

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	11
Justificación del tipo de arreglo de la TRE	12
Procesamiento de datos	12
Correcciones topográficas	14
Inversión de datos	14
Interpretación de datos (Modelo geoelectrico 2D)	16
Conclusiones	19
Glosario de términos	21
Abreviaturas y símbolos utilizados	26
Bibliografía.....	28
Bibliografía para el glosario de términos.....	29

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 Santa María Nativitas 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 hundimiento 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 Colonia Santa María Nativitas, 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 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 Este de la delegación Xochimilco, dentro de las Santa María Nativitas con las coordenadas $19^{\circ}14'48.78''N$; $99^{\circ}5'30.73''W$ (Figura 1) y la línea de la TRE se hizo sobre la calle Cuauhtémoc (Figura 2).

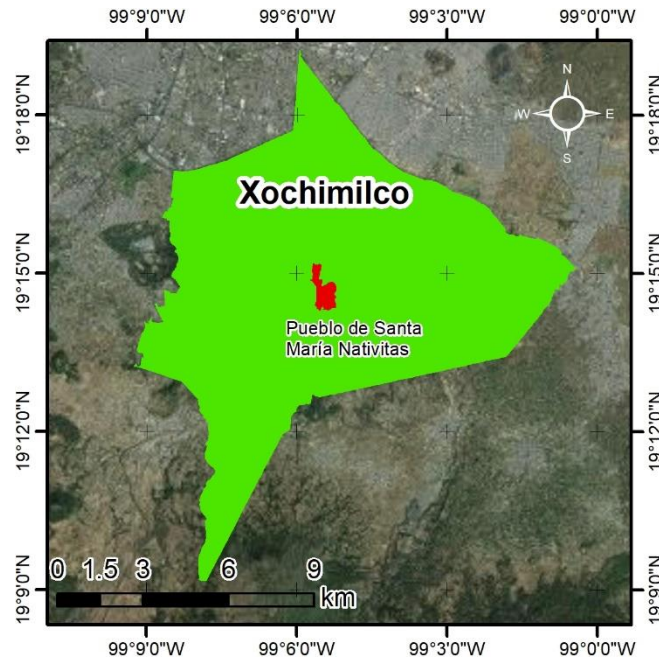


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.



Figura 2. Croquis de localización de la Tomografía de Resistividad Eléctrica, la 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 6)

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 3). (Orellana, 1972; *ELECTRE Pro software Help, Iris Instruments*, 2012).

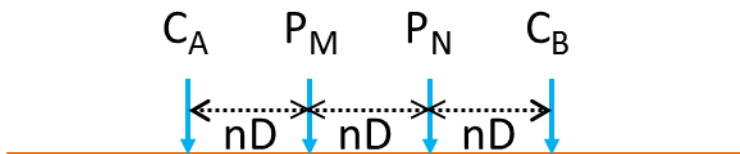


Figura 3. Colocación inicial de los electrodos para el arreglo Wenner-Schlumberger; el cual es similar a un arreglo Wenner. (*ELECTRE Pro software Help, Iris instruments*).

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).

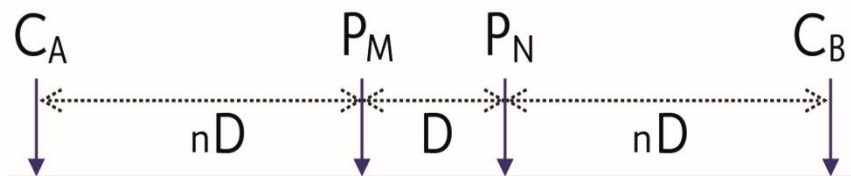


Figura 4. Muestra la disposición de los electrodos a partir del segundo espaciado. (*ELECTRE Pro software Help, Iris instruments*).

Determinación de la zona de la TRE

Con base en la cartografía del Sitio de estudio y los antecedentes, se determinó que la calle Cuauhtémoc, a partir del Antiguo Camino Xochimilco -Tulyehualco hasta el Nuevo Camino Xochimilco -Tulyehualco 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
- 48 electrodos impolarizables
- 4 carretes de cables de superficie de 12 conexiones cada una con espaciamentos de 10 m
- Computadora portátil que cuente con los programas de *ELECTRE Pro* y *Prosys II*, *EarthImager*, *Surfer 9* y *ComsysPro*
- Navegador GPS
- Rotomartillo
- Conos de señalamientos
- Cronómetro
- Cinta métrica
- Marro
- Lápiz
- Libreta

Pruebas de calibración

De acuerdo a Sepúlveda (2009) existen dos formas de diseño de equipos para medir resistividad:

- 1) Equipos que entregan un voltaje o una corriente invariable en el tiempo (CD) a la salida de sus terminales (A y B).
- 2) Equipos que obtienen un voltaje o una corriente alterna con forma de onda cuadrada a la salida de sus terminales A y B. El problema con estos equipos es que se necesita contar con un medidor de potencial y de corriente que pueda medir señales cuadradas de pequeñas frecuencias, proceso llamado *prueba de calibración*.

El equipo *Syscal Pro* corresponde al primer grupo. De acuerdo a las instrucciones del manual de uso del fabricante la opción de calibración de los canales del equipo se debe realizar después de la actualización de *firmware*, también si se tiene una duda sobre los niveles de voltaje recibidos (*Syscal Pro User's Manual*, 2012).

Diseño del levantamiento 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).

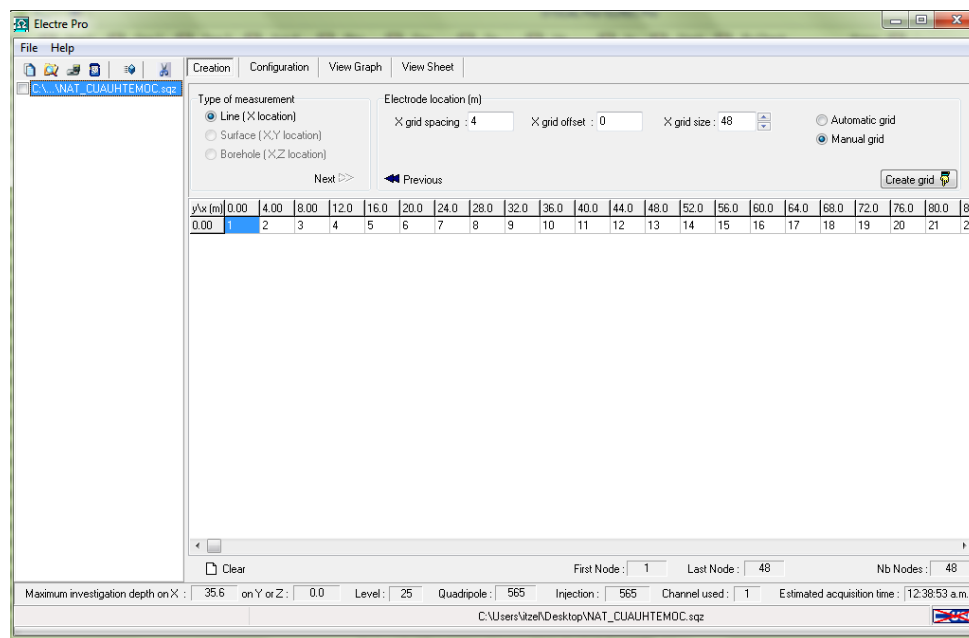


Figura 5. Ventana de asignación de separación entre electrodos para el Levantamiento N°1, cuya separación es de 10 m (Software ELECTRE Pro, Iris Instruments, 2012).

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).

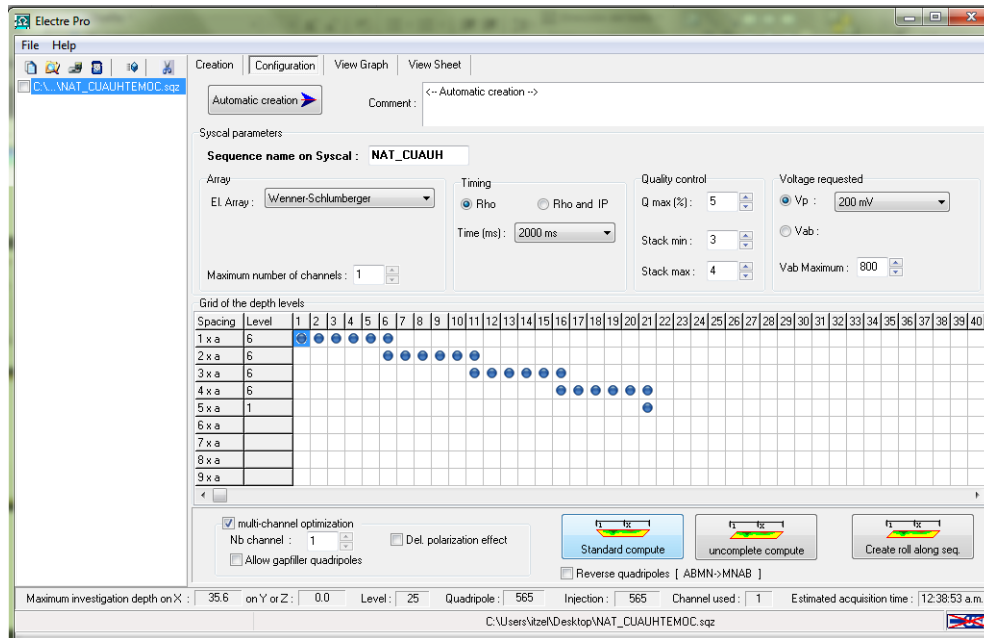


Figura 6. Ventana de configuración, en ella se introducen los parámetros de inyección de voltaje, el tipo de arreglo, el nombre, entre otros (ELECTRE Pro software, Iris Instruments, 2012).

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).

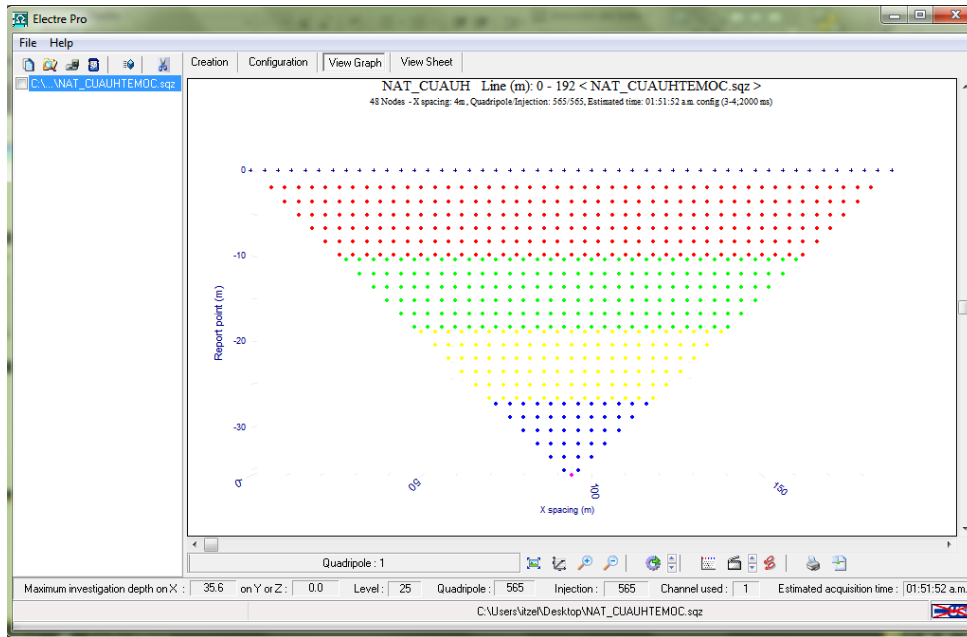


Figura 7. Ventanas que muestran las gráficas preliminares de ambos levantamientos,; en la parte superior se puede observar el nombre del levantamiento y el número de electrodos a utilizarse, el espaciamiento entre ellos; en la parte media se encuentra una representación de los cuadripolos; en la parte 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	188 m
Número de electrodos utilizados	48
Separación entre electrodos	4 m
Profundidad máxima de investigación	35 m
Total de puntos de atribución	565
Puntos de inyección	565

Tabla 2. Datos del levantamiento N°1 (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 1 m de distancia entre cada uno.
4. Verificación de que cada electrodo que hicieran contacto con el material del subsuelo (Figura 8).
5. Instalación de los conectores del cable principal hacia los electrodos. Se verificó que el cable no estuviera enrollado o doblado a fin de que el flujo de electricidad no sufriera interrupción.
6. Colocación el equipo *Syscal Pro* entre los electrodos 24 y 25. Se utilizó una batería de 12 V como fuente externa.
7. Comprobación preliminar del paso de corriente en cada uno de los electrodos y medición preliminar de la resistencia de la puesta a tierra de los dipolos.
8. Recopilación de datos con el equipo, durante la cual se observó que el cableado no fuese movido o el flujo de corriente pudiese haber sufrido interrupción por causas externas.
9. Verificación del correcto guardado de los datos en la memoria del equipo concluido el tiempo de levantamiento.

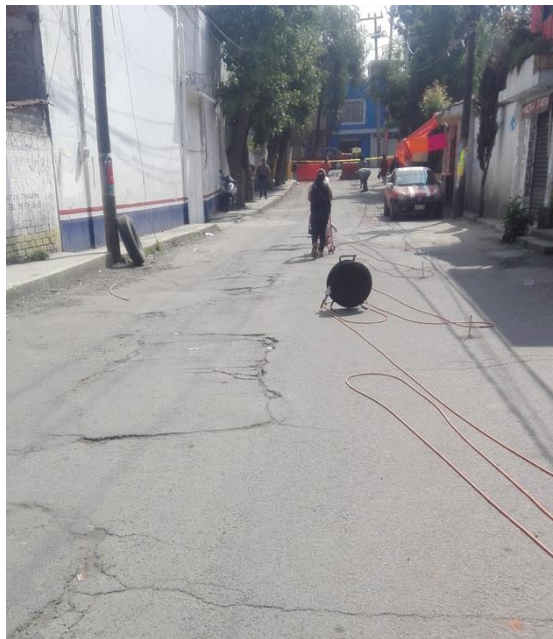


Figura 8. Fotografías donde se observan electrodos colocados en contacto con el terreno (19.2584° N, 99.1204° W. Retorno).

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°1.

N° de Electrodo	X	Y	Distancia (m)
1	490374.87	2128247.9 1	0
10	490371.97	2128212.7 8	36
20	490369.14	2128173.3 2	76
30	490365.08	2128133.4 4	116
40	490361.34	2128093.3 9	156
48	490374.00	2128247.0 0	188

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 como se observa en la figura 9.

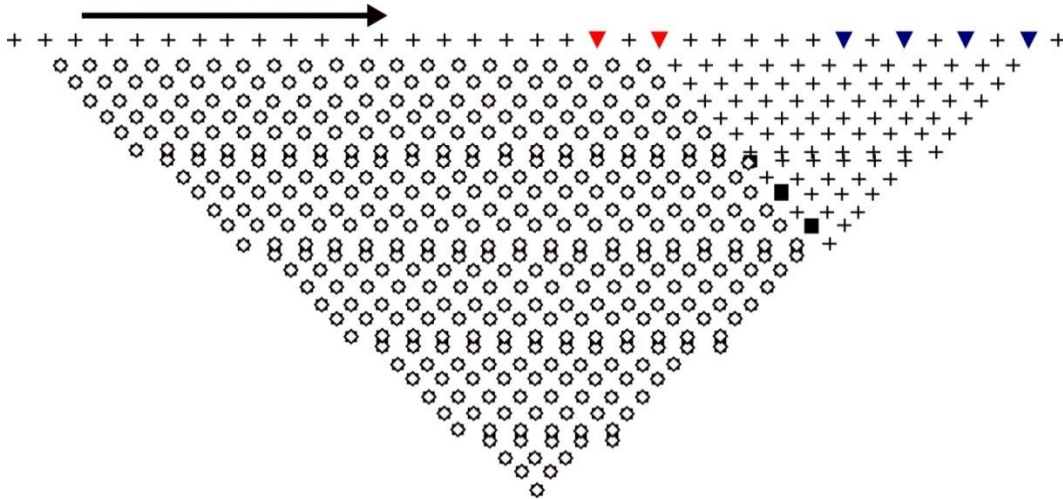


Figura 9. Modelo de puntos de atribución. Triángulos rojos, electrodos de inyección de corriente; triángulos azules, electrodos de potencial; cuadros huecos, puntos de atribución ya medidos; y cuadros negros, puntos de atribución en los que se está realizando la medición en ese momento. Las cruces son 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 (Figura 10).

#	Elarray	Spa1	Spa2	Spa3	Spa4	Rho	Dev	Sp	Stack	Rs-Check	Name	Date		
01	Schkm_VES	0.00	12.00	4.00	6.00	18.00	0.52	-225.71	208.038	281.761	2	4.90	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:24:1...
02	Schkm_VES	0.00	20.00	8.00	12.00	15.45	10.76	141.93	37.680	183.522	4	0.82	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:24:3...
03	Schkm_VES	0.00	28.00	12.00	16.00	11.38	1.56	116.61	17.938	237.788	2	1.51	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:24:3...
04	Schkm_VES	0.00	36.00	16.00	20.00	8.45	5.74	87.52	6.397	190.295	4	1.89	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:24:5...
05	Schkm_VES	0.00	44.00	20.00	24.00	7.63	1.90	-189.76	2.669	138.895	2	10.22	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:25:0...
06	Schkm_VES	0.00	52.00	24.00	28.00	5.82	3.75	-406.66	1.762	159.821	2	10.80	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:25:1...
07	Schkm_VES	0.00	56.00	24.00	32.00	5.66	5.51	-112.91	1.991	106.202	4	9.56	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:25:3...
08	Schkm_VES	0.00	64.00	28.00	36.00	5.15	4.55	505.53	1.934	148.713	2	1.31	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:25:4...
09	Schkm_VES	0.00	72.00	32.00	40.00	4.89	7.83	4.57	0.931	96.005	4	9.52	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:25:5...
10	Schkm_VES	0.00	80.00	36.00	44.00	2.29	50.54	420.41	0.244	66.292	4	1.99	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:26:1...
11	Schkm_VES	0.00	88.00	40.00	48.00	5.79	11.82	-82.09	2.328	303.083	4	5.75	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:26:3...
12	Schkm_VES	0.00	96.00	44.00	52.00	10.42	4.80	-10.27	3.224	277.895	2	1.95	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:26:4...
13	Schkm_VES	0.00	100.00	44.00	56.00	9.79	1.11	346.54	4.040	266.318	2	2.77	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:26:4...
14	Schkm_VES	0.00	108.00	48.00	60.00	6.01	14.09	76.07	2.214	277.951	4	0.96	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:27:0...
15	Schkm_VES	0.00	116.00	52.00	64.00	9.33	1.28	-99.80	1.963	183.305	2	1.86	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:27:1...
16	Schkm_VES	0.00	124.00	56.00	68.00	7.59	6.09	-177.71	2.342	315.825	4	2.53	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:27:3...
17	Schkm_VES	0.00	132.00	60.00	72.00	6.46	2.87	80.27	1.820	319.606	2	2.34	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:27:4...
18	Schkm_VES	0.00	140.00	64.00	76.00	6.76	1.71	144.76	1.461	275.272	2	1.48	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:27:4...
19	Schkm_VES	0.00	144.00	64.00	80.00	6.10	3.77	360.91	1.461	240.990	2	3.80	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:27:5...
20	Schkm_VES	0.00	152.00	68.00	84.00	7.18	13.77	-15.54	1.211	189.162	4	2.95	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:28:1...
21	Schkm_VES	0.00	160.00	72.00	88.00	6.75	0.30	196.44	1.619	298.575	2	1.98	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:28:2...
22	Schkm_VES	0.00	168.00	76.00	92.00	7.51	6.51	-11.76	0.659	120.469	4	0.78	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:28:3...
23	Schkm_VES	0.00	176.00	80.00	96.00	9.19	38.60	-295.24	0.344	96.426	4	3.05	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:28:5...
24	Schkm_VES	0.00	184.00	84.00	100.00	9.51	16.71	-63.34	1.246	241.694	4	1.81	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:29:1...
25	Schkm_VES	0.00	188.00	84.00	104.00	6.61	6.68	12.94	1.182	245.246	4	1.66	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:29:2...
26	Schkm_VES	4.00	16.00	8.00	12.00	21.19	0.17	321.26	40.531	48.073	2	0.59	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:29:3...
27	Schkm_VES	4.00	24.00	12.00	16.00	14.07	25.11	-16.88	3.917	17.788	4	1.93	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:29:5...
28	Schkm_VES	4.00	32.00	16.00	20.00	10.82	2.01	-16.75	4.413	61.524	2	1.77	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:30:0...
29	Schkm_VES	4.00	40.00	20.00	24.00	9.04	42.76	199.96	0.960	26.689	4	9.49	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:30:1...
30	Schkm_VES	4.00	48.00	24.00	28.00	7.43	11.63	-419.08	1.225	62.189	4	10.04	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:30:3...
31	Schkm_VES	4.00	56.00	28.00	32.00	5.08	23.71	-180.55	0.451	46.910	4	0.86	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:30:5...
32	Schkm_VES	4.00	60.00	28.00	36.00	4.32	1.52	182.37	0.831	57.949	2	1.18	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:30:5...
33	Schkm_VES	4.00	68.00	32.00	40.00	5.51	27.14	408.63	0.759	54.596	4	5.77	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:31:1...
34	Schkm_VES	4.00	76.00	36.00	44.00	6.02	103.20	-149.42	0.279	60.872	4	1.88	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:31:3...
35	Schkm_VES	4.00	84.00	40.00	48.00	6.02	20.62	-18.56	0.459	47.300	4	5.14	NAT_CUAUH	1 09/11/2017 12:31:4...

Figura 10. Ventanas que muestran secciones de datos del levantamiento (software Prosys II, Iris Instruments, 2012).

El software *Prosys* nos genera, a partir de los datos de levantamiento, una gráfica preliminar que corresponde a la resistividad aparente ρ_a , que puede contener datos anómalos (Figura 11).

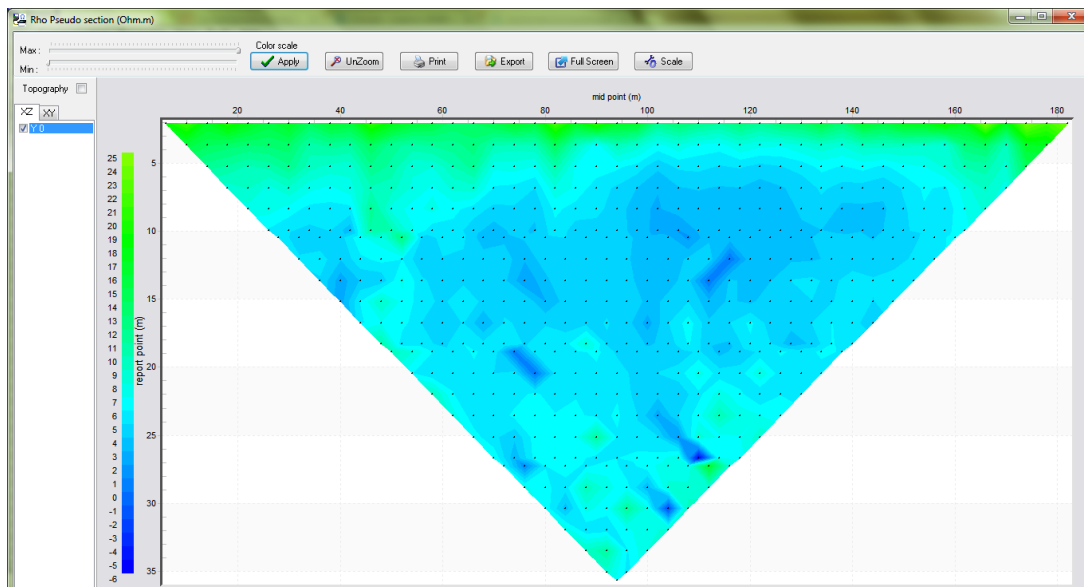
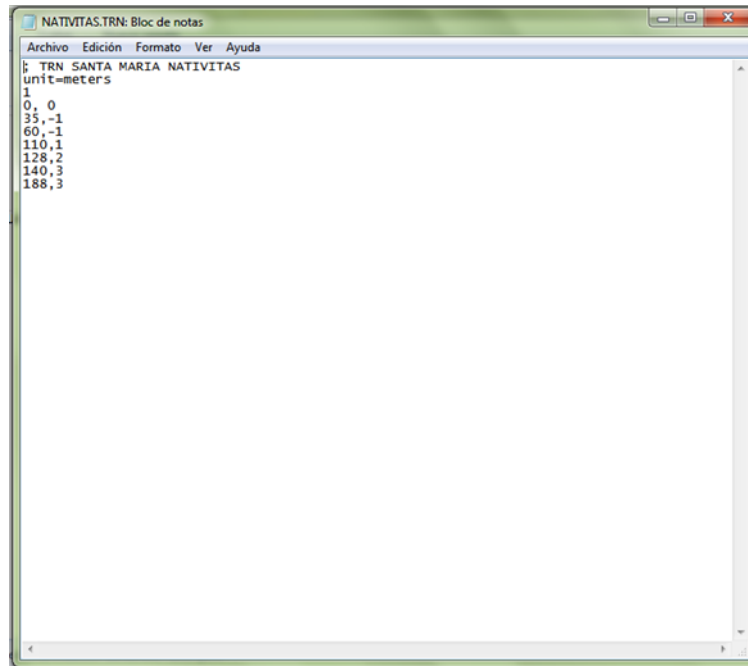


Figura 11. Gráfica de resistividad aparente sin proceso de inversión de datos (software Prosys II, Iris Instruments, 2012).

Correcciones topográficas

Una vez obtenida la ubicación espacial de los electrodos, se 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 12).



```
NATIVITAS.TRN: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
; TRN SANTA MARIA NATIVITAS
unit=meters
1
0, 0
35,-1
60,-1
110,1
128,2
140,3
188,3
```

Figura 12. 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 este estudio.

MinVoltage=-0.2	Voltaje mínimo.
MinAppRes=0.01	Resistividad aparente mínima.
MaxAppRes=1000	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 espaciado entre electrodos. Podemos estimar que nuestro modelado alcanzó parámetros adecuados, y por ello los resultados son aceptables (Figura 13).

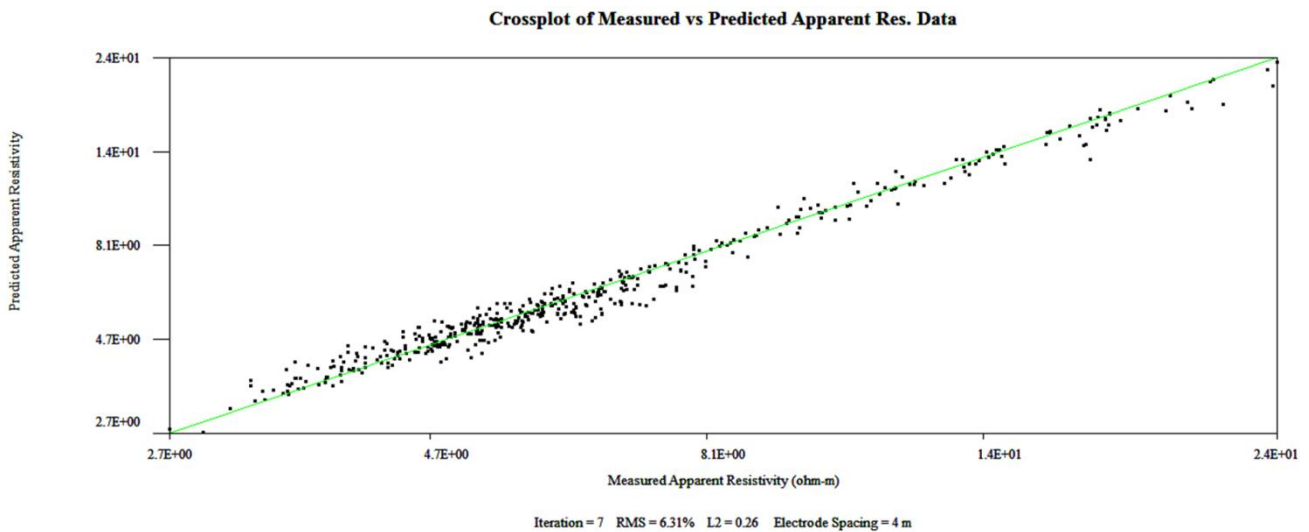


Figura 13. Gráfica cruzada de resistividad aparente del modelo directo vs resistividad aparente medida Levantamiento N°1. (software EarthImager, 2009).

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 resulto del se observan tres tipos de materiales que componen cuatro capas: 1, 2, 3 y 4 (Figura 14).

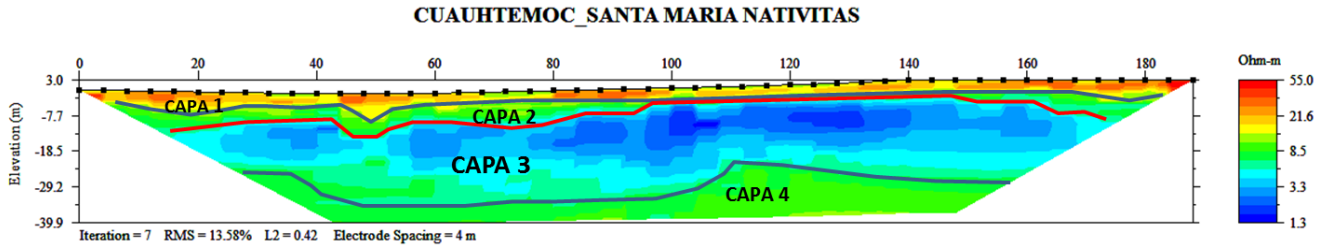


Figura 14. Imagen Resistiva.

Capa 1

Es la capa más superficial con un espesor que varía de 5m hasta 12m. Registro una resistividad que va de los 10 a los 55 Ohms m, se puede asociar con materiales de relleno, arenas, gravas y material de cascajo con bloques de roca con resistividades mayores que denotan un color rojo.

Capa 2

La capa 2 se extiende desde una profundidad de 5m y llega hasta los 18 o 20 m, es una capa delgada con resistividad promedio de 8.5 ohm m, que se encuentra por debajo de los materiales de relleno y cubre a la capa 3. La resistividad registrada indica que son principalmente sedimentos del tipo de los limos y arcillas.

Capa 3

La capa 3 se trata de una capa cuyos materiales arenas, permiten la acumulación de agua (acuífero somero), ya que registraron resistividades muy bajas que están por debajo de 5 Ohms m, tiene un espesor aproximado de 20 m, y en algunos puntos su cima se encuentra debajo de la capa 1 (Distancia 96 a 148 m).

Capa 4

La capa 4 se encuentra por debajo de los 30 m de profundidad y se extiende hasta la base del estudio (40m), su resistividad es aproximada de 5 a 15 Ohms m, en promedio 8,5 similar a la capa 2, lo que induce a relacionarla con depósitos de sedimentos del tipo de los limos y arcillas.

Discusión

En la figura 15 se puede observar como los materiales, que registraron altos resistivos (color rojo), se localizan enfrente de algunas viviendas. Lo anterior induce a que estos materiales son de relleno tipo cascajo que contiene bloques altos resistivos y que fueron utilizados para tratar de mejorar el suelo arcilloo-limoso. El peso de las construcciones provoca que los materiales de relleno se hundan y penetren los materiales de la capa 2.

ZONAS DE RESISTIVIDAD ALTA

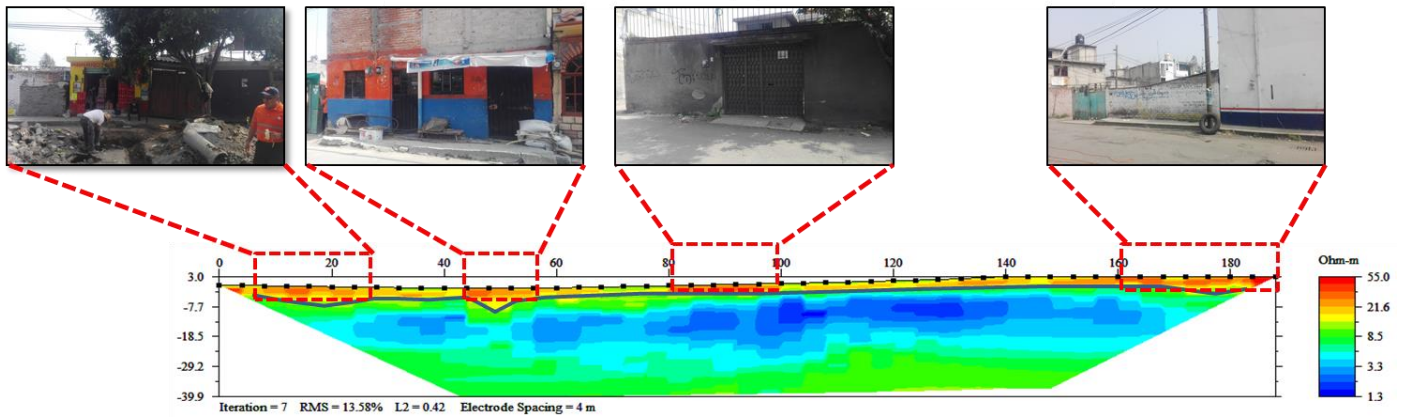


Figura 15. Relación de inmuebles con las zonas con anomalías resistivas.

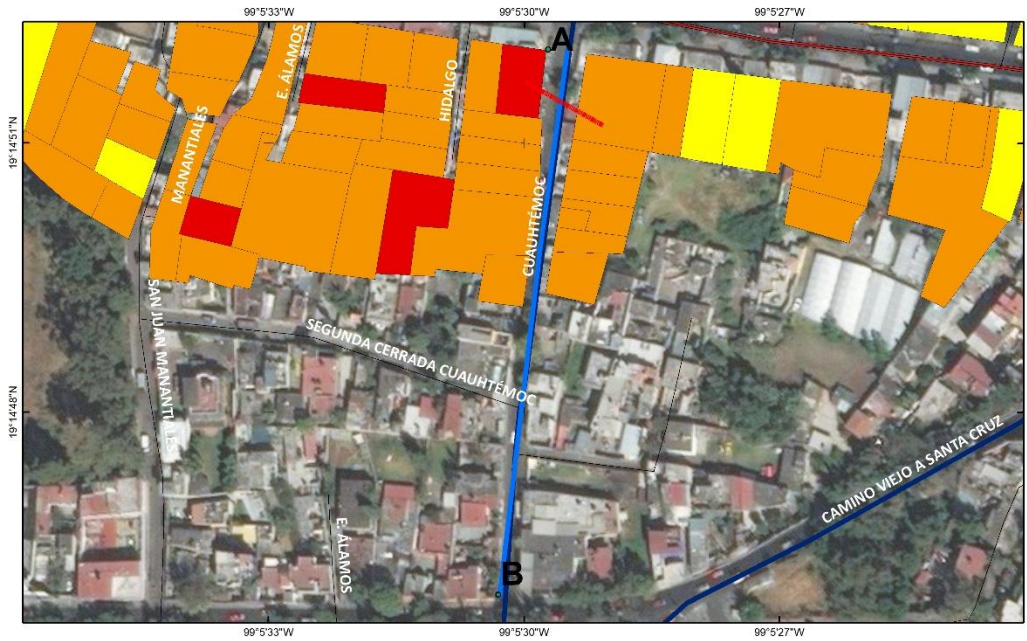
En una excavación localizada en la zona (Figura 16) se observó como el mejoramiento de los materiales del subsuelo se llevó a cabo con cascajo y con costales rellenos de materiales de la zona.



Figura 16. Materiales utilizados en el relleno de zona de hundimientos.

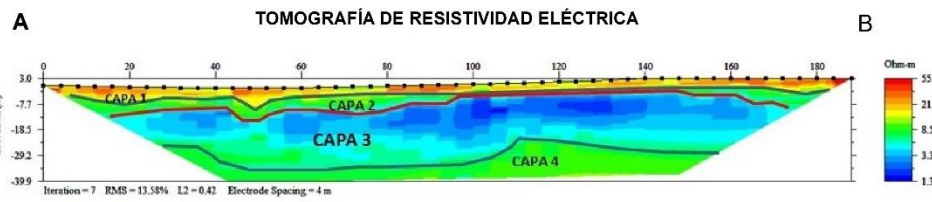
Conclusiones

Los materiales que componen la zona de estudio son en superficie materiales de relleno del tipo de cascajo y costales, los cuales se encuentran sobre limos y arcillas (capa 2) que están en contacto con depósitos de arena sobresaturados con agua (capa 3). Las construcciones y las vialidades se encuentran sobre los materiales de la capa 1, sin embargo, el peso de las construcciones provoca la deformación de los materiales que se penetran con los materiales de la capa 2 y 3. Las variaciones del contenido de agua en la capa 3 es el principal factor en el hundimiento del terreno. Lo anterior es debido a que cuando hay una menor saturación de agua, los poros entre los granos de la arena (capa 3) se llenan con aire, por lo tanto el peso de la construcción los comprime provocando su hundimiento o movimientos diferenciales entre construcciones de diferente peso.



Año de elaboración: 2017
 Datum: WGS84
 Coordenadas geográficas:
 Graculac: 09° 05' 3\"/>

Estudio de Tomografía de Resistividad Eléctrica
 Santa María Nativitas (Calle Cuauhtémoc)



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 kil3metros cuadrados. Entre las formas de relieve caracter3sticas est3n los volcanes de lava y sus derrames asociados, del tipo de Haw3i e Islandia. Cubre tambi3n extensiones gigantescas del fondo oce3nico, mismo que incluye la planicie abisal, monta3as submarinas y las dorsales [1].

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

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

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

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

Caolinitas: Arcillas minerales cuya 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].

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

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

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

Falla: Desplazamiento de un bloque rocoso con respecto a otro colindante a éste o de ambos bloques, a través de un plano denominado «plano de falla». Las fallas son producto de esfuerzos tectónicos, producto de la epirogenesis, orogenia, diastrofismo, tectónica de placas o cualquier otro tipo de desplazamiento de parte de la corteza. Una falla ocasiona discontinuidad de las estructuras geológicas. Los esfuerzos pueden ser: tensionales, compresionales, verticales (en ambos sentidos) o inclinados, dando lugar a diversos tipos de fallas. Los elementos de una falla son: plano de falla, bloque superior o techo, bloque inferior o piso, desplazamiento de la falla o rechazo, espejo de falla, etc. El reconocimiento de las fallas se hace más fácilmente en las rocas sedimentarias y en las metamórficas de origen sedimentario debido a la discontinuidad de las capas o estratos. En las rocas ígneas la identificación es más difícil y solo es posible su reconocimiento observando detenidamente los espejos de falla o planos de fricción, o cuando existen diques o filones que señalan su desplazamiento a través del plano de falla. El estudio de las fallas es de suma importancia para la definición de la geología estructural o de la tectónica de la región. Del punto de vista práctico es de suma utilidad en geología minera para definir la posición o desplazamiento de las vetas mineralizadas o de los cuerpos mineralizados. También es de suma importancia para el estudio de los yacimientos petrolíferos. Tipos de fallas: Oblicua, cruzada, longitudinal, transversal, paralela al plano de estratificación, etc. [11].

Flujo de lodo. Mezcla de materiales sólidos de diferentes tamaños y agua que se desplazan por efecto de las pendientes del terreno [6].

Flujos piroclásticos: Mezclas de materiales volcánicos fragmentados y gases a altas temperaturas (de 300 a 1200 °C), que generalmente se producen por colapso de la columna eruptiva que emerge de los cráteres durante un episodio de actividad volcánica. Las velocidades de los flujos piroclásticos han sido estimadas en un espectro quíntico de entre 10 y 200 m/s, siendo la velocidad más comúnmente registrada, aquella que fluctúa alrededor de los 20 m/s. La extensión de las áreas que suele afectar este tipo de flujos, puede ser muy variable, y asciende desde unos 70 hasta varios cientos de kilómetros cuadrados [5].

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Mapa Geomorfológico: Representa el relieve terrestre con base en la morfología y la génesis del mismo, además de otros parámetros, como geomorfometría, litología y edad [1].

Mioceno: Término debido a Lyell (1832) para designar la época posterior al Oligoceno y anterior al Plioceno, del periodo Neógeno (Terciario tardío) [1].

Montmorillonita: Mineral arcilloso derivado por alteración química de los minerales silíceos de diversas rocas ígneas; se expande fuertemente cuando absorbe agua [2].

Oxidación: Uno de los procesos del intemperismo químico que incluye reacciones de combinación con oxígeno, especialmente con minerales de hierro en presencia de agua. El estado ferroso pasa a férrico, con formación de películas y cortezas de color amarillo a pardo que se disgregan fácilmente. Un ejemplo es la transformación de pirita en limonita [1].

Piroclastos: Fragmentos de magma arrojados durante las erupciones volcánicas de tipo explosivo. De acuerdo con su tamaño se clasifican en cenizas (menor a 2 mm), lapilli (2 a 64 mm) y mayor a 64 mm son bombas (de forma ovoide) y bloques (angulosos) [1].

Piroxeno: Los piroxenos son una familia de los silicatos de composición variable, y a la vez muy compleja; teniendo en cuenta el sistema de cristalización, se pueden distinguir de los rómbicos, denominados ortopiroxenos, y los monoclinicos, o clinopiroxenos. Estos últimos se dividen a su vez en aluminíferos y no aluminíferos según contengan o no aluminio en sustitución de silicio en los tetraedros. [16]

Plagioclasa: Feldespato de la serie calco-sódica que presenta solución sólida de los términos extremos albita y anortita. Los términos ricos en sodio son más frecuentes en rocas ácidas, mientras que los más cálcicos lo son en rocas básicas. Sus características distintivas más relevantes son la extinción oblicua, el desarrollo de un maclado polisintético con múltiples individuos, colores de birrefringencia grises y frecuente alteración a un agregado microcristalino rico en micas [16].

Plioceno: Es la segunda época del Neógeno, el quinto periodo del Terciario, posterior al Mioceno. La duración del Plioceno se calcula en unos 5 Ma, y debe haber terminado hace aproximadamente 2 Ma. En este lapso tuvo un desarrollo gran parte del relieve actual de la Tierra, en especial de regiones jóvenes como México y Centroamérica [1].

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Abreviaturas y símbolos utilizados

Abreviatura Significado

CD/DC	Corriente Directa / Direct Current (Por sus siglas en inglés.)
Dev.	Desviación Estándar.
E	Este.
<i>et al.</i>	(Del latín et. alia) y otros.
ext	Externo.
GPS	Sistema de Posicionamiento Global (por sus siglas en inglés Global Positioning System).
N	Norte.
O	Oeste.
<i>óp. cit.</i>	(Del latín operare citato) En la obra citada.
RMS	Raíz Cuadrada Media (Por sus siglas en inglés Root Mean Square).
Rho	Resistividad.
S	Sur.
Sp	Potencial Espontáneo (Por sus siglas en inglés spontaneous potential).
TRE	Tomografía de Resistividad Eléctrica.
.txt	Extensión de un archivo de texto.
UTM	Por sus siglas en inglés Universal Transversal de Mercator.
.urf	Extensión de un archivo de resistividad universal (Por sus siglas en inglés Universal Resistivity File).

Símbolo Significado

π	Constante matemática con valor de 3.141592...
°	Grados.
°C	Grados Celsius.
>	Mayor que.
<	Menor que.
μV	Micro volt.

2D	Modelación en dos dimensiones.
Ω -m	Ohms metros.
%	Porcentaje.
ρ_a	Resistividad Aparente.
[]	Referencias Bibliográficas.
Ω	Rho, letra del alfabeto griego usada para designar a la Resistividad Eléctrica.
A	Amperes.
cm	Centímetros.
km	Kilómetros.
km/h	Kilómetros sobre horas.
m	Metros.
m ²	Metros cuadrados.
msnm	Metros sobre el nivel del mar.
m/s	Metros sobre segundo.
mm	Milímetros.
Ma	Millones de años.
M	Mega.
s	Segundo.
W	Watts.
V	Voltios.

Bibliografía

- Auge, M. (2008). *Métodos eléctricos para la prospección de agua subterránea*. Argentina: Universidad de Buenos Aires.
- Barklay, F. *Inversión sísmica: Lectura entre líneas*. Oilfield Review: 44-66. Verano 2008.
- 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>.