonia del Mar, Delegación Tláhuac. En la gráfica se pueden observar tres capas de materiales con resistividades diferentes (Capa 1, Capa 2 y Capa 3). En la Capa 2 se observan dos Zonas (A y B, imágenes inferiores a mayor escala) que determinan condiciones y características diferentes de los materiales existentes.

El perfil de la TRE se dividió en 3 capas de acuerdo a su resistividad y profundidad (Figura 21).

**Capa 1.** Su resistividad media es aproximadamente  $100 \Omega\text{m}$ , inicia en la superficie inmediatamente debajo de la carpeta asfáltica. Alcanza una profundidad en las partes más someras de 2 m y en las más profundas de 2.8 m; por lo tanto, su espesor es variable. Por su resistividad y profundidad se puede asociar a zonas con materiales de relleno.

**Capa 2.** Es una zona de resistividad baja: en promedio  $5 \Omega\text{m}$ . Muestra zonas de muy baja resistividad ( $1 \Omega\text{m}$ ); considerando lo que propone Auge (2008) el agua es un factor que contribuye a la disminución de la resistividad eléctrica de los materiales, por lo tanto esta zona se puede considerar saturada (zonas de color azul). Inicia debajo de la Capa 1, es decir, de manera variable en unas partes a 2 m y en otras a 2.8 m, su espesor también varía de algunos centímetros hasta 1.5 m. En esta capa se pueden observar dos zonas A y B, donde predomina las resistividades  $5 \Omega\text{m}$  y de  $1 \Omega\text{m}$ , respectivamente.

**Zona A.** Su resistividad media oscila entre los  $5 \Omega\text{m}$ , tiene una base aproximadamente de 2 m y una altura de 4 m. Según lo observado en la imagen tienen los mismos materiales que la Capa 2, solo que con mayor espesor y sobresaturación con agua. La geometría de esta zona se puede asociar a un antiguo canal (Figura 21).

**Zona B.** Su resistividad media es aproximadamente  $1 \Omega\text{m}$ , en la base mide aproximadamente 1.5 m y tiene una altura de 1.5 m, se encuentra a una profundidad de 1 m, su cima es lineal a las alcantarillas que se encuentran en la calle, por lo que podemos asociar a drenaje pluvial; sin embargo su geometría es irregular. Por su resistividad, geometría y ubicación se puede asociar a un área con arcillas sobresaturadas o de materiales finos de relleno donde se tiene acumulación de agua, posible fuga de agua (Figura 21).

**Capa 3.** Es una zona cuya resistividad media es cercana a  $100 \Omega\text{m}$ , se prolonga de manera uniforme por la base de la TRE, con un espesor medio de 2m y una longitud de 13 m. Junto a esta capa existe una zona que denotamos como Zona A, y a continuación detallamos (Figura 21). La Capa 3 se identificó como el suelo natural más firme (antiguas zonas de cultivo, Chinampas), sobre este suelo se colocaron materiales de relleno (Capa 2). A un lado de los suelos naturales de la Capa 3 se encuentra la geometría de un antiguo canal, el cual fue cubierto por materiales de relleno (Capa 2).

## Conclusiones

### Relación de las afectaciones superficiales con la TRE

De acuerdo a la imagen obtenida se observa una estructura de 13 m de longitud y un espesor 2 m ubicada entre dos zonas de baja resistividad. La Zona A, por sus características geométricas y resistivas, se puede asociar a un canal. Las anteriores estructuras se encuentran cubiertas por una capa de material de relleno. Lo anterior se puede observar en el Mapa de estudio geofísico en sitio con riesgo por hundimiento y fracturamiento en Av. Océano, Colonia del Mar Tláhuac.

## 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].

**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 aluminosilicatados [2].

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

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

**Ceniza:** Partículas de roca volcánica, cristales o vidrio volcánico, generado durante las erupciones (diámetro menor a 2 mm) [3].

**Colada de lava:** Forma en que fluye y se dispone la lava en la superficie terrestre. Sus dimensiones dependen de la viscosidad, del volumen y velocidad de salida del magma a la superficie, y de la pendiente del terreno. Los de tipo ácido son generalmente cortos (1-10 km) y de fuerte grosor (más de 25 m). Los derrames de lava o coladas de lava basálticos, especialmente los de estructura ondulada, son muy largos, de decenas de kilómetros. La mayor velocidad que se conoce para el escurrimiento de lavas fluidas es de 70 km / h [1].

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**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 titanios. Suele ser un accesorio frecuente en rocas alcalinas. Se caracteriza por su relieve alto, color variable de incoloro a marrón y birrefringencia intensa, muchas veces enmascaradas por los colores propios del mineral. Las secciones con terminaciones en forma de cuña son muy características, especialmente las de forma de diamante [17].

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

**Falla:** Desplazamiento de un bloque rocoso con respecto a otro colindante a éste o de ambos bloques, a través de un plano denominado «plano de falla». Las fallas son producto de esfuerzos tectónicos, producto de la 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 et. alia) 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 operare citato) En la obra citada.
RMS	Raíz Cuadrada Media (Por sus siglas en inglés Root Mean Square).
Rho	Resistividad.
S	Sur.
Sp	Potencial Espontáneo (Por sus siglas en inglés spontaneous potential).
TRE	Tomografía de Resistividad Eléctrica.
.txt	Extensión de un archivo de texto.
UTM	Por sus siglas en inglés Universal Transversal de Mercator.
.urf	Extensión de un archivo de resistividad universal (Por sus siglas en inglés Universal Resistivity File).
Símbolo	Significado
$\pi$	Constante matemática con valor de 3.141592...
°	Grados.
°C	Grados Celsius.
>	Mayor que.



<	Menor que.
$\mu\text{V}$	Micro volt.
2D	Modelación en dos dimensiones.
$\Omega\text{-m}$	Ohms metros.
%	Porcentaje.
$\rho_a$	Resistividad Aparente.
[ ]	Referencias Bibliográficas.
$\Omega$	Rho, letra del alfabeto griego usada para designar a la Resistividad Eléctrica.
A	Amperes.
cm	Centímetros.
km	Kilómetros.
km/h	Kilómetros sobre horas.
m	Metros.
$\text{m}^2$	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.

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.

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.

Oviedo de Leon, A. (1970). El Conglomerado Texcoco y el posible origen de la Cuenca de México. *Revista del Instituto Mexicano del Petróleo*, (2), 77–82.

Padilla y Sánchez, R. (1989). Geology and tectonics of the basin of Mexico and their relationship with the damage caused by the earthquakes of September 1985. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, (7), 17–28.

Perdomo, S. (2009) *Tomografía eléctrica en apoyo de la investigación arqueológica*. (Tesis de Grado). Universidad Nacional de la Plata. Argentina.

Programa Delegacional de Desarrollo Urbano para la Delegación Tláhuac (2008).

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

Sepúlveda E, L. (2009). *Diseño de un resistivímetro de corriente directa para realizar estudios de geoelectricos en los Valles Centrales*. (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico Nacional. Oaxaca.

Serrano O., J. (2003). *Caracterización geofísica de filtraciones de agua en el subsuelo*. (Tesina). Universidad Politécnica de Cataluña. España.

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

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

## **Bibliografía para el glosario de términos**

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

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

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

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

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

- [6] constructoracmproyectos (s.f.). Recuperado el 22 julio de 2014 de <http://constructoracmproyectos.com/que-es-mamposteria-en-construccion/>
- [7] Definición. De (s.f.). Recuperado el 22 julio de 2014 de <http://definicion.de/puntal>
- [8] Agiusa (s.f.). Recuperado el 22 julio de 2014 de <https://www.agiusa.com/ministing.sp.shtml>
- [9] Iakubovskii, I. V. y Liajov, L. L. (1980). *Exploración Eléctrica*. Moscú: Reverte.
- [10] Glosario CENAPRED 2010 (consulta en línea). Consultado el 10 de julio 2014.
- [11] Dávila B., J. (2011). *Diccionario geológico*. Perú: INGEMMET.
- [12] Secretaría de Protección Civil del Gobierno del Distrito Federal. (s.f.) *Norma técnica complementaria al reglamento de la ley de P. C. del D F NTC-002-SPCDF-PV-2010*. Recuperado el 10 de julio de 2014 en <http://cgservicios.df.gob.mx>
- [13] Protección Civil, Secretaría de Gobernación (consulta en línea). <http://www.proteccioncivil.gob.mx>, consultado el día 10 de julio 2014.
- [14] Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano. (2014). *Bases para la Estandarización en la Elaboración de Atlas de Riesgos y Catálogo de Datos Geográficos para Representar el Riesgo*. SEDATU: México.
- [15] <http://deconceptos.com/ciencias-naturales/corrosion###ixzz3RvyoLBvD>
- [16] <http://www.segemar.gov.ar/bibliotecaintemin/MINERALES>
- [17] Andrés P. y R. Rodríguez. (2008). *Evaluación y Prevención de Riesgos Ambientales en Centroamérica*. Editorial Documenta Universitaria. España.