
ESTUDIOS DE GEOFÍSICA (TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA) DE LAS SIGUIENTES ZONAS:

- PUEBLO DE SAN ANTONIO TECÓMITL
 - SAN BARTOLOMÉ XICOMULCO
 - SAN SALVADOR CUAUHTENCO
-

Estudio de Tomografía de
Resistividad Eléctrica

Pueblo San Antonio Tecómitl, Milpa Alta.
Calle 5 de Mayo (carretera San Antonio
Tecómitl - San Nicolás Tetelco)







ESTUDIOS DE GEOFÍSICA (TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA) DE LAS SIGUIENTES ZONAS:

- PUEBLO DE SAN ANTONIO TECÓMITL
- SAN BARTOLOMÉ XICOMULCO
- SAN SALVADOR CUAUHTENCO



Estudio de Tomografía de
Resistividad Eléctrica

Pueblo San Antonio Tecómitl, Milpa Alta.
Calle 5 de Mayo (carretera San Antonio
Tecómitl - San Nicolás Tetelco)



ÍNDICE

Introducción	7
Objetivo general	7
Objetivo específicos	7
Definición del problema geológico	7
Metodología de trabajo.....	7
Desarrollo del proyecto	8
Descripción del marco de referencia y geología de la zona.....	8
Localización	8
Geología de la zona de estudio.....	9
Geomorfología.....	9
Litología y estratigrafía.....	10
Geología estructural.....	11
Fundamentos del Método Geofísico	12
Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE).....	13
Determinación de la zona de la TRE.....	14
Descripción del equipo.....	15
Pruebas de calibración.....	16
Diseño del levantamiento de la TRE.....	16
Justificación del tipo de arreglo de la TRE	20
Procesamiento de datos.....	22
Inversión de datos	22
Interpretación de datos (Modelo geoeléctrico 2D).....	24
Resultados.....	27
Capa 1	27
Capa 2	27
Capa 3	27
Conclusiones.....	27
Recomendaciones	30
Glosario de términos	33
Abreviaturas y símbolos utilizados	41
Bibliografía	42
Bibliografía para el glosario de términos	44
Créditos.....	45

INTRODUCCIÓN

La delegación Milpa Alta a través de la dirección de Protección civil solicitó un estudio Geofísico (Tomografía de Resistividad Eléctrica) con atención y en seguimiento a la problemática presentada el día 10 de mayo cuando una ruptura de tubo de agua potable de 36 pulgadas. Dicha problemática se presentó sobre la carretera principal de San Antonio Tecómitl a San Nicolas Tetelco (Tláhuac), en donde se presentó un socavón de 30 metros de largo, 3 metros de ancho y 3 metros de profundidad, así como la afectación de 4 viviendas y una grieta de 150 metros de largo en la parte norte y la parte sur una grieta de la misma dimensión.

OBJETIVO GENERAL

Analizar las condiciones en que se encuentran los materiales y estructuras en el subsuelo del sitio de estudio después de la fuga de agua y reparación de la tubería de la red hidráulica.

OBJETIVO ESPECÍFICOS

- 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

En este sitio se presentó una fractura 3 metros en la parte más ancha, una profundidad de 4 metros y 400 metros de longitud. Afectando viviendas, terrenos de cultivo y vías de comunicación., la cual se extendió por todo un terreno de cultivo y hasta la calle 5 de Mayo del Poblado de San Antonio Tecómitl, donde se encuentra una vivienda que fue afectada por un hueco que se formó por debajo de la misma. Este estudio se realizó para tratar de definir la profundidad de la estructura y cuáles son las condiciones de los materiales del subsuelo y su relación con la misma.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Una vez identificados los fenómenos que se manifiestan en el sitio de estudio Calle 5 de Mayo del Poblado de San Antonio Tecómitl, 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 en el documento 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.

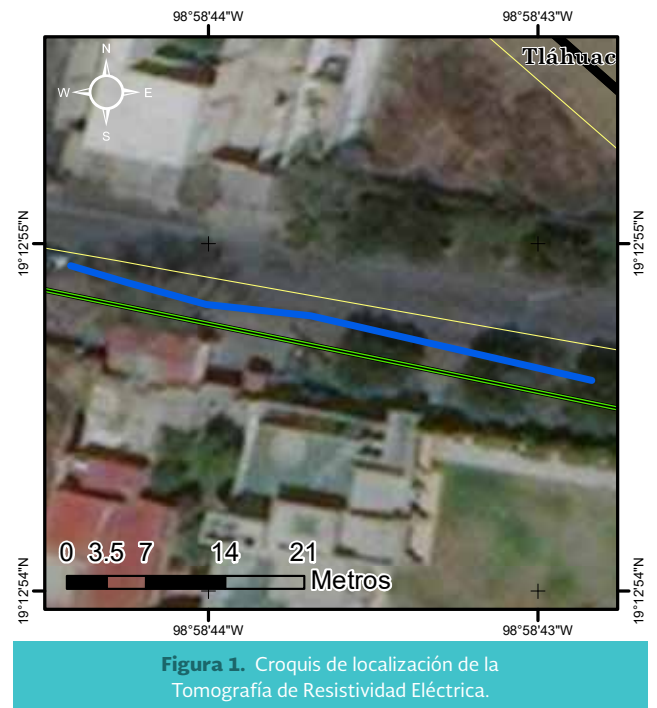
Interpretación de datos (modelo geoelectrico 2D). En esta etapa se relacionaron las propiedades resistivas de los materiales geológicos del modelo 2D.

DESARROLLO DEL PROYECTO

Descripción del marco de referencia y geología de la zona

Localización

El sitio de estudio se encuentra ubicado en la calle 5 de mayo en el poblado de San Antonio Tecómitl la delegación Milpa Alta.



Geología de la zona de estudio

Geomorfología

De acuerdo al Atlas de Riesgo de la Delegación Milpa Alta (Mora, 2011) las principales geoformas de la delegación se pueden agrupar en 2 tipos principales: la sierra volcánica (Sierra Chichinautzin, figura 2) la cual abarca más del 95% de la superficie total y la meseta basáltica, esta última sólo está presente en algunas porciones restringidas del oriente de la delegación y en la franja localizada entre los volcanes Cuauhtzin y Teuhtli.

El Campo Volcánico Sierra Chichinautzin (CVSC), uno de los más grandes de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM), se sitúa al este del sector central, donde conforma la parte frontal del arco volcánico (Lorenzo, 2016). Es un altiplano volcánico de lineamiento E-W situado en la divisoria continental que separa la Cuenca de México al N de los valles de Cuernavaca y Cuautla al S. Al W limita con la Sierra de Las Cruces-Zempoala, donde sufre un estrangulamiento para después extenderse más hacia el W hasta las faldas del Nevado de Toluca, y al E con la Sierra Nevada, llegando hasta las estribaciones del Popocatepetl y el Iztaccíhuatl. Su vulcanismo es de tipo calco-

alcalino, compuesto fundamentalmente por andesitas, andesitas basálticas y dacitas, con basaltos secundarios (supra).

Los volcanes que se ubican en la delegación, con sus correspondientes alturas son (Figura 2, recuadro color amarillo):

- Volcán Tláloc 3.680 msnm
- Volcán Cuauhtzin 3.510 msnm
- Volcán Chichinautzín 3.490 msnm
- Volcán San Bartolo 3.200 msnm
- Volcán Teuhtli 2.710 msnm



Figura 2. Croquis de ubicación de Milpa Alta con relación a la Sierra Chichinautzin (Tomado y modificado de Lorenzo, 2016).

Litología y estratigrafía

Lorenzo (2016) nos describe que el basamento de la zona está compuesto por una secuencia de más de 3000 metros de espesor de calizas y dolomías clásticas marinas del Cretácico pertenecientes a la Plataforma Guerrero-Morelos, plegada durante la orogenia Laramídica a más de 1000 metros sobre su posición original, sobre la que se deposita en el Terciario Inferior y Medio el Grupo Balsas, compuesto por depósitos continentales evaporíticos y volcanoclásticos (supra). Tras un episodio volcánico en el Oligoceno que forma el flujo de lava de Temixco, se depositan en el Mioceno la formación Tepoztlán, caracterizada por unos 1000 metros de espesor de depósitos laháricos volcanoclásticos de composición intermedia, y una secuencia máfica compuesta por flujos de lava andesítico-basálticos. Finalmente tiene lugar el emplazamiento de las formaciones Sierra de Las Cruces y Cuernavaca, formaciones coetáneas compuestas por flujos de lava andesíticos a dacíticos y flujos piroclásticos, sobre las cuales se depositan los productos del CVSC.

López (2007) con respecto a la litología menciona lo siguiente:

En la formación del Chichinautzin (Qc) las lavas de esta unidad en general son extensas, vesiculares, masivas o lajadas, estas lavas tienen una composición principalmente andesítico-basáltico y andesítica, principalmente de grano fino y medio, con fenocristales de olivino y piroxenos en

matriz vítrea y microcristalina. El espesor máximo que se le ha asignado a esta unidad es de 1,800 metros y se le asignó una edad por medio de polaridad magnética normal de 700,000 años.

Los espesores máximos de Depósitos aluviales (Qal) son de alrededor de 500 m, en las zonas norte y sur incluyen material poco consolidado, compuesto por fragmentos con tamaño de grava, arena, limo y arcilla conteniendo localmente marga, los pozos para extracción de agua en el sector meridional de la Cuenca de México muestran gran heterogeneidad en la granulometría de estos depósitos. Descansan con discordancia sobre los depósitos piroclásticos y clásticos del Plioceno y localmente sobre rocas volcánicas más antiguas y sedimentarias del Cretácico, se interdigitan con formaciones volcánicas de la misma edad, se propone que su edad es del Pleistoceno al Holoceno.

Depósitos lacustres (Qla) se agrupan en sedimentos clásticos y productos piroclásticos relacionados con la actividad volcánica del Popocatepetl y de la Sierra Chichinautzin, los cuales se depositaron en ambiente lacustre, estos depósitos se extienden desde Zumpango hasta Chalco y desde Texcoco hasta el Cerro de Chapultepec con espesores que varían de 30 a 300 metros, los mayores se presentan en las planicies de la Ciudad de México, Texcoco y Chalco y disminuyen hacia las márgenes de las planicies.

Geología estructural.

Los edificios del CVSC se han considerado tradicionalmente como alineados a grandes rasgos en dirección E-W tras analizar estadísticamente el emplazamiento de los volcanes, recogen más de dos lineamientos preferenciales (Lorenzo, 2016). Siebe *et al.* (citado en Lorenzo, 2016) interpreta que los lineamientos E-W obedecen a pequeñas fracturas perpendiculares a la dirección de esfuerzos predominantes N-S a partir de la cual se emplazan los grandes volcanes poligenéticos, como es el caso de la Sierra de Las Cruces o la Sierra Nevada. Estas pequeñas fracturas serían paralelas a dos grandes lineamientos E-W claramente reconocibles e interpretados como fallas normales: la Falla de La Pera-Tenango al S, y la Falla de Xochimilco al N (Figura 3). La falla de La Pera-Tenango, además, acomoda la elevación sufrida por la Plataforma Guerrero-Morelos durante la orogenia Laramídica. Estas fallas no sólo delimitan el *horst* donde se sitúa el altiplano volcánico de la Sierra Chichinautzin, cuyas elevaciones máximas superan los 3,500 metros, sino que también habrían funcionado como vías preferentes de ascenso de magma.

La Figura 3 (Tomada de González, 2015) es un modelo de elevación de la Cuenca de México en donde se recoge la ubicación

y el nombre de los pozos profundos perforados en la Cuenca de México (círculos rojos): Copilco-1; Roma-1; Tulyehualco-1; Mixhuca-1; Texcoco-1 y SLT (San Lorenzo Tezonco).

También se muestran algunas de las estructuras geológicas: (1) Pilar (*horst*) de Chichinautzin, (2) Sistema de fallas de Xochimilco y Xicomulco, (3) sistema de Fallas de la Pera, (4) Graben de Santa Catarina (5) Falla Mixhuca, (6) Sistema de Fallas Tenango, (7) Falla Contreras, (8) Sistema de Fallas de Ixtlahuaca y Otomí, (9) Segmento sur del Sistema de Fallas Apan-Tláloc, (10) Falla Texcoco y 11) Sistema de fallas Tizayuca.

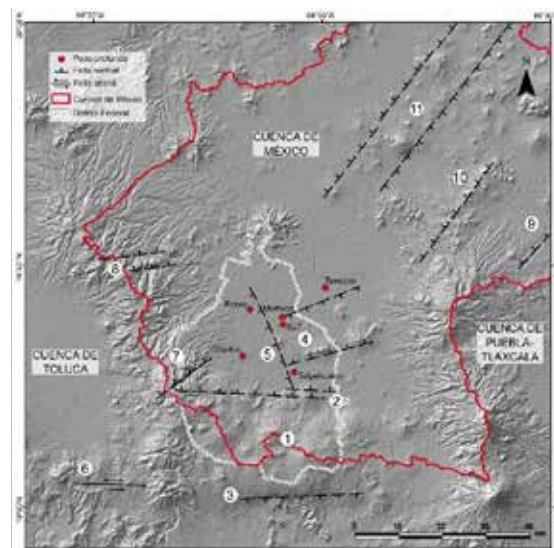


Figura 3. Fallas presentes en la Cuenca de México (Tomada de González, 2015).

Geología de la zona

De acuerdo a la carta geológica de la Ciudad de México (E14) la zona de San Antonio Tecómitl está integrada por materiales del Cuaternario, principalmente basalto-andesita, andesita basalto y aluvi3n, este ultimo integra la zona lacustre del 3rea.

Fundamentos del

M3todo Geof3sico

Los m3todos geof3sicos exploran de manera indirecta las propiedades f3sicas existentes en los materiales que componen el subsuelo. Entre las propiedades estudiadas se encuentran la resistividad el3ctrica, es decir, la oposici3n que presentan los materiales al flujo de una corriente el3ctrica a trav3s de ellos. La resistividad var3a en funci3n del contenido de agua (la salinidad y la distribuci3n de ambas en los poros) de la presi3n 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 i3nicos de resistividad muy variable. Llamamos resistividad (ρ) a la resistencia espec3fica de cada material y en nuestro caso est3 dada por la siguiente f3rmula (Auge, 2008):

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

Donde:

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

I , es la corriente el3ctrica y se mide en amperes.

k , es la constante geom3trica.

De acuerdo a la disposici3n de los electrodos la constante geom3trica K se obtendr3 con diferentes f3rmulas

Para obtener k en el arreglo Wenner usamos la siguiente f3rmula:

$$k=2\pi a$$

Donde:

π , es la constante matem3tica con valor de 3.141592...

a , es la separaci3n que existe entre electrodos y es constante, (Denotado en el esquema con la letra D ; Figura 5).

n , es el n3mero de niveles en el cual se profundiza.

El arreglo Schlumberger utiliza la siguiente f3rmula:

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

Donde:

π , es la constante matem3tica 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 ; Figura 5).

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 5).

Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

La Tomografía de Resistividad Eléctrica es un método de resistividad multielectrónico,

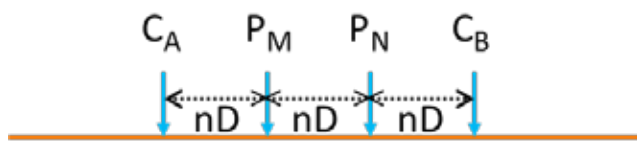


Figura 5. Colocación inicial de los electrodos para el arreglo Wenner-Schlumberger; el cual es similar a un arreglo Wenner. (ELECTRE Pro software Help, Iris instruments).

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).

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 6).

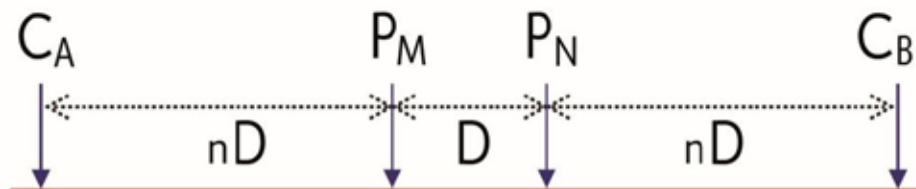


Figura 6. Muestra la disposición de los electrodos a partir del segundo espaciamiento. (ELECTRE Pro software Help, Iris instruments).

Antecedentes

El pasado mes de mayo se registró la ruptura y fuga de agua en la red hidráulica provocando la aparición de un socavón (Figura 7) de aproximadamente 3 metros en la parte más ancha y una profundidad de 4 metros y su longitud fue de 400 metros. Afectando viviendas, terrenos de cultivo y vías de comunicación. La zona en donde se presentaron estas estructuras se encuentra en la calle 5 de mayo (carretera San Antonio Tecómilt - San Nicolás Tetelco)

Determinación de la zona de la TRE

Con base en los antecedentes y la información otorgada por Protección Civil Delegacional, se determinó que la calle 5 de Mayo, entre la calle José María Morelos y la calle Arboledas es la indicada para realizar el estudio, ya que cumple con las siguientes características:



Figura 7. Fotografías que muestran las afectaciones en ocasionadas por la estructura que se originó a causa de la fuga de agua A) Zonas de cultivo; B) Vías de comunicación; C) Viviendas.

- Atraviesa la estructura de manera perpendicular a la misma
- Tiene una longitud que permite hacer un tendido largo.
- 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.

Accesorios:

- Fuente: batería externa de 12 V
- 48 electrodos impolarizables
- 4 carretes de cables de superficie de 12 conexiones cada una con espaciamientos de 10 m
- Computadora portátil que cuente con los programas de *ELECTRE Pro* y *Prosys II*, *EarthImager*, *Surfer 9* y *ComsysPro*
- Navegador GPS
- Rotomartillo
- Conos de señalamientos
- Cronómetro
- Cinta métrica
- Marro
- Lápiz
- Libreta

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

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

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 8).

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 9).

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 10).

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

Longitud del levantamiento	470 m
Número de electrodos utilizados	48
Separación entre electrodos	10m
Profundidad máxima de investigación	90 m
Total de puntos de atribución	565
Puntos de inyección	565

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

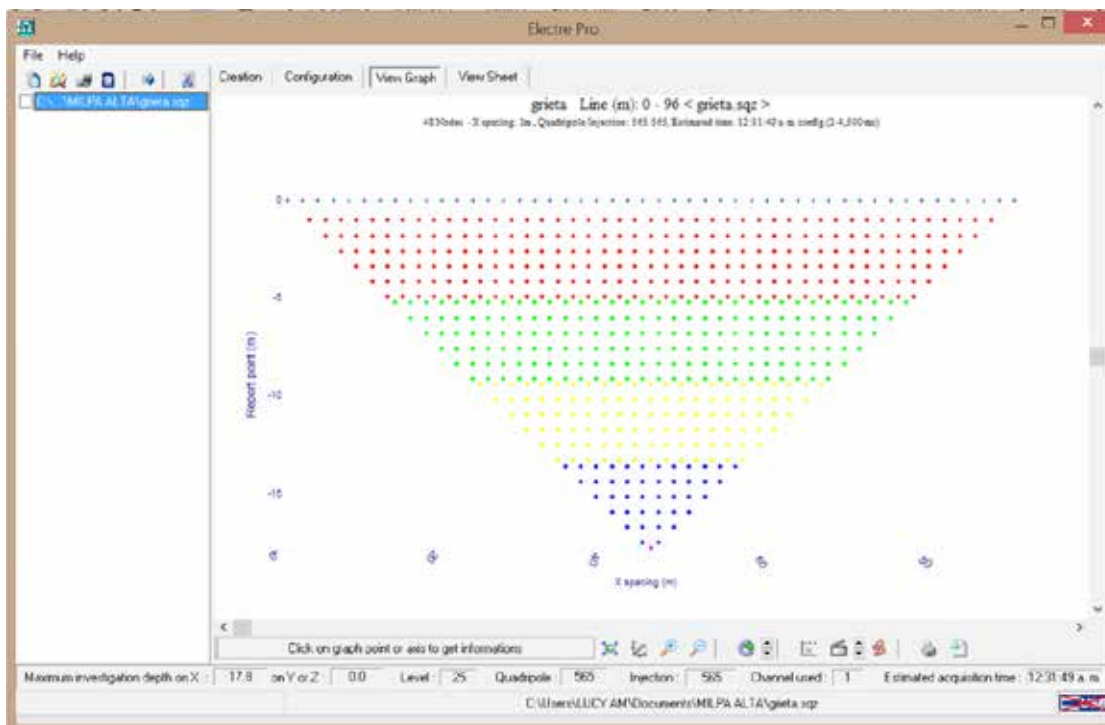


Figura 10. Ventanas que muestran la gráfica preliminar del levantamientos, en la parte superior se puede observar el nombre del levantamiento y el número de electrodos a utilizarse, el espaciamiento entre ellos; en la parte media se encuentra una representación de los cuadrípolos; en la parte inferior (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).

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 2 m de distancia entre cada uno, respectivamente.
4. Verificación de que cada electrodo que hicieran contacto con el material del subsuelo (Figura 11).
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 11).
6. Colocación el equipo *Syscal Pro* entre los electrodos 24 y 25. Se utilizó una batería de 12 V como fuente externa (Figura 7).
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 11. Fotografías donde se observan electrodos colocados en contacto con el terreno y el equipo funcionando (19. 215225° N, 98. 978804° W. Calle: 5 de mayo).

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	502207	2124646	0
3	502211	2124646	4
6	502216	2124644	10
9	502222	2124643	16
12	502228	2124642	22
15	502235	2124641	28
18	502241	2124640	34
21	502247	2124638	40
24	502253	2124636	46

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.

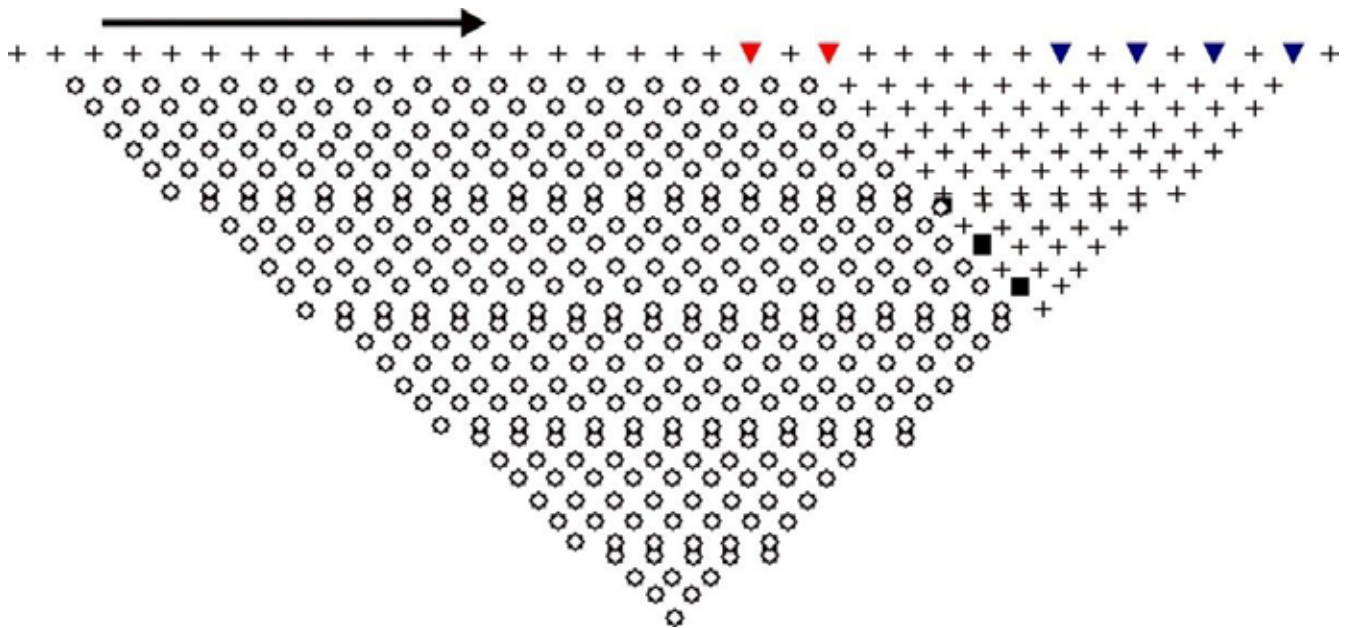


Figura 12. Modelo de puntos de atribución. Triángulos rojos, electrodos de inyección de corriente; triángulos azules, electrodos de potencial; cuadros huecos, puntos de atribución ya medidos; y cuadros negros, puntos de atribución en los que se está realizando la medición en ese momento. Las cruces son 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 13).

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 14).

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

#	Spa1	Spa2	Spa3	Spa4	Rho	Dev	M	Sp	Vp	In	RsCheck	Date
1	0.00	2.00	4.00	6.00	112.45	0.07	0.00	15.12	-1471.032	493.111	1.22	16/07/2016 05:30:1...
2	0.00	2.00	6.00	8.00	127.24	0.03	0.00	9.26	415.074	493.111	1.22	16/07/2016 05:30:1...
3	0.00	2.00	8.00	10.00	84.95	0.07	0.00	0.47	119.589	493.111	0.86	16/07/2016 05:30:1...
4	0.00	2.00	10.00	12.00	69.42	0.00	0.00	53.06	-45.437	493.111	0.73	16/07/2016 05:30:1...
5	0.00	2.00	12.00	14.00	53.28	0.14	0.00	15.42	19.912	493.111	0.96	16/07/2016 05:30:1...
6	0.00	2.00	14.00	16.00	36.89	0.21	0.00	-24.13	9.617	493.111	0.76	16/07/2016 05:30:1...
7	0.00	4.00	16.00	20.00	29.54	0.15	0.00	27.06	-17.705	453.905	0.94	16/07/2016 05:30:2...
8	0.00	4.00	20.00	24.00	12.89	0.54	0.00	-6.41	3.880	453.905	0.75	16/07/2016 05:30:2...
9	0.00	4.00	24.00	28.00	8.58	1.02	0.00	19.78	1.476	453.905	0.67	16/07/2016 05:30:2...
10	0.00	4.00	18.00	22.00	14.53	0.20	0.00	-0.80	6.113	454.908	1.61	16/07/2016 05:30:2...
11	0.00	4.00	22.00	26.00	-25.37	0.19	0.00	100.26	6.069	454.908	0.48	16/07/2016 05:30:2...
12	0.00	4.00	26.00	30.00	84.75	0.20	0.00	-5.12	-11.444	454.908	1.20	16/07/2016 05:30:2...
13	0.00	6.00	28.00	34.00	3.28	1.60	0.00	47.30	0.912	438.441	0.64	16/07/2016 05:30:2...
14	0.00	6.00	34.00	40.00	57.04	0.06	0.00	22.37	13.003	438.441	0.27	16/07/2016 05:30:3...
15	0.00	6.00	20.00	26.00	49.30	0.14	0.00	-20.49	13.429	438.267	1.11	16/07/2016 05:30:4...
16	0.00	6.00	26.00	32.00	65.94	0.14	0.00	80.70	7.362	438.267	0.27	16/07/2016 05:30:4...
17	0.00	6.00	32.00	38.00	114.21	0.06	0.00	75.45	18.130	437.240	0.45	16/07/2016 05:30:4...
18	0.00	6.00	38.00	44.00	23.59	0.05	0.00	33.02	2.200	437.240	0.26	16/07/2016 05:30:4...
19	2.00	4.00	6.00	8.00	186.29	0.05	0.00	-19.27	-1888.796	529.908	1.68	16/07/2016 05:30:5...
20	2.00	4.00	8.00	10.00	80.30	0.00	0.00	-1.48	277.379	529.908	0.96	16/07/2016 05:30:5...
21	2.00	4.00	10.00	12.00	71.16	0.06	0.00	45.19	-86.328	529.908	0.73	16/07/2016 05:30:5...
22	2.00	4.00	12.00	14.00	56.35	0.03	0.00	15.03	-39.931	529.908	0.86	16/07/2016 05:30:5...
23	2.00	4.00	14.00	16.00	44.24	0.10	0.00	-22.18	-17.456	529.908	0.79	16/07/2016 05:30:5...
24	2.00	4.00	16.00	18.00	37.96	0.20	0.00	15.03	-9.267	529.908	1.72	16/07/2016 05:30:5...
25	2.00	6.00	18.00	22.00	27.24	0.07	0.00	4.06	-17.766	497.254	1.62	16/07/2016 05:30:0...
26	2.00	6.00	22.00	26.00	-4.29	1.26	0.00	96.02	1.410	497.254	0.40	16/07/2016 05:30:0...
27	2.00	6.00	26.00	30.00	39.82	0.41	0.00	-3.50	7.903	497.254	1.20	16/07/2016 05:30:0...
28	2.00	6.00	30.00	34.00	19.97	0.12	0.00	-52.29	-4.099	497.254	0.76	16/07/2016 05:30:0...
29	2.00	6.00	34.00	38.00	7.91	1.32	0.00	18.93	1.621	497.254	0.47	16/07/2016 05:30:0...
30	2.00	6.00	38.00	42.00	36.24	0.31	0.00	40.62	9.700	497.254	0.64	16/07/2016 05:30:0...
31	2.00	8.00	30.00	36.00	-33.26	0.27	0.00	-21.02	8.836	495.031	1.11	16/07/2016 05:30:1...
32	2.00	8.00	36.00	42.00	34.18	0.34	0.00	79.39	4.888	495.031	0.27	16/07/2016 05:30:1...
33	2.00	8.00	42.00	48.00	57.97	0.25	0.00	78.95	12.912	495.031	0.45	16/07/2016 05:30:2...
34	2.00	8.00	48.00	54.00	11.89	0.98	0.00	33.06	1.467	495.031	0.26	16/07/2016 05:30:2...
35	2.00	8.00	54.00	60.00	-50.29	0.16	0.00	21.17	9.999	491.696	0.26	16/07/2016 05:30:2...
36	2.00	8.00	60.00	66.00	30.92	0.09	0.00	19.45	-3.245	491.696	0.26	16/07/2016 05:30:2...
37	4.00	6.00	6.00	10.00	77.89	0.00	0.00	-333.90	842.957	456.173	1.57	16/07/2016 05:30:4...
38	4.00	6.00	10.00	12.00	75.07	0.03	0.00	16.90	232.536	456.173	0.73	16/07/2016 05:30:4...
39	4.00	6.00	12.00	14.00	67.90	0.08	0.00	15.74	-82.161	456.173	0.96	16/07/2016 05:30:4...
40	4.00	6.00	14.00	16.00	59.36	0.08	0.00	-21.82	35.916	456.173	0.79	16/07/2016 05:30:4...
41	4.00	6.00	16.00	18.00	62.25	0.06	0.00	18.11	19.063	456.173	1.72	16/07/2016 05:30:4...

Figura 13. Ventana que muestran secciones de datos del levantamientos (software *Prosys II*, Iris Instruments, 2012).

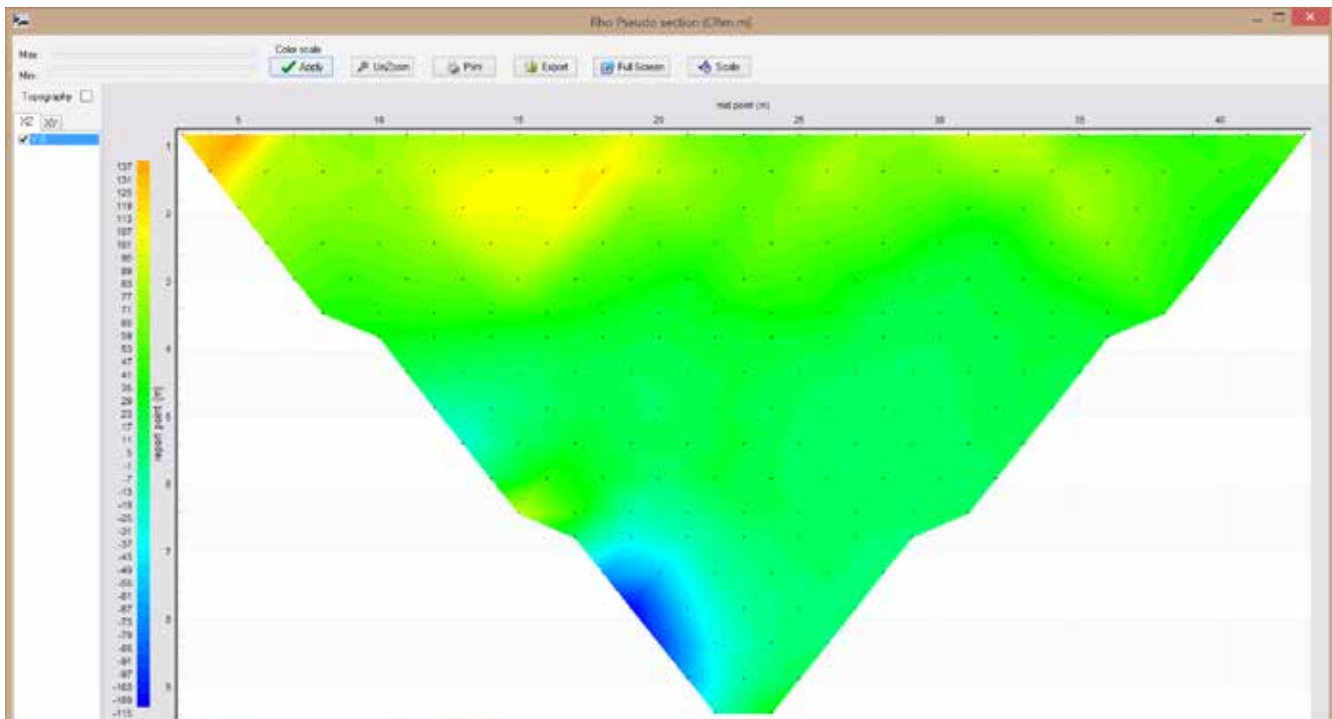


Figura 14. Gráfica de resistividad aparente sin proceso de inversión de datos (software Prosys II, Iris Instruments, 2012).

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 de este estudio.

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 15).

MinVoltage=-1	Voltaje mínimo.
MinAppRes=-1	Resistividad aparente mínima.
MaxAppRes=1000	Resistividad aparente máxima.
MaxRepeatErr=10	Error de repetición máximo.
MaxRecipErr=5	Error de repetición recíproco.
RemoveNegERT=1	Remover valores negativos de la TRE.

Tabla 4. Parámetros para construir el modelo directo del proceso de inversión de datos (fuente: software EarthImager, 2009).

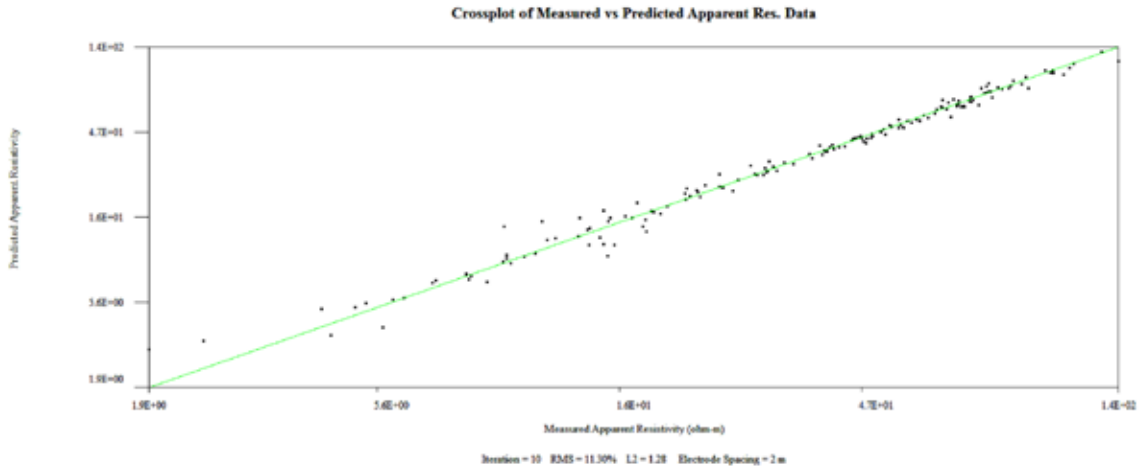


Figura 15. Gráfica cruzada de resistividad aparente del modelo directo vs resistividad aparente medida. (software EarthImager, 2009).

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 (Tabla 6).

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

Tabla 6. Rango de variaciones de la resistividad eléctrica en rocas y minerales en Ωm (Musset, 2000)

ROCAS, MINERAL, MASAS	RESISTIVIDAD (OHM.M)
Minerales y masas	
Plata	$1.6 \cdot 10^{-8}$
Grafito, Mineral Masivo	$10^{-4} - 10^{-3}$
Galena	$10^{-3} - 10^{-2}$
Mineral de Magnetita	$1 - 10^5$
Esfalerita	$10^3 - 10^6$
Pirita	$1 \cdot 100$
Calcopirita	$1 \cdot 10^{-5} - 0.3$
Cuarzo	$10^{10} - 2 \cdot 10^{14}$
Halita	$10 - 10^{13}$
Agua y efectos del agua y las sales contenidos	
Agua Pura	$1 \cdot 10^6$
Agua Subterránea	$1 - 10^3$
Agua de Mar	0.2
20% Sal	$5 \cdot 10^{-2}$
Granito. 0% agua	10^{10}
Granito. 0.19% agua	$1 \cdot 10^{10}$
Granito. 0.31% agua	$4 \cdot 10^{10}$

Tabla 6 (Continuación). Rango de variaciones de la resistividad eléctrica en rocas y minerales en Ωm (Muset, 2000)

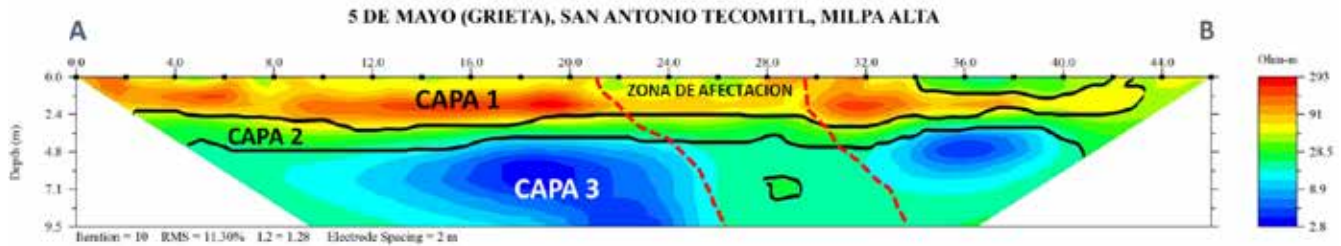


Figura 16. Imagen resistiva.

RESULTADOS

En la TRE que resultó se observan tres tipos de materiales divididos en tres capas: 1, 2 y 3 (Figura 16).

Capa 1

Se inicia debajo de la carpeta asfáltica y hasta una profundidad de 3 m, representan las resistividades altas se infiere que se puede tratar de una mezcla de gravas con arcillas compactas.

Capa 2

La cima de esta capa está localizada a 2 y 3 metros y su base se localiza hacia los 5 m de profundidad. Los tonos verdes

representan resistividades de 10 – 80 ohm arcillas semi-compacta a arcillas compactas

Capa 3

Los tonos azules con bajas resistividades representan arcillas muy blandas, con un alto contenido de agua. Esta capa se localiza a una profundidad de 5 m; su distribución horizontal no es continua en la zona de afectación por lo que podemos inferir que algunas de las parámetros hidráulicos se han modificado después del evento de fuga y agrietamiento.

CONCLUSIONES

Con la TRE realizada se identificó que los materiales en el subsuelo de la zona

de estudio se encuentran en capas bien definidas (Capas 1, 2 y 3) cuyos contactos son paralelos entre sí. Estructura formada en la superficie es un cauce de erosión formado por el flujo del agua a muy alta presión. En el punto de inicio de la fuga (A) el agua sale a presión y fluye hacia el sur (B) y hacia el norte (C). Al fluir hacia el sur se encuentra con los cimientos de dos viviendas, los cual bloquea su paso y permite se incremente la profundidad, posteriormente su fuerza erosiva le permite avanzar por debajo de las construcciones hasta el terreno de cultivo (B). Por el otro lado el flujo del agua erosiona los materiales hacia el norte (C). Durante su recorrido choca con los cimientos de una construcción y se desvía un poco. Posteriormente continua su flujo perdiendo fuerza, al perder fuerza erosiva el agua comienza a formar estructuras

cóncavas y convexas (meandros), como se observa en la figura en el punto C. Figura 17.

La longitud hacia C es mayor respecto a B, debido a que los materiales están más sueltos y fácilmente erosionables. El agua al fluir produce la erosión y el transporte de materiales, posteriormente se filtra, es por ello que solo quedo la estructura de erosión y nada de agua acumulada.

La profundidad máxima de la estructura corresponde a la profundidad de la tubería, lo que indica que la erosión fue hacia los lados y no de forma vertical. Se profundizo por debajo de la vivienda, debido a que encontró un impedimento para seguir fluyendo, lo que ocasiono una mayor erosión local y la mayor profundidad, posteriormente venció la resistencia de los



Figura 17. Figura de la línea de erosión.

materiales y prosiguió con una menor fuerza hacia los terrenos de cultivo (B).

En la imagen de la Figura 18, se hace una correlación entre la información litológica y estratigráfica obtenida de los pozos cercanos al lugar del evento de fuga de agua. En esta imagen se puede observar donde se encuentra el límite de las colada de lava (basaltos) y la zona de depósitos sedimentarios gravas, arenas y arcillas. En el lugar donde se realizó la tomografía (línea amarilla en la calle, a una profundidad e 23m no se encontró la presencia de basalto,

solo materiales sedimentarios compactados (capa 1 y 2). Ante la fuga de agua este material, capa 1, fue fácilmente erosionable y removido de su lugar provocando (alta presión) la formación de un cauce de erosión a ambos lados de la zona de la fuga de agua. La profundidad del cauce es muy similar a la profundidad en la que se encontraba la línea de conducción de agua, lo que indica una fuerza de erosión mayor en sentido horizontal que vertical, a ambos lados del punto de la falla de la línea de conducción.

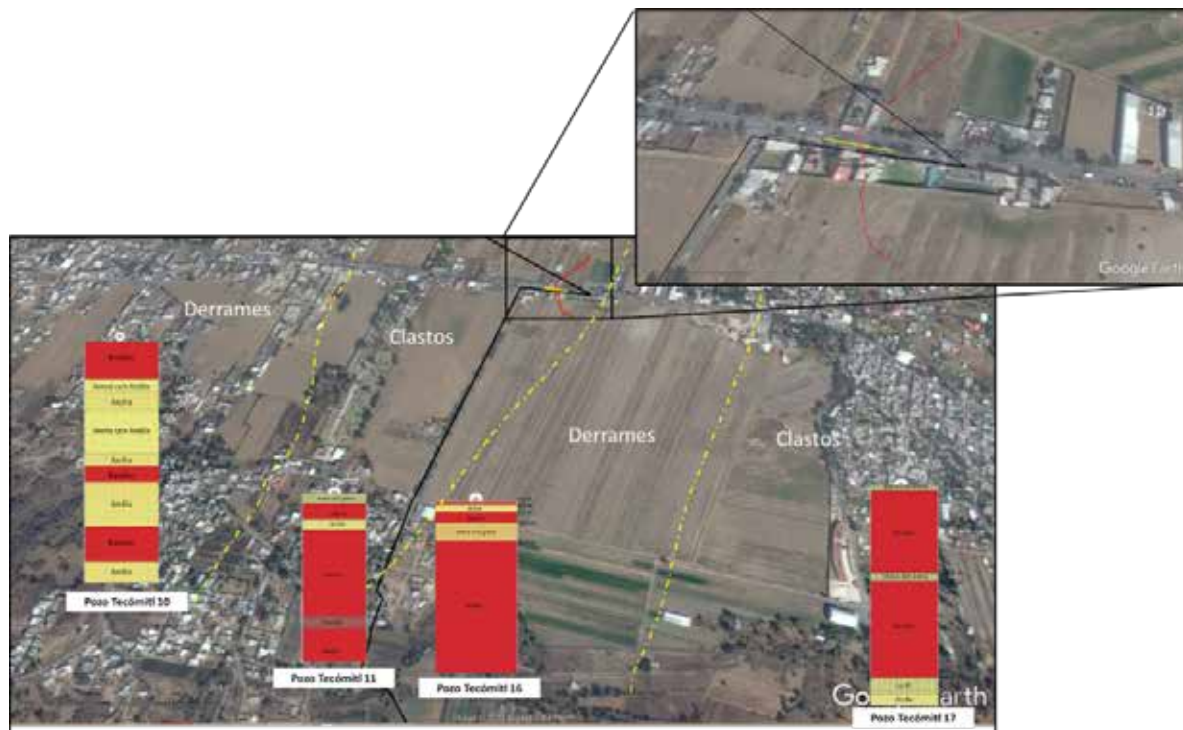
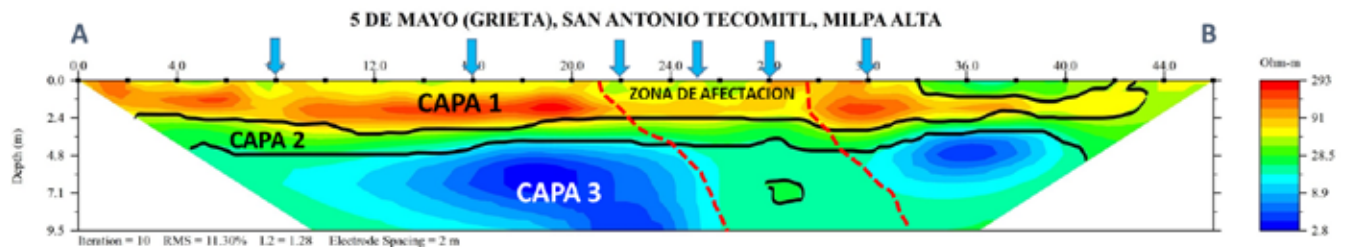


Figura 17 Modelo de estratigrafía y litología de pozos cercanos y la zona de afectación.

RECOMENDACIONES

Se recomienda:

- Un estudio que mida la compactación de los materiales del subsuelo (PANDA) que se distribuya a en la zona de afectación (flechas en color azul, figura 17) y las zonas vecinadas con el fin de hacer una comparación entre ambas partes.
- Realizar una mejora del terreno con materiales que permitan endurecer y compactar los materiales del subsuelo.
- Debido a las condiciones de la zona de estudio es primordial dar mantenimiento preventivo y correctivo a los sistemas de drenaje para evitar las fugas de tuberías de agua potable y también de drenaje que reblandecen el subsuelo y provocan los socavones.



ESTUDIO DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA
PUEBLO SAN ANTONIO TECÓMITL

SIMBOLOGÍA

Estudio de Resistividad Eléctrica

- Línea de estudio TRE
- Electrodo

PELIGRO

- Fractura

VULNERABILIDAD

- Muy Alto

LIMITES POLÍTICOS

- Manzana

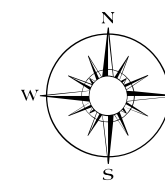
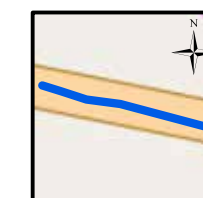
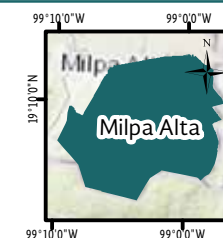
VÍAS DE COMUNICACIÓN

- Pavimentada
- Calle

SITIOS DE INTERÉS

INFRAESTRUCTURA

- Líneas de transmisión eléctrica
- Acueducto

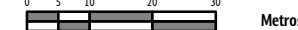


Año de elaboración: 2018
Datum: WGS84

Escala: 1:1,200

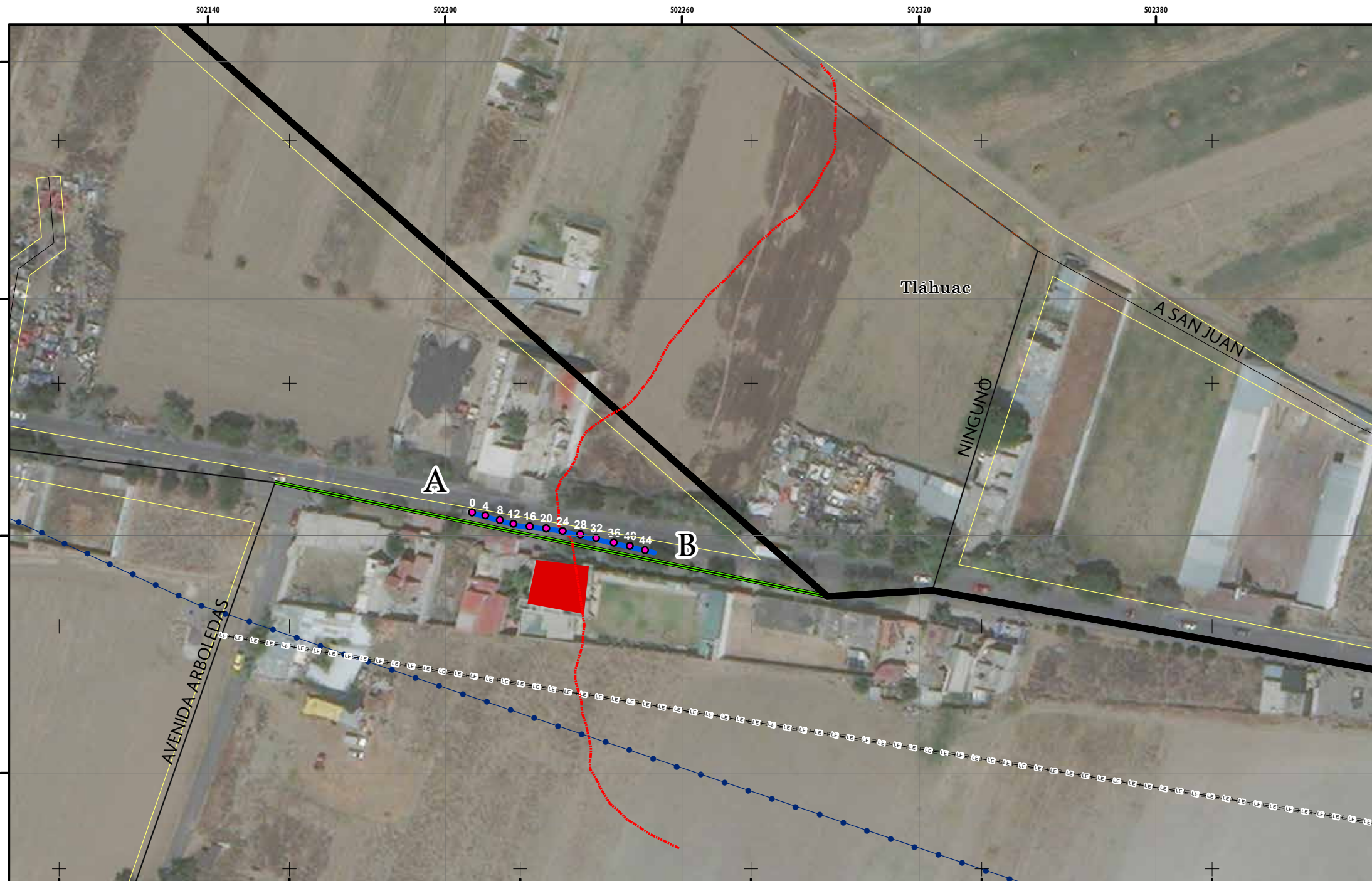
COORDENADAS GEOGRÁFICAS
Gradícula: 00° 00' 02"
Unidades: grados

COORDENADAS UTM
Gradícula: 60
Unidades: metros

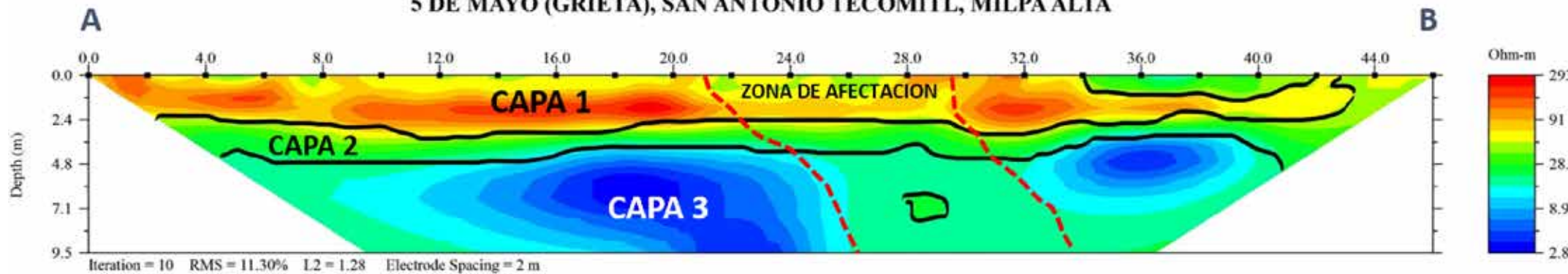


Asesor Científico:
Dr. Juan Carlos Mora Chaparro
Responsable de Proyecto:
CMC. Lucía Ávila Martínez
CMC. IseTalia Piña Hernández

Fuentes:
Marco Geoestadístico Ciudad de México, INEGI 2018.
Resultados por localidad (ITER), INEGI 2010.
World Terrain Base.



5 DE MAYO (GRIETA), SAN ANTONIO TECOMITL, MILPA ALTA



Estudio de Tomografía de Resistividad Eléctrica
calle 5 de Mayo (carretera San Antonio
Tecómilt - San Nicolás Tetelco).

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 var3an ampliamente en funci3n del r3gimen de los r3os, de la resistencia de las rocas a la erosi3n, de la cuenca hidrogr3fica y de las condiciones geomorfol3gicas generales [1].

Andesita: Roca 3gnea efusiva de composici3n intermedia, color oscuro, compuesta de cristales de plagioclasa intermedia, minerales m3ficos y frecuentemente vidrio volc3nico, com3n en las monta3as de los Andes. Junto con el basalto forma las masas principales de rocas efusivas en las regiones de volcanismo joven y actual. Se presenta en general, en las zonas de subducci3n correspondientes a la margen de los continentes y los arcos insulares. Origina una amplia variedad de formas del relieve volc3nico y al transformarse por la erosi3n es com3n que se formen valles y laderas empinadas y una red fluvial de tipo dendr3tico [1].

Arcillas lacustres: Suelo constituido por agregados de silicatos de aluminio hidratados procedentes de la descomposici3n de minerales de aluminio. Surge de la descomposici3n de rocas que contienen feldespato, originada en un proceso natural que dura decenas de miles de a3os. El di3metro de las part3culas de la arcilla es inferior a 0,002 mm [12].

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

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

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

Basalto: Roca 3gnea efusiva de composici3n b3sica y color oscuro, consistente principalmente en plagioclasas b3sicas, augita y con frecuencia olivino.

Generalmente es una roca compacta y porosa. Presenta estructuras de derrame; forma mesas de lava de cientos o miles de 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 epirogénesis, orogenia, diastrofismo, tectónica de placas o cualquier otro tipo de desplazamiento de parte de la corteza. Una falla ocasiona discontinuidad de las estructuras geológicas. Los esfuerzos pueden ser: tensionales, compresionales, verticales (en ambos sentidos) o inclinados, dando lugar a diversos tipos de fallas. Los elementos de una falla son: plano de falla, bloque superior o techo, bloque inferior o piso, desplazamiento de la falla o rechazo, espejo de falla, etc. El reconocimiento de las fallas se hace más fácilmente en las rocas sedimentarias y en las metamórficas de origen sedimentario debido a la discontinuidad de las capas o estratos. En las rocas ígneas la identificación es más difícil y solo es posible su reconocimiento observando detenidamente los espejos de falla o planos de fricción, o cuando existen diques o filones que señalan su desplazamiento a través del plano de falla. El estudio de las fallas es de suma importancia para la definición de la geología estructural o de la tectónica de la región. Del punto de vista práctico es de suma utilidad en geología minera para definir la posición o desplazamiento de las vetas mineralizadas o de los cuerpos mineralizados. También es de suma importancia para el estudio de los yacimientos petrolíferos. Tipos de fallas: Oblicua, cruzada,

longitudinal, transversal, paralela al plano de estratificación, 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 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 radicación solar, la fuerza de la gravedad y actividad de los organismos [1].

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

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

Red de Drenaje: Todos los sistemas de drenaje están compuestos por una red interconectada de corrientes que, juntas, forman modelos concretos. Estos modelos de drenaje responden a los tipos de

rocas o modelos estructurales de fallas y pliegues presentes. Los tipos de modelos de drenaje son dendríticos, rectangulares, enrejados o radiales [3].

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

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

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

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

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

«Nube fénix» que puede transportar ceniza a enormes distancias [10].

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

Textura microlítica (Hipocristalina): Cuando la roca está compuesta en parte por vidrio y en parte por cristales, sin que ninguno de los dos términos supere el 90% en volumen. Esta textura refleja dos ritmos de enfriamiento diferentes, uno más lento

para formar los cristales y otro mucho más rápido que conlleva la formación de vidrio por solidificación del fundido sin tiempo a que los componentes químicos se ordenen en una estructura cristalina simétrica [17].

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

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS UTILIZADOS

Abreviatura	Significado
CD/DC	Corriente Directa / Direct Current (Por sus siglas en inglés.)
Dev.	Desviación Estándar.
E	Este.
<i>et al.</i>	(Del latín 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
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.
- Auvinet G., G. (2007). *Riesgos geotécnicos para la construcción de vivienda en el Valle de México*. 5to Simposio Nacional de Ingeniería Estructural en la Vivienda. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, Querétaro, Qro.
- Barklay, F. *Inversión sísmica: Lectura entre líneas*. Oilfield Review: 44–66. Verano 2008.
- Constantino R., L. D. (2011). *Método de tomografía eléctrica para determinar estructuras volcánicas, México*. (Tesis inédita de Licenciatura). UNAM. México, D. F.
- Córdoba R. F. (2015). *Evaluación de vulnerabilidad por fracturamiento en la zona de transición del Valle de México: El pueblo de San Antonio Tecómitl, Milpa Alta*. (Tesis inédita de Licenciatura). UNAM. México, D. F.
- González T., E. A., et al. (2015). *Revisión de los últimos eventos magmáticos del Cenozoico del sector norte-central de la Sierra Madre del Sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. 67(2): 285-297.
- Iakubovskii, I. V. y Liajov, L. L. (1980). *Exploración Eléctrica*. Reverte: Moscú.
- Iris Intruments, *ELECTRE Pro software Help* (CD-ROM). Francia: (2012).
- Iris Intruments, *Prosys Help* (CD-ROM). Francia: (2012).
- Iris Intruments. (2012). *Syscal Pro, User's Manual*. Francia.
- López M., F. (2007). *Metodología de evaluación de riesgos y vulnerabilidad de suelos por actividades no industriales en el Distrito Federal*. (Tesis inédita de Posgrado). Instituto Politécnico Nacional. México, D. F.
- Lorenzo M., A. (2016). *Historia eruptiva del volcán pelado (Sierra Chichinautzin, México)*. Tesis inédita de Posgrado). UNAM. México, D. F.
- 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.
- Mooser, F y Montiel (1989). *El relleno post-Chichinautzin del Valle de México y su relación con la intensidad sísmica*. México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos

- Mora C., J. C. (2011). *Atlas de Riesgos Naturales de la Delegación Milpa Alta 2011*. México, D. F.: UNAM.
- 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.
- 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.
- Tarbuck, L. (2008). *Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física*. Madrid: Ed. Pearson-Prentice Hall.
- Vázquez S., E. y Jaimes P., R. (1989). *Geología de la cuenca de México: Geofísica Internacional*, 28 (2): 133–190.

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.l>
- [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://cgsservicios.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###ixzz3RvvoLBvD>.
- [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.

CRÉDITOS

Asesor externo

Dr. Juan Carlos Mora Chaparro

Director General

Ing. Geomático Venancia López Hernández

Supervisor de Proyecto

Ing. Geólogo Karen Michel Gil Frausto

Especialistas

CMC. Lucila Ávila Martínez

CMC. Ilse Talia Piña Hernández

Diseño e identidad visual

Lic. Silvia Berenice Lovera Salazar

