



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

“CARACTERIZACIÓN GEOELÉCTRICA DEL SITIO DE
DISPOSICIÓN FINAL PRADOS DE LA MONTAÑA,
CIUDAD DE MÉXICO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
I N G E N I E R O G E O F Í S I C O

P R E S E N T A:
CÉSAR DANIEL CASTRO SOTO

DIRIGE: DRA. CLAUDIA ARANGO GALVÁN



CIUDAD UNIVERSITARIA. MÉXICO D.F. 2015

Este trabajo fue realizado en el marco del proyecto

"Propuesta para aprovechar el biogás generado en el sitio de disposición final Prados de la Montaña, Ciudad de México"

del Programa de Investigación en Cambio Climático (PINCC) de la UNAM (2012-2013) con personal e infraestructura del Grupo de Exploración del Departamento de Geomagnetismo y Exploración del Instituto de Geofísica de la UNAM.

ÍNDICE

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Objetivo de la investigación	5
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO ELÉCTRICO	6
2.1. Resistividad eléctrica	6
2.2. Ecuaciones fundamentales	7
2.3. Resistividad aparente	9
2.5. Configuraciones electródicas	11
2.5.1. <i>Configuración Wenner</i>	12
2.5.2. <i>Configuración Schlumberger</i>	13
2.5.3. <i>Configuración Dipolo – Dipolo</i>	13
2.5.4. <i>Configuración Polo – Dipolo</i>	14
2.6. Técnicas de Prospección	14
2.6.1. <i>Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)</i>	14
2.6.2. <i>Calicata eléctrica</i>	15
2.7. Tomografía eléctrica	16
2.7.1. <i>Adquisición de datos en campo</i>	16
2.7.2. <i>Inversión de los datos</i>	17
3. ÁREA DE ESTUDIO	20
3.1. Marco geográfico y fisiográfico regional	20
3.2. Marco Geológico Regional	21
3.3. Marco geográfico y fisiográfico local	22
3.4. Marco geológico local	24
3.4.1. <i>Geología Estructural</i>	26
3.4.2. <i>Estratigrafía</i>	28

4. METODOLOGÍA	30
4.1. Adquisición de datos	30
4.2. Procesamiento e inversión de datos	34
4.3. Cálculo del volumen a partir de los datos de resistividad	37
4.4. Cálculo del volumen a partir de datos topográficos	38
5. RESULTADOS	39
5.1. Mapas topográficos	39
5.2. Modelo 2D	40
5.3. Modelo Pseudo 3D	42
5.4. Integración de resultados	46
6. CONCLUSIONES	48
BIBLIOGRAFÍA	50

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO ELÉCTRICO

Figura 2.1.	<i>Inyección de corriente eléctrica al terreno (Orellana, 1982)</i>	7
Figura 2.2.	<i>Vector densidad de corriente en un semiespacio homogéneo, con electrodo puntual en la superficie límite (Orellana, 1982)</i>	9
Figura 2.3.	<i>Esquema básico del funcionamiento de los dispositivos electródicos (Cantos, 1987)</i>	10
Figura 2.4.	<i>Dispositivo electródico lineal y simétrico (Modificado de Orellana, 1982)</i>	12
Figura 2.5.	<i>Dispositivo Wenner (Modificado de Orellana, 1982)</i>	12
Figura 2.6.	<i>Dispositivo Schlumberger (Modificado de Orellana, 1982)</i>	13
Figura 2.7.	<i>Dispositivo Dipolo – Dipolo (Modificado de Orellana, 1982)</i>	13
Figura 2.8.	<i>Dispositivo Polo – Dipolo (Modificado de Orellana, 1982)</i>	14
Figura 2.9.	<i>Principio del SEV. A medida que A y B se separan, la corriente penetrará en las capas más profundas (Gasulla, 1999)</i>	15
Figura 2.10.	<i>Secuencia de mediciones para la construcción de una pseudosección (Loke, 2012)</i>	17

CAPÍTULO 3. ÁREA DE ESTUDIO

Figura 3.1.	<i>Mapa fisiográfico en donde se indican los límites de la cuenca de México (Enciso-De la Vega, 1992)</i>	20
Figura 3.2.	<i>Principales unidades fisiográficas presentes en la zona de estudio (Fuentes, 2011)</i>	23
Figura 3.3.	<i>Principales unidades litológicas presentes en la zona de estudio (Fuentes, 2011)</i>	25
Figura 3.4.	<i>Principales fallas presentes en la zona de estudio (Fuentes, 2011)</i>	27

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA

Figura 4.1.	<i>Ubicación de los perfiles de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) en el SDF Prados de la Montaña (Google Earth, 2014)</i>	30
Figura 4.2.	<i>Equipo SYSCAL Pro Switch de Iris Instruments</i>	32
Figura 4.3.	<i>Conexión del electrodo al terreno</i>	32
Figura 4.4.	<i>Levantamiento topográfico con nivel y estatal</i>	33
Figura 4.5.	<i>Limpieza de datos incongruentes en el Perfil 5</i>	34
Figura 4.6.	<i>Inversión del Perfil 4.</i> <i>(a) Pseudosección de resistividad aparente medida</i> <i>(b) Pseudosección de resistividad aparente calculada</i> <i>(c) Modelo de resistividad después de la rutina de inversión</i>	36
Figura 4.7.	<i>Adaptación de los datos de resistividad para RockWorks15</i>	37

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

Figura 5.1.	<i>Topografía del sitio de disposición final Prados de la Montaña.</i> <i>a) Topografía para los años 1987, 1994 y 1996</i> <i>b) Topografía para los 5 perfiles con estudio de TRE</i>	39
Figura 5.2.	<i>Modelos 2D obtenidos a partir de la inversión de los datos de resistividad aparente</i>	40
Figura 5.3.	<i>Corte transversal de pozos y red de extracción de biogás (SUDDF, 1997)</i>	42
Figura 5.4.	<i>Límites inferior (6.5 Ωm) y superior (9.5 Ωm) propuestos con base en los valores de resistividad. La línea continua describe la línea de iso-resistividad correspondiente. La línea discontinua infiere la presencia de estos valores</i>	43
Figura 5.5.	<i>Modelo pseudo 3D, generado a partir de los modelos 2D obtenidos para cada una de las líneas de estudio (Visto desde el SE). (Google Earth, 2014)</i>	44
Figura 5.6.	<i>Modelación del volumen aproximado de los desechos sólidos contenidos en el SDF-Prados de la Montaña (Visto del SE)</i>	45
Figura 5.7.	<i>Modelación del volumen aproximado de los desechos sólidos contenidos en el SDF-Prados de la Montaña (Visto del SW)</i>	45

Figura 5.8. *Integración de la información. Las curvas negras corresponden con perfiles topográficos para los años 1987, 1994 y 1996. Las zonas indicadas en óvalos rojos corresponden con anomalías de baja resistividad por debajo de la topografía de 1987 47*

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	<i>Características de los diferentes perfiles de investigación</i>	26
----------	--	----

RESUMEN

Al poniente de la Ciudad de México, en los límites de la delegación Cuajimalpa con la delegación Álvaro Obregón, se encuentra el Sitio de Disposición Final Prados de la Montaña (SDF-PM), un predio de aproximadamente 24.99 hectáreas, de las cuales 22.60 hectáreas fueron habilitadas y destinadas a la disposición final de residuos sólidos. El SDF Prados de la Montaña se mantuvo abierto para la recepción de residuos sólidos durante 7 años (1987 – 1994), depositándose en él cerca de 5.6 millones de toneladas de desechos.

El monitoreo ambiental, de este sitio y otros rellenos sanitarios, es fundamental ya que se puede dar seguimiento a la degradación de la materia orgánica, permitiendo detectar oportunamente la posible contaminación fuera del confinamiento. Para este trabajo se realizaron 5 perfiles de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE), 4 de ellos con una orientación NE – SO y el quinto con orientación NW – SE, tratando de cubrir la mayor área posible. Con el resultado del procesamiento de los datos eléctricos, se generó un sólido y con base en el análisis del contraste entre los valores de resistividad eléctrica, se extrajo sólo el volumen de interés.

El informe sobre la clausura de Prados de la Montaña indica que el fondo del socavón tiene una forma irregular, siendo más profundo en la porción occidental del predio, en donde los residuos sólidos alcanzan los 45 metros. Se tiene conocimiento de que el SDF fue construido sobre material competente y que además, el fondo del socavón fue acondicionado con materiales poco permeables para evitar la migración de fluidos a profundidad a través de las rocas.

En los modelos 2D obtenidos a partir de las líneas 1, 2, 3 y 4, se observa que al oeste del predio existe un contraste de resistividad cerca de los 45 metros de profundidad. De igual manera para el Perfil 5 se observa que en la parte norte del predio, ese material de baja resistividad ($6.5 \Omega\text{m}$) se presenta hasta a una profundidad cercana a los 40 metros. Para el límite superior se tiene el conocimiento de que el espesor de la cobertura del terreno es variable, rondando entre 2 y 5 metros y que por debajo de ésta se encuentran los desechos sólidos. En el modelo 2D se observa un contraste de resistividad en los primeros metros, lo que sugiere que un valor de $9.5 \Omega\text{m}$ pueda ser utilizado para marcar el límite entre la cobertura del confinamiento y los desechos depositados.

Adicionalmente se revisaron mapas topográficos de los años 1987, 1994 y 1996, que concuerdan con el inicio del depósito de los desechos, el depósito final y el término de la construcción de la cobertura del confinamiento, respectivamente. Estos mapas se digitalizaron y se calculó el volumen entre las superficies de los años 1987 y 1994, resultando en un volumen de 4, 344,600 m³.

La estimación del volumen obtenido a partir de los datos de resistividad eléctrica se comparó con el valor del volumen obtenido entre las superficies topográficas de los años 1987 y 1994, resultando una sobrestimación del volumen a partir del modelo geoeléctrico en 2.26%.

Con la ayuda de los mapas topográficos fue posible integrar la información de los modelos 2D con perfiles topográficos de los años mencionados, para comparar la relación entre la anomalía de resistividad y la topografía original del contenedor. Se encontraron zonas al Norte, Noroeste y

Noreste del predio en donde la anomalía de baja resistividad aparece por debajo del límite topográfico inferior. Esto pudiera indicar la existencia de irregularidades en el estrato impermeable en el fondo del socavón, lo que traería en consecuencia la percolación de lixiviados.

1. INTRODUCCIÓN

El incremento de la población en las últimas décadas provocó el aumento en la demanda de los servicios públicos. La generación de residuos en los diferentes estados de la materia: líquido, sólido y gaseoso, o bien la combinación de estos por cada consumidor, lleva a la transposición (en forma y/o composición) y al traslado de los desechos a recipientes mayores para almacenarlos y/o disponerlos (Miranda, 2011). Una gestión integral de los residuos sólidos domiciliarios requiere un adecuado proceso de acciones para su manejo a diferentes escalas con el objetivo de proteger el ambiente y la calidad de vida de la población. En la mayoría de los países desarrollados se observa una tendencia a disminuir la generación de residuos e incentivar a los programas de reciclaje.

Una las diversas soluciones al problema de la generación de residuos sólidos, se encuentran los rellenos sanitarios, que son sitios en donde se depositan materiales, tanto orgánicos como inorgánicos, se les compacta y se les cubre con tierra cada cierto periodo. Esta técnica busca minimizar los daños al medio ambiente que podría producir la descomposición de los desechos. En los rellenos sanitarios los residuos se biodegradan desprendiendo sustancias que originan lixiviados, los cuales pueden llegar a migrar formando una pluma contaminante alcanzando los cursos de agua superficial y acuíferos (Pomposiello *et al.*, 2009).

En la zona de Santa Fe, al sur-poniente de la Ciudad de México, en los límites de la delegación Cuajimalpa con la delegación Álvaro Obregón, se encuentra el Sitio de Disposición Final Prados de la Montaña (SDF-PM), un predio de aproximadamente 24.99 hectáreas, de las cuales 22.60 hectáreas fueron habilitadas y destinadas a la disposición final de residuos sólidos. En este confinamiento se recabaron los residuos que generaban las delegaciones: Álvaro Obregón, Benito Juárez, Cuajimalpa, Cuauhtémoc, Iztapalapa, Gustavo A. Madero, Magdalena Contreras, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza. Este sitio se mantuvo operando desde el año de 1987, en el que se depositaron cerca de 5.6 millones de toneladas de desechos durante su vida útil hasta el año de 1994, en el que se decidió proceder al cierre del sitio para recepción de residuos sólidos.

El SDF Prados de la Montaña se encuentra aproximadamente a unos 30 metros por encima de la Formación Tarango, la cual se calcula que tenga alrededor de 300 m de espesor y de la que en el siguiente apartado se abordará con más detalle. El contenido arcilloso de esta formación le confiere una baja permeabilidad que favorece la estabilización de los lixiviados, mismos que tendrían que migrar verticalmente una distancia de 130 metros para llegar a la zona de saturación, lo cual se ha estimado, ocurriría en un lapso aproximado de 180 años (López y Sámano, 1996).

La construcción de la cobertura final de Prados de la Montaña fue la fase más significativa en el proceso de clausura, ya que de ella depende en gran medida el control eficiente de algunos impactantes ambientales. Esta cobertura está conformada por 20 cm de cobertura vegetal, una capa de 20 cm de tepetate compactado como protección a la erosión, material arcilloso de espesor variable para conformar los niveles finales, además de una capa de 30 a 50 cm de tepetate que ya se encontraba cubriendo los desechos. La formación de lixiviados está relacionada con la precipitación pluvial, es por esto que la construcción de una cobertura altamente impermeable era

más que indispensable. Además, la baja permeabilidad de la cobertura es un excelente factor de eficiencia para los sistemas de captación de biogás (López y Sámano, 1996).

Sin embargo, como consecuencia del depósito de residuos, actualmente la cobertura manifiesta diversas fracturas producto de la subsidencia y el asentamiento de los desechos debido a la biodegradación de la materia orgánica. Estas inconformidades en la cobertura permite la filtración del agua de lluvia a través de los desechos, provocando el incremento en la producción de lixiviados. Si el sistema de captación de lixiviados no es operado de forma correcta, éstos pudieran alcanzar a contaminar cuerpos de agua subterráneos. Por lo anterior, es fundamental que después de la construcción de un SDF se dé el mantenimiento necesario, así como un constante monitoreo ambiental de la estructura contenedora y del material depositado en él, lo que permitirá dar seguimiento a la degradación de la materia orgánica y poder así detectar oportunamente la posible evolución de la contaminación dentro y fuera del confinamiento (Orta y Sánchez, 1999).

Los lixiviados de los rellenos sanitarios son fluidos ricos en materia orgánica, sales y algunos metales, razón por la que su conductividad eléctrica tiende a ser alta. Por lo tanto, no es de extrañar que la geofísica, en particular los métodos geoelectricos, hayan sido utilizados en gran medida para el estudio de impacto ambiental de este tipo de vertederos. Los métodos geoelectricos tienen la ventaja de ser mínimamente invasivos, relativamente de bajo costo y de rápida ejecución, sin dejar de ofrecer una buena resolución. En cambio, el uso alternativo de métodos directos como la perforación y muestreo, implicarían el considerable riesgo de llegar a dañar el revestimiento de estos sitios de disposición, favoreciendo la creación de nuevas rutas para la migración de contaminantes (De Carlo *et al.*, 2013)

El método de tomografía de resistividad eléctrica, utilizada en el estudio de estructuras relativamente someras, se ha convertido en una herramienta fundamental aportando información acerca de la distribución de la resistividad en el subsuelo (Chapelier *et al.*, 1991). El método geoelectrico propuesto para el desarrollo de este trabajo es altamente eficiente en la determinación de zonas con grandes contrastes de resistividad eléctrica y principalmente en medios de muy baja resistividad debida a la presencia de fluidos salinos (Pomposiello *et al.*, 2009). Además, este tipo de metodología permite monitorear el alcance de la contaminación a través del tiempo.

Aunado a esto, existe información detallada de la aplicación del método de tomografía eléctrica en el estudio de la estructura de rellenos sanitarios, como el publicado por Ganelle *et al.* (2012), en el que se estudia la cobertura del relleno para poder identificar zonas de posible filtración del agua pluvial hacia la basura almacenada.

1.1. Objetivo de la investigación

Estimar el volumen del Sitio de Disposición Final “Prados de la Montaña”, a partir de la modelación del mismo mediante datos obtenidos con la técnica de tomografía de resistividad eléctrica. Asimismo, integrar la información geoelectrica con la información topográfica e identificar la percolación de lixiviados en los perfiles de resistividad eléctrica, en caso de que estuviera presente.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO ELÉCTRICO

2.1. Resistividad eléctrica

La resistencia eléctrica se puede definir a partir de un cubo homogéneo, con lados de longitud L , a través del cual pasa una corriente eléctrica I . El material del cual se encuentra formado el cubo, resiste el paso de la corriente a través de él, resultando así en una diferencia de potencial V entre las caras opuestas de dicho cuerpo.

Se sabe que la resistencia eléctrica de un objeto es el grado de oposición al paso de una corriente a través de éste, teniendo en cuenta que la resistencia eléctrica es inversamente proporcional al área de la sección A y directamente proporcional a la longitud L del material (Lizarazo y Gómez, 2007). Con lo anterior, se tiene que la resistencia eléctrica a través de un cubo de volumen unitario estará dada por la siguiente expresión:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad \dots (2.1)$$

donde la constante de proporcionalidad ρ se define como la resistividad eléctrica, la cual es un parámetro característico para cada material (Cano, 2005).

De acuerdo a la Ley de Ohm, la resistencia también puede estar definida en términos del cociente entre la diferencia de potencial V y la corriente eléctrica que atraviesa un cuerpo, es decir:

$$R = \frac{V}{I} \quad \dots (2.2)$$

Igualando las expresiones (3.2) y (3.3) y despejando la resistividad, podemos entonces expresar esta propiedad eléctrica de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{V \cdot A}{I \cdot L} \quad \dots (2.3)$$

cuyas unidades en el Sistema Internacional estarán dadas en Ωm . Es de esta forma en que llegamos al concepto de resistividad, la cual se define como la medida de la oposición al paso de la corriente eléctrica a través de un material determinado, aunque también podría haberse considerado como la facilidad de permitir el paso a la corriente, resultando así el concepto de conductividad eléctrica σ , con unidades en el Sistema Internacional de *Siemens/m* y que expresado numéricamente, resultará ser el inverso de la resistividad (Orellana, 1982), es decir:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad \dots (2.4)$$

2.2. Ecuaciones fundamentales

Se considera el subsuelo como un semiespacio de resistividad ρ_1 y a la atmósfera, que representará otro semiespacio de resistividad infinita ρ_2 . El campo eléctrico se podrá establecer por medio de un generador de corriente conectado por medio de cables a 2 electrodos, A y B, que estarán parcialmente clavados al subsuelo (Orellana, 1982). En la Figura 2.1 se observa que la corriente I_A penetrará al subsuelo por el electrodo A y después de recorrerlo, por el electrodo B saldrá una intensidad de corriente I_B la cual regresará al generador para cerrar el circuito, satisfaciendo:

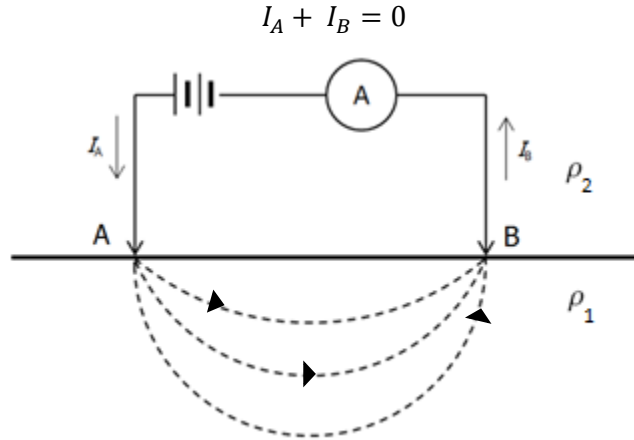


Figura 2.1. Inyección de corriente eléctrica al terreno (Orellana, 1982)

Para establecer las leyes que describen este fenómeno se partirá de las ecuaciones de Maxwell, las cuales describen el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos (Orellana, 1982):

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \dots (2.5)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad \dots (2.6)$$

donde, por tratarse de un campo estacionario, las derivadas temporales habrán de anularse. De esta forma las expresiones (2.5) y (2.6) se podrán escribir de la siguiente manera:

$$\nabla \times E = 0 \quad \dots (2.7)$$

$$\nabla \times H = J \quad \dots (2.8)$$

La expresión (2.7) nos dice que el campo eléctrico E es conservativo, por lo que deriva de un campo escalar U , es decir:

$$E = -\nabla U \quad \dots (2.9)$$

donde se incluye el signo menos, según la convención comúnmente aceptada (Orellana, 1982).

Por otra parte, se deberá de cumplir con la Ley de Ohm en su forma diferencial para medios isótropos, la cual expresa que la densidad de corriente J en un punto, tiene la misma dirección y sentido que el campo E en el mismo punto, y que es proporcional a él.

$$J = \sigma E \quad \dots (2.10)$$

En todos los puntos, excepto en los electrodos, se deberá cumplir la ecuación de continuidad, que para medios estacionarios se puede definir de la siguiente manera:

$$\nabla \cdot J = 0 \quad \dots (2.11)$$

Al combinar la expresión (2.11) con las anteriores, se tiene que:

$$\nabla \cdot (\sigma E) = 0 \quad \dots (2.12)$$

la cual es la expresión más general de la prospección eléctrica. Desarrollando la ecuación:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\sigma E) &= \sigma \nabla \cdot E + E \cdot \nabla \sigma = -\sigma \nabla \cdot \nabla U + E \cdot \nabla \sigma \\ &= \sigma \nabla^2 U + E \cdot \nabla \sigma = 0 \end{aligned}$$

al ser σ constante en el semiespacio, se obtiene la expresión:

$$\nabla^2 U = 0 \quad \dots (2.13)$$

que es la ecuación de Laplace, la cual será válida en todo el semiespacio a excepción de en los electrodos.

Si se traza una superficie semiesférica, como la que se muestra en la Figura 2.2, alrededor del electrodo A , la densidad de corriente J en cualquier punto de dicha superficie tendrá el mismo valor. Si se considera un radio r , la integral de J sobre la superficie semiesférica será igual a l , es decir:

$$2\pi r^2 J = l \quad \dots (2.14)$$

Combinando las expresiones (3.14) y (3.10) y despejando el campo eléctrico, se tendrá:

$$E = \frac{l\rho}{2\pi r^2} \quad \dots (2.15)$$

lo que indica que el campo eléctrico E de un electrodo puntual es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r

De la expresión (2.9), la diferencia de potencial entre 2 puntos, M y N , estará dada por:

$$\Delta V = U_N^M = - \int_N^M E \cdot dl \quad \dots (2.16)$$

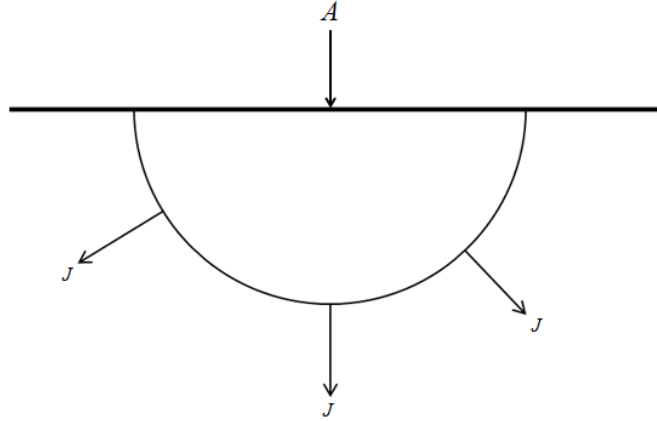


Figura 2.2. Vector densidad de corriente en un semiespacio homogéneo, con electrodo puntual en la superficie límite (Orellana, 1982)

Entonces, si definimos a r_1 y r_2 como las distancias desde el electrodo A hasta los puntos M y N , respectivamente, y combinando la expresión (2.15) y (2.16), se tendrá:

$$\Delta V = U_N^M = \frac{l\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad \dots (2.17)$$

Por convención, se toma como origen de potenciales un punto situado a una distancia infinita de la fuente que produce el campo, donde el potencial absoluto se encuentra en el punto M . Al calcular el límite de la expresión (2.17) para cuando $r_2 \rightarrow \infty$ se obtiene que:

$$U_M = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{r_1} \quad \dots (2.18)$$

donde la primera fracción recibe el nombre de emisividad (Orellana, 1982). Debido a que el potencial es una magnitud aditiva, al ser varias fuentes, habrá que sumar cada uno de los potenciales, teniendo así:

$$U = \frac{\rho}{2\pi} \sum \frac{I_i}{r_i} \quad \dots (2.19)$$

2.3. Resistividad aparente

Hasta ahora sólo se ha considerado un semiespacio homogéneo e isótropo, sin embargo, el subsuelo se comporta de manera muy compleja, debido a que existen heterogeneidades en el medio, dando como resultado variaciones de resistividad con respecto a la posición relativa de cada electrodo. Esta condición impide el uso de la expresión (2.19). De este modo se tendrá que buscar una integral de la ecuación de Laplace que satisfaga las condiciones de entorno, las cuales estarán definidas por las características del medio (Orellana, 1982).

Para cualquier tipo de dispositivo electródico, el cual se explica en el siguiente apartado, si se conoce la distancia entre los electrodos, la Intensidad de corriente que fluye entre los electrodos A y B , así como la diferencia de potencial entre los electrodos M y N , podemos calcular la resistividad aparente ρ_a de la siguiente forma

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad \dots (2.20)$$

en donde K es el factor geométrico, el cual representa los efectos de la distancia de abertura entre los electrodos de corriente y de potencial con respecto a la distribución espacial de cada punto de atribución, es decir, K representa la relación que existe entre la propiedad física medida y la relación potencial eléctrico/intensidad de corriente (Milsom, 2003).

Para el caso de un medio homogéneo la expresión (2.20) nos arrojará el valor de la resistividad real. Es decir, si el terreno fuera homogéneo, la resistividad que se obtiene a partir de la expresión (2.20), tendría que ser constante e independiente del espaciamiento que existe entre los electrodos (Parasnis, 1997).

2.4. Dispositivos electródicos

Cómo ya se mencionaba en el punto anterior, un dispositivo electródico consta de 4 electrodos A , B , M y N (Figura 2.3).

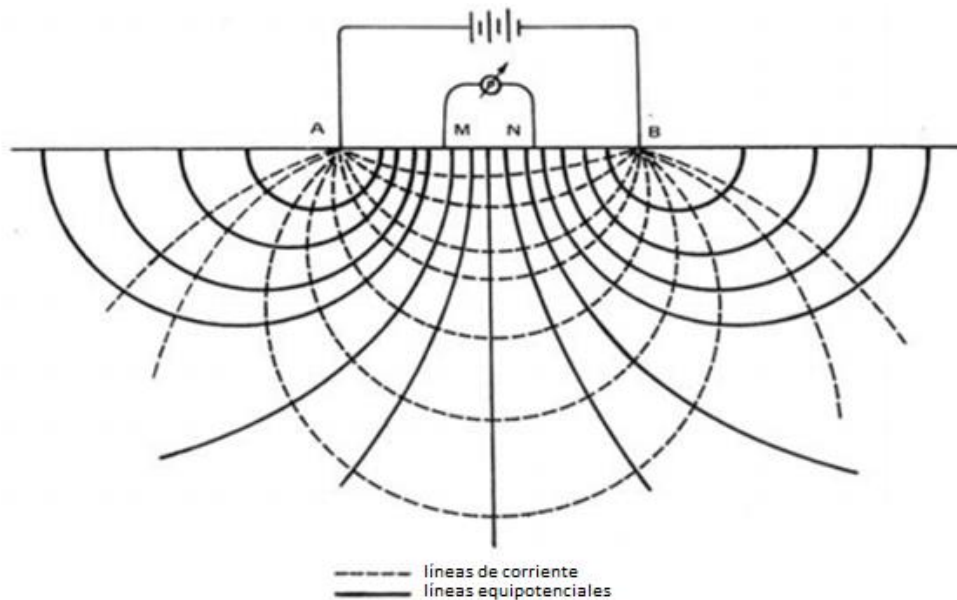


Figura 2.3. Esquema básico del funcionamiento de los dispositivos electródicos (Cantos, 1987).

Se basan en introducir en el subsuelo un campo eléctrico de corriente continua mediante 2 electrodos de corriente, A y B , conectados a un amperímetro, mientras que con los otros 2

electrodos, M y N , se mide la diferencia de potencial eléctrica creada por los electrodos A y B . Tenemos así 2 circuitos independientes. El primero recibe el nombre de circuito de corriente y el segundo es llamado circuito de potencial (Orellana, 1982).

De acuerdo con Parasnis (1997), la resistividad aparente obtenida a partir de una medición con un dispositivo electródico, no es un promedio de las resistividades obtenidas del subsuelo, sino que cada valor de resistividad es una medición individual que está asociada al punto atribuido al centro del dispositivo (dependiendo de la geometría de éste) y está en función del espaciamiento de los electrodos y la distribución real de resistividad.

Para el caso más general, en donde los 4 electrodos están dispuestos de modo cualesquiera, en línea recta y sobre una superficie plana, la diferencia de potencial ΔV se podrá obtener mediante la siguiente expresión.

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad \dots (2.21)$$

en donde AM , BM , AN y BN son las distancias entre cada par de electrodos. Por lo tanto, con base en las expresiones (2.20) y (2.21), podemos definir a la resistividad aparente de un medio de la siguiente manera:

$$\rho_a = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \frac{\Delta V}{I} \quad \dots (2.22)$$

En este caso el factor geométrico del dispositivo es:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1}$$

En los medios en donde la prospección geoelectrica interviene, se cumple con el Principio de Reciprocidad, por lo que al cambiar de posición los electrodos de corriente por los de potencial, la expresión permanece invariable (Orellana, 1982)

2.5. Configuraciones electródicas

En la práctica habitual, los electrodos $AMNB$ se disponen de modo que los dispositivos de medición sean fáciles de manejar. Entre estos, los más usados son los dispositivos electródicos lineales, en donde los cuatro electrodos se encuentran sobre una misma línea recta

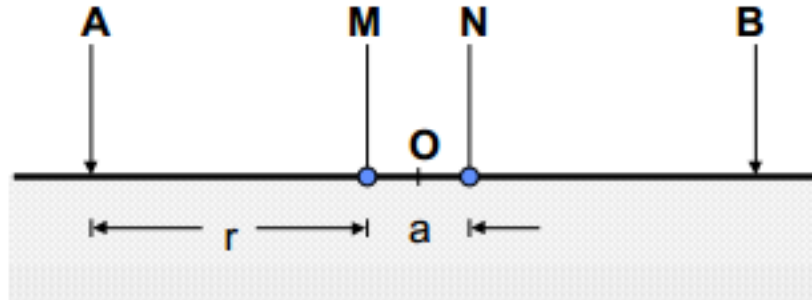


Figura 2.4. Dispositivo electrodico lineal y simetrico (Modificado de Orellana, 1982).

Si además se disponen simétricamente respecto del centro O del dispositivo, se tendrá un dispositivo lineal y simétrico (Orellana, 1982). Para este caso, la diferencia de potencial entre 2 puntos cualesquiera, estará dada por:

$$\Delta V = U_N^M = \frac{\rho I}{\pi} \frac{a}{r(r+a)} \quad \dots (2.23)$$

Partiendo de la expresión anterior y considerando que se obtendrá la medición de una resistividad aparente, se tendrá que:

$$\rho_a = \pi \frac{r(r+a)}{a} \frac{\Delta V}{I} \quad \dots (2.24)$$

A continuación se presentan las configuraciones más recurridas en la prospección geoelectrica y sus características, mismas que se resumen en la Tabla 2

2.5.1. Configuración Wenner

En esta configuración los electrodos se disponen equidistantes en el orden $AMNB$, de modo tal $AM = MN = NB = a$.

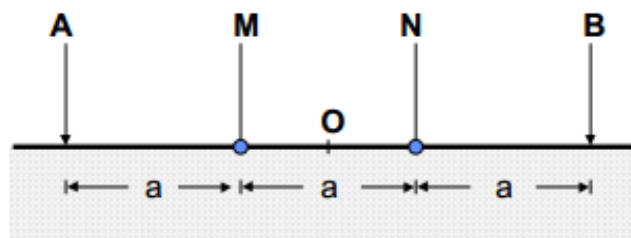


Figura 2.5. Dispositivo Wenner (Modificado de Orellana, 1982)

De esta forma, el cálculo de la resistividad aparente puede expresarse de la siguiente manera:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I}$$

En donde el factor geométrico del dispositivo Wenner está dado por:

$$K = 2\pi a$$

2.5.2. Configuración Schlumberger

Se trata de una disposición de los electrodos de la forma $AMNB$, donde la distancia entre los electrodos de potencial MN es mucho menor a la distancia entre los electrodos de corriente AB . En la práctica $AB > 5MN$ (Orellana, 1982).

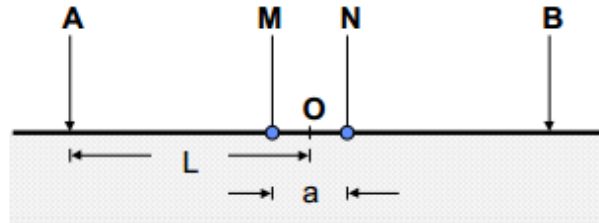


Figura 2.6. Dispositivo Schlumberger (Modificado de Orellana, 1982)

Si llamamos L a la distancia $OA = OB$, la expresión (2.24) se podrá representar de la siguiente manera:

$$\rho_a = \pi \left(L^2 - \frac{a^2}{4} \right) \frac{\Delta V}{Ia}$$

2.5.3. Configuración Dipolo – Dipolo

En este dispositivo los electrodos son colocados en el orden $ABMN$.

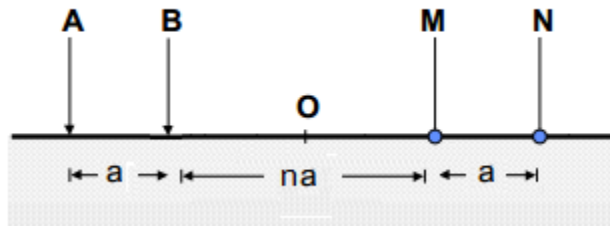


Figura 2.7. Dispositivo Dipolo – Dipolo (Modificado de Orellana, 1982)

Teniendo en cuenta que la separación entre los electrodos de corriente y los de potencial serán iguales y la separación entre ambos pares de electrodos será proporcional a la distancia entre cada

par de electrodos, la resistividad aparente para este arreglo electródico puede expresarse de la siguiente manera:

$$\rho_a = \pi a (n + 2)(n + 1)(n) \frac{\Delta V}{I}$$

2.5.4. Configuración Polo – Dipolo

En este dispositivo, el electrodo B se lleva a una gran distancia (teóricamente, se lleva al infinito) de los otros 3. Para esta configuración, la resistividad aparente estará dada por

$$\rho_a = 2\pi \frac{r(a+r)}{a} \frac{\Delta V}{I}$$

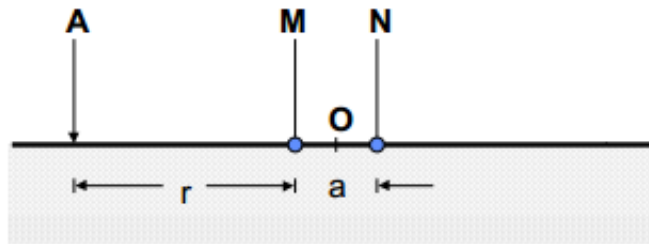


Figura 2.8. Dispositivo Polo – Dipolo (Modificado de Orellana, 1982)

2.6. Técnicas de Prospección

En la compilación realizada por Knödel (2007), se determina que en las mediciones de resistividad se pueden utilizar los siguientes métodos de operación:

2.6.1. Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)

Se puede definir al Sondeo Eléctrico Vertical, o por sus siglas SEV, como una serie de mediciones de la resistividad aparente del subsuelo, efectuadas con la misma configuración electródica y aumentando la separación entre los electrodos de corriente y los de potencial para cada medición (Orellana, 1982).

El objetivo del SEV es el de obtener un modelo unidimensional de la variación de la resistividad aparente en función de la profundidad a partir de las mediciones de la diferencia de potencial obtenidas en superficie.

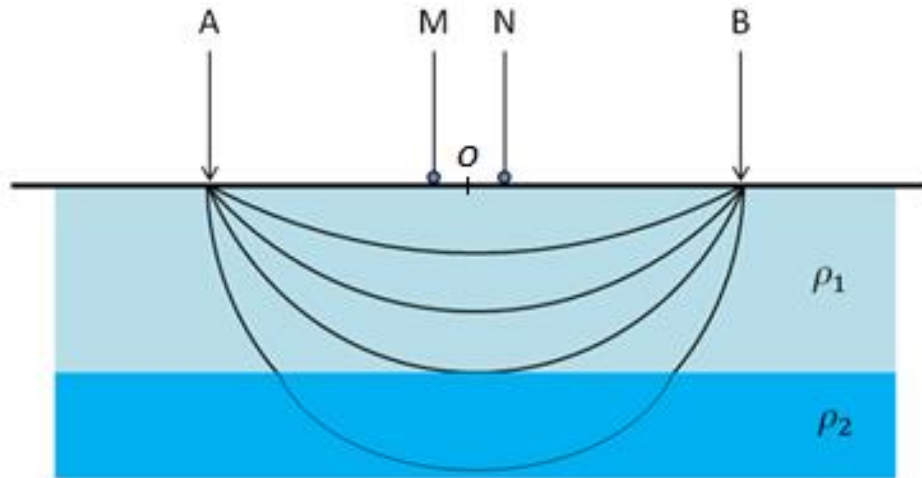


Figura 2.9. Principio del SEV. A medida que A y B se separan, la corriente penetrará en las capas más profundas (Gasulla, 1999)

La profundidad alcanzada por la corriente eléctrica dependerá de la separación que exista entre los electrodos de corriente y de las propiedades eléctricas del subsuelo. Si la distancia entre electrodos AB aumenta, la corriente circula a mayor profundidad, aunque la densidad de corriente disminuye. Podría pensarse que la profundidad de investigación es proporcional a la separación AB , sin embargo esto no siempre se cumple dado que lo anterior sólo sería válido para un semiespacio homogéneo (Orellana, 1982).

La efectividad del método corresponde al caso en el que el SEV se utiliza para el estudio de medios estratificados, de capas lateralmente homogéneas en lo que respecta al parámetro de resistividad. La experiencia demuestra que los resultados obtenidos son válidos para medios en donde los estratos alcanzan una inclinación de hasta 30° (Orellana, 1982).

2.6.2. Calicata eléctrica

La finalidad de las calicatas eléctricas es el de obtener un perfil de la variación lateral de la resistividad del subsuelo a una profundidad de investigación aproximadamente constante. Este tipo de estudio es el ideal cuando se pretende detectar contactos verticales o inclinados, o bien, cuerpos y estructuras que se presentan como heterogeneidades laterales de resistividad (Orellana, 1982).

La profundidad de investigación con esta técnica estará en función de la separación que exista entre electrodos, así como por la distribución de resistividades del subsuelo. En la práctica, las calicatas eléctricas consisten en trasladar los 4 electrodos a lo largo de un perfil, manteniendo constante la separación entre electrodos, para obtener un perfil de resistividades por debajo de la línea estudiada (Parasnis, 1997).

2.7. Tomografía eléctrica

Complementando la compilación de Knödel (2007) se tiene la técnica de la tomografía de resistividad eléctrica (TRE) o simplemente tomografía eléctrica y que se puede definir como el fruto de la evolución y la conjunción de los métodos geoelectricos clásicos, como son el SEV y la calicata eléctrica (Tapias *et al.*, 2003). Con esta metodología se pueden realizar estudios e investigaciones en dos dimensiones (o tres dimensiones) y de la que se pueden obtener resultados fiables en áreas con una geología moderadamente compleja (Griffiths y Barker, 1993).

La tomografía eléctrica es una técnica de exploración geofísica cuyo objetivo específico es el de determinar la distribución de la resistividad eléctrica en el subsuelo. Esto se puede obtener mediante la inyección de una corriente eléctrica continua en la superficie del terreno a través de 2 electrodos y midiendo la diferencia de potencial en otro par de electrodos a lo largo de una línea o un perfil y hasta un cierto rango de profundidad (Lugo *et al.*, 2008).

Las mediciones obtenidas corresponden a valores de resistividad aparente. Una vez procesados los datos, se obtiene información sobre la distribución de resistividad real del subsuelo. Es importante mencionar que las medidas se deben de realizar involucrando varios rangos de profundidad, la cual estará en función de la apertura de los electrodos de corriente (Figura 2.10).

El equipo durante cada medición obtiene información sobre las variaciones tanto verticales como horizontales de la resistividad del subsuelo. La relación entre la resistividad aparente y la resistividad verdadera es una relación compleja, en la cual es necesario aplicar técnicas de inversión de los datos para la determinación de la resistividad real del subsuelo a partir de los datos de resistividad aparente (Loke, 2012).

El resultado que se obtiene después del procesamiento de los datos, es una imagen en 2D distancia-profundidad que muestra la distribución de resistividad real del subsuelo y que puede ser interpretado en términos geológicos (Aracil *et al.*, 2003).

La técnica de tomografía eléctrica se puede dividir en dos etapas. La primera consiste en la adquisición de datos en campo y la segunda etapa corresponde a la inversión de los datos, dando como resultado una imagen eléctrica (Tejero *et al.*, 2002).

2.7.1. Adquisición de datos en campo

En la práctica, los estudios realizados por el método de tomografía de resistividad eléctrica se realizan a lo largo de un perfil, en el que se colocarán de manera equiespaciada los electrodos que a su vez se unirán a los nodos de cables multinúcleo; estos últimos se conectarán a un resistivímetro que será el encargado de establecer y coordinar la secuencia de mediciones (Loke, 2012).

Uno de los factores que influyen en la efectividad del método para obtener una imagen eléctrica, es la densidad de datos de resistividad eléctrica. Como ejemplo, en la figura 3.10 se muestra una posible sucesión de mediciones utilizando el arreglo Wenner para un perfil de 20 electrodos.

Hasta el momento, la nomenclatura que se ha manejado para distinguir los electrodos era A y B , para los de corriente, mientras que para los de potencial, M y N . Nótese que para este ejemplo los electrodos de corriente serán definidos como C_1 y C_2 , mientras los de potencial como P_1 y P_2 . La separación entre electrodos adyacentes será a y los niveles de investigación estarán definidos por la letra n .

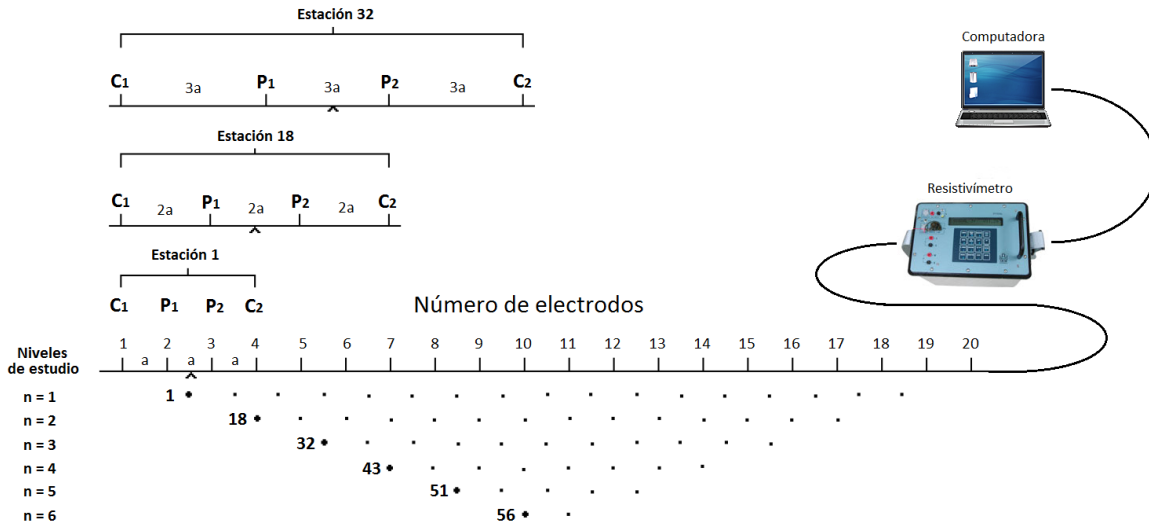


Figura 2.10. Secuencia de mediciones para la construcción de una pseudosección (Loke, 2012)

El primer paso para la adquisición de datos es realizar todas las mediciones de resistividades aparentes posibles con una separación de $1a$ entre electrodos. Para la primera medición se utilizan los electrodos 1, 2, 3 y 4. Para el caso del dispositivo Wenner, el electrodo 1 funciona como el electrodo de corriente C_1 , el electrodo 2 como electrodo de potencial P_1 , el electrodo 3 como segundo electrodo de potencial P_2 y el electrodo 4 como el segundo electrodo de corriente C_2 . Para la segunda medición se utilizan los electrodos 2, 3, 4 y 5, para C_1 , P_1 , P_2 y C_2 , respectivamente. Esto se repite sobre la línea de electrodos hasta que se utilizan los electrodos 17, 18, 19 y 20 para la última medición con un espaciamiento de $1a$.

Después de completar la primera secuencia de medidas con una separación entre electrodos de $1a$, se realizan las medidas pero ahora con un espaciamiento entre electrodos de $2a$. Para la primera medición se utilizan los electrodos 1, 3, 5 y 7. Para la segunda medición se utilizan los electrodos 2, 4, 6 y 8. El proceso se repite hasta que se utilizan los electrodos 14, 16, 18 y 20. Este mismo proceso se repite para medidas con espaciamiento $3a$, $4a$, $5a$ y $6a$.

2.7.2. Inversión de los datos

Los valores de resistividad aparente obtenidos en campo son utilizados para generar imágenes eléctricas. Para esto, es necesario convertir la pseudosección de resistividades aparentes en un

modelo de resistividades verdaderas. Lo anterior es posible mediante la aplicación de algoritmos de inversión de estos datos, dando como resultado una imagen eléctrica (Urbieta, 2001)

El proceso de inversión de los datos de resistividad busca obtener un modelo del subsuelo que pueda ser considerado como una solución válida y que a su vez sea compatible con los datos de campo. Por lo tanto, los datos teóricos y los obtenidos en la práctica deben de ser semejantes entre sí (Loke y Barker, 1996). Durante el proceso de inversión, se toma como criterio de convergencia el valor del error cuadrático medio (RMS), entre los datos de campo y la respuesta del modelo teórico después de cada iteración. Si el valor del RMS se encuentra por encima de la tolerancia de error predefinido por el usuario, se rediseña el modelo. Cuando el valor del RMS sea aceptable, se puede decir que la inversión ha convergido y que el proceso de inversión se encuentra terminado. Se debe de tener en cuenta que el modelo que tenga el más bajo RMS puede, algunas veces, no ser siempre el “mejor” modelo desde la perspectiva geológica (Loke, 2012).

Uno de los algoritmos más utilizados en la inversión de imágenes eléctricas es el desarrollado por Loke y Barker (1996), que está basado en un método de mínimos cuadrados que produce un modelo en 2D, libre de distorsiones en la pseudosección de resistividad aparente ocasionadas por el tipo de arreglo electródico empleado. El modelo de inversión divide el subsuelo en un pequeño número de prismas rectangulares e intenta determinar los valores de resistividad de cada prisma y poder así minimizar la diferencia entre los valores de resistividad aparente entre los datos observados y los calculados (Loke, 2012).

Entonces, la resistividad aparente puede quedar expresada en términos de la expansión de primer orden de la serie de Taylor (Loke y Barker, 1996):

$$\rho_a = F(\vec{p}) + \sum_{k=1}^M \frac{\partial F(\vec{p})}{\partial p_k} \delta p_k \quad \dots (2.25)$$

donde \vec{p} es el vector de parámetros de dimensión M. Por lo tanto, la resistividad verdadera para el k-ésimo prisma es p_k y $F(\vec{p})$ es la función que determina la resistividad aparente. Para obtener un buen modelo de inversión se necesita reducir la diferencia entre la resistividad observada y la resistividad calculada o estimada a partir del modelado directo, dicha diferencia puede ser definida de la siguiente manera:

$$\delta \rho_a = \rho_a^{obs} - \rho_a^{est} \quad \dots (2.26)$$

en donde ρ_a^{obs} es la resistividad aparente y ρ_a^{est} es la resistividad calculada a partir del modelo. El RMS de la expresión anterior queda entonces expresado de la siguiente manera:

$$E^2 = \sum_{j=1}^N (\rho_{aj}^{obs} - \rho_{aj}^{est})^2 \quad \dots (2.27)$$

en donde N es el número de mediciones en un nivel. Sustituyendo la resistividad aparente de la expresión (2.25) en (2.27), se tiene:

$$E^2 = \sum_{j=1}^N \left(\rho_{aj}^{obs} - F_j(\vec{p}) - \sum_{k=1}^M \frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_k} \delta p_k \right)^2 \quad \dots (2.28)$$

Como se mencionó anteriormente, se necesita reducir el RMS con respecto del vector de resistividades \vec{p} , es decir:

$$\frac{\partial E^2}{\partial p_i} = 2 \sum_{j=1}^N \left(\rho_{aj}^{obs} - F_j(\vec{p}) - \sum_{k=1}^M \frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_k} \delta p_k \right) \left(-\frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_i} \right) = 0 \quad \dots (2.29)$$

donde $i = 1, 2, \dots, M$. La expresión (2.30) es conocida como la ecuación de ajuste normal, la cual se puede mostrar de la siguiente forma:

$$\sum_{k=1}^M \delta p_k \sum_{j=1}^N \frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_k} \frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_i} = \sum_{j=1}^N \frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_k} \delta \rho_{aj} \quad \dots (2.30)$$

La expresión (2.30) comúnmente es expresada en forma matricial, modificada, para obtener una solución en términos de $\delta \rho_a$ (Loke y Barker, 1996), donde:

$$\delta \rho_a = (J^T J + \lambda C^T C)^{-1} J \delta \rho_a \quad \dots (2.31)$$

donde λ es un factor de amortiguamiento que asegura la convergencia de la solución, C es un filtro de convergencia que minimiza las perturbaciones en el modelo y que lo aproxima a un valor constante, el símbolo (T) indica la matriz transpuesta y (J) son los elementos de la matriz Jacobiana de derivadas parciales y que son definidos de la siguiente forma:

$$J_{pk} = \frac{\partial F_j(\vec{p})}{\partial p_k}$$

Un inconveniente en los procesos de inversión de datos es el problema de la no unicidad. La solución al problema inverso en la prospección geoelectrica no es única porque existen diversas combinaciones entre los parámetros del algoritmo de inversión que pueden resultar en modelos semejantes. Esto no ocurre al obtener el modelo directo, debido a que éste es una solución única al problema. Lo anterior nos lleva a restringir al modelo, a partir de la información geológica disponible, valores críticos de resistividad, o bien, información derivada de otros métodos geofísicos (Tapias *et al.*, 2003)

3. ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Marco geográfico y fisiográfico regional

La Cuenca de México forma parte de la provincia fisiográfica denominada Eje Neovolcánico Transmexicano y se encuentra situada entre los meridianos $98^{\circ}15'$ y $99^{\circ}30'$ de longitud oeste y entre los paralelos $19^{\circ}00'$ y $20^{\circ}15'$ de latitud norte, con una altitud promedio de 2240 m.s.n.m.

La cuenca de México, formada principalmente de la actividad volcánica del Cuaternario (Figura 3.1), se encuentra limitada por elevaciones topográficas como son la Sierra de Pachuca al norte, al sur por las Sierras del Ajusco y de Chichinautzin, al sureste por las estribaciones de la Sierra Nevada de donde sobresalen los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl, el límite al noroeste definido por la Sierra de Tezontlalpan, al oeste las Sierras de Monte Alto y Monte Bajo y al suroeste por la Sierra de las Cruces (Secretaría del Medio Ambiente, 2002).

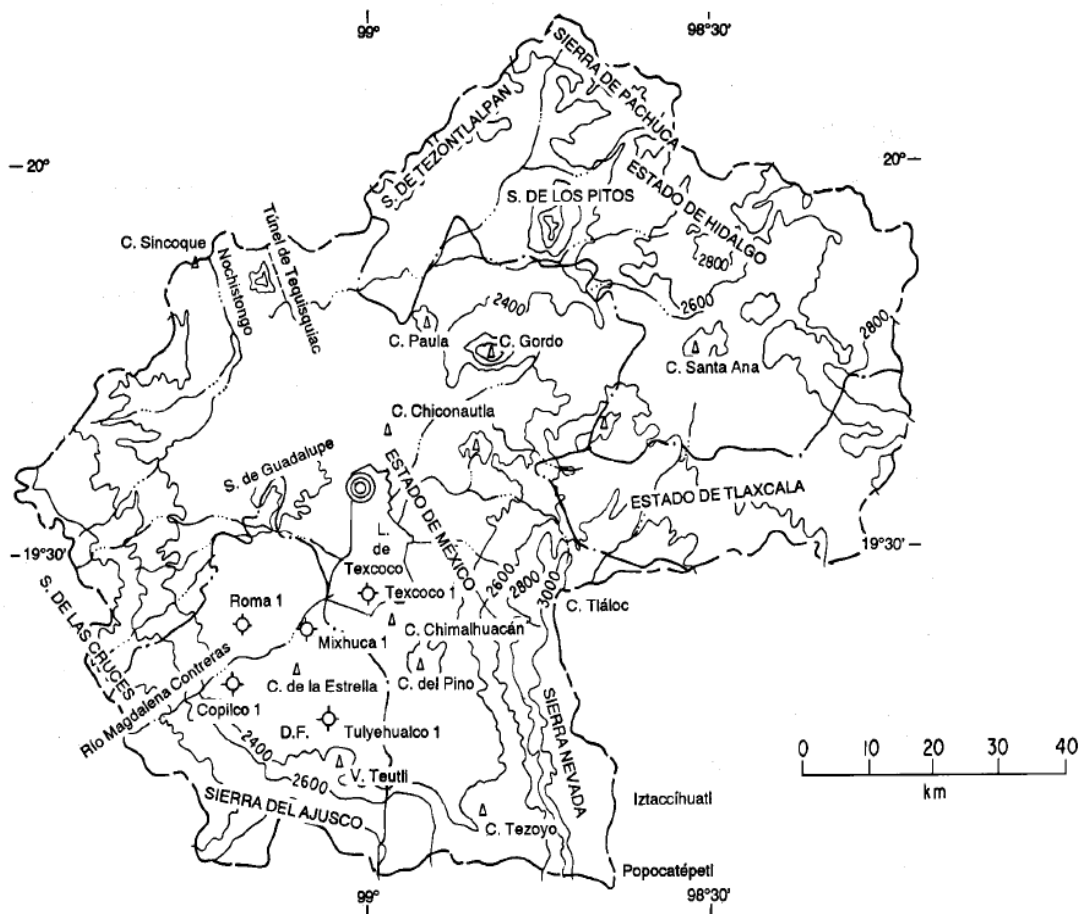


Figura 3.1. Mapa fisiográfico en donde se indican los límites de la cuenca de México (Enciso-De la Vega, 1992)

3.2. Marco Geológico Regional

En los estudios realizados por Vázquez-Sánchez y Jaimes-Palomera (1989), se propone la geología de la cuenca de México de la siguiente manera: durante el Aptiano hasta el Turoniano Tardío prevaleció el depósito de sedimentos calcáreos de origen marino presentándose un periodo de levantamiento y erosión, el cual inició con la acumulación de anhidrita proseguida por sedimentación calcárea con dolomitización diagenética en ambiente de plataforma marina en la zona meridional, mientras que en la región septentrional solamente se presentaron depósitos calcáreos en condiciones marinas profundas.

Ya en el periodo comprendido entre el Coniaciano y el Campaniano Temprano, la sedimentación calcárea cambió a ser una sedimentación de tipo flysh como posible consecuencia del levantamiento del Arco Magmático Cretácico al poniente.

Debido a la orogenia Laramide, las secuencias cretácicas fueron plegadas en el transcurso del Maestrichtiano al Eoceno Temprano y que afectó gran parte del territorio nacional. Al finalizar dicho plegamiento, aconteció un fallamiento normal conjugado con desplazamiento lateral derecho, contemporáneamente con sedimentación clástica continental del tipo molasa y con efusiones fisurales basálticas alcalinas.

Relacionado a la actividad del Arco Magmático del Terciario Medio, se encuentran rocas volcánicas de composición calco – alcalina que van de la andesita a la riolita y que son contemporáneas de la secuencia de ignimbritas de la Sierra Madre Occidental.

Andesitas basálticas, andesitas y dacitas calco-alcalinas del Mioceno Medio – Tardío, Plioceno Temprano – Tardío y del Cuaternario, así como los basaltos alcalinos y calco-alcalinos del Plio – Cuaternario y las andesitas basálticas del Cuaternario, son producto de los eventos volcánicos que se asocian genéticamente con el Arco Volcánico Transmexicano, así como fallas normales del Plio – Cuaternario con una orientación preferencia E – O.

Originalmente, la cuenca de México tuvo un régimen de tipo fluvial exorreico, cuyos drenes iban hacia el sur, pero el intenso volcanismo que edificara a la Sierra Chichinautzin, cerró el drenaje de la cuenca dejando así las aguas pluviales encajonadas. Es así como se llega al actual régimen endorreico de la cuenca de México y la constante sedimentación lacustre producto del Pleistoceno – Holoceno.

3.3. Marco geográfico y fisiográfico local

El SDF de Prados de la Montaña se encuentra situado al oriente del Distrito Federal, cerca de los límites de la delegación Álvaro Obregón con la delegación Cuajimalpa, con coordenadas geográficas entre los 99°15'30" y 99°16'00" de longitud O y entre los 19°21'15" y 19°21'45" de latitud N (Sánchez y Sámano, 1996), a una altitud de 2596 m.s.n.m., en la subprovincia fisiográfica denominada Lagos y Volcanes de Anáhuac.

La delegación Álvaro Obregón se extiende desde las altas cimas de la sierra de las Cruces hasta las riberas de la planicie lacustre (Lugo-Hubp *et al.*, 1995), situada sobre las laderas del volcán San Miguel. Cuenta con una extensión de 96.1 km², que representa casi el 6.5% de la superficie total del Distrito Federal. Colinda al oriente con la delegación Benito Juárez y Coyoacán, al sur con Magdalena Contreras y Tlalpan, al norte con Miguel Hidalgo y al poniente con Cuajimalpa.

La delegación Álvaro Obregón está conformada por una serie de estructuras de origen volcánico entre las que se destacan el Cerro del Triángulo, el Cerro de San Miguel, el Cerro de la Cruz de Cólica, el Cerro Temamatla, entre otros.

El relieve de esta delegación se puede dividir en tres unidades principales (Figura 3.2)

- Laderas montañosas
- Piedemonte
- Planicie lacustre y riberas

Las laderas montañosas, enclavadas en la Sierra de las Cruces y que constituyen la parte más alta de la demarcación, son superficies con una fuerte inclinación que llegan a tener más de 15° y que se presentan a partir de los 2700 m.s.n.m.

La zona de transición entre las laderas y el piedemonte, llamado por Mooser (1986) como abanicos volcánicos, se reconoce fácilmente por el cambio de pendiente que va de los 15-30° a unos 6°. El piedemonte se encuentra cortado por una serie de barrancos profundos entre los que se destacan La Malinche, San Ángel, Puerta Grande, Mixcoac, Becerra y Tacubaya, los cuales fueron formados principalmente por una erosión remontante.

La planicie se encuentra urbanizada totalmente y es la porción más baja de la delegación, con pendientes muy suaves entre los 0.5 – 3°. En el extremo meridional de esta unidad, se puede reconocer una de las formas más jóvenes del relieve, una colada de lava originada por el Volcán Xitle hace unos 2,200 años (Lugo-Hubp *et al.*, 1995).

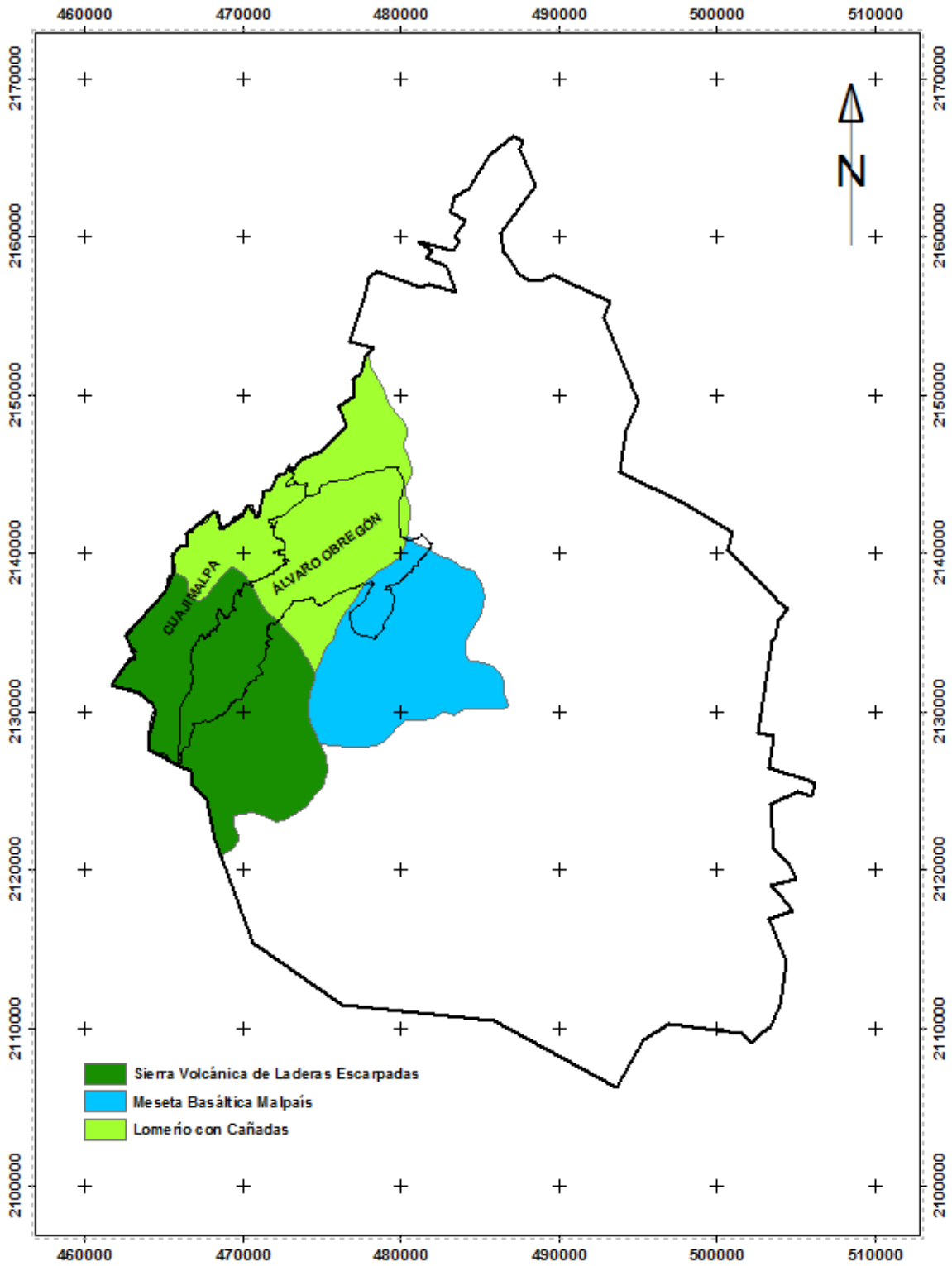


Figura 3.2. Principales unidades fisiográficas presentes en la zona de estudio (Fuentes, 2011)

3.4. Marco geológico local

Las rocas que afloran en la delegación Álvaro Obregón corresponden al Cuaternario y su edad absoluta, así como su posición estratigráfica han sido establecidas gradualmente en los últimos años, aunque no en forma definitiva (Lugo-Hubp *et al.*, 1995). Debido a la actividad volcánica que dio origen a la Sierra de las Cruces, el área de estudio se constituye en su mayoría por depósitos vulcano-sedimentarios con intercalaciones de coladas de lava.

A continuación se describe de manera muy general las formaciones y tipos de rocas que se encuentran en la delegación Álvaro Obregón:

- *Andesitas del Terciario – Plioceno*: Es la unidad más antigua y consiste en rocas volcánicas como son las andesitas y las dacitas del Mioceno, las cuales están expuestas con una expresión morfológica serrana y que forman parte del conjunto morfoestructural de la Sierra de las Cruces.
- *Depósitos vulcano-sedimentarios del Terciario – Plioceno – Cuaternario*: El piedemonte de la Sierra de las Cruces que corresponde al área poniente de la cuenca de México está constituido por diversos sedimentos, que trabajos previos de Bryan (1948) y Arellano (1952) llamaron formación Tarango, de la cual se calcula que tenga un espesor de unos 300 m y que se muestra como indicio del fin del gran vulcanismo en la región. La formación Tarango está constituida de acuerdo con Bryan (1948) por tobas, brecha-toba, depósitos fluviales con clastos de origen volcánico y capas delgadas de pumicita, aunque en sus alrededores está constituida por depósitos de lahar, flujos de lodo y depósitos aluviales. Cabe mencionar que sobre esta formación se encuentra el área de estudio de este trabajo (Figura 3.3).
- *Basaltos del Cuaternario*: En la porción sureste de la Cuenca de México se extiende una gran losa rocosa conformada por rocas de origen volcánico, como basaltos y andesitas basálticas, las cuales fluyeron aparentemente desde el volcán del Xitle. Estos derrames basálticos aparecen intercalados con algunos horizontes de tezontle y presentan estructuras primarias como túneles de lava y chimeneas de explosión, los cuales afloran en la zona de los pedregales.
- *Aluviones del Cuaternario*: En el lecho de algunos arroyos y desembocaduras de las cañadas, se pueden identificar depósitos de materiales fluviales compuestos por arenas y gravas de rocas ígneas andesíticas y dacíticas, así como fragmentos de piroclastos de pómez.
- *Depósitos lacustres del Cuaternario*: La parte más baja de la cuenca de México está cubierta por la acumulación de sedimentos de origen lacustre. Estos materiales limo-arcillosos con intercalaciones de material volcánico fueron explotados como bancos de material para elaborar ladrillos.

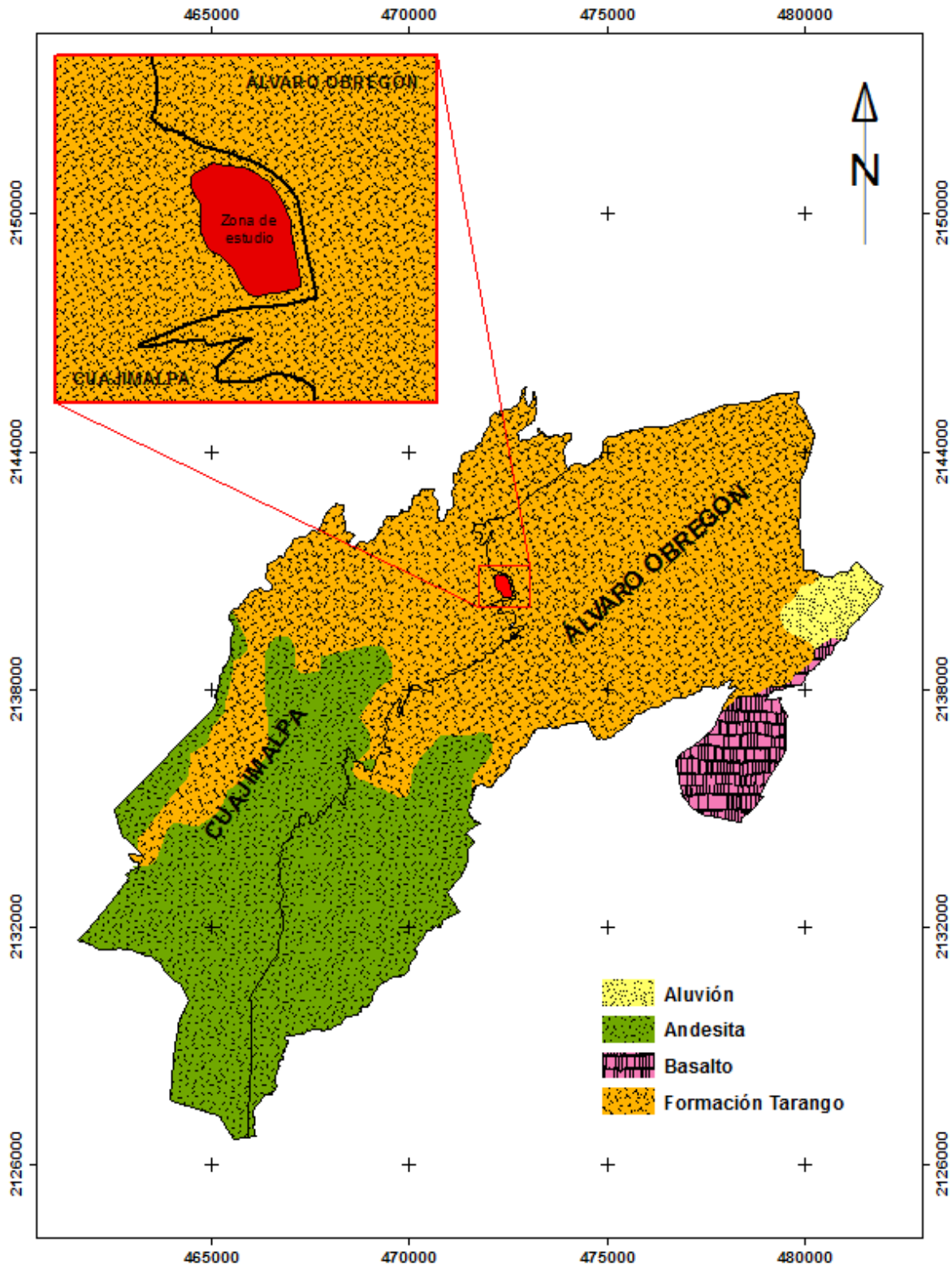


Figura 3.3. Principales unidades litológicas presentes en la zona de estudio (Fuentes, 2011)

3.4.1. Geología Estructural

En el trabajo de Cordero (1992) se describen 6 fallas principales en la delegación Álvaro Obregón aunque es importante destacar que no se descarta la existencia de alguna otra. A continuación se describirá de forma general cada estructura (Figura 3.4):

1. *Falla Contadero*, la cual se encuentra dividida en 2 estructuras que están estrechamente relacionadas, en donde el primer tramo, con un rumbo N 45° E, se extiende hasta el fraccionamiento Lomas de Vista Hermosa y a partir de este punto, toma un rumbo N 80° E, hasta su terminación, donde choca con la falla Santa Fé. La longitud de esta estructura es de aproximadamente 10 km. El desplazamiento vertical es de 20 m, en donde el bloque hundido se localiza al noroeste para los 2 tramos que constituyen esta falla.
2. *Falla Santa Fe*, que se extiende desde Santa Rosa Xochiac hasta el suroeste, con un rumbo N 40° E. Hacia el noreste el rumbo cambia a N 60° E. Esta falla es la más extensa en la delegación Álvaro Obregón, con una longitud aproximada de 17 km, ligeramente convexa hacia el noroeste. Se infiere que el bloque caído se encuentra al suroeste. Esta falla posteriormente sufrió un desplazamiento horizontal de aproximadamente 1500 m, cerca de la zona en donde colisiona con la falla Contadero.
3. *Falla Atzoyapan*, la cual se encuentra ubicada al sureste, de trayectoria casi recta, alcanzando una longitud superficial de 11 km. Su rumbo es N 60° E y el desplazamiento vertical es de aproximadamente 20 m. Se infiere que el bloque que cayó se encuentra en el noroeste.
4. *Falla Puente Colorado*, que se extiende desde Santa Rosa Xochiac hasta la Barranca del Muerto, con aproximadamente 10 km de longitud. Tiene un rumbo promedio de N 60° E en donde el bloque caído se encuentra al noroeste.
5. *Falla Texcaltlaco*, considerada como una falla de desplazamiento vertical y horizontal, en donde el bloque caído se encuentra al sureste. Esta estructura se extiende desde las cercanías de San Bernabé Ocotepéc hasta la presa Tarango y tiene una longitud de 7 km. La primera porción de la falla ubicada al suroeste, presenta un rumbo N 40° E, mientras que la segunda porción se encuentra situada al noreste con un rumbo N 60° E.
6. *Falla Contreras*, localizada a lo largo de la barranca del Río Magdalena, tiene una longitud superficial de 17 km. Se extiende desde las proximidades del cerro La Palma hasta Contreras, en donde se pierde en la zona urbana. Es una falla de desplazamiento vertical con rumbo N 55° E.

Como se muestra en la figura 3.4 ninguna estructura de interés pasa a través del área de estudio, sin embargo, no se puede descartar la presencia de estructuras geológicas secundarias.

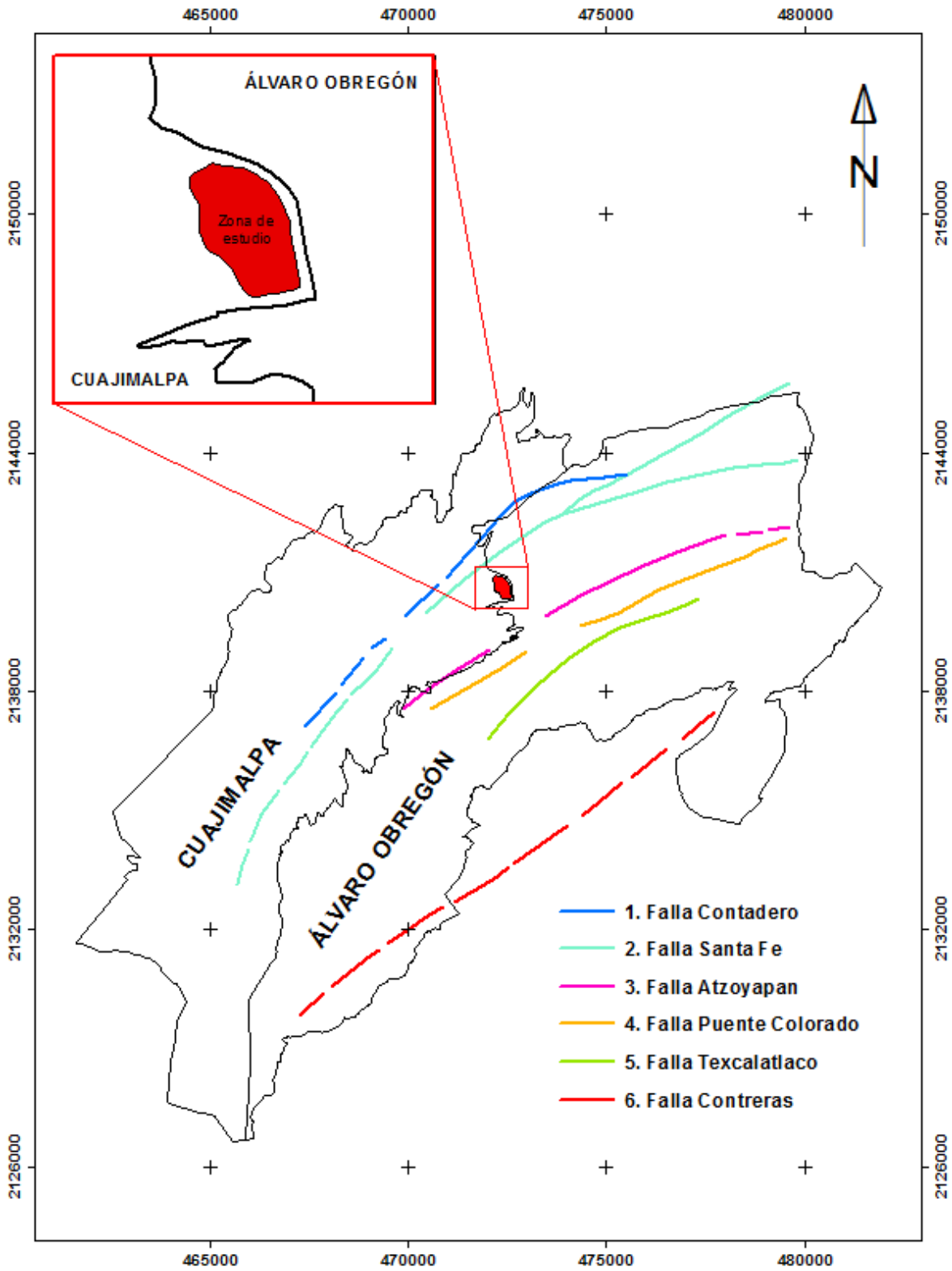


Figura 3.4. Principales fallas presentes en la zona de estudio (Fuentes, 2011)

3.4.2. Estratigrafía

La secuencia estratigráfica conocida de la cuenca de México abarca desde el Cretácico hasta el Cuaternario, aunque en la superficie sólo afloran rocas de origen volcánico y derivadas de éstas, cuyas edades más antiguas son consideradas del Oligoceno.

Mooser *et al.* (1992) reconocieron en el piedemonte de la Sierra de las Cruces las siguientes unidades litológicas:

- Derrames piroclásticos y arenas azules (270,000 años)
- Erupciones piroclásticas Xolopo (430,000 años)
- Tres erupciones plinianas de pómez
- Derrames piroclásticos Cuquita
- Erupciones de nubes ardientes menores de polvo fino (de menos de 600,000 años)

Estos tipos litológicos concuerdan con los estudios geotécnicos de algunos autores como Rodríguez y León (1976), Sánchez-Mora (1992), Gutiérrez-Sarmiento y Cuevas-Rivas (1992), entre otros.

En el trabajo de Lugo-Hubp *et al.* (1995) se reconocieron en el piedemonte de la delegación Álvaro Obregón 9 unidades litológicas principales:

1. *Piroclastos finos*, que en su mayoría son cenizas de color pardo. Es el depósito con mayor distribución horizontal y vertical con un grosor que va desde los 0.5 a los 50 m.
2. *Cenizas con clastos angulosos*, mal clasificados con un tamaño promedio de 15 cm. Se trata de material andesítico de colores rojo y gris. Esta capa tiene un espesor de hasta 2 m y se encuentra asociado con la toba de piroclastos pumíticos finos.
3. *Ceniza con pómez*, que es una capa transicional entre dos unidades la cual tiene un espesor de entre 0.5 y 1.5 m.
4. *Pómez*, es un tipo de depósito muy común en la zona de estudio, se observa de forma continua a poca profundidad, por lo general yaciendo bajo un depósito de derrame piroclástico. Se observó en la mayoría de los barrancos profundos del piedemonte superior. Se reconocieron 3 tipos de pómez:
 - a. Capas casi horizontales de color amarillo claro, es el tipo dominante en la zona con espesores desde los 0.5 hasta los 5 m.
 - b. Pómez fina, que es muy poco común en la zona de estudio, de color blanco, constituida por fragmentos pequeños.
 - c. Pómez rosa, Observadas en la parte norte, cerca de las laderas del río Piedad. Se presenta en estratos de 1 a 3 m de espesor.
5. *Depósitos de derrames piroclásticos*, de los cuales se reconocieron tres tipos
 - a. Clastos angulosos y mal clasificados, de color gris azulosos, se disponen en capas de 5 m o más de espesor
 - b. Clastos angulosos y bien clasificados, que conforman una capa delgada de 60 cm hasta 2 m, que está asentada en forma concordante, por lo general sobre pómez

- c. Sedimentos volcánicos de color gris azulado, que son clastos angulosos y bien clasificados, poco consolidados y dispuestos de forma masiva. No son reconocibles fácilmente, debido a la explotación que se ha hecho de los mismos.
6. *Depósitos de lahar*, o también llamados de derrame piroclástico con espesores de unos 35 m, con bloques angulosos de andesita de hasta 1.5 m de diámetro, aunque los más representativos don de 10 a 20 cm. Compactados regularmente y cementados con piroclastos finos con pómez.
7. *Depósitos de derrame de lodo*, provenientes de corrientes montañosas. Generalmente consisten de bloques angulosos y subredondeados con una regular clasificación. Son los depósitos característicos de la desembocadura de arroyos montañosos.
8. *Conglomerados*, en la base de los barrancos, principalmente. Consisten en cantos bien clasificados y bien redondeados.
9. *Lavas del Volcán Xitle*, de aproximadamente 2,200 años y que ocupa una porción pequeña de la delegación Álvaro Obregón, la correspondiente a la colonia Pedregal de San Angel, donde cubren a capas de pómez.

4. METODOLOGÍA

Un factor importante que se debió contemplar para el diseño de la campaña de adquisición de datos en campo fue el escaso tiempo que se tenía para realizar el estudio y la extensa área que se debía de cubrir. Dado que el objetivo principal de este trabajo es el de obtener el volumen de desechos contenido en el SDF-Prados de la Montaña, se diseñaron líneas de tal forma que se pudiera tener información en todos los extremos del predio.

4.1. Adquisición de datos

Para este trabajo se realizaron cinco perfiles (Tabla 1), de manera que cuatro de estos fueran lo más paralelos entre sí, con dirección preferencial NE – SW, y un quinto perfil perpendicular a los otros perfiles (NW – SE), como se muestra en la Figura 4.1. La separación que existe entre los perfiles paralelos (Perfiles 1-4) ronda los 150 y 200 metros.



Figura 4.1. Ubicación de los perfiles de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) en el SDF Prados de la Montaña (Google Earth, 2014)

Dos de las 5 líneas propuestas (Perfil 3 y 5) excedieron la longitud que se podía alcanzar con la apertura seleccionada entre los electrodos, por lo que se recurrió al método de *roll along* o empalme, el cual consiste en realizar una primera medición de valores de resistividad aparente utilizando los 48 electrodos disponibles. La siguiente secuencia se lleva a cabo, para este caso, trasladando 12 electrodos (25%) al final de la línea y poder cubrir la longitud total del perfil. Para los perfiles mencionados se requirió de un empalme al 75%. La separación entre los perfiles paralelos

Tabla 1. Características de los diferentes perfiles de investigación

Perfil	Longitud (m)	Dirección	Separación electrónica (m)	Roll along
1	235	N 76° E	5	N/A
2	282	N 63° E	6	N/A
3	354	N 60° E	6	Si (75%)
4	235	N 60° E	5	N/A
5	590	S 30° E	10	Si (75%)

Al no saber exactamente la forma en que se depositaron los desechos, se optó por la configuración electrónica Wenner – Schlumberger que, de acuerdo con Loke (2012), este arreglo es una buena opción para detectar variaciones de resistividad eléctrica, tanto vertical como horizontal, esto permitiría visualizar de forma más clara la forma irregular de la base del socavón. La separación entre electrodos fue elegida teniendo como objetivo alcanzar una profundidad de más de 40 m. Para ganar aún más tiempo entre mediciones, se decidió medir sólo los subniveles impares, debido a que en un nivel de mediciones, el último subnivel se empalmaría con el primer subnivel del siguiente nivel de mediciones.

El equipo utilizado para las lecturas de resistividad aparente fue un resistímetro SYSCAL Pro Switch, de Iris Instruments (Figura 4.2), en conjunto con cuatro tramos de cable inteligente, de 12 nodos cada uno. Para poder inyectar la corriente al terreno se utilizaron electrodos de cobre de 40 cm de longitud y $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro. Debido a la maleabilidad del terreno, no fue necesario más que un marro para poder enterrar los electrodos (Figura 4.3). Una vez conectados los 48 electrodos, se cargaron en el equipo las configuraciones necesarias, tales como la configuración electrónica, la separación de electrodos y la secuencia de mediciones, mismas que se habían programado con anterioridad.



Figura 4.2. Equipo SYSCAL Pro Switch de Iris Instruments



Figura 4.3. Conexión del electrodo al terreno

El terreno permitió una baja resistencia de contacto en cada uno de los dipolos, todas por debajo de $2\text{ K}\Omega$, por lo que no fue necesario aplicar alguna solución electrolítica o humedecer el terreno para mejorar este factor. La consola se colocó en el centro de cada perfil y con un GPS se obtuvieron las coordenadas de los extremos de cada línea para después ubicarlos en un mapa.

Otro factor a considerar es el de la topografía del predio. Formas topográficas semejantes a un valle dan como resultado valores de resistividad bajos en la parte central de la pseudosección; por otro lado, las formas similares a una cresta producen anomalías con valores de alta resistividad en el centro, con valores de menor magnitud de resistividad en los flancos. Estas anomalías producidas por la forma del terreno podrían resultar en interpretaciones erróneas del modelo, si no se toma en cuenta la topografía del perfil (Fox *et al.*, 1980).

Para tener un control sobre la topografía de cada sondeo, se midió la diferencia de altura en cada electrodo respecto a la del primer electrodo de cada línea. Estos datos fueron obtenidos con ayuda de un nivel óptico Leica NA724 y un estadal plegable de 4 metros (Figura 4.4).



Figura 4.4. Levantamiento topográfico con nivel y estadal

Una vez obtenidos los datos de resistividad aparente para cada línea de TRE, se descargaron a una computadora, para que con ayuda del software Prosys II (Syscal Utilities) se ordenaran en un formato que el programa de inversión pudiera reconocer.

4.2. Procesamiento e inversión de datos

Para obtener los modelos de resistividad eléctrica en 2D se utilizó el programa RES2DINV. Una ventaja de este software de inversión, es que cuenta con un módulo para visualizar la información obtenida en campo y poder eliminar algunos datos incoherentes debido a un posible problema en el equipo, un objeto extraño en el subsuelo o un desperfecto en algún electrodo.

El programa despliega la información en forma de niveles, en los que se puede visualizar las variaciones de resistividad, analizar los cambios de esta propiedad y poder “limpiar” la información, si fuese necesario. Para los datos obtenidos en Prados de la Montaña, sólo fue necesaria la depuración de datos en el Perfil 5 (Figura 4.5), debido a que la información incongruente a lo largo del segundo nivel de medición era muy notoria.

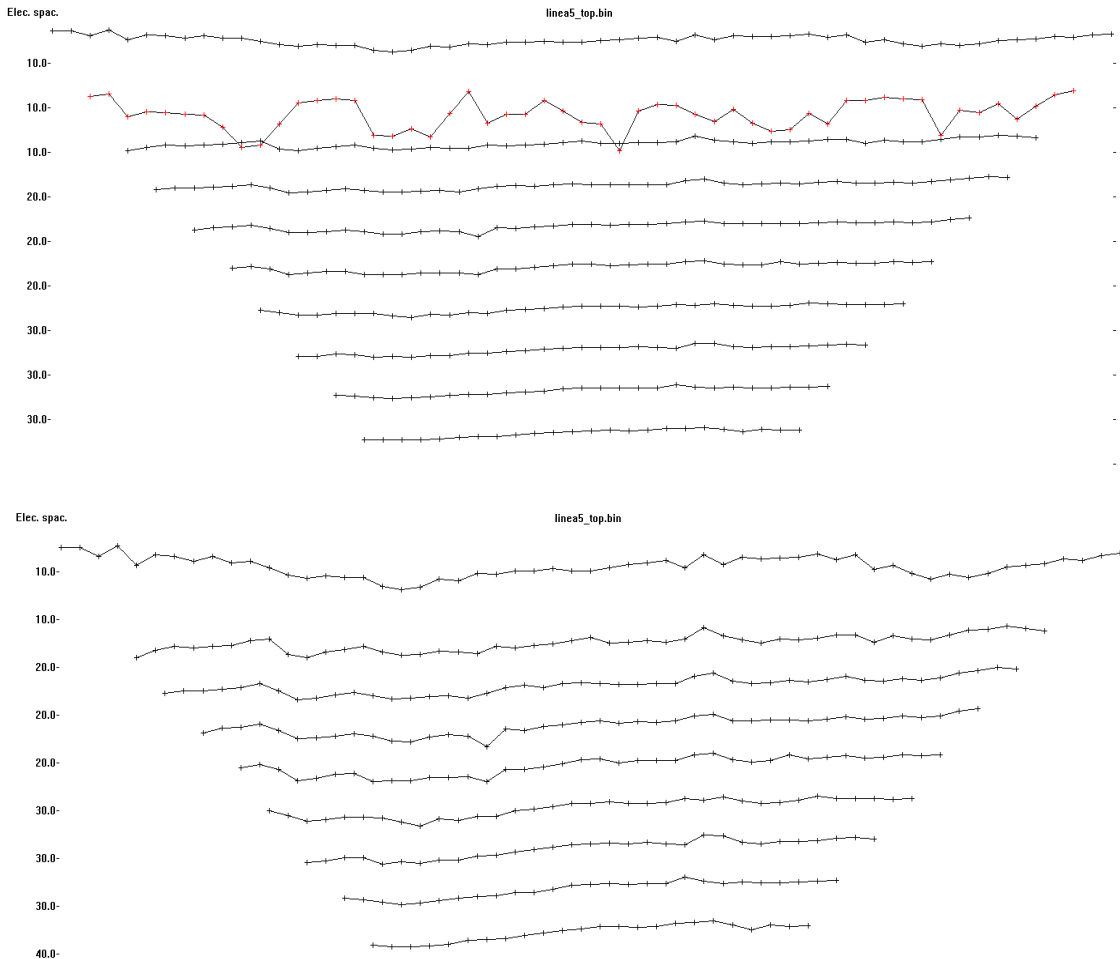


Figura 4.5. Limpieza de datos incongruentes en el Perfil 5.

Al limpiar los datos se eliminó todo el nivel, teniendo en cuenta que los datos de interés se encontraban a una profundidad mayor. En consecuencia, existía la posibilidad de un error al momento de empalmar los perfiles en un modelo pseudo 3D, debido a que la falta de información en el segundo nivel del perfil 5 podría no concordar con los demás perfiles, pero hay que tener en cuenta que la información de interés se encuentra en la parte superior y al fondo del socavón.

Los datos de los perfiles topográficos obtenidos con el nivel y el estatal, fueron procesados en una hoja de cálculo en el programa Microsoft Excel. Estos perfiles topográficos, se anexaron a los archivos que contienen los datos de resistividad, para que el programa de inversión los tuviera en cuenta al momento de la modelación.

Ya con los datos listos se procede a fijar todos los parámetros necesarios para la inversión de los datos. La rutina de inversión utilizada por el programa RES2DINV se basa en el método de mínimos cuadrados con suavizado forzado (de Groot-Hedlin y Constable, 1990), aunque también puede ser usada una nueva implementación del método basada en la técnica de optimización cuasi-Newton (Loke y Barker, 1996). El método de mínimos cuadrados con suavizado forzado se basa en la siguiente expresión

$$(J^T J + uF)d = J^T g \quad \dots (5.1)$$

donde:

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T$$

f_x = filtro de achatamiento horizontal

f_z = filtro de achatamiento vertical

J = matriz de derivadas parciales

u = factor de amortiguamiento

d = vector del modelo de perturbación

g = vector de discrepancia

Otra ventaja de este programa es que los parámetros como el factor de amortiguamiento y los filtros de achatamiento, horizontal y vertical, pueden ser modificados según las necesidades del usuario (Loke, 2012). Este último parámetro está diseñado para acentuar estructuras horizontales o verticales en el caso de tener conocimiento de la forma de las estructuras de interés en el subsuelo. Para el proceso de inversión de estos datos se le dio más peso al filtro de achatamiento horizontal, debido a que se esperaban contrastes verticales de resistividad en los materiales. El factor de amortiguamiento se optimizó para cada iteración. Este parámetro es el responsable de controlar el grado en que el proceso de inversión puede cambiar la resistividad de una zona (Loke, 2012) y varía con relación a la cantidad de ruido en los datos, generalmente reduciéndose después de cada iteración.

Como ya se comentaba en el apartado 2.7.2., el modelo de inversión divide el subsuelo en prismas rectangulares e intenta determinar los valores de los prismas para poder así minimizar la diferencia entre los valores de resistividad medida y calculada (Loke, 2012). Una medida de esta diferencia

está dada por el error RMS, sin embargo, en ocasiones un modelo con un valor bajo en el error RMS puede no ser el “mejor” modelo desde la perspectiva geológica (Loke, 2012). En general la aproximación más prudente es elegir el modelo para una iteración en la cual el error RMS no cambie significativamente respecto a la iteración anterior, esto usualmente ocurre entre la cuarta y quinta iteración.

Para este trabajo se utilizó el modelado por elemento finito, el cual es el idóneo para datos que incluyen topografía. Otros parámetros como el valor de convergencia del error RMS, el número de iteraciones y los ajustes en el método de inversión fueron fijados según las necesidades del proyecto. Además, se utilizó el método de la transformación de Schwarz-Christoffel, para calcular la deformación en las capas del subsuelo debido a la presencia de cambios en la topografía. Según el manual del RES2DINV (GEOTOMO, 2012), este método es el que genera un modelo más natural en la distribución de resistividad en el subsuelo afectado por los cambios en la topografía.

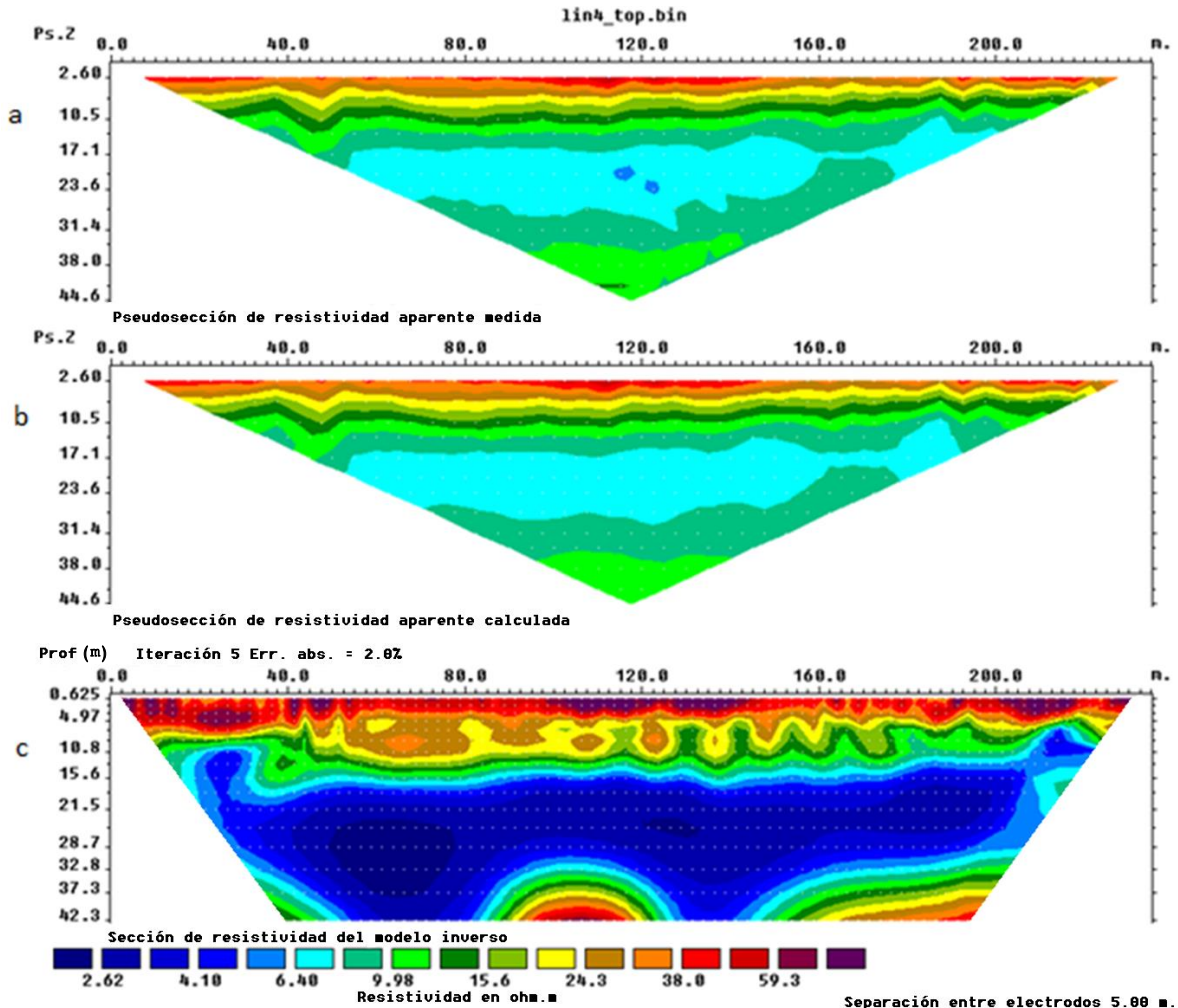


Figura 4.6. Inversión del Perfil 4.

(a) Pseudosección de resistividad aparente medida

(b) Pseudosección de resistividad aparente calculada

(c) Modelo de resistividad después de la rutina de inversión

Ya fijados los parámetros necesarios se inicia la rutina de inversión. El programa despliega tres imágenes para cada iteración, la primera imagen (Figura 4.6a) corresponde a la pseudosección de resistividad aparente medida, la segunda imagen (Figura 4.6b) corresponde a la pseudosección de resistividad aparente calculada y la tercera imagen (figura 4.6c) corresponde a la sección de resistividad producto de la inversión de los datos.

Los resultados pueden ser exportados a distintos formatos, para este trabajo, se exportó la información en un formato que el software *Surfer 11* pudiera reconocer, lo anterior para una mejor visualización de la información.

4.3. Cálculo del volumen a partir de los datos de resistividad

Después de obtener las imágenes de resistividad eléctrica, el siguiente paso es calcular el volumen de los residuos dentro del contenedor. Para obtener dicho volumen se utilizó el programa *RockWorks15*, un software diseñado para el manejo y análisis de datos de las propiedades del subsuelo así como para su visualización en 2D y 3D.

Para generar el sólido de donde se extraerá el volumen de interés, fue necesario que todos los datos de resistividad fueran ubicados y georreferenciados según las coordenadas obtenidas en campo. *Rockworks15* está diseñado para trabajar con datos obtenidos a partir de sondeos en un pozo, por lo que los datos de resistividad deberán de adaptarse a esta condición. Entonces, la ubicación de cada pozo corresponderá a la ubicación de cada electrodo, teniendo columnas de datos de resistividad para diferentes profundidades (Figura 4.7). Con ayuda de un modelo digital de elevaciones se pudo ubicar la altura de cada pozo en metros sobre el nivel del mar. En total se generaron 309 pozos.

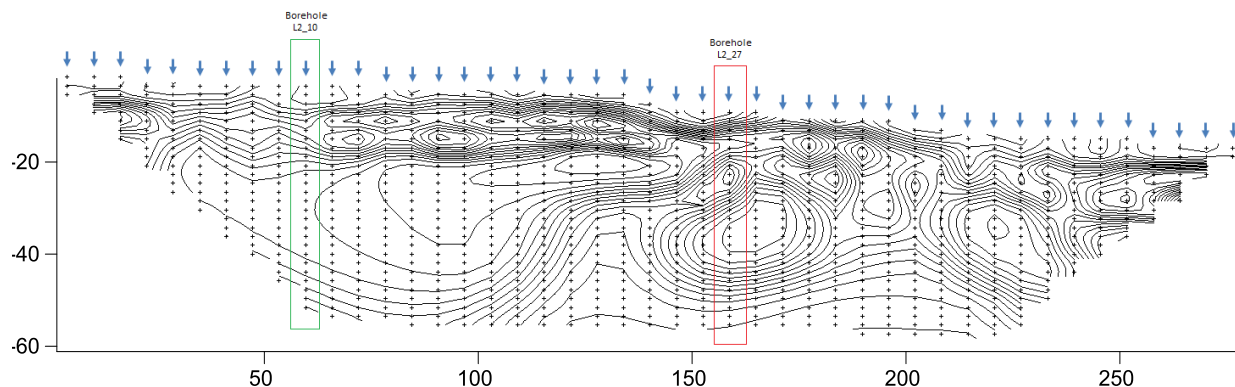


Figura 4.7. Adaptación de los datos de resistividad del Perfil 2 para RockWorks15

Posteriormente, se procede a crear una base de datos, la cual contiene la información acerca del nombre y número del pozo, la ubicación geográfica, el tipo de proyección, los datos de resistividad a profundidad, entre otras características. A partir de esta base de datos, se pueden generar modelos sólidos, perfiles, secciones, entre otros gráficos.

4.4. Cálculo del volumen a partir de datos topográficos

Posteriormente, las autoridades encargadas del proyecto facilitaron tres mapas que correspondían a levantamientos topográficos que se realizaron en el predio para mantener un control y tener conocimiento de los espesores y edades de los residuos depositados. El primer mapa realizado en 1987, corresponde a la fecha en la que el SDF abrió sus puertas para la recepción de desechos sólidos. El segundo plano se realizó en el año de 1994, año en que las autoridades del Departamento del Distrito Federal tomaron la decisión de proceder al cierre del sitio para recepción de residuos sólidos. El tercer mapa, del año de 1996, corresponde a la fecha en la que la cobertura final del relleno se concluyó, lo que trajo como resultado la clausura del predio.

Con ayuda del software *Surfer 11*, se digitalizaron las curvas topográficas y se obtuvieron las superficies correspondientes. Además, este software cuenta con un módulo "*Volume Calculations*" que permite, entre otras cosas, obtener el volumen de un cuerpo definido entre dos superficies.

Surfer realiza este cálculo a partir del volumen de cada celda de la cuadrícula que conforma la cuadrícula de la superficie. El cálculo del volumen se vuelve más preciso a medida que la densidad de las celdas en la cuadrícula aumenta. Matemáticamente, el volumen bajo una función $f(x, y)$ está definida por la doble integral:

$$Volumen = \int_{x_{min}}^{x_{max}} \int_{y_{min}}^{y_{max}} f(x, y) dx dy \quad \dots (5.2)$$

En *Surfer*, esta operación se realiza integrando primeramente sobre x (columnas), para obtener las áreas de cada una de las filas y posteriormente, integrando sobre y (filas) para obtener el volumen final. El volumen puede ser calculado mediante tres métodos: La Regla trapezoidal, la Regla de Simpson y la Regla de Simpson 3/8. Si el cálculo mediante estos tres métodos es parecido, se puede tomar al volumen neto como un promedio de estos valores.

Teniendo en cuenta que los desechos sólidos fueron depositados entre los años 1987 y 1994, con ayuda de este módulo se calculó el volumen neto entre las superficies correspondientes a esos años que, desde otro punto de vista, corresponden con el límite inferior y superior de los residuos depositados. El volumen obtenido a partir de los datos topográficos, servirá como criterio para evaluar los resultados obtenidos a partir del cálculo del volumen mediante los datos de resistividad eléctrica.

5. RESULTADOS

5.1. Mapas topográficos

Como resultado de la digitalización de los mapas proporcionados, se obtuvieron 3 superficies que corresponden con la forma topográfica del confinamiento en diferentes periodos (Figura 5.1). La superficie del año de 1987, contiene la información de la topografía en la parte inferior del socavón, antes de que se iniciara el depósito de desechos sólidos. La segunda superficie corresponde al mapa de 1994, año en que el SDF cerró sus puertas a la recepción de residuos. Por último, la superficie correspondiente al año de 1996 describe la forma actual de la superficie del terreno, sobre la cual se realizó el estudio.

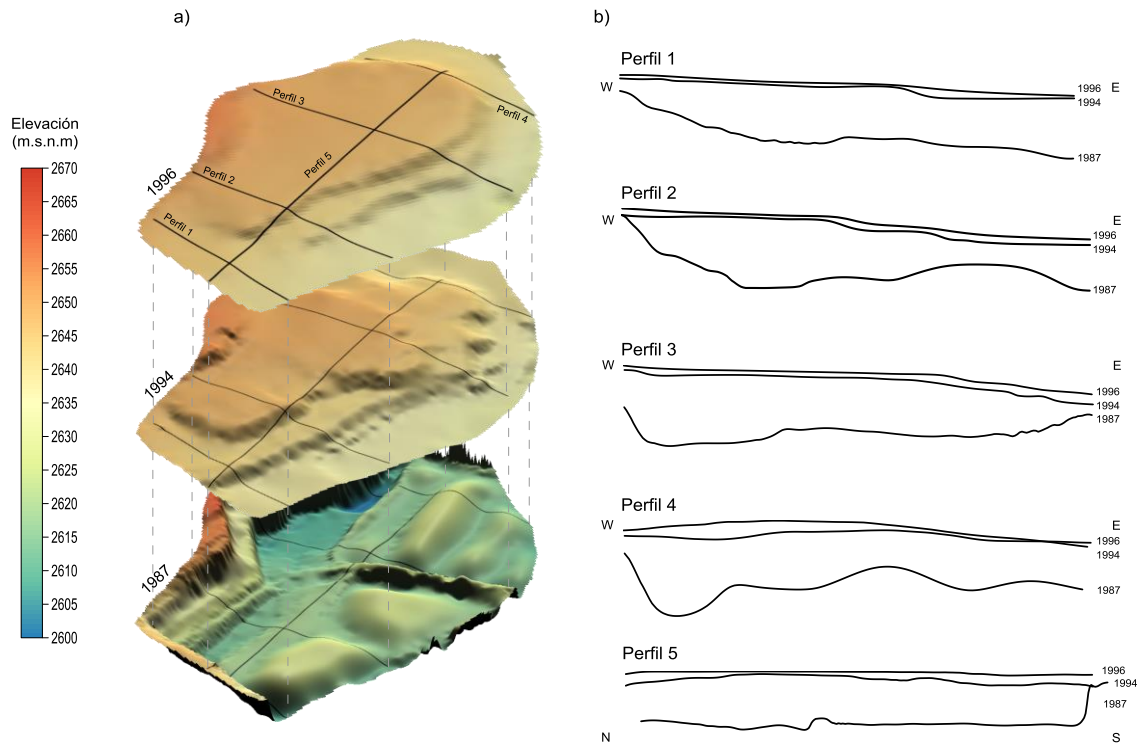


Figura 5.1. Topografía del sitio de disposición final Prados de la Montaña.

a) Topografía para los años 1987, 1994 y 1996

b) Perfiles topográficos para los 5 perfiles de TRE

Como se mencionó anteriormente, al calcular el volumen que existe entre ambas superficies se obtendría un estimado de los residuos depositados en el contenedor muy cercano al de la realidad, suponiendo una buena precisión en los datos topográficos de ambos mapas. El resultado al calcular el volumen entre ambas superficies fue de 4, 344,600 m³. Este dato será de suma importancia sirviendo como criterio para determinar la efectividad en el análisis y en el procesamiento de los datos de resistividad eléctrica, con los que se pretende obtener un modelo sólido de la estructura interna del relleno.

5.2. Modelo 2D

En los modelos (Figura 5.2) se puede identificar material de baja resistividad ($0.5 \Omega\text{m} - 11 \Omega\text{m}$) que se encuentra limitado en la parte superior e inferior por un material de mayor resistividad (mayor a $25 \Omega\text{m}$).

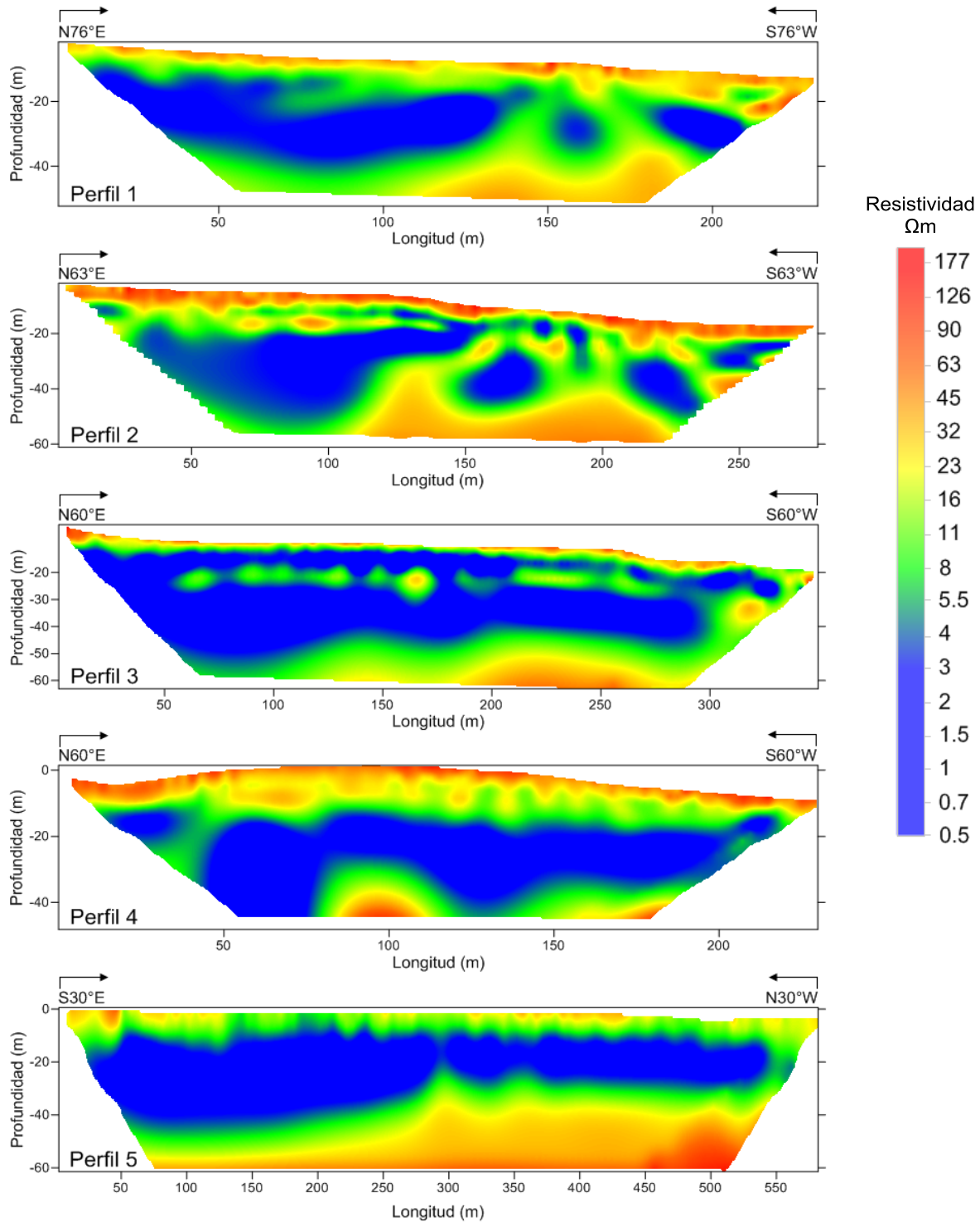


Figura 5.2. Modelos 2D obtenidos a partir de la inversión de los datos de resistividad aparente

El objetivo ahora es identificar los límites, superior e inferior, de los residuos sólidos:

- En la parte superior con la cobertura del relleno (desechos-cobertura)
- En la parte inferior con el fondo del socavón (desechos-fondo)

Según informes sobre la clausura del SDF (López y Sámano, 1996), se tiene conocimiento de que la cobertura del relleno tiene un espesor que ronda los 2 y 5 metros, la cual está formada por diversos materiales y compactada para actuar como una capa sello. Además se necesitaron aproximadamente 150,000 m³ de material para nivelar el terreno, lo que nos indica que el espesor de la cobertura del terreno podría variar para cada perfil.

Ahmed y Sulaiman (2001) se dieron a la tarea de analizar algunas muestras de material obtenidas en un relleno sanitario, con el fin de conocer la resistividad eléctrica de materiales que conforman dicho sitio. Como resultado de este análisis se obtuvo que la resistividad de los desechos en presencia de lixiviados tendrían una resistividad entre 6.03 y 7.16 Ωm , mientras que los desechos no saturados rondarían los 9.30 y 10.57 Ωm . Reyes-López *et al.* (2008) diferenciaron capas de un relleno sanitario de acuerdo a los valores de resistividad eléctrica, en donde los materiales que conforman la cobertura del relleno presentan resistividades mayores a 25 Ωm , la zona de transición entre la cobertura y los desechos una resistividad entre 5 y 15 Ωm y los materiales saturados con lixiviados resistividades entre 1 y 5 Ωm . Pomposiello *et al.* (2009) concuerda con que los desechos sólidos saturados presentan resistividades entre 1 y 10 Ωm . De Carlo *et al.* (2013), Suárez y Zúñiga (2013), Tsourlos *et al.* (2014), Bernstone *et al.* (2000), entre otros, también coinciden en que la resistividad de los desechos depositados en este tipo de confinamientos se encuentra entre 1 y 15 Ωm .

Con lo anterior y la información preliminar, se plantea lo siguiente: en los Perfiles 1, 2 y 3 se observa que en la parte superior, el material presenta valores de resistividades mayores a los 30 Ωm , distribuidos entre los primeros 3 a 5 metros. Para el Perfil 4 estos valores de resistividad se llegan a presentar en los primeros 5 a 7 metros. En el Perfil 5 no es posible encontrar este rango de resistividades en la parte superficial del terreno debido que al aumentar la separación entre electrodos (10 m) para las mediciones de resistividad, también aumenta la profundidad a la que fluye la corriente, por lo que no se tendrá información de la superficie al menos en los primeros 3 metros. Con base en lo anterior, se puede relacionar estos valores de resistividad con la cobertura del confinamiento.

Por otra parte, se sabe que la profundidad del socavón es del orden de los 45 metros (López y Sámano, 1996) en la parte occidental, y que va disminuyendo conforme se acerca a la parte oriental del predio (Figura 5.3). En los perfiles orientados SW – NE (1, 2, 3 y 4), se puede identificar que en la porción occidental los valores de resistividad menores a los 6.5 Ωm alcanzan una profundidad entre 38 y 45 metros y que van disminuyendo en espesor mientras se acercan a la porción oriental. Esto concuerda con la información que se tenía acerca de la profundidad del socavón. Para el Perfil 5 no se tiene conocimiento de cómo podría ser la topografía del fondo, pero de igual manera se observa que en la porción Norte, los valores de resistividad por debajo de los 6.5 Ωm llegan alcanzar

los 45 metros, mientras que al acercarse a la porción Sur del predio, el espesor de este material de baja resistividad se hace más delgado.

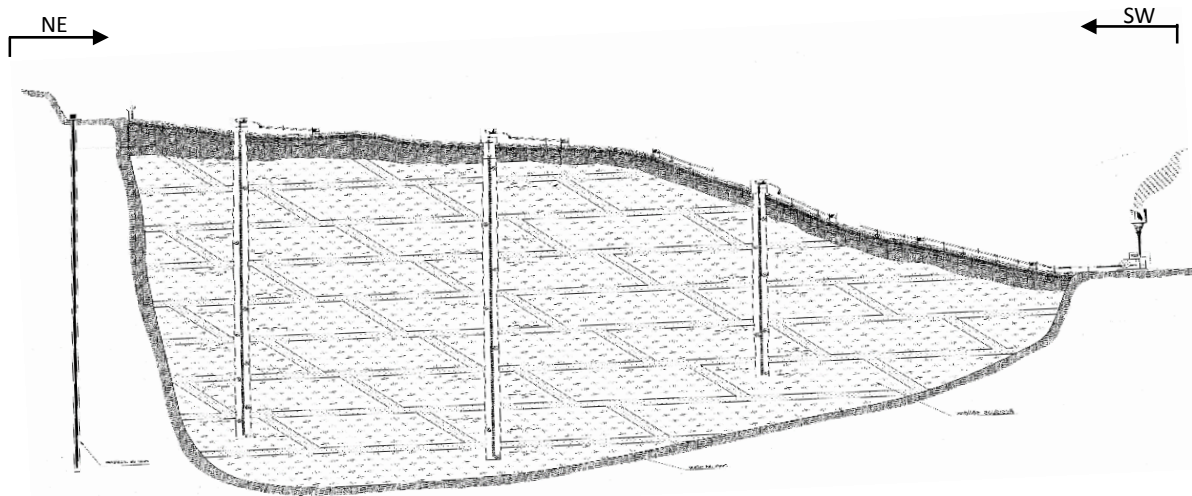


Figura 5.3. Corte transversal de pozos y red de extracción de biogás (SUDDF, 1997)

5.3. Modelo Pseudo 3D

Tomando como referencia el informe de López y Sámano (1996), se sabe que en la parte occidental, el fondo del socavón ronda los 40 - 45 metros de profundidad. También se debe de tomar en cuenta que en el fondo del relleno se construyó un estrato de baja permeabilidad mediante material arcilloso compactado para evitar la migración de los lixiviados, al cual se le dotó de un sistema de canales colectores que descargan a cárcamos de concreto de donde se puede extraer el lixiviado. Adicionalmente se instalaron poco más de 53,000 m² de geomembrana de polietileno en la ladera occidental con el fin de reducir la migración de fluidos.

Con base en lo anterior y comparando la información obtenida a partir de los perfiles de tomografía eléctrica con el informe antes mencionado, se propone buscar el límite inferior de los desechos a una profundidad que concuerde con el valor propuesto de 6.5 Ω m. De igual manera, para el contacto entre los residuos sólidos y la cobertura del relleno, se compararon los resultados obtenidos a partir de los modelos 2D con los del informe López y Sámano (1996) y se propone encontrar el límite superior a una profundidad que concuerde con el valor de 9.5 Ω m (Figura 5.4).

Hay que recordar que el objetivo de este trabajo es el de calcular el volumen de los residuos confinados en el SDF-PM, para cumplir este objetivo se generó un modelo pseudo 3D (Figura 5.5) a partir de los modelos 2D, con la finalidad de correlacionar la información de cada perfil, generar un sólido y obtener un volumen aproximado de los desechos sólidos.

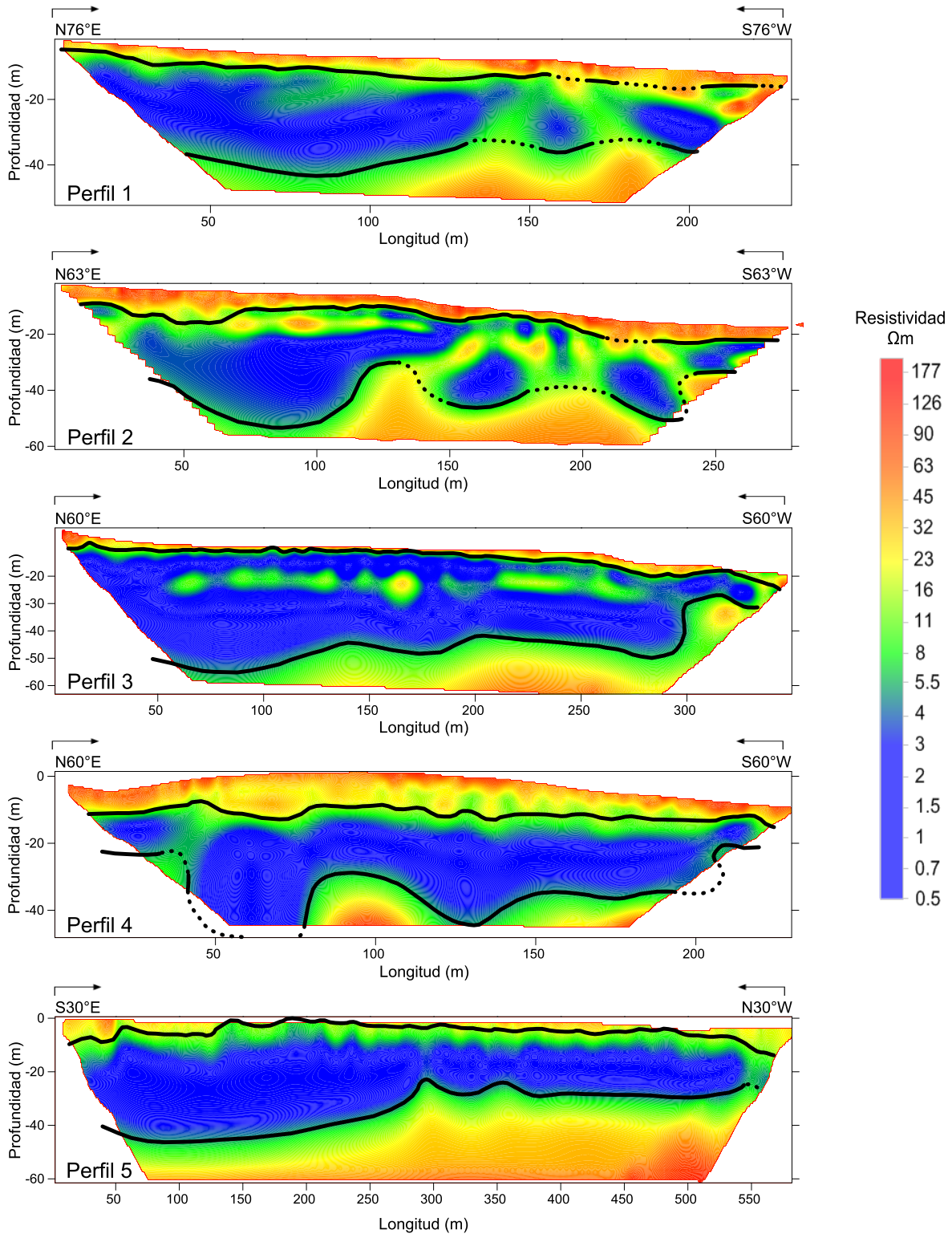


Figura 5.4. Límites inferior (6.5 Ωm) y superior (9.5 Ωm) propuestos con base en los valores de resistividad.

La línea continua describe la línea de iso-resistividad correspondiente.

La línea discontinua infiere la presencia de estos valores.

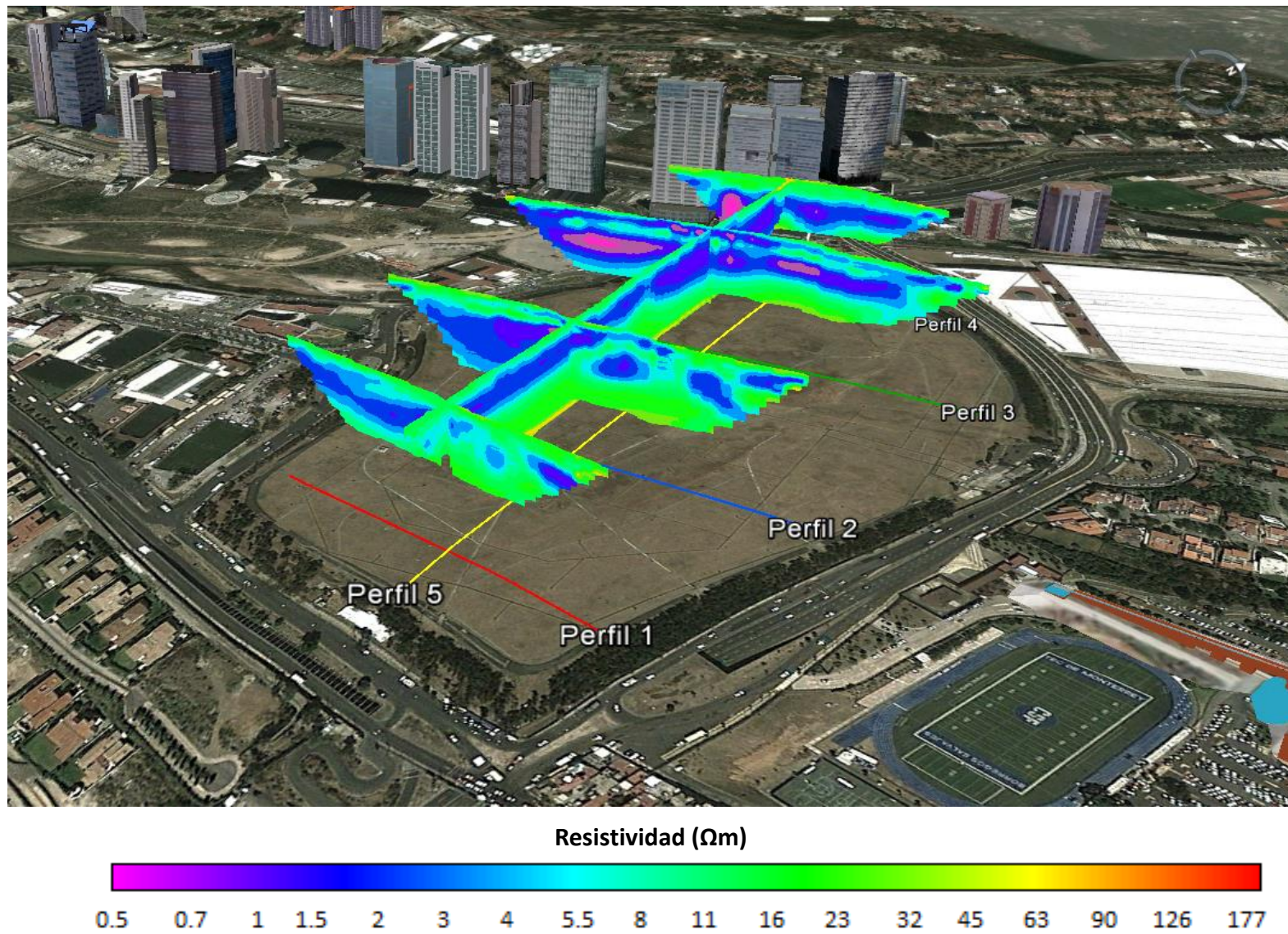


Figura 5.5. Modelo pseudo 3D generado a partir de los modelos 2D, obtenido para cada una de las líneas de estudio (Visto desde el SE). (Google Earth, 2014)

Después de definir los límites, se extrajo del modelo sólido sólo el volumen deseado. Para esto, es necesario limitar el modelo sólido a que sólo despliegue la información de resistividad que se encuentra en el rango de 0 – 9.5 Ωm , teniendo en cuenta el límite en la parte inferior del relleno a los 6.5 Ωm dando como resultado un volumen aproximado de 4, 442,825 m^3 (Figuras 5.6 y 5.7)

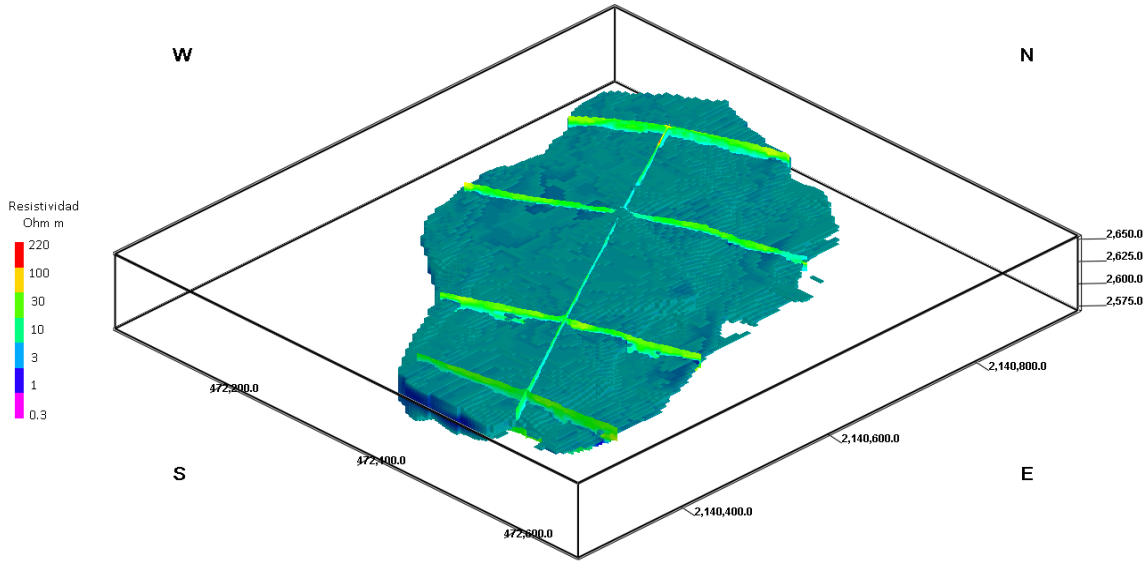


Figura 5.6. Modelación del volumen aproximado de los desechos sólidos contenidos en el SDF-Prados de la Montaña (Visto del SE)

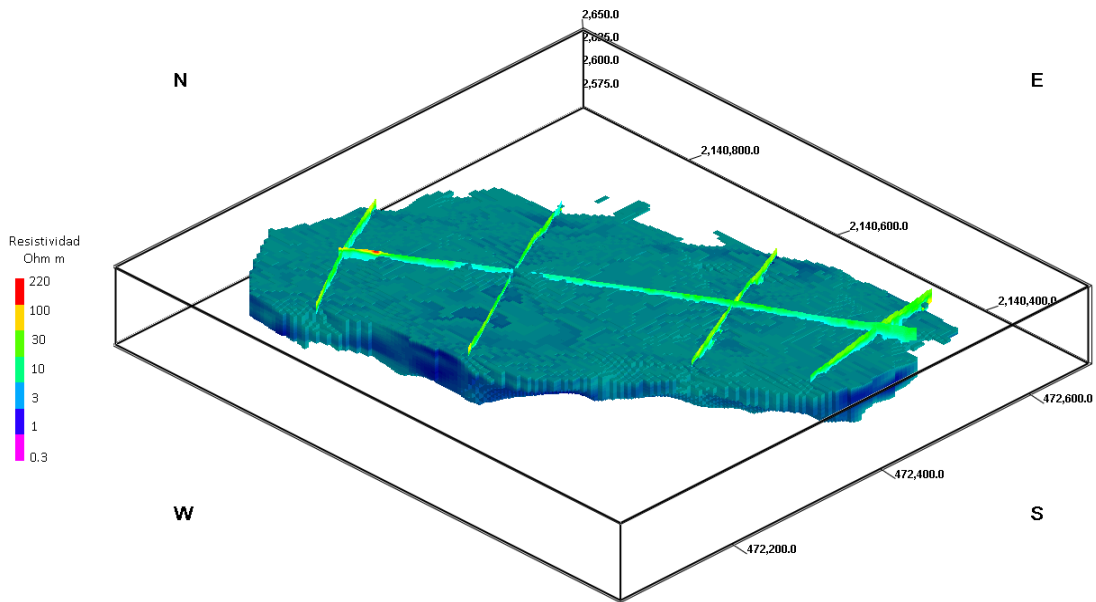


Figura 5.7. Modelación del volumen aproximado de los desechos sólidos contenidos en el SDF-Prados de la Montaña (Visto del SW)

Cabe mencionar que no se seleccionó el mismo valor de resistividad para el límite superior y el inferior y esto se debe principalmente a que se cree que por efectos de gravedad, los fluidos producto de la infiltración pluvial o bien, los fluidos producto de la degradación de la materia ahí depositada, hayan migrado a profundidad, por lo que el material en el fondo del relleno sanitario pueda encontrarse saturada debido a la presencia de estos fluidos, a comparación de la materia que se encuentra cerca de la superficie. Esto daría como resultado valores de resistividad menores en los materiales depositados en el fondo del socavón a comparación de los que se encuentran próximos al contacto superior

5.4. Integración de resultados

Como parte final del trabajo, se integró la información de los mapas topográficos con los modelos 2D obtenidos a partir de la inversión de los datos de resistividad (Figura 5.8).

Sobre las imágenes eléctricas están sobrepuestos tres perfiles topográficos para los años 1996, 1994 y 1987, respectivamente. Con esto es posible observar la relación que existe entre la respuesta eléctrica de los desechos depositados y la forma del contenedor.

Para el Perfil 1, en la porción occidental, se observa que existe una respuesta de baja resistividad por debajo del límite descrito por el perfil topográfico del año 1987, entre $x = 35$ m hasta $x = 90$ m. Lo mismo ocurre para el Perfil 2, pero ahora para la parte oriental, donde se observa una acumulación de material de baja resistividad entre $x = 215$ m y $x = 230$ m.

En la parte central del Perfil 4, se observan dos acumulaciones de material de baja resistividad, muy por debajo del perfil topográfico descrito.

Para el Perfil 3, todo parece indicar que la respuesta de baja resistividad encaja bastante bien con la descrita con el perfil topográfico del año 1987.

Con la integración de la información, en la porción Norte del predio es posible definir otra zona de baja resistividad por debajo del perfil topográfico del año 1987, esto es fácil de visualizar en el Perfil 5 entre $x \approx 25$ m y $x = 175$ m.

Con este análisis podemos observar que en la zona norte del SDP-Prados de la Montaña se presentan valores de resistividad bajos muy por debajo del límite topográfico, en comparación con la zona sur, en la que sólo en el Perfil 2 se encuentran muy por debajo de la topografía.

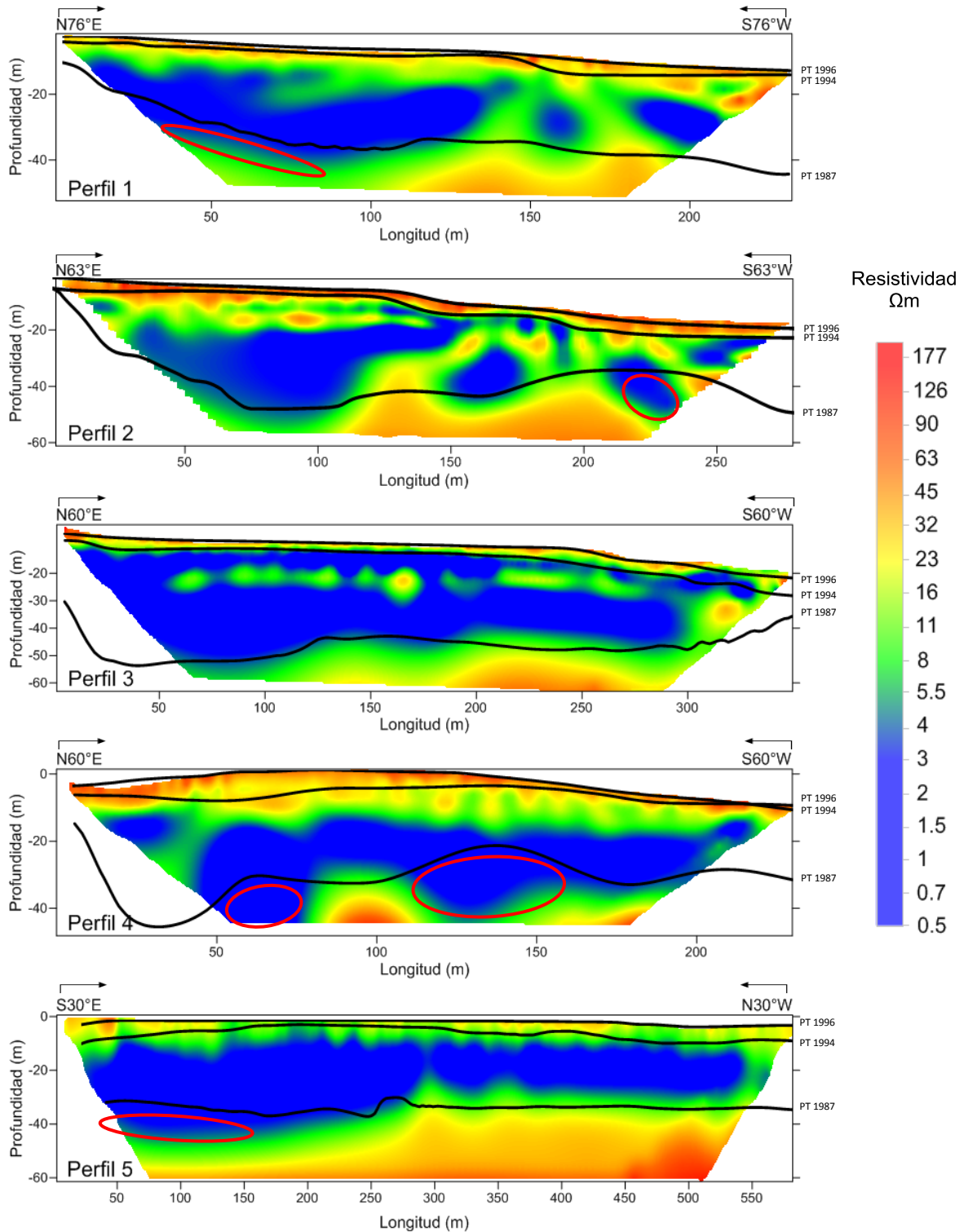


Figura 5.8. Integración de la información.

Las curvas negras corresponden con perfiles topográficos para los años 1987, 1994 y 1996.

Las zonas indicadas en óvalos rojos corresponden con anomalías de baja resistividad por debajo de la topografía de 1987

6. CONCLUSIONES

Como se mostró en el apartado anterior, el método de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) arroja buenos resultados cuando los estudios se realizan en zonas donde los materiales del subsuelo presentan un contraste de resistividad amplio.

Gracias a la respuesta eléctrica del medio, en todos los perfiles se pudieron delimitar los cambios en la composición de los materiales, esto a partir de los contrastes de los valores de resistividad, pudiendo separarlos en conductivos y resistivos, Además, la información reportada por López y Sámano (1996), en donde a grandes rasgos se describe la forma del contenedor en un principio, fue de suma importancia. Sin ésta, se hubiera complicado definir los límites buscados, ya que no en todos los perfiles llegan a ser tan notorios (Perfil 1 y Perfil 2).

Fue de gran utilidad que después del cálculo del volumen a partir de los datos de resistividad eléctrica, se hayan proporcionado los mapas topográficos, ya que con esto se pudo evaluar la eficiencia del método de tomografía eléctrica en el estudio de sitios de deposición final y rellenos sanitarios. Otra utilidad de los mapas proporcionados fue la de obtener los perfiles topográficos a distintas profundidades, para cada perfil y compararlos con el contraste en los valores de resistividad eléctrica.

En un caso ideal, el estrato impermeable y la geomembrana que se instala en los rellenos sanitarios deberían de impedir la percolación de lixiviados a las formaciones subyacentes, sin embargo, pocas veces se pueden presenciar casos en el que esto ocurra. Es de suponer que el resultado obtenido con ayuda de los mapas topográficos hubiera sido suficiente, ya que con éste tendríamos los límites "físicos" y el volumen real del confinamiento. Sin embargo, la integración de los resultados nos indica que no en todos los casos el límite "físico" corresponde con el propuesto a partir de los datos de resistividad. Una de las principales aportaciones de la tomografía de resistividad eléctrica en este estudio fue el poder encontrar los límites "químicos" de los desechos, en donde la presencia de lixiviados y material en degradación estaría relacionado con valores de resistividad bajos ($\leq 6.5 \Omega\text{m}$).

Al comparar el resultado obtenido a partir de los datos de resistividad (4, 442,825 m³) y el que se obtuvo a partir del cálculo del volumen entre las superficies del año 1987 y 1994 (4, 344,600 m³), resultó que existe una sobre estimación en el volumen del 2.26%. Teniendo en cuenta de que el área del predio es de aproximadamente 192,328 m², el 2.26% correspondería aproximadamente a un espesor de 51 cm.

Por otro lado, hay que tomar en cuenta que en el fondo, se construyó un estrato de aproximadamente 2 metros de espesor constituido por material arcilloso que cubriría toda la superficie del socavón, y que además se instalaron poco más de 53,000 m² de geomembrana de polietileno en la ladera occidental, todo esto para disminuir la permeabilidad y evitar la infiltración de lixiviados. Con lo anterior, se infiere que las zonas señaladas en la Figura 5.8 pudieran estar relacionadas con irregularidades en la cobertura impermeable del socavón, principalmente al Norte del predio, en donde se observa que en el Perfil 4 y Perfil 5 la anomalía de baja resistividad se encuentra muy por debajo de los límites topográficos descritos para el año de 1987. Esta

irregularidad en la estructura impermeable podría traer como consecuencia la percolación de lixiviados.

Aunque el sólido obtenido a partir de la interpolación de los datos de resistividad se ajusta a los perfiles obtenidos en el modelo 2D, el resultado sólo se puede tomar como una aproximación del volumen. Si se requiere mayor precisión en el cálculo del volumen del relleno, se recomienda realizar líneas paralelas a los Perfiles 1, 2, 3 y 4, para en conjunto con los resultados de este trabajo se pueda obtener un resultado más cercano a la realidad.

Se recomienda la adquisición de perfiles paralelos y próximos al Perfil 4, con el objetivo de tener más información en esa zona y verificar la continuidad y el comportamiento de la anomalía de baja resistividad que se presenta por debajo de los límites topográficos en esa porción del predio.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed, A. y Sulaiman, W., 2001. *Evaluation of groundwater and soil pollution in a landfill area using electrical resistivity imaging survey*. Environmental Management, 28, 5, 655 – 663.
- Aracil, E., Maruri, U., Vallés, J., Martínez-Pagán, P., Porres, J., 2003. *Evaluación de problemas medioambientales mediante tomografía eléctrica*. Ingeopres. Madrid: Entorno Gráfico, 122, 34 – 39.
- Arellano, A., 1951. *Estratigrafía de la cuenca de México*. Universidad Nacional Autónoma de México, Congreso Científico Mexicano, Memorias, 3, 172 – 186.
- Arvizu, J. y Huacuz, J., 2003. *Biogás de rellenos sanitarios para la producción de electricidad*. Boletín IIE, Octubre-Diciembre.
- Bernstone, C., Dahlin, T., Ohlsson, T. y Hogland, W., 2000. *DC-resistivity mapping of internal landfill structures: two pre-excitation surveys*. Environmental Geology, 39, 360 – 371.
- Bryan, K., 1948. *Los suelos complejos y fósiles de la Altiplanicie de México, en relación con los cambios climáticos*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 13, 1 – 20.
- Cano, A., 2005. *Materiales Dieléctricos y Aislantes. Primera Parte*. GAMMA, Boletín Técnico, 40.
- Cantos, J., 1987. *Tratado de Geofísica Aplicada*. Promotora de minas de Carbón, 3era. Ed. Madrid, España, 535 pp.
- Chapellier, D., Fitterman, D., Parasnis, D. y Valla, P., 1991. *Application of Geophysics to Water Prospecting in Arid and Semi-Arid Areas*. Geoexploration, 27, 208 pp.
- Cordero, M., 1992. *El origen y la evolución del relieve en la Delegación Álvaro Obregón*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, Universidad Nacional Autónoma de México.
- De Carlo, L., Perri, M., Caputo, M., Deiana, R., Vurro, M. y Cassiani, G., 2013. *Characterization of a dismissed landfill via electrical resistivity tomography and mise-à-la-masse method*. Journal of Applied Geophysics, 98, 1 – 10.
- Edwards, L., 1977. *A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization*. Geophysics, 42, 1020 – 1036.
- Enciso-De la Vega, S., 1992. *Propuesta de nomenclatura estratigráfica para la cuenca de México*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, 10, 26 – 36.
- Fox, R., Hohmann, G., Killpacks, T. y Rijo, L., 1980. *Topographic effects in resistivity and induced polarization surveys*. Geophysics, 45, 1, 75 – 93.

Fuentes, A., 2011. *Elaboración de un Sistema de Información Geográfica para definir el peligro en las zonas minadas en la Delegación Álvaro Obregón, México D.F.* Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Gasulla, M., 1999. *Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica del subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales.* Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Genelle, F., Sirieix, C., Riss, J. y Naudet, V., 2012. *Monitoring landfill cover by electrical resistivity tomography on an experimental site.* Engineering Geology, 18–29.

GEOTOMO, 2012. *Rapid 2-D Resistivity & IP inversion using the least-squares method.* Versión 4.01. GEOTOMO Software.

GF Instruments, 2013. *Methodical guide for resistivity and induced polarization: ARES Short guide.* GF Instruments. <http://www.gfinstruments.cz/>

González, S. y Valdivia, C., 2000. *Tratamiento de los lixiviados de Prados de la Montaña en un sistema de lodos activados.* Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales, Memorias técnicas, 1 – 12.

Griffiths, D. y Barker, R., 1993. *Two-dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology.* Journal of Applied Geophysics, 29, 211 – 226.

Hernández-Cano, G. y Durán-de-Bazúa, 2006. *Productividad de biogás en un relleno sanitario clausurado.* AIDS de Ingeniería y Ciencias Ambientales, Investigación, desarrollo y práctica, 1, 10 pp.

Knödel, K., 2007. *Environmental geology: handbook of field methods and case studies.* Ed. Springer, USA, 1357 pp.

Lizarazo, J. y Gómez, J., 2007. *Desarrollo de un modelo de redes neuronales artificiales para predecir la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica del concreto.* Revista Ingeniería e Investigación, 44, 11 – 18.

Loke, M., 2012. *Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.* <http://www.geoelectrical.com>

Loke, M. y Barker, R., 1996. *Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi-Newton method.* Geophysical Prospecting, 44, 131 – 152.

López, F. y Sámano, H., 1996. *Clausura del relleno sanitario Prados de la Montaña: Primera experiencia mexicana apegada a una rigurosa normatividad.* Dirección General de Servicios Urbanos, D.D.F.

Lugo, E., Playà, E. y Rivero, Ll., 2008. *Aplicación de la tomografía eléctrica a la prospección de formaciones evaporíticas.* GEOGACETA, 44, 223 – 226.

Lugo-Hubp, J., Cordero-Estrada, M., Zamorano-Orozco, J., 1995. *Relieve, litología y riesgos en la zona urbana de la delegación Álvaro Obregón, Distrito Federal, México*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 12, 52 – 67.

McGillivray, P. y Oldenburg, D., 1990. *Methods for calculating Frechet Derivates and sensitivities for the non-linear inverse problem: A comparative study*. Geophysical Prospecting, 38, 499 – 524.

Milsom, J., 2003. *Field Geophysics (Geological Guide)*. Wiley and Sons, 3rd ed., Chichester, Inglaterra, 231 pp.

Miranda, M., 2011. *Aplicación de métodos geofísicos en la determinación de lentes de biogás en un relleno sanitario, caso de aplicación: Bordo Poniente*. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 136 pp.

Orellana, E., 1982. *Prospección Geoeléctrica en corriente continua, 2ª edición*. Thomson Paraninfo, S.A. 580 pp.

Orta, T. y Sánchez, J., 1999. *Control ambiental del relleno sanitario de Nuevo Laredo, Tamaulipas*. Pub. Instituto de Ingeniería, UNAM, México, D.F.

Parasnis, D., 1998. *Principles of Applied Geophysics*. Chapman & Hall, 5th ed, Gran Bretaña, 429 pp.

Pomposiello, C., Dapeña, C., Boujon, P. y Favetto, A., 2009. *Tomografías eléctricas en el basurero municipal de Gualeguychú, provincia de Entre Ríos: evidencias de contaminación*. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 64, 603 – 614.

Reyes-López, J., Ramírez-Hernández, J., Lázaro-Mancilla, O., Carreón-Diazconti, C, y Martín-Loeches, M., 2008. *Assessment of groundwater contamination by landfill leachate: A case in México*. Waste Management, 28, 533- 539.

Secretaría del Medio Ambiente, 2002. *Diagnóstico geológico y geohidrológico preliminar de la Microcuenca del Río Magdalena*. Gobierno del Distrito Federal

Suárez, J. y Zúñiga, H., 2013. *Detección de capas de desechos con métodos geoeléctricos: caso Relleno Sanitario Río Azul, Costa Rica*. Revista Geológica de América Central, 49, 129 – 139.

Tapias, J., Himi, M. y Casas, A., 2003. *Estimación de la distribución espacial de las propiedades texturales de los suelos por tomografía eléctrica: principios y aplicaciones*. Estudios de la zona no saturada del suelo, 7, 191 – 196.

Tejero, A., Chávez, R. E., Urbietta, J. y Flores-Márquez, E. L., 2002. *Cavity detection in the south western hilly portion of México City by resistivity imaging*. Journal of Engineering and Environmental Geophysics, 130 – 139.

Vargemezis, G., Tsourlos, P., Fikos, I. y Tsokas, G., 2014. *Geoelectrical methods applied to landfill investigation: case studies from Greece*. First Break, 31, 8, 81 – 89.

Urbieta, J., 2001. *La tomografía eléctrica en los métodos de corriente continua*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Vázquez-Sánchez, E. y Jaimes-Palomera, R., 1989. *Geología de la cuenca de México*. Geofísica Internacional, 28, 133 – 190.