

Contenido

Introducción.....	1
Antecedentes.....	1
Objetivo general.....	1
Objetivos específicos.....	1
Definición del problema geológico.....	1
Metodología de trabajo.....	2
Desarrollo del proyecto.....	3
Descripción del marco de referencia	3
Localización	3
Fundamentos del Método Geofísico	4
Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)	5
Determinación de la zona de la TRE	6
Descripción del equipo	6
Pruebas de calibración	7
Diseño del levantamiento de la TRE	7
Ubicación de los electrodos	10
Justificación del tipo de arreglo de la TRE	11
Procesamiento de datos	11
Correcciones topográficas	12
Inversión de datos	13
Interpretación de datos (Modelo geoelectrico 2D)	14
Conclusiones y recomendaciones	15
Glosario de términos	17
Abreviaturas y símbolos utilizados	23
Bibliografía.....	25
Bibliografía para el glosario de términos.....	26

Introducción

El objetivo Principal de Protección Civil, es la salvaguardia de la persona y la sociedad, así como sus bienes y entorno ante la eventualidad de un desastre por esto, es necesario la coordinación permanente, la solidaridad y la ayuda mutua, no solamente al ocurrir una situación crítica; sino también, para establecer los mecanismos de prevención y preparación adecuados que permitan mitigar en lo posible los efectos de cualquier fenómeno destructivo.

Definimos un sitio con riesgo como aquel en donde se conoce el peligro (fenómeno perturbador), la vulnerabilidad física y social (viviendas y personas expuestas), por lo que se esperan daños o pérdidas económicas, físicas y sociales. Por ello existen estudios de métodos indirectos como la Geofísica que nos permiten conocer las condiciones del subsuelo, de manera concreta para este sitio con riesgo se aplicó el estudio de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE).

Antecedentes

Este estudio se realizó a petición de la Dirección de Protección Civil de la Delegación Xochimilco, quien encargo a la empresa 3GSIG S.A DE C.V que ejecutara el estudio de una tomografía de resistividad eléctrica en el Pueblo de Santiago Tulyehualco ya que presenta peligro por Hundimiento reportada en el atlas de peligros y/o riesgos de la Delegación Xochimilco ,2015.

Objetivo general

Conocer las características y condiciones en que se encuentran los materiales en el subsuelo del sitio de estudio.

Objetivos específicos

- Visualizar de forma regional y local la zona de riesgo por remoción en masa local en correlación con los asentamientos humanos.
- Llevar a cabo una Tomografía de Resistividad eléctrica que nos permita conocer la disposición de los estratos que conforman el terreno a una mayor profundidad.

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].

Metodología de trabajo

Una vez identificados los fenómenos que se manifiestan en el sitio de estudio Santiago Tulyehuaco, 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 de estudio.

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

Determinación de la zona de la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE). Con base a información vertida sobre esta calle nos permitía hacer el estudio de manera perpendicular a dos estructuras de Hundimiento, estas estructuras 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

Localización

El sitio de estudio se encuentra ubicado en el Oeste de la delegación Xochimilco, dentro del pueblo de Santiago Tulyehualco, con coordenadas $19^{\circ}15'27.24''N$; $99^{\circ}1'4.98''O$ (Figura 1) y la línea de estudio de la Tomografía de Resistividad eléctrica se llevó a cabo sobre la calle Aquiles Serdán (Figura 2).

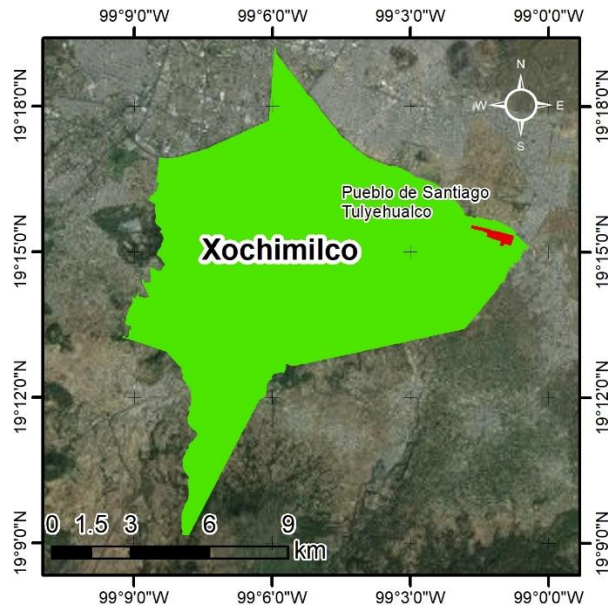


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

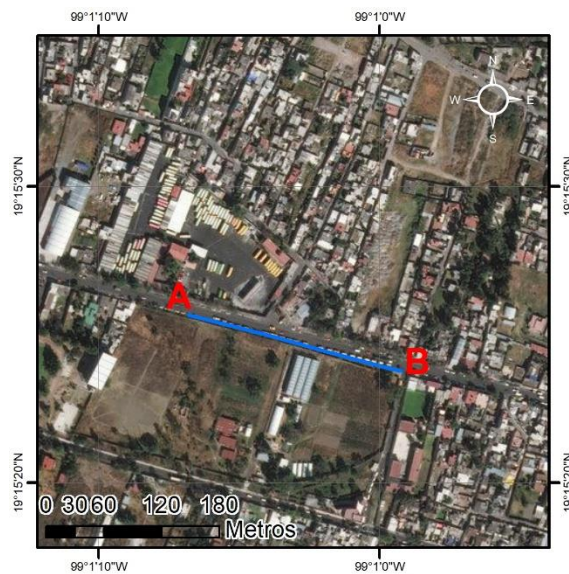


Figura 2. Croquis de localización de la Tomografía de Resistividad Eléctrica, línea en color azul.

Fundamentos del Método Geofísico

Los métodos geofísicos exploran de manera indirecta las propiedades físicas existentes en los materiales que componen el subsuelo. Entre las propiedades estudiadas se encuentran la resistividad eléctrica, es decir, la oposición que presentan los materiales al flujo de una corriente eléctrica a través de ellos. La resistividad varía en función del contenido de agua (la salinidad y la distribución de ambas en los poros) de la presión y de la temperatura (Serrano, 2009). Las rocas presentan minerales semiconductores y entre sus poros pueden existir fluidos, los cuales pueden contener electrolitos que hacen que se comporten como conductores iónicos de resistividad muy variable. Llamamos resistividad (ρ) a la resistencia específica de cada material y en nuestro caso está dada por la siguiente fórmula (Auge, 2008):

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

Donde:

Δv , es la diferencia de potencial y se mide en volts.

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

k , es la constante geométrica.

De acuerdo a la disposición de los electrodos la constante geométrica K se obtendrá con diferentes formulas

Para obtener k en el arreglo Wenner usamos la siguiente fórmula:

$$k = 2\pi a$$

Donde:

π , es la constante matemática con valor de 3.141592...

a , es la separación que existe entre electrodos y es constante, (Denotado en el esquema con la letra D ; Figura 5).

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

El arreglo Schlumberger utiliza la siguiente fórmula:

$$k = \pi \frac{L^2}{2l}$$

Donde:

π , es la constante matemática con valor de 3.141592...

L , es la mitad de la separación que existe entre electrodos de Corriente (C_A y C_B) (Denotado en el esquema con la letra D).

l , es la mitad de la separación que existe entre electrodos de potencial (P_M y P_N) (Denotado en el esquema con la letra D figura 3).

Y para el arreglo Dipolo- Dipolo

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

Dónde:

π , es la constante matemática con valor de 3.141592...

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

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

Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

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

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

Arreglo Wenner-Schlumberger. Es un híbrido entre el método Schlumberger y el método Wenner; en un principio los electrodos de corriente (C_A y C_B) y los electrodos de potencial (P_M y P_N) se acomodan como si se tratara de un método Wenner; es decir, la distancia entre ellos es igual (Figura 5). (Orellana, 1972; *ELECTRE Pro software Help, Iris Instruments*, 2012).

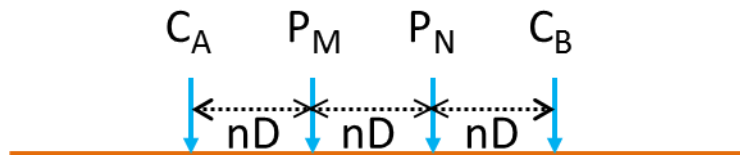


Figura 3. Colocación inicial de los electrodos para el arreglo Wenner-Schlumberger; el cual es similar a un arreglo Wenner. (*ELECTRE Pro software Help, Iris instruments*).

Posteriormente la separación se aproximará al modelo propuesto por Schlumberger, y cuando la distancia entre C_A y C_B sea 5 veces la distancia de P_M y P_N , la separación entre estos últimos P_M y P_N cambiará (Figura 4)

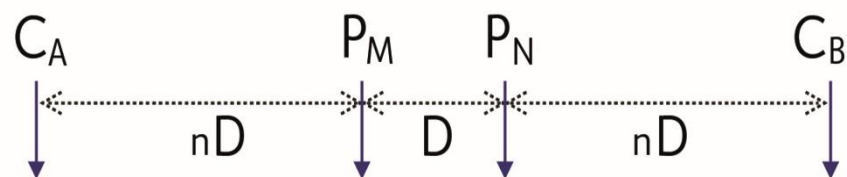


Figura 4. Muestra la disposición de los electrodos a partir del segundo espaciamento. (ELECTRE Pro software Help, Iris instruments).

Determinación de la zona de la TRE

Con base en la cartografía del Sitio de estudio y los antecedentes, se determinó que la calle Aquiles Serdán, a partir de la calle Fray Martín de Valencia hasta la calle de Las Animas es la indicada para realizar el levantamiento, ya que cumple con las siguientes características:

- Tiene una longitud que permite hacer un tendido largo.
- Cruza transversalmente la zona de hundimiento.
- Factible bloquear el tránsito vehicular (con la finalidad que la inyección de corriente y la recolección de datos sean continuos).
- La calle es recta y permite una buena adquisición de datos.

Descripción del equipo

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

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

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

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

Accesorios:

- Fuente: batería externa de 12 V
- 2 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 de la TRE

Una vez determinada las zonas donde se realizarán las TRE, se diseña el levantamiento (también llamado secuencia), que incluye establecer la separación entre electrodos, el número de electrodos usados, la continuidad y la alineación de los mismos (Figura 5).

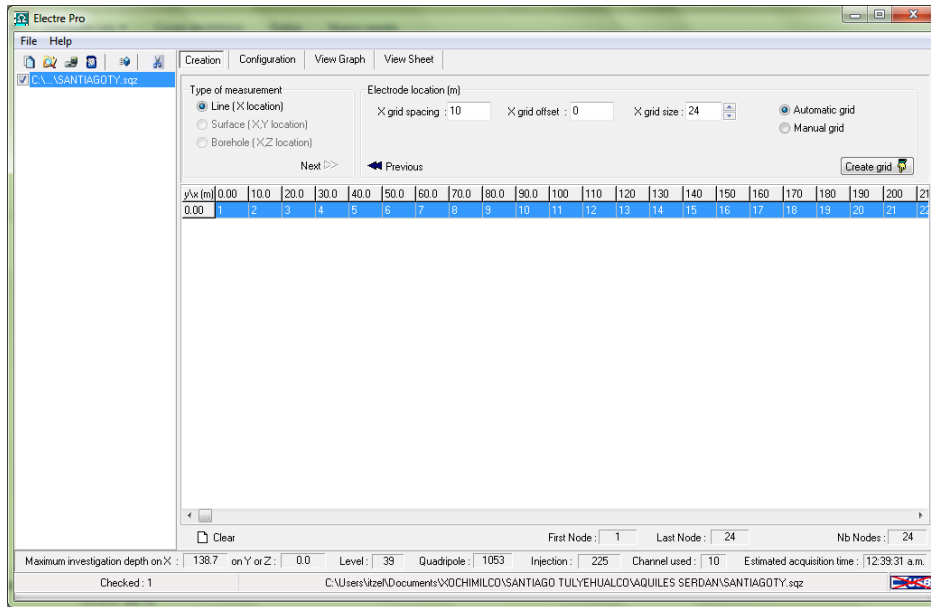


Figura 5. Ventana de asignación de separación entre electrodos para el Levantamiento (Software ELECTRE Pro, Iris Instruments, 2012).

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 6).

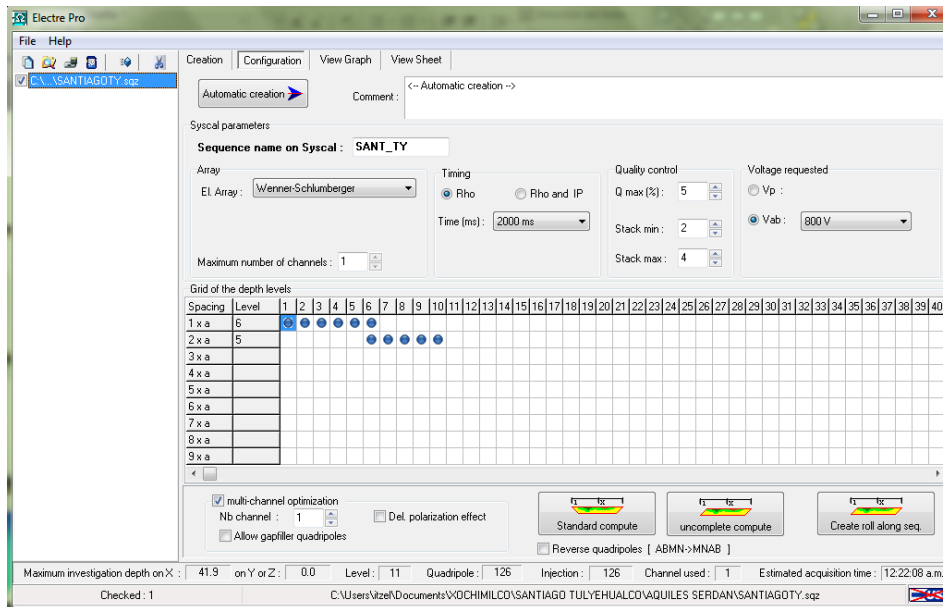


Figura 6. Ventana de configuración del levantamiento, en ella se introducen los parámetros de inyección de voltaje, el tipo de arreglo, el nombre, entre otros (ELECTRE Pro software, Iris Instruments, 2012).

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 7).

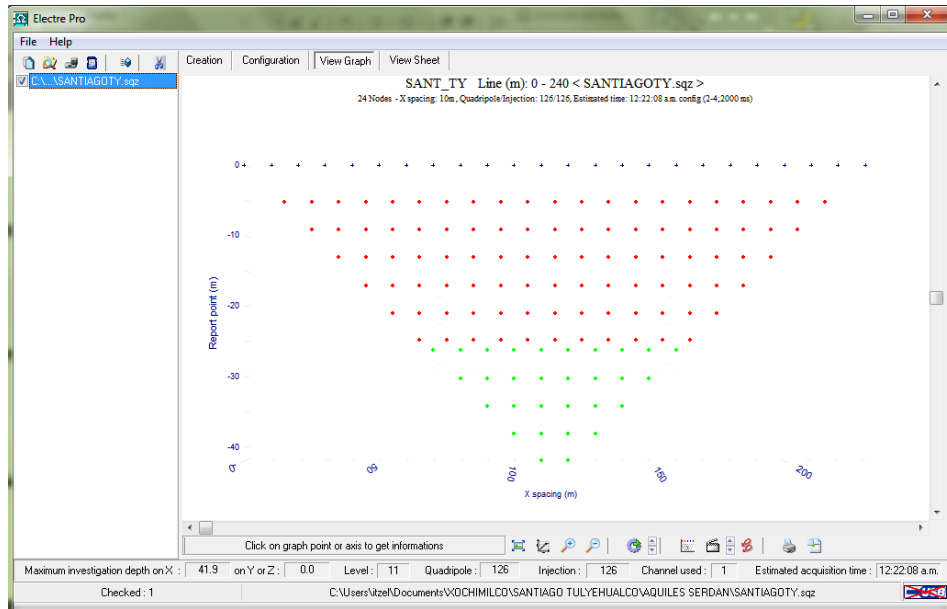


Figura 7. Ventana que muestra la gráfica preliminares del levantamiento; en la parte superior se puede observar el nombre del levantamiento y el número de electrodos a utilizarse, el espaciamento entre ellos; en la parte media se encuentra una representación de los cuadripolos; en la parte inferior (de izquierda a derecha): el nivel máximo de investigación, niveles, total de cuadripolos, canales utilizados y el tiempo estimado (ELECTRE Pro software, Iris Instruments, 2012).

Una vez verificado que el diseño del levantamiento sea el adecuado, se introduce al equipo. Las características del levantamiento N°1 o secuencia fueron las siguientes (Tabla 2):

Longitud del levantamiento	230 m
Número de electrodos utilizados	24
Separación entre electrodos	10 m
Profundidad máxima de investigación	45 m
Total de puntos de atribución	126
Puntos de inyección	126

Tabla 2. Datos del levantamiento (Fuentes: Datos obtenidos en campo y PROSYS II).

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 10 m de distancia entre cada uno.
4. Verificación de que cada electrodo que hicieran contacto con el material del subsuelo (Figura 14).
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 (Figura 14).
6. Colocación el equipo *Syscal Pro* entre los electrodos 24 y 25. Se utilizó una batería de 12 V como fuente externa (Figura 8).

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 8. Fotografías donde se observan la colocación del equipo en la zona del estudio (19.2584° N, 99.1204° W. Retorno).

Ubicación de los electrodos

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

N° de Electrodo	X	Y	Distancia (m)
1	498050.00	2129278.00	0
5	498088.00	2129268.00	40
10	498136.00	2129256.00	90
15	498184.00	2129243.00	140
20	498233.00	2129230.00	190
24	498271.00	2129220.00	230

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

Justificación del tipo de arreglo de la TRE

El arreglo Wenner-Schlumberger, es híbrido de los arreglos Schlumberger y Wenner, permite una profundidad de investigación de aproximadamente 30% de la longitud total del tendido, la señal presenta una buena intensidad, muestra gran sensibilidad a cambios horizontales y verticales, ligeramente mejor cobertura horizontal que el arreglo Wenner (Figura 9).

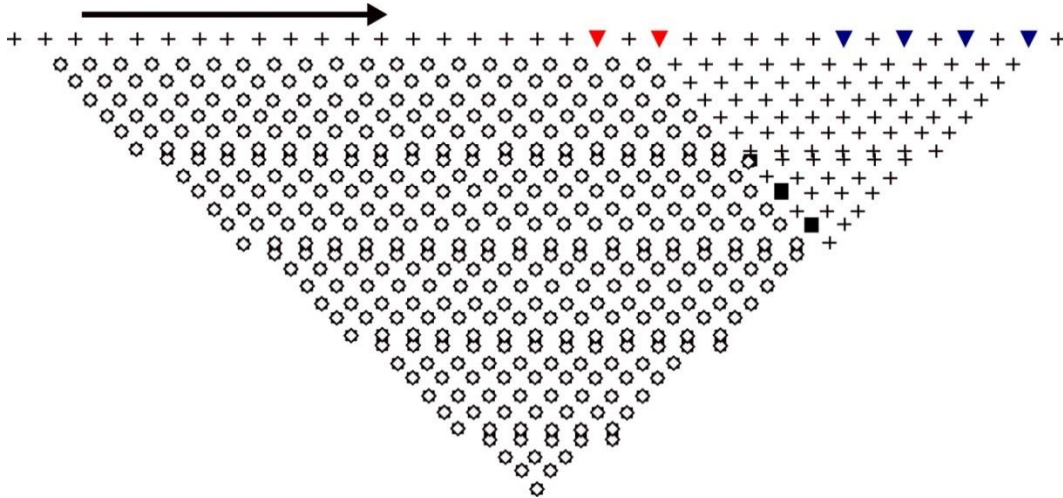


Figura 9. Modelo de puntos de atribución. Triángulos rojos, electrodos de inyección de corriente; triángulos azules, electrodos de potencial; cuadros huecos, puntos de atribución ya medidos; y cuadros negros, puntos de atribución en los que se está realizando la medición en ese momento. Las cruces son 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.

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 10).

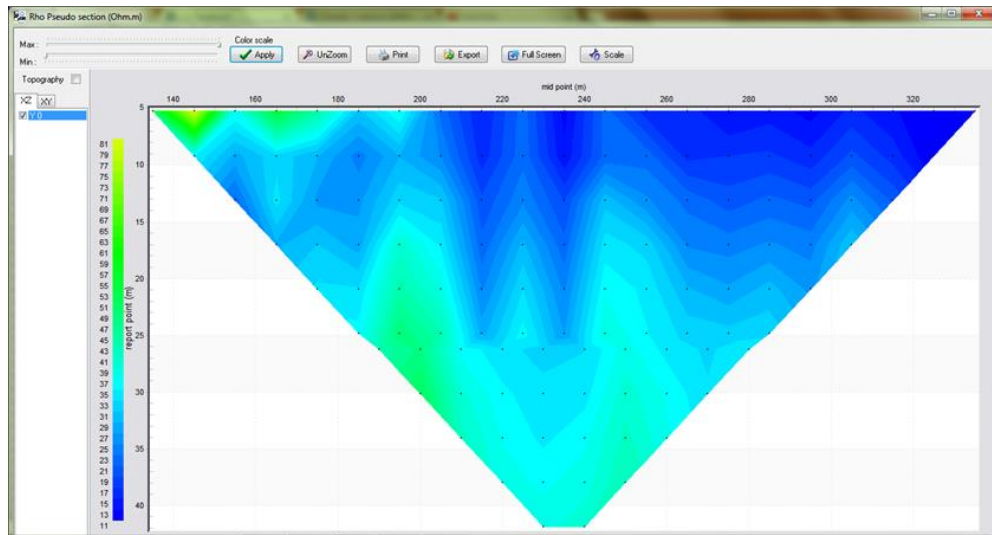


Figura 10. Gráfica de resistividad aparente sin proceso de inversión de datos levantamiento (software Prosys II, Iris Instruments, 2012).

Correcciones topográficas

Una vez obtenida la ubicación espacial de los electrodos, se obtienen datos de altimetría. Los cuales 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 11).

```

TULYEHUALCO.TRN: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
; TRN SANTIAGO TULYEHUALCO
unit=meters
1
0, 0
40, -1
110, 0
170, -1
230, -1.5

```

Figura 11. Archivo de topografía que se ingresa al programa *EarthImager* durante el proceso de inversión de datos.

Inversión de datos

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

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

El proceso de inversión de datos comienza con la propuesta de un modelo directo, que parte de las propiedades del suelo. En la Tabla 4 se muestran los parámetros que constituyen el modelo directo propuesto para el levantamiento N°1 de este estudio.

MinVoltage=0.2	Voltaje mínimo.
MinAppRes=0.01	Resistividad aparente mínima.
MaxAppRes=1000000	Resistividad aparente máxima.
MaxRepeatErr=3	Error de repetición máximo.
MaxRecipErr=10	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 12).

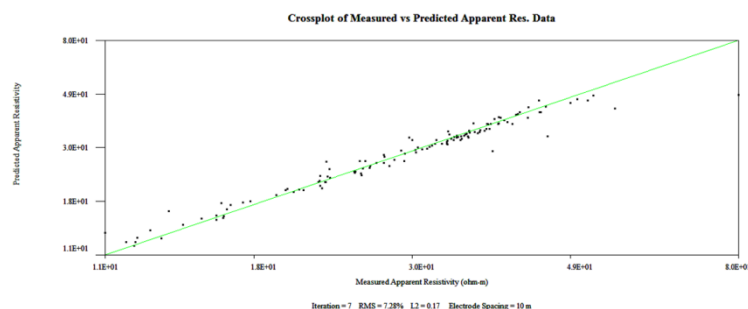


Figura 12. Gráfica cruzada de resistividad aparente del modelo directo vs resistividad aparente medida Levantamiento N°1. (software *EarthImager*, 2009).

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 (Tabla 5).

ROCAS, MINERAL, MASAS	RESISTIVIDAD (OHM.M)
Sedimentos	
Caliza	50-150
Arcilla	1-100
Gravas	100-5000
Limos	50-10 ⁷
Marga	1-100
Cuarzo	10-10 ⁸
Lutita	10-1000
Arena	500-5000
Arenisca	1-10 ⁸
Rocas ígneas y metamórficas	
Basalto	10-10 ⁷
Gabro	1000-10 ⁶
Granito	100-10 ⁶
Mármol	100-10 ⁸
Esquisto	10-10 ⁴
Pizarra	100-10 ⁷
Minerales y masas	
Plata	1.6*10 ⁻⁸
Grafito, Mineral Masivo	10 ⁻⁴ - 10 ⁻³
Galena	10 ⁻³ - 10 ⁻²
Mineral de Magnetita	1 - 10 ⁵
Esfalerita	10 ³ - 10 ⁶
Pirita	1*100
Calcopirirta	1*10 ⁻⁵ - 0.3
Cuarzo	10 ¹⁰ - 2*10 ¹⁴
Halita	10 - 10 ¹³
Agua y efectos del agua y las sales contenidos	
Agua Pura	1*10 ⁶
Agua Subterránea	1- 10 ³
Agua de Mar	0.2
20% Sal	5*10 ⁻²
Granito. 0% agua	10 ¹⁰
Granito. 0.19% agua	1*10 ¹⁰
Granito. 0.31% agua	4*10 ¹⁰

Tabla 5. Rango de variaciones de la resistividad eléctrica en rocas y minerales en Ωm (Musset, 2000)

En la TRE que resultado del levantamiento se observan tres tipos de materiales divididos en tres capas (Figura 13).

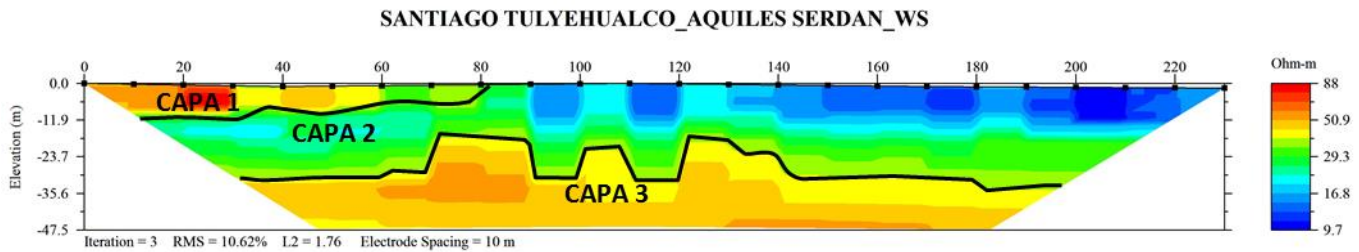


Figura 13. Imagen Resistiva del levantamiento.

Capa 1.

Inicia en los primeros 9 electrodos y su profundidad va de la superficie hasta una profundidad de 11 m, se componen de material cuya resistividad está comprendida en un rango de los 50 a los 80 Ohms m. se puede relacionar con materiales con mayor compactación, o materias como son gravas y arenas.

Capa 2.

Inicia por debajo de la capa 1 y se manifiesta a partir de los 90 m como una capa debajo del recubrimiento de las calles su resistividad eléctrica es muy baja, se encuentra comprendida en un rango de los 10 a los 50 Ohms m. se puede relacionar con materiales como son arenas, limos y arcillas, con una saturación hídrica alta. Su base se encuentra a una profundidad de 28 m, de manera casi uniforme, siguiendo una topografía preexistente.

Capa 3

Se encuentra a una profundidad de 28 y 30 metros en la cima y se extiende hasta la base del estudio, su resistividad está comprendida en un rango de 50 a 90 Ohms m. Por la resistividad eléctrica que ofrece y la geología de la zona se puede asociar a materiales como son arenas y gravas finas que sirven de base para los estratos superiores.

Discusión:

Es una zona de transición donde se pueden encontrar materiales diversos (arenas arcillas, gravas finas) con una saturación de agua alta, debido a que esta zona recibe el flujo superficial y subsuperficial de la parte superior, el flujo de agua no solo es superficial si no de manera subterránea. Como se puede observar en la imagen resistiva. Este fenómeno está determinado por una topografía preexistente.

Conclusiones y recomendaciones

Los estratos de materiales finos mantienen una estabilidad debido a la presencia determinada de agua, es por ello que resulta muy importante el mantener las condiciones de recarga hídrica a fin de mantener el equilibrio en los mismos.

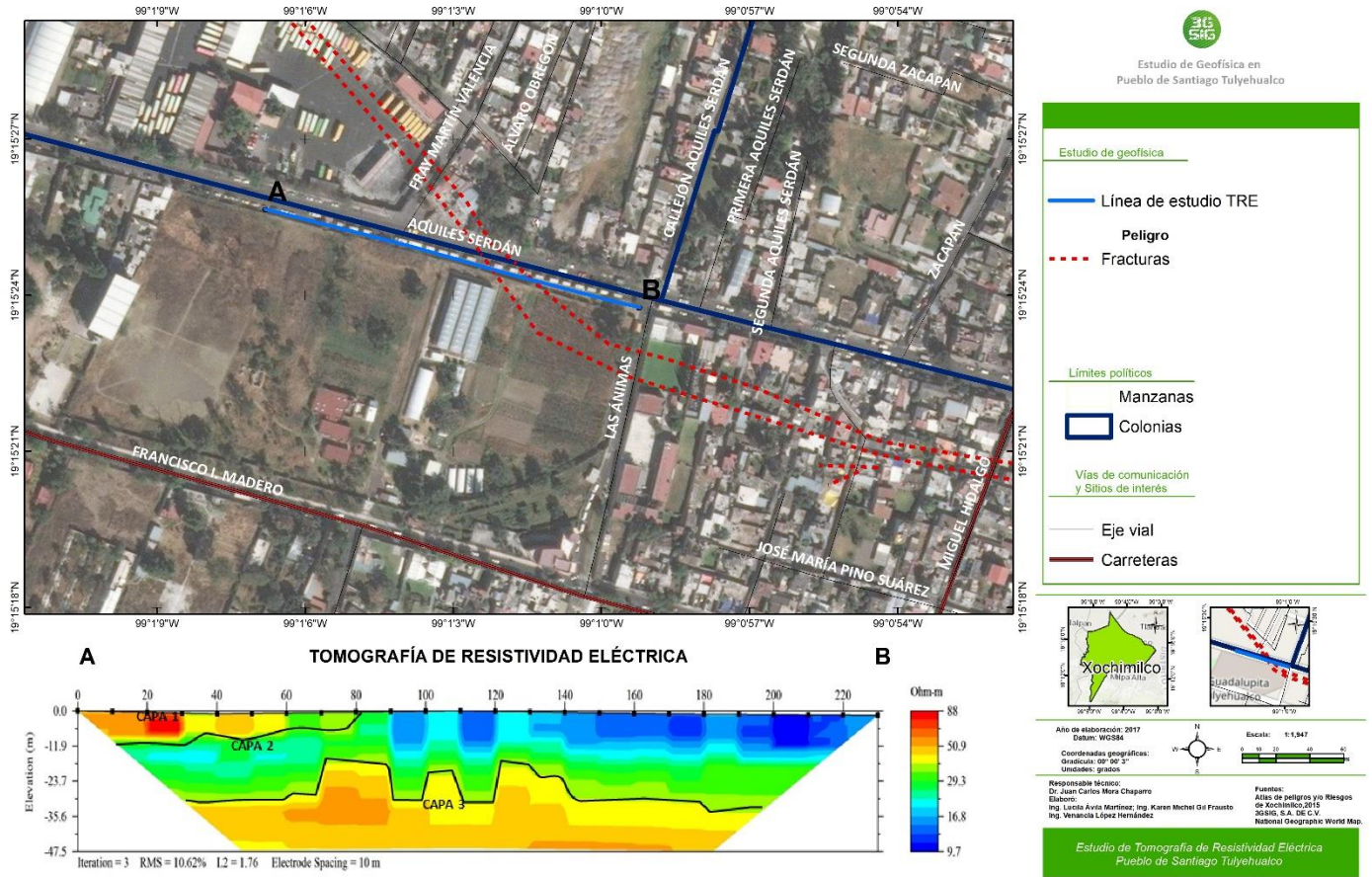


Figura 14. Mapa del estudio de la Tomografía de Resistividad Eléctrica.

Glosario de términos

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

Aluvi3n: Dep3sitos sedimentarios formados por corrientes fluviales en el cauce y llanura de inundaci3n de los valles. La composici3n granulom3trica y mineral3gica, as3 como caracter3sticas estructural-texturales varían 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 ígnea efusiva de composici3n intermedia, color oscuro, compuesta de cristales de plagioclasa intermedia, minerales máficos y frecuentemente vidrio volcánico, com3n 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 subducci3n 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 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 ańos. El diámetro 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].

Basalto: Roca ígnea 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 Hawái e Islandia. Cubre tambi3n 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 tect3nico 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, marr3n 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 erupci3n explosiva, por remoci3n 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].

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Falla: Desplazamiento de un bloque rocoso con respecto a otro colindante a éste o de ambos bloques, a través de un plano denominado «plano de falla». Las fallas son producto de esfuerzos tectónicos, producto de la epirogenésis, 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 quinético de entre 10 y 200 m/s, siendo la velocidad más comúnmente registrada, aquella que fluctúa alrededor de los 20 m/s. La extensión de las áreas que suele afectar este tipo de flujos, puede ser muy variable, y asciende desde unos 70 hasta varios cientos de kilómetros cuadrados [5].

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Abreviaturas y símbolos utilizados

Abreviatura	Significado
CD/DC	Corriente Directa / Direct Current (Por sus siglas en inglés.)
Dev.	Desviación Estándar.
E	Este.
<i>et al.</i>	(Del latín <i>et. alia</i>) y otros.
ext	Externo.
GPS	Sistema de Posicionamiento Global (por sus siglas en inglés Global Positioning System).
N	Norte.
O	Oeste.
<i>óp. cit.</i>	(Del latín <i>operare citato</i>) En la obra citada.
RMS	Raíz Cuadrada Media (Por sus siglas en inglés Root Mean Square).
Rho	Resistividad.
S	Sur.
Sp	Potencial Espontáneo (Por sus siglas en inglés spontaneous potential).
TRE	Tomografía de Resistividad Eléctrica.
.txt	Extensión de un archivo de texto.
UTM	Por sus siglas en inglés Universal Transversal de Mercator.
.urf	Extensión de un archivo de resistividad universal (Por sus siglas en inglés Universal Resistivity File).
Símbolo	Significado
π	Constante matemática con valor de 3.141592...
°	Grados.
°C	Grados Celsius.
>	Mayor que.
<	Menor que.
μV	Micro volt.
2D	Modelación en dos dimensiones.
$\Omega\text{-m}$	Ohms metros.
%	Porcentaje.
ρ_a	Resistividad Aparente.
[]	Referencias Bibliográficas.
Ω	Rho, letra del alfabeto griego usada para designar a la Resistividad Eléctrica.

A	Amperes.
cm	Centímetros.
km	Kilómetros.
km/h	Kilómetros sobre horas.
m	Metros.
m ²	Metros cuadrados.
msnm	Metros sobre el nivel del mar.
m/s	Metros sobre segundo.
mm	Milímetros.
Ma	Millones de años.
M	Mega.
s	Segundo.
W	Watts.
V	Voltios.

Bibliografía

- Auge, M. (2008). *Métodos eléctricos para la prospección de agua subterránea*. Argentina: Universidad de Buenos Aires.
- Barklay, F. *Inversión sísmica: Lectura entre líneas*. Oilfield Review: 44-66. 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.
- 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.
- Ortega G. F., et al. (1992). Carta Geológica de la República Mexicana escala 1:2,000,000: México, UNAM, COREMIN.
- Oviedo de León, A. (1970). El Conglomerado Texcoco y el posible origen de la Cuenca de México: *Revista del Instituto Mexicano del Petróleo*, 2: 5-20.
- Programa Delegacional de Desarrollo Urbano para la Delegación Gustavo A. Madero del Distrito Federal, 2010.
- Protección Civil, Secretaría de Gobernación (consulta en línea). <http://www.proteccioncivil.gob.mx>, consultado el día 10 de julio 2014.
- Perdomo, S. (2009) *Tomografía eléctrica en apoyo de la investigación arqueológica*. (Tesis de Grado). Universidad Nacional de la Plata. Argentina.
- Sepúlveda E, L. (2009). *Diseño de un Resistivímetro de corriente directa para realizar estudios de geoelectricos en los Valles Centrales*. (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico Nacional. Oaxaca, México.
- Serrano O., J. (2003). *Caracterización geofísica de filtraciones de agua en el subsuelo*. (Tesina). Universidad Politécnica de Cataluña. España.
- Strahler, A.N. (1988). *Geografía Física*. Barcelona: Ediciones Omega, S.A.
- Tarback, L. (2008). *Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física*. Madrid: Ed. Pearson-Prentice Hall.

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/punta.1>
- [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>.