



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**MODELACIÓN EN 3D A PARTIR DE LA
INTERPRETACIÓN DE DATOS DE TOMOGRAFÍA
ELÉCTRICA RESISTIVA EN EL CCADET (CENTRO
DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO), EMPLEADOS PARA LA
DETECCIÓN DE POSIBLES TUBOS BASÁLTICOS.**

TESIS

Que para obtener el título de
INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A

Coronado Oscar Cristóbal López Capir

DIRECTOR DE TESIS

Aide Esmeralda López González



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

"A mi madre: María Teodora Capir y a mi padre: Oscar López (C.L.C.), por su enorme apoyo y por todo su amor. A mis hermano: Gil y a mi hermana: Tana por su apoyo incondicional. A Ellos por confiar en mí y estar conmigo durante este ciclo. ¡Gracias!"

"Vic por haberme apoyado, su cariño, comprensión y paciente espera para que pudiera terminar este proyecto son evidencias de su gran amor."

*"Let me tell you something you already know.
The world ain't all sunshine and rainbows.
It's a very mean and nasty place.
And I don't care how tough you are.
It will beat you to your knees and keep you permanently there if you let it.
You, me, or nobody is gonna hit as hard as life,
but it ain't about how hard you hit,
it's about how hard you can get hit and keep moving forward,
how much you can take and keep moving forward.
That's how winning is done."*

Sylvester S.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, en particular a la Facultad de Ingeniería por brindarme todos los apoyos durante mi formación y la realización de esta tesis.

A M.C. Aide Esmeralda López González por brindarme el apoyo, la confianza y la oportunidad de poder realizar esta tesis bajo su dirección, por su tiempo e interés para concluir esta tesis. Agradezco sus recomendaciones y consejos para mejorar académicamente y como persona.

Al Dr. Andrés Tejero por su apreciable apoyo en este trabajo, al M.C. David Escobedo por su gran apoyo como jefe de carrera y sus observaciones a este trabajo, al Ing. Alejandro García y Dr. René Chávez por las correcciones acertadas y el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo.

Al Dr. Rodolfo Zanella Director del CCADET por confiar en la Facultad de Ingeniería y académicos para realizar el estudio Geoeléctrico. Por permitirme ocupar los datos obtenidos en este estudio, para la realización de esta tesis.

Al arquitecto José Luis Juárez adjunto de la secretaria técnica por facilitarnos los planos de las instalaciones del CCADET.

Al Instituto de Geología, por el interés y la atención a través de la Dra. Blanca Prado de física de suelos con su grupo 2014-2.

A mis amigos Xiúhnel, Paco y Miguel por el apoyo durante todas las materias que compartimos y por todos los buenos momentos pasados. A Cristian por ser un segundo hermano, quien me brindó su ayuda y consejos durante este tiempo. A Pablo R. por apoyarme y ser parte de mi familia. A Mau y Leo por compartir grandes alegrías.

A todos aquellos familiares y amigos que de una u otra manera estuvieron involucrados a lo largo de este proceso, brindándome todo su apoyo.

Índice

1. Resumen.....	1
2. Objetivos	2
3. Introducción	3
4. Marco Teórico	4
4.1. Ecuaciones de Maxwell	4
4.2. Expresión del Potencial para una fuente puntual.....	7
4.3. Resistividad Aparente.	9
4.4. Configuración Electrónica.	11
4.4.1. Punto de Atribución y Profundidad de Investigación.	14
4.5. Tomografía de Resistividad Eléctrica	17
4.6. Teoría de Inversión.....	21
5. Trabajo del CCADET.....	28
5.1. Ubicación.....	28
5.2. Geología del Lugar.....	29
5.3. Protocolo del levantamiento de la TRE.....	34
5.4. Resultados e Interpretación de la TRE	40
6. Modelado Sintético	47
6.1. Selección de modelos sintéticos	48
6.2. Resultados de modelos sintéticos.....	52
7. Conclusiones.....	61
7.1. Recomendaciones	62
8. Bibliografía	63

1. Resumen

Se realizó un estudio de tomografía de resistividad eléctrica, en las instalaciones del CCADET: con los datos adquiridos se realizó el procesamiento de la información que incluyó la aplicación de un filtro media móvil para poder disminuir el ruido; posteriormente, se llevó a cabo la inversión con el software Earthimager 3D; los resultados fueron analizados e interpretados. Como resultado se define, la ubicación de tres cuerpos de interés, dos cuerpos alto resistivos cercanos a la superficie y uno de resistividades bajas a una profundidad de 4 o 5 m.

Al tener información de la posible existencia de cuerpos anómalos en el área de interés, se elaboraron modelos sintéticos con el programa Earthimager 3D. El objetivo era conocer, la respuesta del medio a la posible existencia de cuerpos con características similares, se eligieron tres modelos; el primer modelo muestra la ausencia de una anomalía de resistividades bajas; el segundo modelo recrea un cuerpo paralelepípedo con resistividades bajas en forma vertical; el último modelo presenta una anomalía rectangular de valores bajos orientados de forma horizontal. En los tres modelos anteriores, se colocaron dos cuerpos con valores alto resistivos en la parte alta del cubo de resistividades. Después de la inversión de cada uno de los modelos sintéticos, fue analizada y se correlacionó con los resultados obtenidos en el CCADET; como resultado se tiene que esta modelación sintética, aumenta la certeza de la ubicación y profundidad de los cuerpos de mayor importancia, visualizados en la interpretación de los datos del CCADET.

2. Objetivos

General

Modelar sintéticamente cuerpos asociados a tubos basálticos o cavidades en el subsuelo, a partir de los datos obtenidos de un estudio de tomografía eléctrica realizado en el CCADET, con lo cual se aumentará la certeza de la existencia de estos cuerpos en el área de interés.

Particular

- Llevar a cabo la adquisición de los datos, procesamiento, inversión e interpretación de la información para poder identificar la posible existencia de tubos basálticos, cavidades o zonas de fallamiento.
- Realizar la modelación en 3D mediante el programa Earthimager 3D, de los cuerpos encontrados en la inversión de los datos del CCADET para aumentar la certeza de su existencia.

3. Introducción

El método de prospección eléctrica es adecuado para estimar las propiedades geoeléctricas del medio, que a su vez, pueden ofrecer información referente a las estructuras geológicas, así como las condiciones en las que se encuentran, el método se basa en imágenes 2D y 3D de resistividades calculadas a partir de datos superficiales; siempre se debe cuidar de que la profundidad del estudio sea el adecuado para identificar los objetivos.

Gracias a los diversos estudios que se han realizado, es posible identificar la resistividad de los materiales con poca incertidumbre, debido a que presentan resistividades muy características o contrastantes en el medio que se encuentran, esto nos da como beneficio el poder identificar zonas de interés.

En respuesta a la solicitud por parte del Dr. Rodolfo Zanella Specia, Director del Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET), Ciudad Universitaria, se llevó a cabo un estudio de Prospección Eléctrica en las instalaciones de esta dependencia universitaria en la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. Este trabajo se enfocó en realizar una búsqueda de estructuras geológicas características de los basaltos volcánicos (tubos lávicos, cavernas y zonas de fallamiento) mediante perfiles geoeléctricos.

Los datos obtenidos en el proyecto se presentan en esta tesis, la cual fue dividida en dos partes, la primera se enfoca a la adquisición de los datos en campo, empleando un arreglo Wenner-Schlumberger y Ecuatorial paralelo. En la segunda parte se enfoca en la obtención de modelos de datos sintéticos de tomografía eléctrica en 3D con el software de EarthImager 3D, con la finalidad de poder observar y corroborar el comportamiento que pudiera presentar la presencia de cuerpos con diferentes resistividades dentro del área de estudio. Con estos 2 procedimientos podemos tener una mejor percepción e interpretación de la información obtenida en campo.

4. Marco Teórico

Una de las condiciones fundamentales para poder realizar prospección geoelectrica es el conocimiento de los principios físicos en los que están basados los dispositivos utilizados para hacer las mediciones. Las expresiones matemáticas que fundamentan el fenómeno físico, en este caso la respuesta del subsuelo ante un flujo de corriente es producto de consideraciones ideales del medio, que no siempre se cumplen en la realidad, pero para poder desarrollar matemáticamente estos fenómenos debemos suponerlas, de lo contrario el problema sería irresoluble.

4.1. Ecuaciones de Maxwell

Considerando un flujo continuo de corriente en un medio isotrópico, homogéneo y lineal, las leyes de Maxwell nos brindan las bases fundamentales sobre las que se desarrolla la teoría del método eléctrico (Telford,1992).

Partiendo de las ecuaciones de Maxwell para campos electromagnéticos. La ecuación 1.1, describe la creación de un campo eléctrico (rotacional del campo eléctrico) debido a una variación del campo magnético respecto al tiempo, mientras que la ecuación 1.2, expone como se forma un campo magnético (rotacional del campo magnético) a causa de un campo eléctrico cambiante respecto al tiempo y una corriente eléctrica.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1.1) \quad \text{Ley de la inducción de Faraday}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1.2) \quad \text{Ley de Amper-Maxwell}$$

Donde

$$\vec{E} = \text{Campo eléctrico [V/M]}$$

$$\vec{B} = \text{Campo de Inducción magnetica [T]}$$

$$\vec{H} = \text{Campo Magnético [A/m}^2\text{]}$$

$$\vec{D} = \text{Campo de Desplazamiento Eléctrico [C/m}^2\text{]}$$

$$\vec{J} = \text{Densidad de corrientes.}$$

Si consideramos que las ecuaciones (1.1) y (1.2) no tiene variaciones en el tiempo, se anulan las derivadas temporales de las dos ecuaciones citadas.

Las ecuaciones quedarían expresadas de la siguiente manera:

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (1.3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (1.4)$$

La ecuación (1.3) indica que el campo eléctrico es un campo conservativo e irrotacional y (1.4) nos dice que el campo magnético dependerá únicamente de la densidad de la corriente.

La ley de Ohm rige el flujo de corriente a través de un medio, siendo un medio homogéneo e isótropo; La ecuación de Ohm en su forma diferencial se define de la siguiente manera:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (1.5)$$

$$\sigma = \text{Conductividad del medio [V/m]}$$

$$\vec{J} = \text{Densidad de corriente}$$

$$\vec{E} = \text{Intesidad Campo eléctrico [V/M]}$$

De la ecuación antes mencionada podemos decir que la densidad de la corriente \vec{J} en un punto, tiene el mismo sentido y dirección que el campo \vec{E} en el mismo punto; y es proporcional a éste a través de un factor de proporcionalidad σ .

La función gradiente del potencial eléctrico, nos permite obtener el valor del campo eléctrico (que es una función vectorial) en base a una función escalar que es el potencial eléctrico. Dicha relación entre el potencial eléctrico U y la intensidad del campo eléctrico \vec{E} , se puede representar por la siguiente ecuación (Loke, 2004).

$$\vec{E} = -\nabla U \quad (1.6)$$

Incluimos el signo negativo en la ecuación (1.6) por la convención descrita y aceptada por (Orellana, 1982), debido a que las líneas de campo están orientadas en la dirección a la disminución del potencial.

Si se lleva a cabo la sustitución del campo eléctrico \vec{E} en la ecuación (1.5), en la dirección anterior, nos da como resultado la ecuación:

$$\vec{J} = -\sigma \nabla U \quad (1.7)$$

Esta ecuación relaciona el potencial eléctrico con la densidad de la corriente. En todos los puntos de la superficie se cumplirá la siguiente expresión de continuidad.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (1.8)$$

debido a que el medio no presenta variaciones respecto al tiempo, la ecuación (1.8) se reduce, y entonces la densidad de la corriente \vec{J} se pueda expresar como:

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (1.9)$$

Si sustituimos \vec{J} de la ec. (1.7), en la ecuación anterior (1.9), nos queda como resultado:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla U) = 0 \quad (1.10)$$

la ecuación (1.10), esta se puede expresar de la siguiente manera:

$$\nabla\sigma \cdot \nabla\bar{U} + \sigma\nabla^2\bar{U} = 0 \quad (1.10a)$$

Si consideramos que la conductividad es uniforme, podemos decir que $\nabla\sigma = 0$ por lo que la ecuación (1.10a) se reduce a la siguiente expresión:

$$\nabla^2U = 0 \quad (1.11)$$

Esta expresión matemática es la ecuación de Laplace, la cual será válida en todo el semiespacio conductor excepto en la fuente y las superficies de discontinuidad de la resistividad.

4.2. Expresión del Potencial para una fuente puntual

Consideremos el flujo de corriente alrededor de un electrodo que introduce una corriente I en una superficie semiesférica. El punto de contacto del electrodo se considera como una fuente puntual debido a su tamaño en proporción al estudio, de este punto la corriente se dispersara de forma radial. Las líneas de campo eléctrico son paralelas al flujo de corriente y normales a las superficies equipotenciales del campo eléctrico (Figura) 1 (Loke,2004).

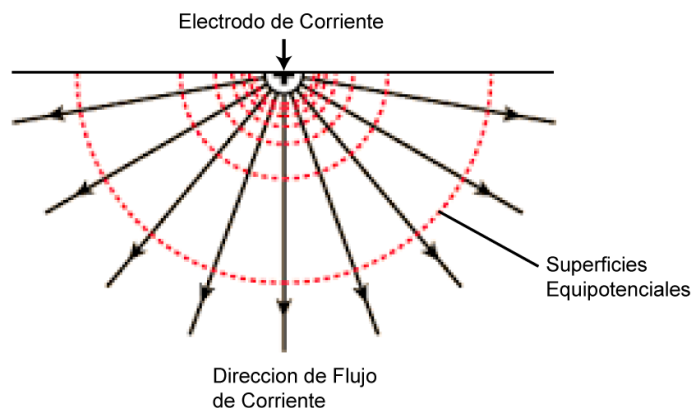


Figura 1. Representación grafica del Flujo de corriente de una fuente puntual, y la distribución del las líneas equipotenciales resultantes. Imagen modificada de Loke (2010).

La densidad de corriente \vec{J} sobre la superficie es igual a I dividida por el área superficial, que es $2\pi r^2$ para una semiesfera de radio r (Orellana 1982).

$$\vec{J} = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (1.12)$$

El campo eléctrico \vec{E} a una distancia r del electrodo de corriente, es obtenida por la ley de Ohm (1.5)

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad ; \quad \frac{\vec{J}}{\sigma} = \vec{E}$$

sustituyendo (1.12) en la ecuación (1.5)

$$\vec{E} = \frac{I}{\sigma 2\pi r^2} \quad (1.13)$$

Si consideramos que la inversa de la conductividad (σ) es $\frac{1}{\rho}$ donde ρ es la resistividad, podemos reescribir la ecuación (1.13) como.

$$\vec{E} = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (1.14)$$

Sabemos que se puede expresar el campo eléctrico como la diferencial del potencial eléctrico con respecto de una distancia r :

$$\vec{E} = -\frac{dU}{dr} \quad (1.15)$$

si llevamos a cabo la sustitución de (1.14) en (1.15) obtendremos la siguiente expresión

$$-\frac{dU}{dr} = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (1.16)$$

de donde podemos encontrar U integrando, considerando que la resistividad es constante:

$$U = -\frac{I\rho}{2\pi} \int \frac{dr}{r^2}$$

Al resolver la integral de línea, el signo es negativo, de esta manera el potencial eléctrico queda determinado de la siguiente forma:

$$U = \frac{I\rho}{2\pi r} \quad (1.17)$$

Donde r es la distancia de un punto cual quiera a la fuente. En prospección eléctrica esta expresión es muy importante, debido a que se basa en mediciones de potencial eléctrico U y corriente eléctrica I , para conocer la resistividad aparente del medio. La expresión (1.7) deja ver que el potencial de campo eléctrico dependerá de la distancia a la cual se encuentre la fuente.

4.3. Resistividad Aparente.

Cuando realizamos un estudio de tomografía eléctrica, necesitamos inyectar un flujo de corriente continua, a través de un par de electrodos; la diferencia de potencial que se genere será registrado por otro par de electrodos (normalmente sobre la superficie). Las lecturas del potencial son afectadas por la posición en la que se encuentren colocados los electrodos. Con el desarrollo de la ecuación (1.17), una fuente puntual que inyecta una corriente (I) generará un potencial (U) a cierta distancia desde la fuente.

Supongamos un medio homogéneo con una resistividad ρ , dos electrodos de medición ($P1, P2$) y un par de electrodos como fuente ($C1, C2$), los cuales estarán dentro de este medio, el potencial eléctrico se podrá expresar como la ecuación (1.16), si despejamos de esta ecuación, la resistividad ρ , que es el parámetro a medir se obtiene.

$$\rho = 2\pi r \frac{\Delta U}{I} \quad (1.18)$$

Donde r es la distancia entre los electrodos. r será representado por la función del espaciamiento entre los electrodos. Si expresamos la diferencia de potencial como consecuencia de la inyección de corriente, aunado a la geometría de los electrodos, se pueden adquirir los valores de resistividad (Fig. 2).

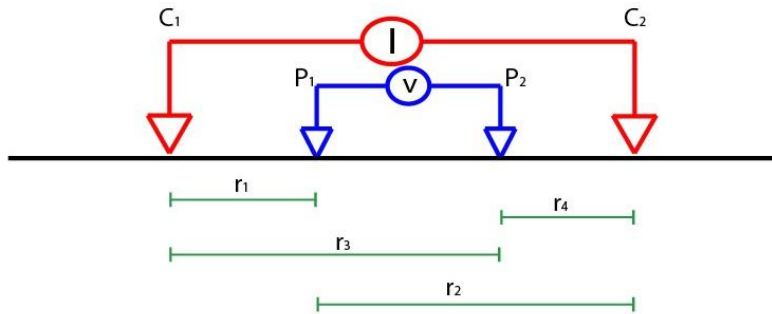


Figura 2. Esquema de las distancias entre los electrodos de potencia y los electrodos de corriente.

$$\rho = \frac{\Delta U}{I} \left(2\pi \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right]^{-1} \right) \quad (1.19)$$

donde r_1, r_2, r_3, r_4 es el espaciamiento entre los electrodos de corriente y de potencial. Si de la última ecuación sustituimos

$$K = \left(2\pi \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right]^{-1} \right) \quad (1.20)$$

Nos queda

$$\rho_a = \frac{\Delta U}{I} k \quad (1.21)$$

Donde k es el factor geométrico que depende únicamente de la geometría del arreglo de los 4 electrodos. El valor determinado de la resistividad no es el real del subsuelo, obtenemos un valor "aparente" de resistividad debido a que el semiespacio esta influenciando la respuesta del potencial eléctrico en la superficie. Las resistividades son aparentes, y no serán iguales a las resistividades reales, no pueden ser consideradas resistividades promedio o ponderadas.

4.4. Configuración Electrónica.

Para realizar un estudio de tomografía eléctrica resistiva debemos tener en cuenta la posición geométrica donde se colocarán los electrodos de potencial y de corriente de cada perfil, conocido como arreglo electrodo o configuración electrónica. Debido a que el objetivo de interés varía en cada estudio, existen varias configuraciones, la nomenclatura que se utiliza para los electrodos de corriente es A y B, mientras que los electrodos de potencial es M y N. Ahora mencionaremos las características de algunas configuraciones.

Wenner

Para este arreglo se colocan los electrodos de corriente en los extremos, mientras que M y N en la parte central del arreglo, los electrodos mantendrán la misma distancia entre si la cual estará representada por "a", se moverán de forma conjunta los electrodos, respetando el espaciamiento, de manera que la distancia para los niveles siguientes del arreglo será igual a "n x a" donde "n" es el nivel (Fig. 3).

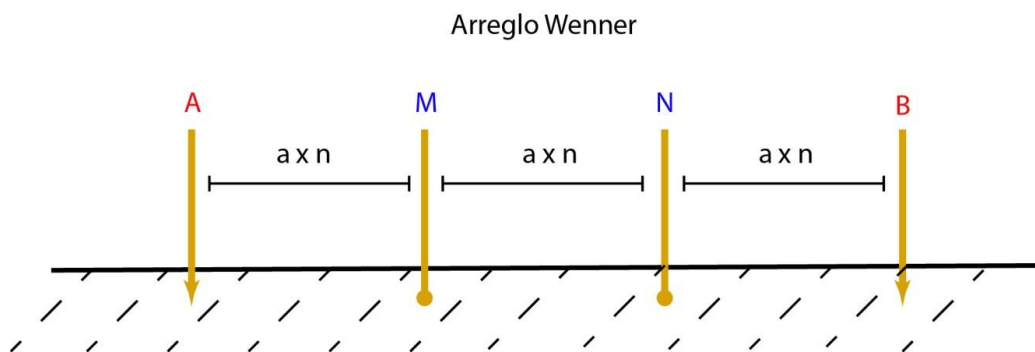


Figura 3. Esquema de la Configuración Electrónica Wenner.

Schlumberger

Esta configuración eléctrica dispone los electrodos de potencia en el centro y los de corriente a los extremos; la diferencia con respecto al arreglo Wenner radica en el espaciado entre el par de electrodos A-M y N-B con respecto a la separación de los electrodos de potencial M y N, la distancia entre el par A-M y N-B estará multiplicada por el factor "n", pero entre M-N habrá una separación de "a" esta separación normalmente se mantiene constante, aunque en ocasiones se debe ampliar dependiendo de la relación señal-ruido (Fig. 4).

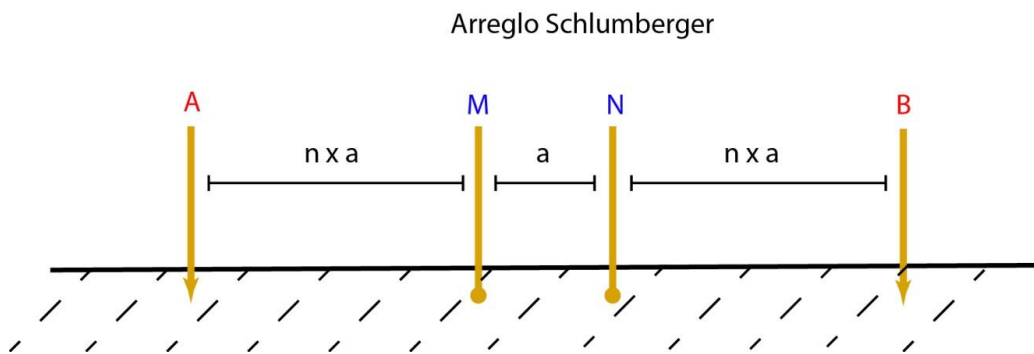


Figura 4. Esquema de la Configuración Electrónica Schlumberger.

Ecuatorial Paralelo

Este arreglo permite tener valores de potencial entre dos perfiles, los datos obtenidos del arreglo ecuatorial, permiten recopilar datos en áreas donde no es posible colocar electrodos para realizar un perfil 2D, cuando se tiene un número limitado de electrodos u obtener más datos e interpretar como 3D. Para poder llevar a cabo esta forma de adquisición de datos, se necesitan dos líneas de electrodos paralelas, en la primera línea colocaremos un par de electrodos, ellos corresponde a los electrodos de corriente A,B. En la segunda línea mantendremos los dos electrodos, pero ahora serán los de potencial M,N. Al comenzar las mediciones los electrodos de potencial mantendrán una separación constante, el cual se desplazará un electrodo a la vez, la apertura de los electrodos de corriente va ir aumentando a razón de "na". Se respetarán las relaciones de separación entre electrodos del arreglo Wenner-Schlumberger 2D hasta finalizar las líneas (Fig. 5).

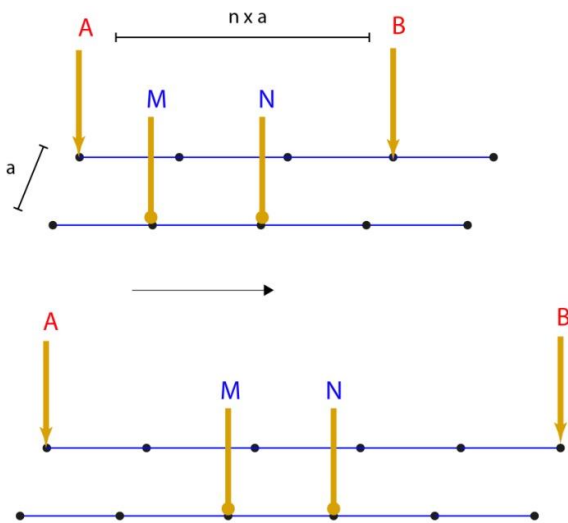


Figura 5. Esquema de la Configuración Electrónica Ecuatorial Paralelo.

El arreglo Wenner es bueno para cambios verticales en las resistividades (recomendable para estructuras horizontales, estratos sedimentarios o en geotecnia), la profundidad de investigación se estima en 20% de la longitud total de arreglo esto puede variar dependiendo de los diferentes factores presentes en la adquisición de los datos de campo. El factor geométrico de este arreglo se representa de la siguiente manera: $k = 2a\pi$

La configuración Schlumberger tiene la ventaja de tener una sensibilidad aceptable para cambios verticales y horizontales de resistividades (puede ser aconsejable para estructuras horizontales y verticales) de manera general se usa una relación empírica en donde la profundidad de investigación puede alcanzar el 30% de la longitud del arreglo. Esta relación varía dependiendo de las características del medio. Su factor geométrico puede ser calculado a partir de:
 $k = n\pi a(n + 1)$.

El arreglo Ecuatorial Paralelo es sensible a cambios verticales y horizontales (se utiliza en la búsqueda de estructuras horizontales y verticales), la profundidad que alcanza este arreglo puede encontrarse entre el 20% - 25% de la longitud del arreglo y la intensidad de la señal es bastante fuerte. La profundidad de investigación en cualquier arreglo varía debido a las condiciones de la zona de estudio, ya que estas presentan diferentes tipos de roca, porosidad y contenido de fluidos.

4.4.1. Punto de Atribución y Profundidad de Investigación.

Al obtener una medición en campo se obtiene un solo valor de la resistividad aparente, a este dato se le asigna una ubicación en el subsuelo. El punto donde se ubicó el valor de resistividad aparente, es llamado como "punto de atribución".

Una forma de ubicar espacialmente a este punto es proporcionarle una ubicación horizontal justo en el punto medio de la longitud total del arreglo (para arreglos simétricos) y una ubicación vertical a una distancia que sea proporcional a la

separación entre los electrodos. Esta ubicación vertical estará dada por la profundidad media de investigación (Edwards, 1977).

Estos valores se toman como coeficientes que representan proporciones entre la longitud total del arreglo "L" y la distancia entre electrodos "a" en relación a la profundidad de investigación " Z_e " (Loke, 2004).

Hay una variedad de definiciones físicas para la profundidad de investigación, cada una de ellas se formula por la necesidad de querer relacionar una medición hecha en la superficie con alguna profundidad en particular, con esto se puede tener un mayor análisis de los parámetros del estudio para una mejor identificación del objetivo (Barker, 1989).

Una de las primeras definiciones de profundidad de investigación dice que es aquella profundidad a la cual un estrato delgado horizontal (paralelo a la superficie del terreno) contribuye la cantidad máxima a la señal total medida en la superficie del terreno (Evjen, 1938). Más adelante Roy y Apparao en 1971 utiliza la misma definición en los estudios con más de un medio homogéneo e isótropo.

Roy en 1972 calcula curvas para distintos arreglos de electrodos convencionales (incluyendo Wenner, Schlumberger y dipolo-dipolo) los cuales muestran la respuesta de una capa delgada horizontal con profundidad variable. El punto donde estas curvas alcanzan un punto máximo de profundidad se define como "profundidad de investigación característica" (DCI, por sus siglas en inglés).

Con el paso del tiempo en lugar de discutir la contribución de la corriente a través del medio, Roy y Apparao analizaron la contribución de cada elemento de la tierra a la señal total ($\Delta V / I$) observada en la superficie. Si se añade esta contribución sobre una capa delgada horizontal y se normaliza de tal forma que el total de la señal es igual a la unidad, originan el concepto de "profundidad de investigación característica normalizada" (NDCI, por sus siglas en inglés), esto les sirvió para poder generar curvas de (NDCI) para distintos arreglos.

Las curvas de NDCI no son simétricas en el valor máximo (Z_{max}), pero son sesgadas hacia mayores profundidades.

(Edwards, 1977) sugiere que el valor más representativo puede ser la profundidad a la cual la mitad de la señal medida en la superficie es debida a la porción del suelo superior a esa profundidad y la otra mitad de la señal a la porción del suelo inferior, definiéndola como la "profundidad media" o profundidad de investigación efectiva, esta definición tiene validez física y aplicación práctica.

Se define a (Z_{med}) como:

$$n(n+1)(n+2) \left[\{n^2 + u\}^{-\frac{1}{2}} - 2\{(n+1)^2 + u\}^{-\frac{1}{2}} + \{(n+2)^2 + u\}^{-\frac{1}{2}} \right] = 1 \quad (1.22)$$

Donde $u = 4 \left(\frac{Z_{med}}{a} \right)^2$

Esto nos brinda la oportunidad de estimar la profundidad que puede alcanzar el estudio. Como nota, las profundidades fueron estimadas para un modelo de tierra homogénea, aunque en la práctica se tiene un modelo heterogéneo en el subsuelo, se considera que la profundidad estimada es considerablemente buena para ocuparlas en un estudio de campo. En la práctica, la profundidad de investigación depende, de las capas del subsuelo, la configuración geométrica del estudio, la separación de los electrodos, la porosidad del medio y el contenido de humedad.

4.5. Tomografía de Resistividad Eléctrica

Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D

La Tomografía de resistividad eléctrica (TRE) es un método diseñado para poder inferir la variación de resistividad eléctrica en una sección del subsuelo y la profundidad a la que se encuentra, a partir de un dispositivo tetraelectrodico (2 electrodos de corriente y 2 de potencial, puede diferir en la cantidad de electrodos dependiendo el arreglo) ubicados en geometrías determinadas.

Esta forma de estudiar el subsuelo se desarrolla para zonas donde la geología es más compleja e incrementar la aplicación en problemas ingenieriles, hidrogeológicos, geotécnicos y arqueológicos (Fig. 6).

Con los datos recolectados en campo, se obtiene una imagen en dos dimensiones que nos brinda una representación grafica de la distribución de resistividad eléctrica aparente de la zona de estudio. A estos datos medidos, se decide, si se desea llevar a cabo un proceso para disminuir el ruido u otras afectaciones a los datos, ya que se tiene los datos procesados se aplican un algoritmo de inversión a los datos, dando como resultado, la distribución teórica de resistividades.

Cuando se lleva a cabo un estudio de TRE, los datos adquiridos pueden ser desde cientos hasta miles de mediciones; con el avance de la tecnología en los diversos campos de computación, electrónica, etc., se han podido desarrollar herramientas que facilitan la adquisición de los datos, mediante procesos automatizados y software capaces de procesar una gran cantidad de información.

La resistividad del subsuelo cambia de acuerdo con el contenido y clase de minerales, fluidos, por su porosidad y grado de saturación de agua (Loke y Baker, 1976a).

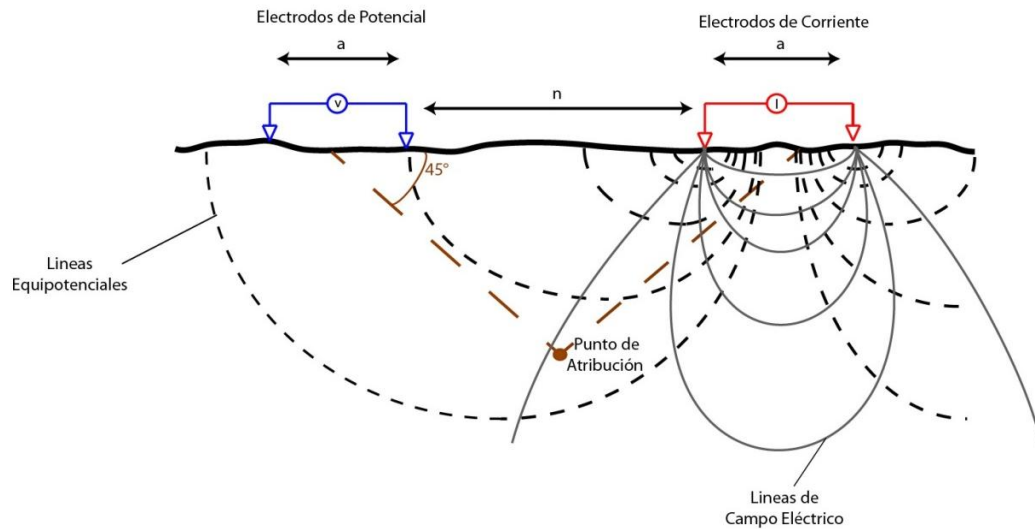


Figura 6. Electrodos de corriente y de potencial, que se van separando conforme se requiera la profundidad de investigación. Imagen modificada de http://geotech.mex.tl/986328_geofisica.html.

Tomografía de Resistividad Eléctrica 3D

En la gran mayoría de los casos de estudio, se trabaja con estructuras en tres dimensiones como estructuras geológicas, edificaciones subterráneas, debido a este tipo de retos, los estudios en 3D han evolucionado considerablemente en la última década para generar modelos de interpretación en tres dimensiones.

Esta técnica permite que la distribución espacial de los arreglos multi-electródicos se pueda combinar, en todo el plano de estudio (Fig. 7). Los arreglos en 3D se pueden realizar en líneas paralelas o en forma de rejilla procurando mantener las mismas distancias de espaciamiento en los ejes coordenados "X" y "Y" de tal forma que se pueda ocupar un electrodo para inyectar corriente como para medir el potencial (Loker y Barker 1996).

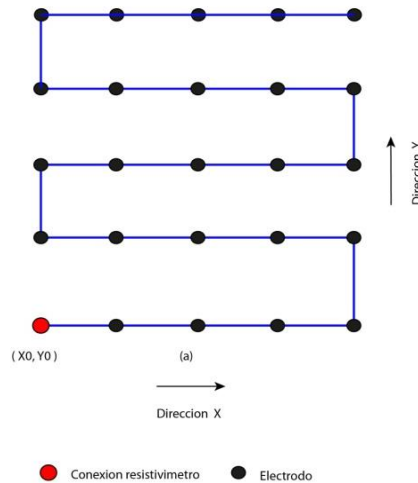


Figura 7 Ubicación de los electrodos a lo largo de un cable multi-electrónico para un levantamiento 3D de resistividad (imagen tomada y modificada Loke (1996a)).

Cuando se dispone a realizar un estudio con líneas paralelas y las mediciones no se tomaran de forma cruzada (Fig. 8), se recomienda que la distancia entre cada perfil sea máximo 4 veces el espaciamiento eléctrico, con la finalidad de que se pueda mapear el medio que se encuentra entre las líneas de una manera óptima (Aizebeokhai, 2009).

En el caso del arreglo en rejilla se registra una gran cantidad de mediciones lo cual da lugar a que el procesado y la inversión de los datos tome demasiado tiempo. Para poder optimizar estos procesos fue desarrollado una técnica para adquisición de datos llamada "cross-diagonal" por Loke y Barker (1996a). Esta nueva técnica tiene como objetivo disminuir la cantidad de mediciones, hasta en un tercio con relación de la forma convencional sin afectar la calidad del modelo obtenida. La forma en que se aplica es fijando un electrodo de corriente, y variar el electrodo de potencial, como con el arreglo Polo-Polo (Fig. 8). Las mediciones que el arreglo considera serán cuando el electrodo de potencial se encuentre alineado ortogonalmente, o bien a 45° del electrodo de corriente.

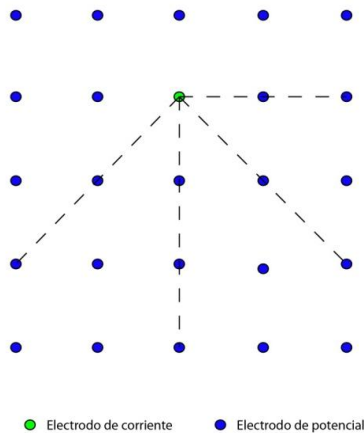


Figura 8. Ubicación de los electrodos para un estudio 3D en forma de rejilla (imagen tomada y modificada Loke (1996)).

En los últimos años se han desarrollado nuevas disposiciones geométricas para la adquisición de datos, como resultado de los impedimentos para poder colocar una malla de electrodos sobre el área a prospectar. Tejero et al. (2015), muestra los arreglos en "L" y "Esquina", los cuales son una forma alternativa de colocar los electros para poder circunvalar construcciones.

El arreglo en "L" es una configuración la cual consisten en ubicar dos perfiles, los cuales son perpendiculares entre sí, con esta geometría, los electrodos de potencial y de corriente se mueven a través de estas líneas de un extremo a otro, se puede utilizar las diferentes secuencias de adquisición de datos que ya se conocen como Polo-Polo, Dipolo-Dopolo, Wenner, Schlumberger y Wnner-Schlumberger (Chávez, G., 2011).

Otro arreglo propuesto por Tejero et al. (2015), denominado en "Esquina", es planteado con la finalidad de disminuir el número de electrodos presentes en una malla, sustituyéndolo, por un par de líneas perpendiculares entre sí, el origen de cada perfil es el mismo para ambas líneas. Aquí se ubica un electrodo de corriente A y uno de potencial M al final de una línea, el otro par de electrodos B y N se colocan en el otro, al final de la segunda línea. Los arreglos anteriores permiten tener una caracterización de subsuelo en 3D por debajo de estructuras de interés, las cuales no desean ser dañadas o el acceso a ellas está restringido.

4.6. Teoría de Inversión

El problema inverso es simplemente el conjunto de métodos usados para adquirir información útil de nuestro entorno a partir de medidas físicas o datos (Menke,1989). Para entender mejor la teoría de inversión describimos un "modelo" como una representación matemática idealizada de una sección de la tierra, este modelo tiene parámetros a los que llamaremos "parámetros del modelo", que son cantidades físicas que describirán el comportamiento del modelo (fenómeno físico). Los "datos" serán medidas físicas de interés del fenómeno. Los datos para el problema directo, se calculan a través de los parámetros ya conocidos del modelo y las variables independientes. Caso opuesto del problema inverso, los datos serán las mediciones realizadas de las cuales se tratara de calcular los parámetros para describir el modelo.

Problema Directo

En el método geoelectrico el problema directo consiste en encontrar una ecuación que nos brinde la diferencia de potencial entre un par de puntos en el espacio en función de la distribución de resistividad del medio, arreglo geométrico y la corriente inyectada (Sequera,2016).

El problema directo nos proporciona datos de resistividad aparente del medio; teniendo en cuenta las consideraciones anteriores de un medio isótropo, se puede expresar una ecuación para un punto de la corriente I en la superficie como:

$$\nabla \cdot \vec{J} = \sigma \nabla^2 \bar{U} = -I \delta(x - x_A) \delta(y - y_A) \delta(z - z_A) \quad (1.23)$$

Si despejamos el Laplaciano del potencial entonces nos queda:

$$\nabla^2 \bar{U} = -I \rho \delta(x - x_A) \delta(y - y_A) \delta(z - z_A) \quad (1.24)$$

De esta ecuación, debemos de encontrar los valores de resistividad aparente, existen diferentes procedimientos para obtener dichos valores: método Analítico, método de elementos de contorno, método de diferencias finitas y el método de elemento finito. Cada uno tiene características diferentes por lo cual en función de nuestro enfoque es que debemos elegir el método. Los dos primeros métodos son utilizados con mayor frecuencia para geometrías relativamente simples, pero para un número de regiones con diferentes valores de resistividad esto podría ser una limitante.

En la actualidad el método de elementos finitos y el método de diferencias finitas son los más utilizados para realizar el modelado directo.

En el método de diferencias finitas se discretiza el subsuelo en secciones rectangulares, utilizando una rejilla y determinando el potencial en cada nodo de la rejilla. En el método de elementos finitos se divide el volumen del subsuelo en elementos de resistividad constante, no se limita por una forma cubica, y del mismo modo que con el método de diferencia finitas se obtiene el potencial en cada nodo formado.

De los métodos de diferencias finitas y elementos finitos el último es el que se ha destacado por ser el que mejor resuelve la inversión de los datos cuando los mismos fueron adquiridos sobre una zona con desniveles topográficos (Burden, Faires 1997). Al realizar todos los cálculos con este procedimiento, las condiciones de contorno se incorporan como integrales en la función que deseamos minimizar mientras que la resolución por diferencias finitas originan inconvenientes en el momento de incluir contornos irregulares. De esta forma la construcción de las condiciones del método de elementos finitos muestra ser independiente de las condiciones de frontera del problema particular.

Problema Inverso

Se puede describir la teoría de inversión como un conjunto de métodos matemáticos cuyo propósito es analizar una serie de observaciones con la finalidad de extraer información significativa sobre un fenómeno físico, con base en inferencias derivadas de los datos observados. La información vendrá como valores numéricos de una propiedad en específico del medio, estas propiedades serán los parámetros del modelo inverso y se presume la existencia de alguna teoría matemática o modelo que describe de forma adecuada la relación entre los parámetros del modelo y los datos (Menke, 1989).

En este trabajo el problema inverso proporciona la distribución de resistividades del medio a partir de las mediciones hechas en superficie. Se estima la distribución de las resistividades calculadas con base a un modelo teórico basado en una tierra compuesta por una serie de prismas bidimensionales contiguos (Fig. 9) al cual denominamos dominio (Loke y Barker, 1995,1996).

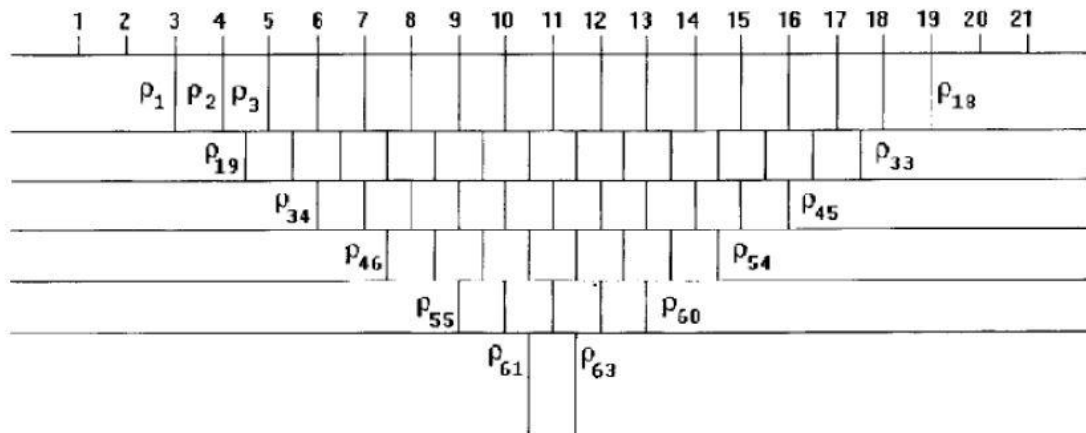


Figura 9. Representación grafica de los bloques rectangulares para un modelo 2D (Loke y Barker 1996).

La forma convencional de la aproximación para determinar las resistividades de los bloques se puede lograr con un método iterativo de optimización no-lineal (Barker, 1992).

Si nosotros tenemos un problema no lineal, este se linealiza considerando cambios de resistividad pequeños, esto permite que, sí se discretiza el subsuelo en celdas de resistividad constantes (Fig. 9) se podrá obtener la matriz de sensibilidad que relaciona las medidas de una configuración electródica con las diferentes celdas que se generaron.

Debe de haber el mismo número de datos de resistividades como de bloques en la pseudosección de resistividades aparentes, así mismo la profundidad en los centros de los bloques son ubicados en la profundidad media de investigación (Edwards, 1977). Esto para cada arreglo eléctrico usado.

El algoritmo matemático para calcular la imagen de resistividad fue desarrollado por Loke y Barker (1995,1996). Ellos fundamentan sus métodos en el sistema de mínimos cuadrados.

La resistividad aparente puede expresarse en términos de primer orden en la expresión de Taylor como lo describe Tejero et al (2002) de forma breve.

$$\rho_{app} = F(p) + \sum_{k=1}^M \frac{\partial F(p)}{\partial p_k} \delta p_k \quad (1.25)$$

Donde sabemos que ρ es el vector de los parámetros de dimensión M. para estos casos la resistividad verdadera del prisma k_{th} es ρ_k y $F(p)$ es la función que determina la resistividad aparente. Se determina la diferencia entre la resistividad observada y la calculada hasta el elemento j_{th} observando la ecuación (1.25).

$$\delta \rho_{appj} = \rho_{appj}^{obs} - \rho_{appj}^{est}$$

"obs" hace referencia a la resistividad observada y "est" para la estimada.

El error cuadrático de la función se define de la siguiente manera:

$$E^2 = \sum_{j=1}^N \delta \rho_{appj} = \sum_{j=1}^N (\rho_{appj}^{obs} - \rho_{appj}^{est})^2 =$$

$$\sum_{j=1}^N \left(\rho_{appj}^{obs} - F_j(p) - \sum_{k=1}^M \frac{\partial F_j(p)}{\partial p_k} \delta p_k \right)^2 \quad (1.26)$$

Donde N es el número de mediciones.

Si se deriva la expresión (1.26) con respecto al vector " p " se obtiene

$$\frac{\partial E^2}{\partial p_i} = 2 \sum_{j=1}^N \left[\rho_{appj}^{obs} - F_j(p) - \sum_{k=1}^M \frac{\partial F_j(p)}{\partial p_k} \delta p_k \right] \left[-\frac{\partial F_j(p)}{\partial p_i} \right] = 0 \quad (1.27)$$

$$i = 1, \dots, M$$

La ecuación anterior está definida como un conjunto de ecuaciones normalizadas:

$$\sum_{k=1}^M \delta \rho_k \sum_{j=1}^N \frac{\partial F_j(p)}{\partial p_j} \frac{\partial F_j(p)}{\partial p_i} = \sum_{j=1}^N \frac{\partial F_j(p)}{\partial p_i} \delta \rho_{appj} \quad (1.28)$$

La expresión (1.28) es comúnmente expresada de forma matricial, que se modifica para obtener la solución en términos de $\delta(p)$ (Loke y Barker, 1995) entonces;

$$\delta(p) = (J^T J + \lambda C^T C)^{-1} J \delta \rho_{app} \quad (1.29)$$

Los elementos de la matriz Jacobiana definidos en la expresión anterior se representa de la siguiente forma:

$$J_{jk} = \frac{\partial F_j(p)}{\partial p_k} \quad (1.30)$$

λ es Factor de amortiguamiento, C es un filtro de suavizado utilizado para limitar la suavidad de las perturbaciones de los parámetros del modelo a algún valor constante (Sasaki, 1992), C^T indica la matriz transpuesta del filtro.

La ecuación (1.29) fue resuelta por Loke y Barker (1995) utilizando el método que ellos nombraron Deconvolución de Mínimos Cuadrados (LSD). Para el valor de $F(p)$ se derivada la función potencial $U(r)$ con respecto a la resistividad verdadera en cada prisma. Para un conjunto de electrodos tal función se encuentra por superposición. Por lo tanto para una fuente con coordenadas $(a, 0, 0)$ y para un electrodo de potencial en $(x, 0, 0)$, *la derivada del potencial puede ser expresada de la siguiente manera:*

$$\frac{\partial U(r)}{\partial \rho_i} = \sum_{i=1}^L U_i(r) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{V_i} \left(\frac{x'(x'-a)-y'^2-z'}{[x'^2+y'^2+z'^2]^{3/2} [(x-x')^2+y'^2+z'^2]^2} \right) dV_i \quad (1.31)$$

x', y', z' son el conjunto de coordenada de un punto dentro del prisma, y, dV_i es el volumen de cada dominio.

La ecuación expresada anteriormente es válida para contrastes pequeños en la resistividad en los prismas contiguos. Loke y Barker (1996) mostraron la flexibilidad del método con ejemplos de modelos sintéticos, tomando en cuenta contrastes pequeños en la resistividades.

El error RMS (*root mean square*) es la diferencia entre los valores medidos y los valores del modelado, conocido como error cuadrático medio, sirve de criterio para detener el proceso de inversión el cual se define :

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i^{pred} - d_i^{meas}}{d_i^{meas}} \right)^2}{N}}$$

N es el valor total de mediciones, d^{pred} son datos calculados en el modelado y d^{meas} son los datos medidos.

Cuando se realiza una inversión se trata de reducir el error en los datos, entre el campo medido y los datos calculados con la reconstrucción del modelo. Las mediciones podrían tener un error entre 1% y 5%, a causa de errores numéricos y de redondeo (advanced Geosciences, Inc., 2009).

5. Trabajo del CCADET

Una parte fundamental de los trabajos geoeléctricos es la forma de adquisición de los datos de campo; teniendo en cuenta los aspectos que influyen en las imágenes de resistividades, las características geológicas y la profundidad deseada, se desarrolló el protocolo de actividades, las herramientas que se emplearían, el arreglo que mejor resultados obtendría y los atributos que mejorarían la inversiones de datos a prospectar. En este capítulo se brinda la información relacionada a la zona donde se realizó el estudio de TRE 3D en el área del CCADET y las características del arreglo utilizado.

5.1. Ubicación

El estudio se llevó a cabo en el CCADET que se ubica en Ciudad Universitaria, con dirección en Circuito Exterior S/N, C.P. 04510, Cd. Universitaria, México, D.F. (coordenadas UTM: 14 Q 480496 N, 2136471 E) (Fig. 10).

Las instalaciones se encuentran en Ciudad Universitaria conocida por los habitantes de la ciudad como "C.U.", se encuentra al sur de la parte central de la Ciudad de México, a ambos lados de la Avenida de los Insurgentes e incluye dentro de sus instalaciones varias facultades reconocidas, importantes bibliotecas así como destacados centros culturales y museos.

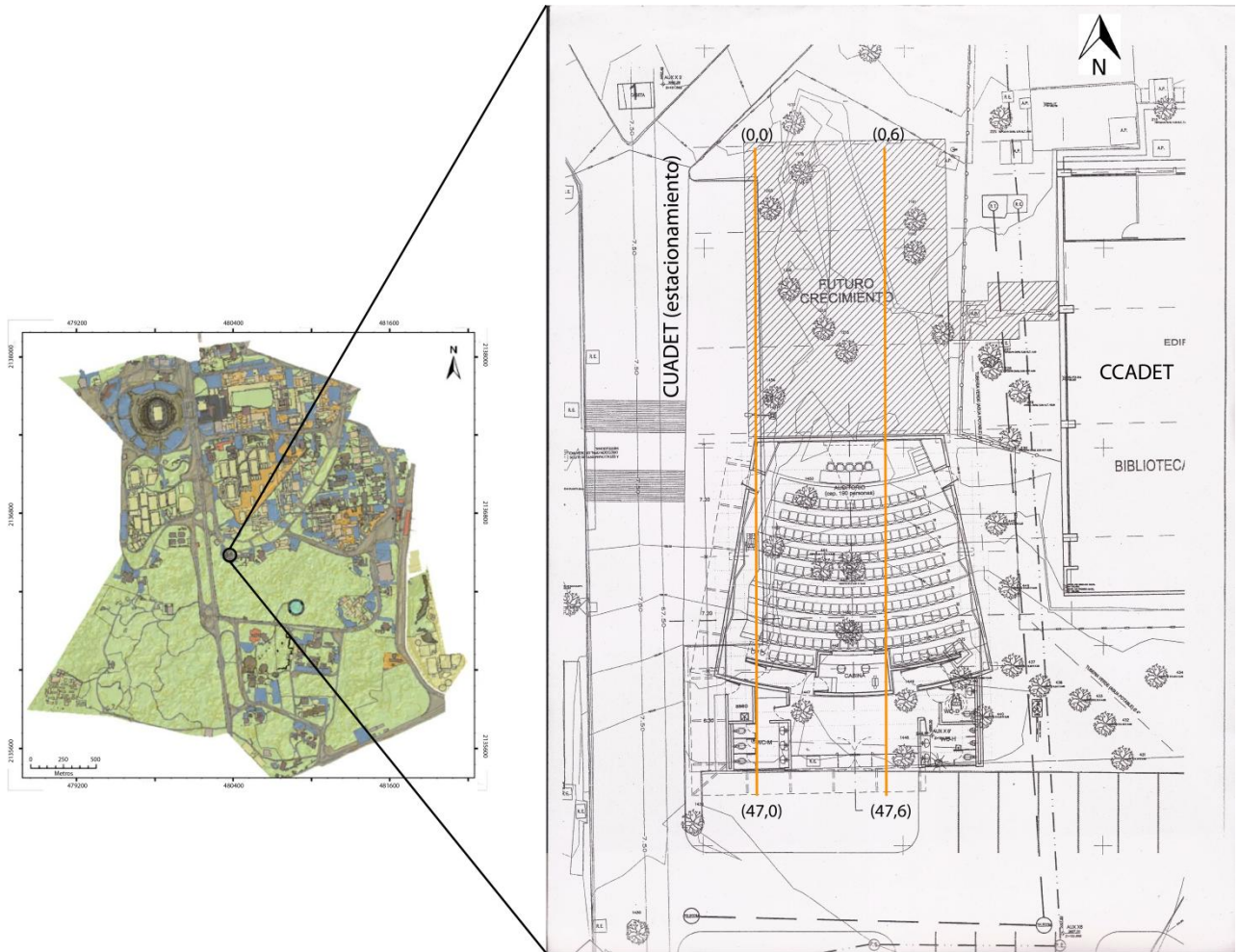


Figura 10. Zona de Ubicación del CCADET. Lado izquierdo: Campus C.U., Lado derecho: plano de localización de la zona de estudio, dentro de las instalaciones del CCADET. Mapa modificado de "http://www.pumagua.unam.mx/sistema_informacion.html".

5.2. Geología del Lugar

El trabajo realizado se llevó a cabo dentro del valle de México, el cual se localiza dentro de la Faja volcánica Transmexicana (FVTM) (Fig. 11).

La Sierra de Chichinautzin (SCN) es un campo volcánico orientado en dirección E-W y N60°E, con una superficie extendida entre la Ciudad de México y el estado de Morelos, cuya edad varía entre el Plioceno superior al Reciente, y se ubica en la provincia Geológica denominada FVTM (Gómez-Tuena et al., 2005).



Fig. 11. Ubicación de la zona Transmexicana desde el Pacífico hasta el golfo de México. Entre los paralelos 19° y 20° de latitud Norte. Imagen modificada de "http://sierra-madre-oriental.blogspot.mx/2014_03_01_archive.html".

La SCN es reconocida como una de las regiones con mayor densidad de volcanes monogenéticos en toda la FVTM. La mayoría de las rocas volcánicas en esta región son andesitas. De manera subordinada ocurren basaltos y dacitas, que pertenecen en su mayoría a la serie calco-alcalina (Gunn y Mooser, 1971; Swinamer, 1989; Lugo-Hubp, 1984)

Debido a que la SCN se encuentra en la periferia de la ciudad de México, se han hecho estudios relacionados con la actividad Volcánica de la sierra Chichinautzin. Algunos de estos trabajos se han concentrado en las coladas del Volcán cinerítico El Xitle, que cubren amplias demarcaciones de la zona del sur de la Capital de la Ciudad, incluyendo la Ciudad Universitaria de la UNAM.

La última actividad relacionada al valle de México está representada por el derrame de composición basáltica que cubre el área conocida con el nombre de

Pedregal de San Ángel; tuvo su origen en la pendiente norte de la SCN y se extiende hacia el norte a lo largo de 13 o 14 km (Badilla-Cruz, 1977).

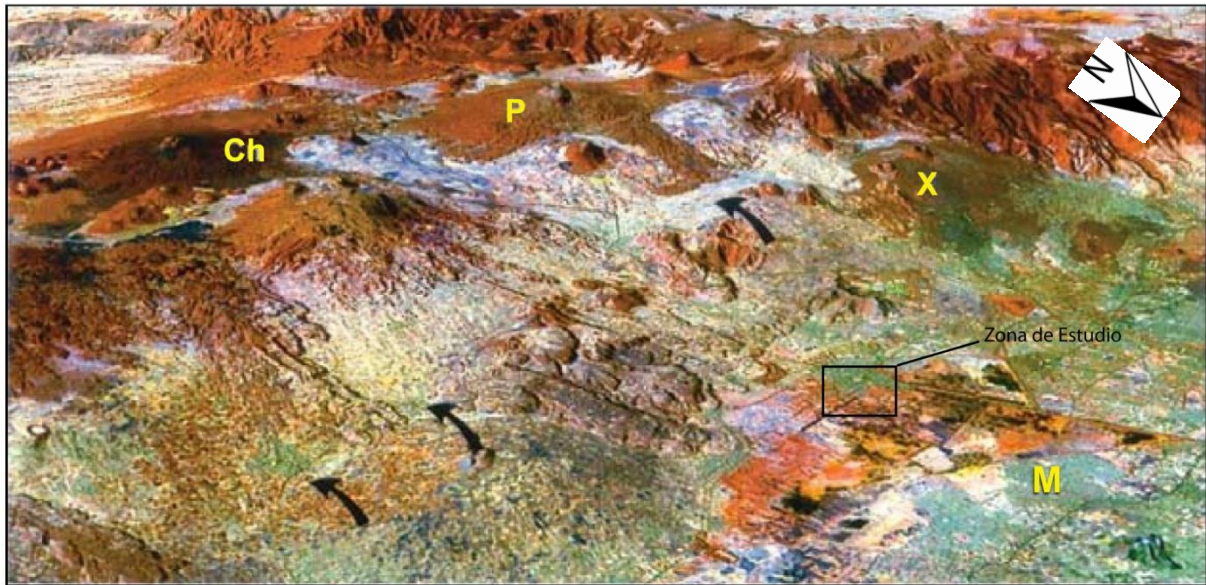


Figura 12. Imagen de Satélite LANDSAT con perspectiva hacia el SW se puede ubicar el volcán Xitle (X) y la extensión del pedregal así como parte de la SCN. M=ciudad de México, Ch= Volcán Chichinautzin, P= Volcán El Pelado, las flechas indican la traza de una falla normal con dirección E-W (Imagen tomada y modificada de Siebe, 2009).

Dichas lavas fueron emitidas por un cono de escorias y cenizas localizadas en las laderas del extinto volcán de Ajusco, éstas lavas avanzaron por lo que ahora conocemos como pedregales de San Ángel, San Francisco, Santa Úrsula, Carrasco y Padierna (Minor, 2014), cubriendo un área de 70 Km² (Siebe, 2009) (Fig. 12).

En el lugar donde se encuentra un cono cinerítico conocido actualmente con el nombre de Xitle, hay evidencias de actividad explosiva, tanto antes como después de la efusión de lava.

La erupción del Xitle está datada en 1670 +/- 35 años AP (Siebe, 2000). La velocidad y la dirección en que avanzaron las lavas estuvieron controladas por la topografía, de ahí que se desplazaran hacia el N y NE, descendiendo una distancia de 12 km por las laderas del Ajusco hasta llegar el Valle de México.

El Xitle es uno de los últimos volcanes monogenéticos en el campo del Chichinautzin, ocupa un área aproximada de 80 Km². Con un flujo principal hacia el norte de más de 13 km que abarca una zona de 70 Km², que se extendió mediante un sistema complicado de tubos de lava, formando otras estructuras volcánicas como: hornitos, túmulos, cordilleras de presión, cavidades, etcétera (Martín del Pozo et al., 1997b).

Ciudad Universitaria está asentada sobre una gran capa de derrame volcánico, estas lavas pertenecen a la formación Chichinautzin. Las lavas de esta unidad en general son muy extensas, vesiculares, masivas o lajadas y su composición es principalmente andesítico-basáltica y andesítica, principalmente de grano fino y medio, porfiríticas-afaníticas-mesocráticas, con fenocristales de olivino y piroxeno; también hay presencia de andesitas basálticas de augita, basaltos, basaltos alcalinos y dacitas.

Por debajo de esta unidad se encuentran sedimentos clásticos y productos piroclásticos relacionados con la actividad volcánica de la sierra Chichinautzin, los cuales se depositaron en un ambiente lacustre. El origen de estos depósitos lacustres está íntimamente relacionado con la obstrucción definitiva del desagüe de la cuenca de México. Se considera que este afloramiento es del período Cuaternario, con afloramientos rocosos ígneos extrusivos (44.7%), y suelo (31.6%). Este afloramiento está ubicado al sur de la Ciudad de México.

De acuerdo con Martín del Pozzo et al, (1997b), la explicación de la formación de los tubos de lava en la zona es la solidificación de la corteza superficial sobre lava líquida y a la existencia de tubos secundarios de lava, por los que siguió fluyendo una cantidad continua de lava, que por la temperatura existente permitió fundir la

corteza que separaba entre sí a los tubos secundarios, ayudando a que se unieran una cantidad de tubos y formando un tubo maestro (anastomosis).

Estos tubos del Xitle se extendieron por 8 km en un sistema complejo de tubos. Entre más lejana era la distancia menor era el flujo de lava que circulaba por los tubos secundarios, lo que impedía que se siguieran formando tubos maestros.

Con estos conceptos se estarían buscando alguna de estas estructuras que podrían estar dentro de la zona en donde se realizó la tomografía de resistividad (Fig. 13).

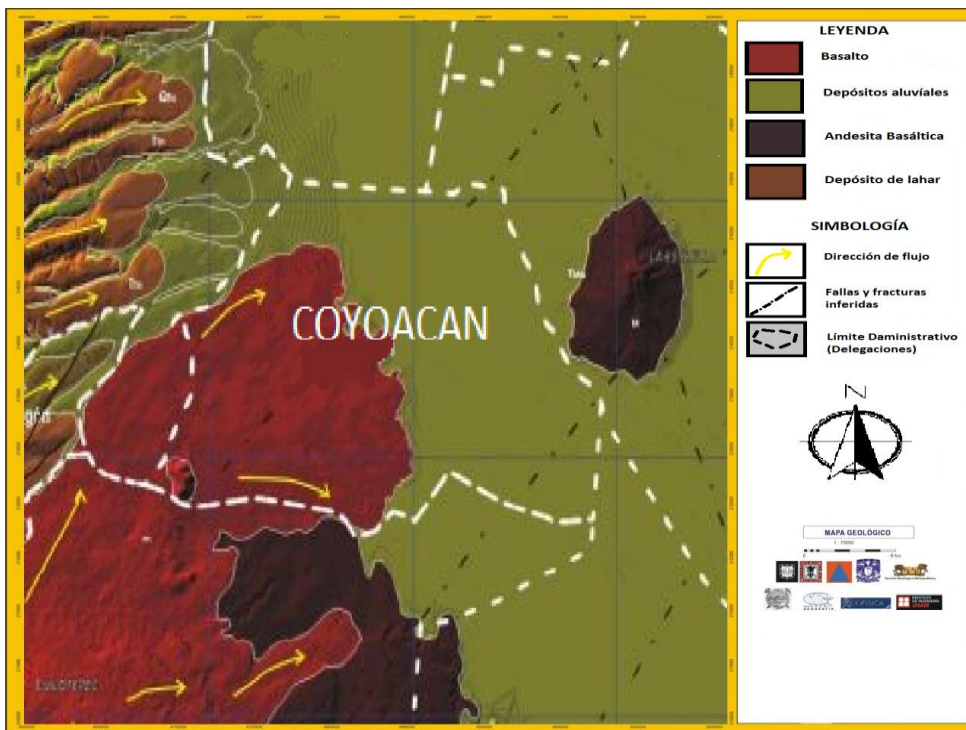


Figura 13. Mapa geológico de la Delegación Coyoacán donde se ubica el CCADET. Mapa modificado de "http://data.proteccioncivil.cdmx.gob.mx/mapas_sgm/mapa_geologico_df_b_1280_1349.jpg".

5.3. Protocolo del levantamiento de la TRE

Lo primero que fue necesario hacer fue visitar el sitio de estudio para determinar el área de exploración y la ruta de acceso. Al visitar el sitio nos percatamos de que el mejor método para cubrir la mayor parte del área deseada sería hacer dos líneas de tomografía, cada línea con 48 electrodos, una separación de 6 m entre líneas y una orientación norte-sur, de modo que a partir de los datos obtenidos pudiéramos extrapolar a un modelo tridimensional que nos ofreciera una mejor visualización de los datos para su interpretación.

Las dos líneas de electrodos abarcaron la mayor parte de la zona de estudio, para poder tener una mejor respuesta y cumplir con la profundidad deseada, se colocaron de manera que la primera se situó en el estacionamiento del CUAED pegado a la banqueta y la segunda, atravesó el área verde que se encuentra más cercana a los edificios del CCADET en una zona con rocas volcánicas sueltas y mayor presencia de vegetación.

Debido a que era muy importante no dejar de tener información entre las líneas del estudio, se llevó a cabo también un dispositivo ecuatorial el cual consiste en obtener información del subsuelo entre dos líneas paralelas de electrodos, empleando el arreglo Wenner-Schlumberger mencionado anteriormente, con lo cual se obtiene la información necesaria para generar una imagen eléctrica en 3D.

De esta manera los puntos de atribución del arreglo (esto es, los puntos distribuidos espacialmente asociados al valor de la resistividad aparente) quedaron distribuidos como se muestra en la Figura 14, la separación entre electrodos fue de 1 m, se observa la aproximación en la profundidad alcanzada.

El diseño de adquisición de la toma de datos fue programado en el software especializado *Electre Pro* (Iris Instruments, 2005), que ayuda a visualizarlos espacialmente.

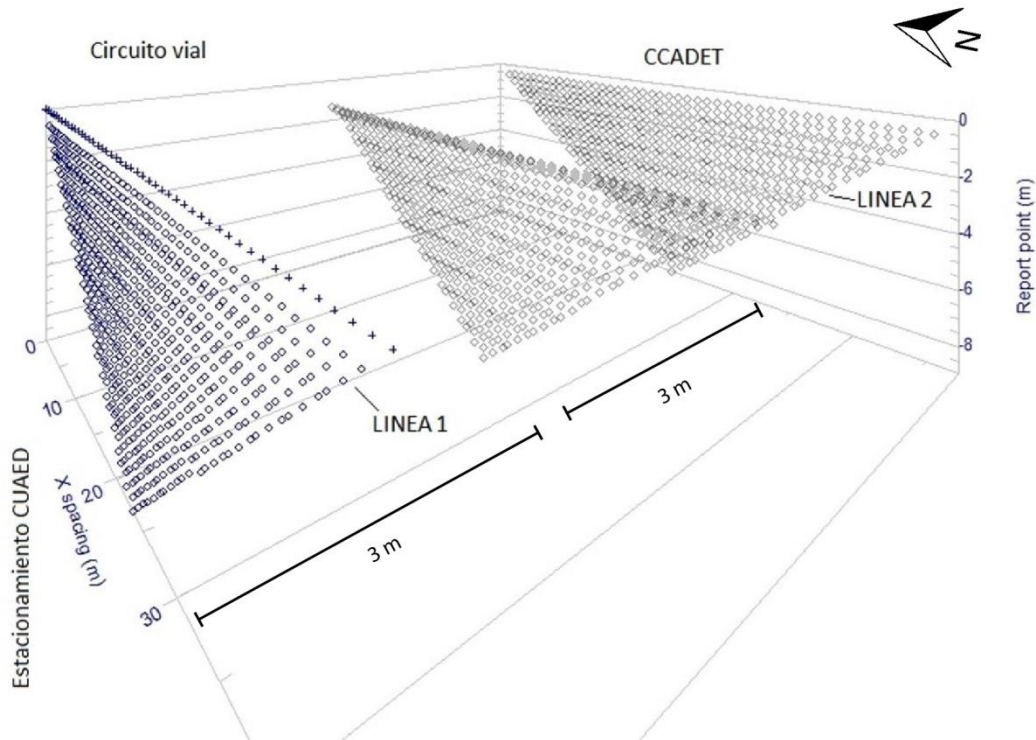


Figura 14. Puntos de atribución de las líneas 1 y 2. Los puntos de atribución centrales corresponden al dispositivo ecuatorial.

La siguiente etapa de trabajo, fue trazar la logística de campo que nos permitiría colocar los electrodos en su ubicación requerida tomando en cuenta las condiciones del terreno.

El día viernes 9 de mayo del 2014 se perforaron los orificios para colocar los electrodos. Se usaron dos tipos de electrodos, los convencionales hechos de una aleación de metales con bronce, también se ocuparon barras delgadas de cobre para poder mejorar la inyección de corriente en las zonas donde se encontraba basalto mal consolidado. En las zonas donde se encontraron rocas sueltas, fue necesario usar una técnica para mejorar la conducción, esto es mediante la elaboración de perforaciones (fue necesario usar una broca especial y un rotomartilló) las cuales fueron rellenas de sulfato de cobre granulado, en donde se introdujeron los electrodos de cobre delgados (Fig. 15).



Figura 15. Electrodo con sulfato de cobre.

Se continuó con el estudio, el día 29 de mayo, colocando los electrodos en el sitio de estudio y se dejó reposar durante la noche, de modo que hubiera una buena infiltración del sulfato de cobre granulado disuelto en agua y que la resistencia de contacto disminuyera para el momento de la toma de datos.

Al día siguiente (viernes 30 de mayo de 2014), se llevó a cabo la adquisición de los datos, para empezar se colocaron los electrodos de bronce que cumplían con las condiciones de contacto adecuadas (50 cm de largo y media pulgada de diámetro), los cuales fueron distribuidos en las dos líneas. Los electrodos del 1-48 se colocaron en la primera línea.



Figura 16. Ubicación en la parte del estacionamiento del CUAED de la Línea 1.

La Línea 2 se ubicó en la parte del terreno irregular (área verde junto al CCADET), donde se colocaron los electrodos numerados del 49 al 96, de igual manera la separación entre cada electrodo fue de 1 m. En esta línea se colocaron en las posiciones del 49 al 60 y del 75 al 96 electrodos de bronce, mientras que en los electrodos 61 al 74 se colocaron los electrodos de cobre inmersos en sulfato de cobre. El siguiente paso consistió en desenrollar los carretes de los cables y colocarlos en cada línea, acto seguido se conectaron los electrodos a los cables y el resistivímetro *SyscalPro* (Iris Instruments, 2005), el cual es un dispositivo electrónico versátil que combina un transmisor, un receptor y una unidad de conmutación en una sola consola. Se suministra la corriente con el uso de una batería de 12V con la que se pueden tomar datos automáticamente

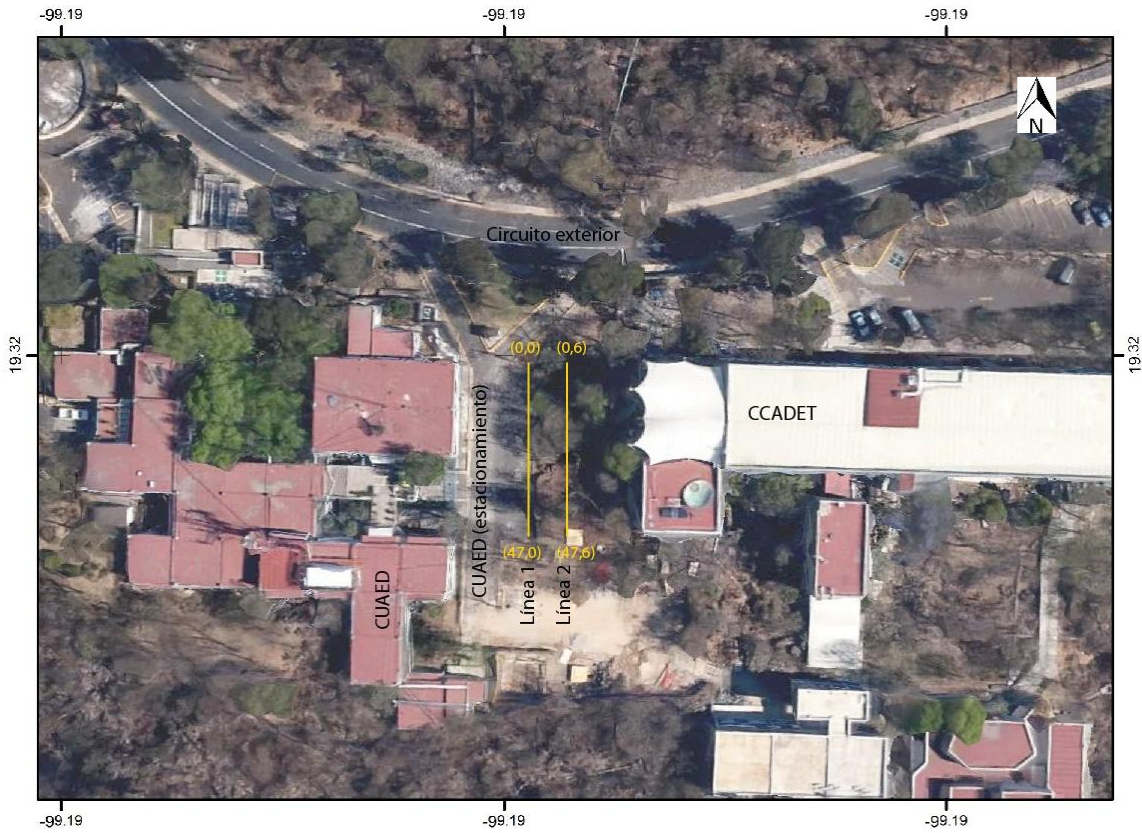


Figura 17. Distribución de los electrodos en la línea 1 (superior), Mapa de la localización de los edificios aledaños y las líneas de estudio (inferior). (Imagen Adaptada de Google Earth, 2014)

Por último se revisó que todos los electrodos estuvieran bien conectados, lo cual dio pie a comenzar a tomar las mediciones con el resistivímetro.



Figura 18. Ubicación e irregularidades del terreno de la línea 2.

Se realizaron tres tomas de datos en un tiempo de 3 horas, la primera toma se realizó en la Línea 1 y 2 con un dispositivo Wenner-Shlumberger, la segunda toma fue con un dispositivo ecuatorial Wenner-Shlumberger entre la Línea 1 y la Línea 2, la tercera toma fue con un dispositivo ecuatorial entre la Línea 2 y la Línea 1. Durante todo el transcurso de la toma de datos se estuvo agregando agua diluida con sulfato de cobre en todos los electrodos, para mejorar la resistencia de contacto y así permitir la mejor transmisión de la corriente. Días anteriores al estudio y durante la adquisición de los datos se presentaron precipitaciones.

Debido a que las variaciones topográficas abruptas pueden distorsionar las anomalías en la TRE, es importante medirlas y hacer una corrección topográfica a los datos, por lo que se llevó a cabo un levantamiento topográfico para el cual se utilizó un teodolito de la marca Leica, una plomada, un estadal, un GPS (Garmin) y una baliza graduada, para poder ver las variaciones de la altura en terreno.

5.4. Resultados e Interpretación de la TRE

En el procesado de los datos se utilizó un filtro de promedios móviles propio con una ventana de tres puntos, sobre las resistividades aparente, para disminuir el ruido sistemático, corrientes telúricas, aleatorios y delimitar mejor las anomalías. Posteriormente, se organizaron los datos en un formato universal (URF) para invertirlos en un software comercial llamado EarthImager.

Al realizar la inversión de los datos en este software se modificaron los parámetros necesarios, de manera que se empleó el tipo de inversión suavizada basada en método mínimos cuadrados con norma L2, en una malla de 2 elementos en cada par de datos e interpolación en elementos finitos.

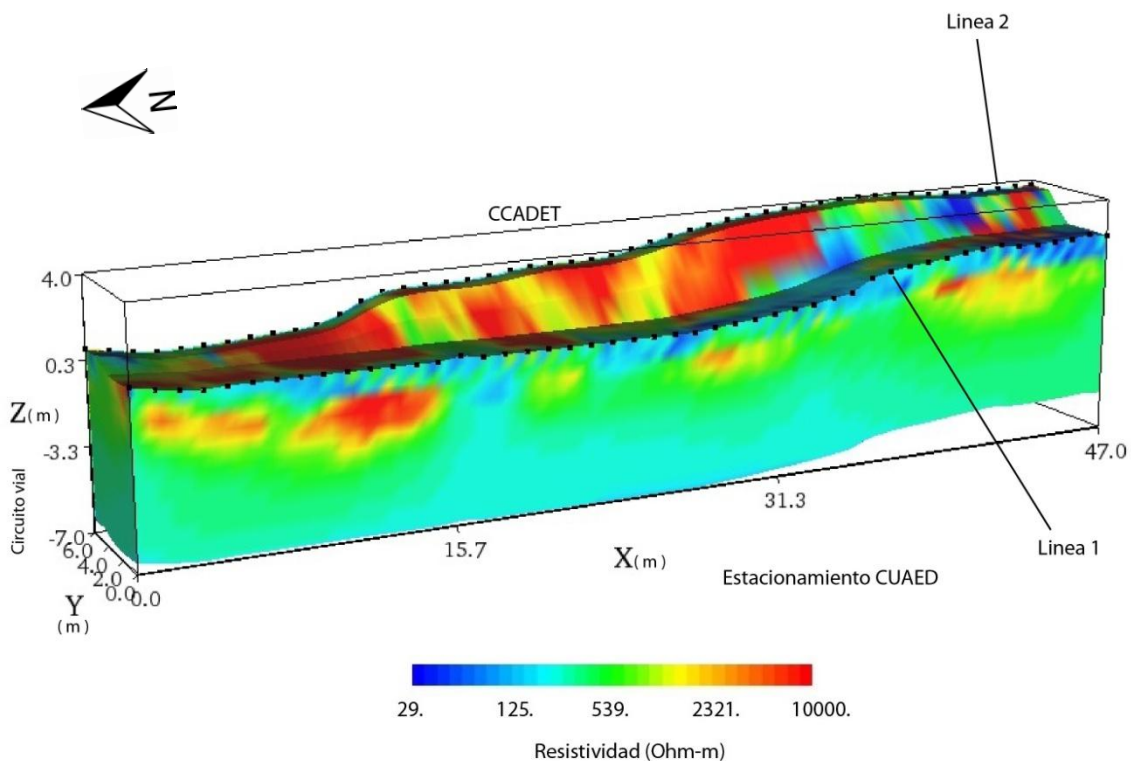


Figura 19. Cubo de resistividades, se muestra la ubicación de los perfiles.

En la Figura 19, se puede apreciar la imagen tridimensional de las resistividades ajustadas, la posición de los electrodos en cada línea, la topografía de cada perfil fue incluida en el modelado 3D, por lo que nos permite ver la diferencia de altura entre los electrodos de cada perfil.

En las figuras obtenidas de la inversión, podemos observar dos anomalías (Anomalías 1 y 2, Fig. 20) de resistividad alta; dependiendo del ambiente geológico, este tipo de anomalías se asocian generalmente a rocas sanas (compactas, sin fracturas o fallas) o a zonas de alta porosidad (areniscas, cavernas, fallas grandes, entre otras) con gases como fluido. En nuestro estudio el tipo de geología, las observaciones en campo y las imágenes resistivas favorecen la idea de que las anomalías 1 y 2 (10000 Ohm-m) están vinculadas a basaltos altamente porosos o fracturados.

Por otro lado, en la parte inferior de cubo resistivo encontramos una tercera anomalía con resistividad baja (Anomalía 3, Fig. 20). Estas resistividades suelen presentarse en ambientes con cierto contenido de humedad o en presencia de metales (menas, diseminados o en solución). Los resultados obtenidos indican que la anomalía 3 (150 Ohm-m) podría tratarse de basalto con una gran humedad o un cuerpo con material de relleno.

Las anomalías 1 y 2 ligadas a cuerpos alto-resistivos, se encuentran más cerca de la línea 1, este perfil se ubica en el terreno irregular, con mayor vegetación y en la cual pudimos apreciar estructuras basálticas y rocas basálticas sueltas. En la Línea 2 tenemos la presencia de resistividades bajas, la Anomalía 3 en particular se encuentra cargada hacia esta línea en la parte inferior, la línea 2 es la que se colocó sobre el estacionamiento del CUAED.

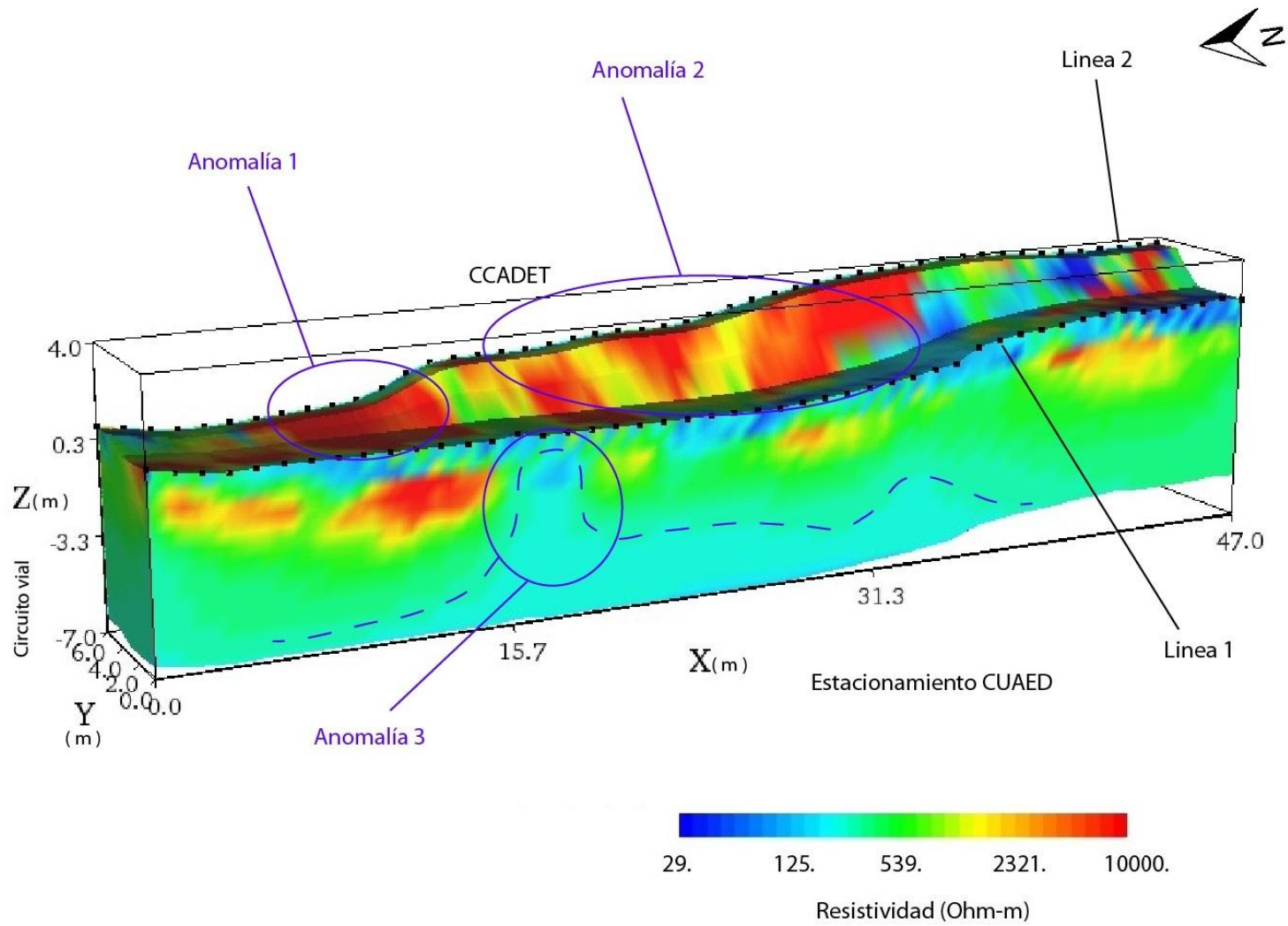


Figura 20. Imagen de resistividades, en esta figura se localizo las anomalías bajo-resistivas y alto-resistivas de interés.

Con la finalidad de poder tener una mejor ubicación y delimitar los cuerpos de las anomalías, se llevó a cabo modelos de contornos, esto nos permitió resaltar los límites que presentan los contornos de las anomalías con cada intervalo de las resistividades en la Figura 21. La orientación de las figuras nos muestra una vista desde el CCADET hacia el estacionamiento del CUAED, nos apoya para inferir que la anomalía 1, alto resistiva, se ubica a 7 m del origen, alineada con el perfil 1, cuenta con 6 m de largo, 4 m en el eje de la "y" y una profundidad de aproximadamente 3 metros por debajo de la superficie. La segunda anomalía se aprecia a partir de los 20 m con respecto del origen, el largo de este cuerpo puede ser considerado de 10 u 11 metros, o como un subconjunto de tres anomalías (anomalía 2A, 2B y 2C) alto resistivas, estas se encuentran del lado del perfil 1 y se estima su profundidad a 2 a 3 m.

El área donde se aprecian estos cuerpos, corresponde a la ubicación de los electrodos modificados para este estudio, los cuales están compuestos de sulfato de cobre, que como se menciono anteriormente, se utilizaron ya que el terreno presentaba bloques de basalto mal consolidados (las anomalías se encuentran encerradas en círculos morados).

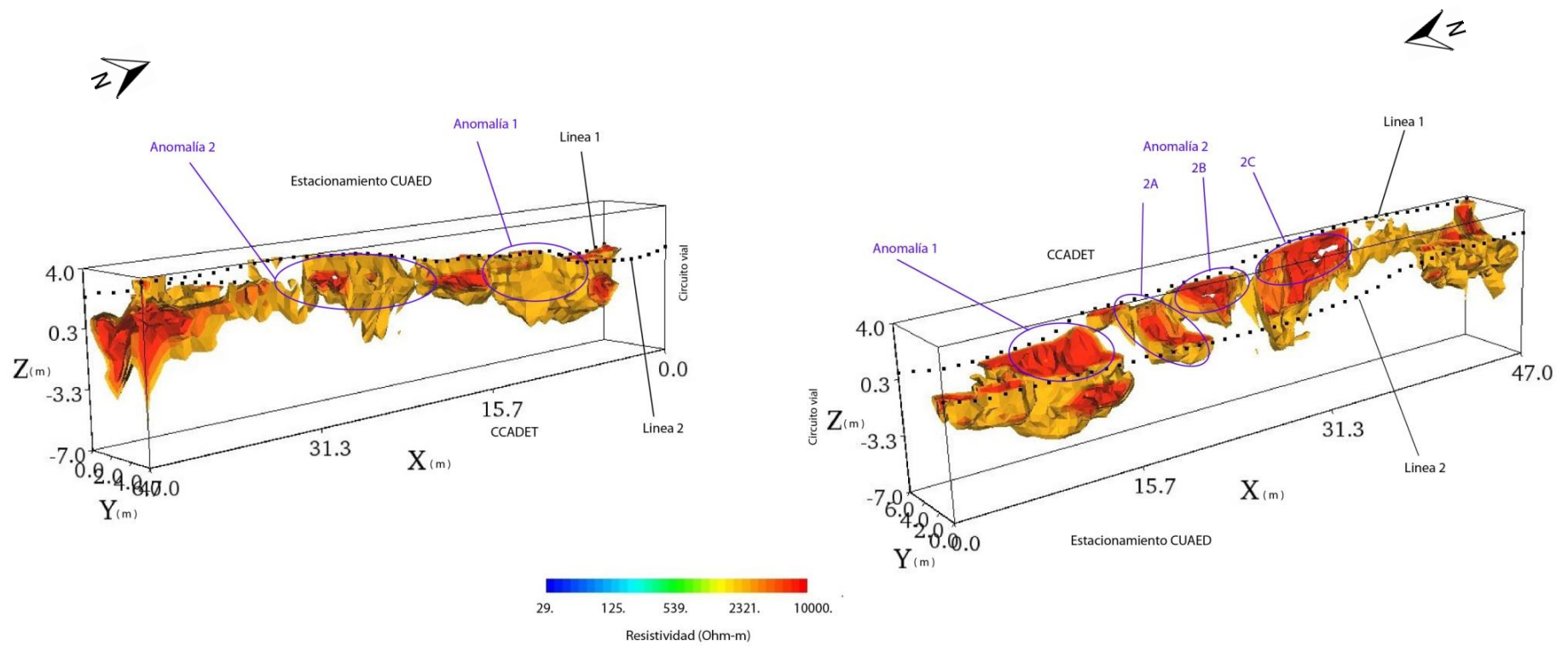


Figura 21. Figura de contornos vista desde dos perspectivas , el lado derecho corresponde a la vista desde el CCADET y la izquierda desde el CUAED, cubo de resistividades bajas, se puede ubicar las anomalías 1 y 2. Rango de resistividad 5 a 10 (kOhm-m)

En la imagen de contornos de la Figura 22, podemos observar cómo se comporta el cuerpo anómalo de baja resistividad en la parte inferior (Anomalía 3), cercano a la línea 2, se presenta a 15 m sobre el eje abscisas, con una geometría tubular orientada sobre el eje de las ordenadas a unos 2 o 3 m por debajo de la superficie del terreno, con una profundidad de 5 m aproximadamente, el cuerpo parece desplazarse con dirección al estacionamiento del CUAED, la presencia de este cuerpo bajo resistivo nos puede indicar la existencia de algún medio conductor que probablemente esté asociada a las lluvias intensas que se presentaron antes y durante la adquisición de los datos. Asociado a esta anomalía 3 se ven valores bajo resistivos que se distribuyen de forma horizontal a partir del metro 16 en adelante, a una profundidad de 5 m. Las imágenes de contorno contienen una vista desde el CCADET (derecha de la imagen) como del CUAED (izquierda de la imagen). La vista desde el CCADET en la Figura 22, tiene una mejor apreciación del cuerpo de bajas resistividades.

En esta misma imagen de contornos, podemos identificar una zona con bajas resistividades, se localizan en la parte superior derecha del cubo a una distancia de 40 m del origen de las líneas, se localizan en la zona donde hay presencia de suelo orgánico (Fig. 21, imagen derecha), de este lado del perfil, el subsuelo presentaba una mayor saturación, provocado por las constantes precipitaciones, como por la utilización de la solución de sulfato de cobre con la cual se remojaran los electrodos para mejorar la resistencia de contacto, lo cual podría dar origen a la presencia de los valores bajos en resistividad que se ven en la imagen.

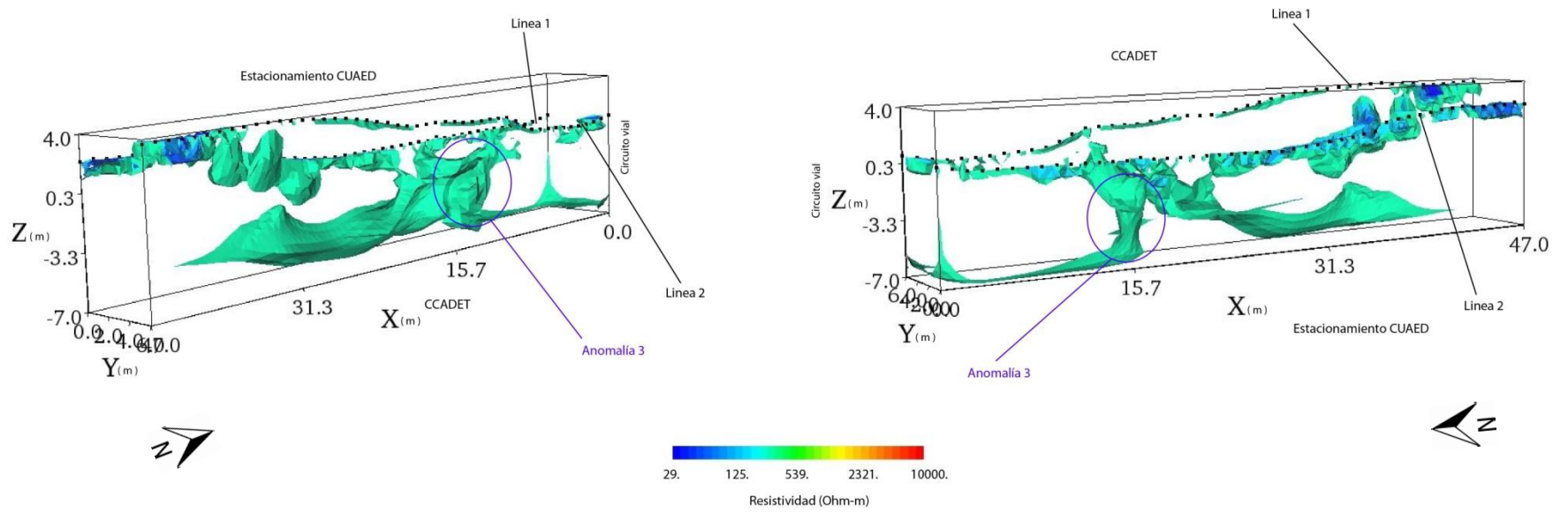


Figura 22. Figura de contornos de contornos vista de dos perspectivas , el lado derecho corresponde a la vista desde el CCADET y la izquierda desde el CUAED, cubo de resistividades bajas. se puede ubicar las anomalía 3. Rango de resistividad 10 a 400 (Ohm-m).

6. Modelado Sintético

Los modelos sintéticos se realizaron con el Software de EarthImager 3D desarrollado por Advance Geoscience Inc. Como parte del programa se encuentra la herramienta de "Suvery Planer, (estudio de planeación)", dicha herramienta nos permite elegir la geometría que podrían presentar los cuerpos, las condiciones del medio en el cual se está realizando el estudio y el porcentaje de ruido.

Se realizaron diferentes modelos sintéticos en esta tesis, utilizando las mismas características que se interpretaron en el estudio de campo, un arreglo eléctrico ecuatorial paralelo, con una lectura de datos Wenner-Schlumberger, una separación de 6 m entre las dos líneas; se consideró la topografía en cada uno de los perfiles. Los modelos sintéticos comprenden al cuerpo bajo resistivos con diferente geometría y con la ausencia de este cuerpo, para poder visualizar cual es la respuesta de la simulación de los datos. Las estructuras con valores resistivos se ubicaron en la misma posición.

6.1. Selección de modelos sintéticos

En el modelo de inversión de los datos se puede distinguir una anomalía bajo resistiva, la cual se localiza por debajo de los 4 metro aproximadamente, en los primeros metros hay presencia de cuerpos alto resistivos. Por esto se planteó la posibilidad de que en los modelos directos se encontraran tres cuerpos, los cuales cambiarían su forma y dimensiones. Después de seleccionar y obtenidas sus respuestas, los modelos, se invertirán cada uno de ellos, los cuales mostraran una inversión suavizada basada en el método de mínimos cuadrados; el tipo de malla que se eligió, consiste en 2 elementos en cada par de datos e interpolación en elementos finitos.

El primer cuerpo dentro de la modelación sintética fue uno con valores altos resistivos 20000 Ohm-m (S1), debido a que en la adquisición de los datos se visualiza una zona donde hay material mal consolidado y un desnivel muy abrupto en la topografía. Un segundo cuerpo de 20000 ohm-m (S2) se colocó con una profundidad similar y una misma altura que S1, debido a que las observaciones en campo nos muestran un bloque de roca, paralela a los perfiles con ángulo considerable de inclinación respecto a la superficie del suelo, con lo cual fundamentamos esta ubicación de S2 (Figura 23).

Un cuerpo más es considerado el cual presenta valores de resistividades de 10 ohm-m (S3), se ubicó en la parte inferior del modelo, las dimensiones de este grupo de datos se modificó en cada modelo, en la construcción de los modelos se considera un porcentaje de ruido.

El primer modelo (Fig. 23) partió de la hipótesis de que no existiera una anomalía con datos de resistividad baja dentro del cubo de resistividades, este modelo presentó los cuerpos alto resistivos en la parte superior, con dimensiones similares en altura y ancho (Tabla 1), el cuerpo de resistividades bajas no se colocó en esta ocasión, para verificar que la presencia de estos valores bajo resistivos, no se deriven de el contraste entre el medio y los valores alto resistivos. el ruido asignado a este modelo fue del 10%

Resistividad de medio (ohm-m)	Cuerpos	Coordenadas del origen de cuerpo			Dimensiones		
		x	y	z	x	y	z
400							
Valores de Resistividad (ohm-m)	S1	15	5	1	10	5	3
10							
20000	S2	35	5	1	31	5	3
Porcentaje de ruido (%)							
10							

Tabla 1. Tabla con las dimensiones del primer modelo, con la ausencia de un cuerpo bajo resistivo.

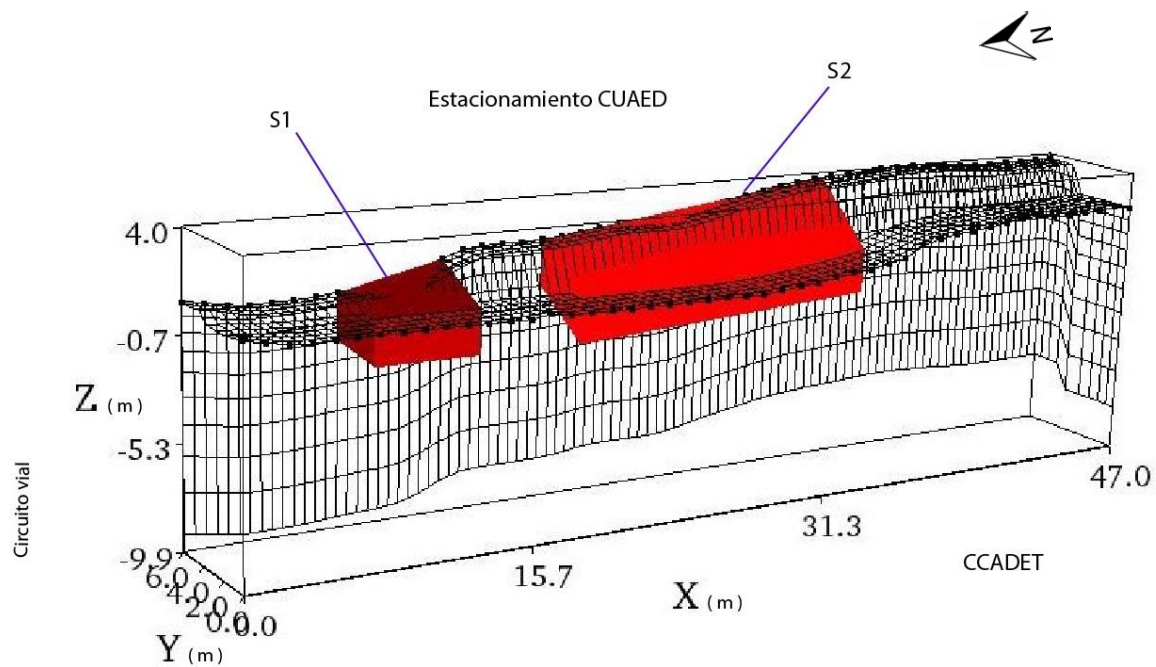


Figura 23. Imagen de los cuerpos resistivos propuestos en el primer modelo sintético. Cuerpo bajo resistivo Ausente.

El segundo modelo sintético que se genera en esta tesis, corresponde a una estructura de forma vertical, para ver si es posible tener una mejor delimitación de los valores bajo resistivos obtenidos de la inversión, dicha anomalía se encuentra entre los dos cuerpos alto resistivos y su profundidad es mayor a S1y S2, sus dimensiones se describe en la Tabla 2. Los cuerpos alto resistivos se mantiene en la misma forma que se modelaron en el primer modelo (Fig. 24).

Resistividad de medio (ohm-m)	Cuerpos	Coordenadas del origen de cuerpo			Dimensiones		
		x	y	z	x	y	z
400							
Valores de Resistividad (ohm-m)	S1	15	5	1	10	5	3
10							
20000	S2	35	5	1	31	5	3
Porcentaje de ruido (%)	S3_A	28	1	5	8	5	5
10							

Tabla 2. Tabla con las dimensiones del segundo modelo sintético, con un paralelepípedo vertical.

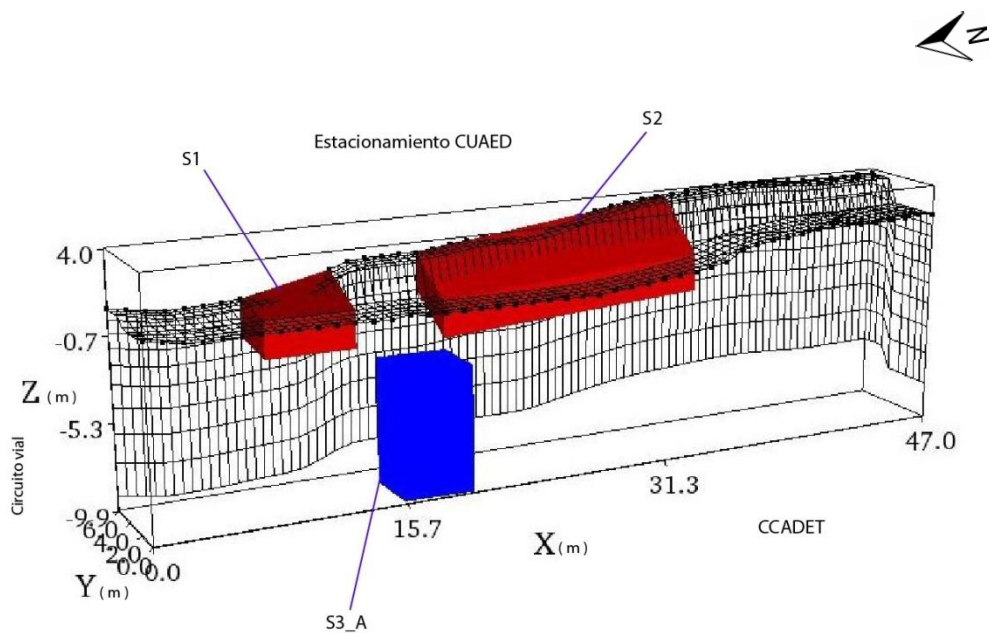


Figura 24. Imagen de los cuerpos resistivos propuestos en el segundo modelo sintético. Cuerpo bajo resistivo en forma de paralelepípedo vertical.

Por último se realizó una modelación con una estructura bajo resistivo subyacente a los cuerpos S2 y S3, el cuerpo presenta una forma en paralelepípedo S3_B con su eje mayor paralelo al plano de superficie (Fig. 25), se planteó esta posibilidad con el objetivo de observar si un cuerpo de dimensiones horizontales, originaria el cuerpo tubular que se presentó en los datos del CCADET, este se compone de un horizonte donde el contraste entre los cuerpos S1,S2 y S3_B es muy amplio.

Resistividad de medio (ohm-m)	Cuerpos	Coordenadas del origen de cuerpo			Dimensiones		
		x	y	z	x	y	z
400							
Valores de Resistividad (ohm-m)	S1	15	5	1	10	5	3
10							
20000	S2	35	5	1	31	5	3
Porcentaje de ruido (%)	S3_B	33	1	7	10	5	2
10							

Tabla 3. Tabla con las dimensiones del tercer modelo sintético, con un paralelepípedo horizontal en la parte inferior del modelo.

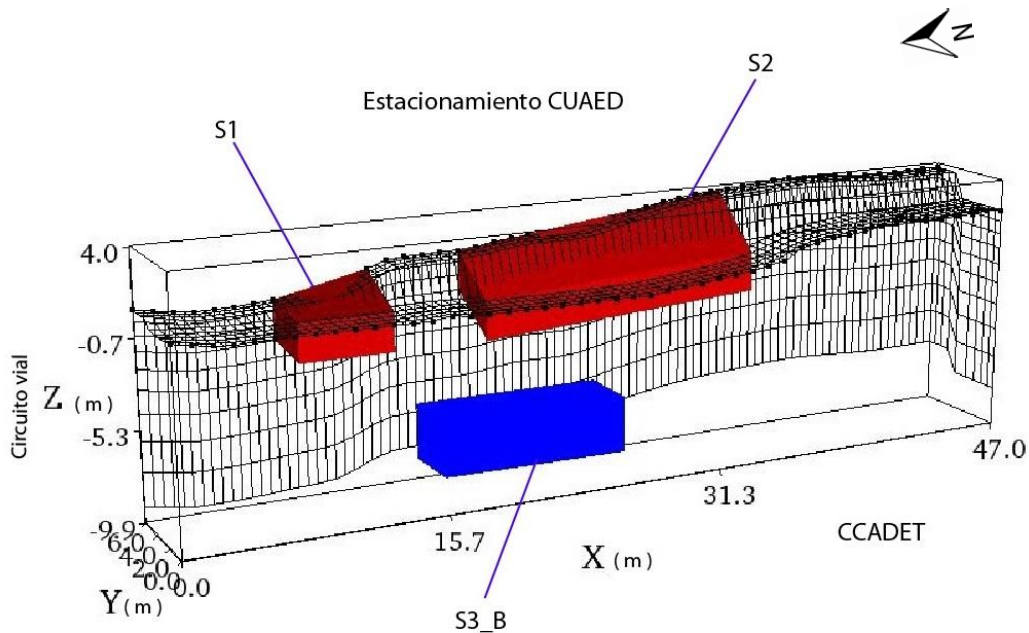


Figura 25. Imagen de los cuerpos resistivos propuestos en el tercer modelo sintético. Cuerpo bajo resistivo en forma de paralelepípedo horizontal.

6.2. Resultados de modelos sintéticos

El proceso de inversión en los datos del primer modelo, nos brinda la imagen de la Figura 26, donde se puede apreciar que los dos cuerpos alto resistivos se aprecian con claridad, manteniendo su presencia S1 en $x=8$ m y S2 a $x=19$ m, la anomalía S1 (10000 Ohm-m) presenta límites irregulares, mientras que el límite del ancho en la anomalía S2 (10000 Ohm-m) presenta una delimitación más clara con 3 m para los dos cuerpos, la longitud de los dos cuerpos es de 5 m para S1 y 15 m en S2.

Para los dos cuerpos, la profundidad es de aproximadamente 2 m. Ya que en este modelo no se colocó un cuerpo bajo resistivo, la respuesta del medio contrasta de forma irregular algunos valores bajo resistivos, estos valores se visualizan a una profundidad de 2 metros aproximadamente por debajo de la superficie, no presenta una forma homogénea o definida, se ubican por debajo de la línea dos a una distancia de 22 m con respecto al origen y 5 metros de largo. Por debajo de los 3 metros no se puede divisar algún cuerpo o estructura con valores bajos en resistividad.

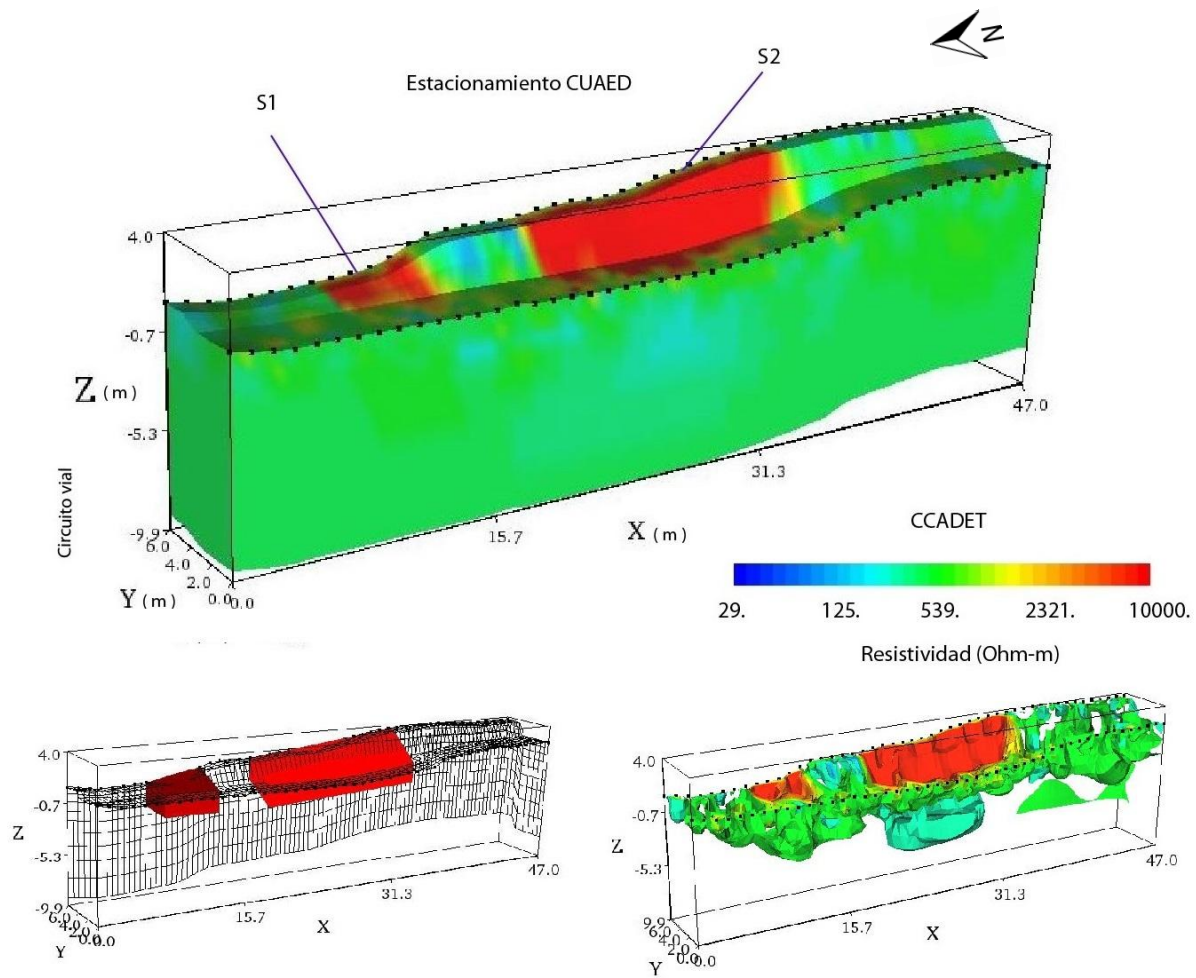


Figura 26. Imagen en 3D de los datos invertidos para el primer modelo sintético.

La respuesta que nos da la inversión del segundo modelo sintético se muestra en la Figura 27, Las estructuras alto resistivas del modelo se siguen observando de forma nítida, en el primer cuerpo S1 (10000 Ohm-m) se pierde un poco la forma, se observa en el metro $x=8$ m, con un largo de 5m y un ancho de 2 m, pero el contraste es bueno para ser ubicado con una altura 2 m. En la anomalía S2 (10000 Ohm-m) las dimensiones se mantienen conforme a lo mostrado en las inversiones anteriores, se encuentran en la línea 1, se puede delimitar a partir de la superficie con una altura de 2 m. Se observa un horizonte que no es uniforme de resistividades bajas subyacente al del perfil dos, a 1 metro de profundidad, por debajo de este horizonte se expone una estructura S3_A de valores bajo resistivos (150 Ohm-m) en el metro 16 con respecto al origen, la forma que adquiere es más alargada paralelo al eje z, a una profundidad de 2 m y altura de 4 m, el largo de la estructura es de 7 m y 3 m de ancho.

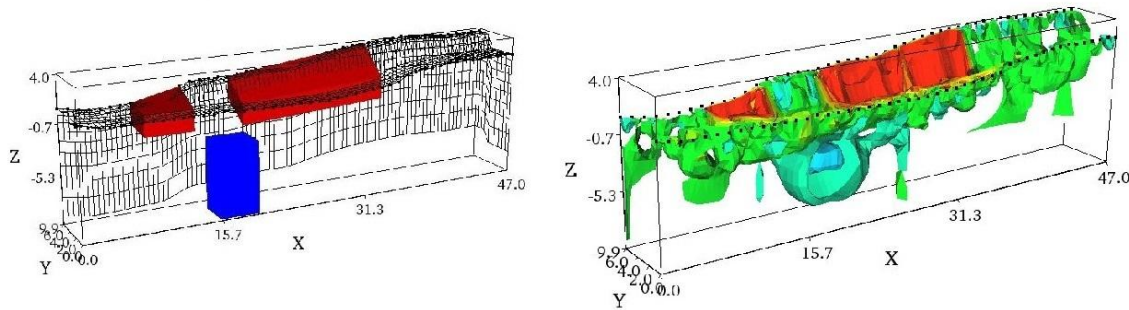
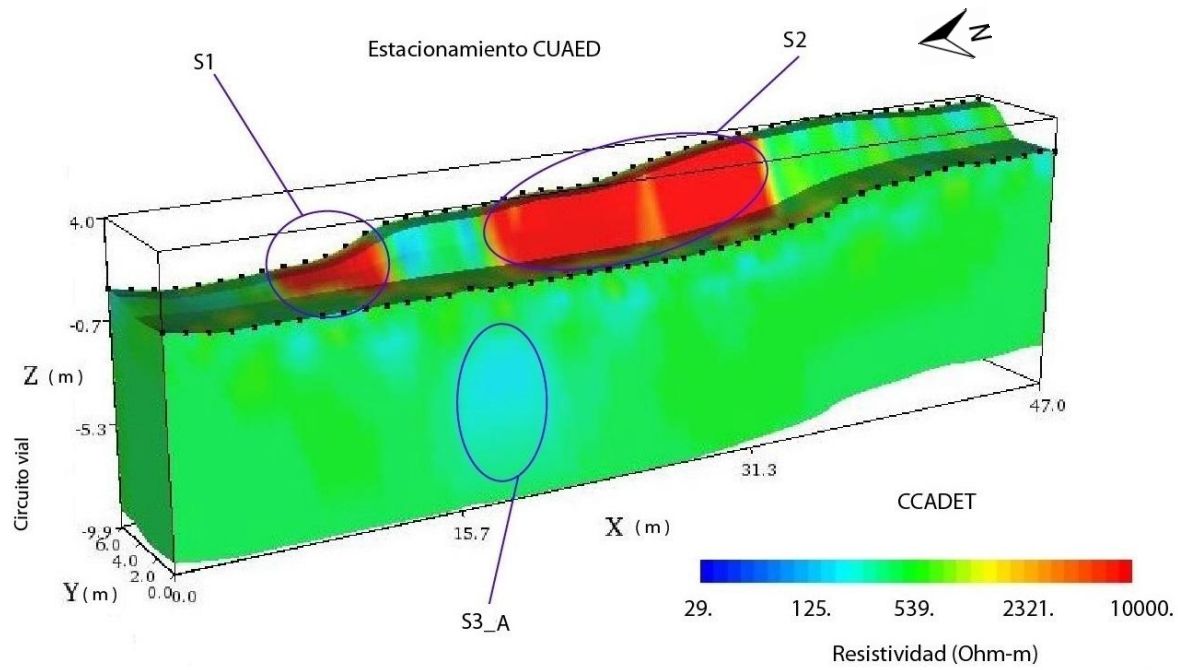


Figura 27. Imagen en 3D de los datos invertidos para el segundo modelo sintético.

En la inversión del tercer modelo sintético (Fig. 28) se observa que el cuerpo de mayor interés S3_B (150 Ohm-m) es detectado por el arreglo, esto gracias al contraste con el medio, la forma que presenta es irregular aunque se puede ver que mantiene una tendencia sobre la forma que origina esta anomalía. La ubicación es a partir de 16 m del origen con un largo 10 m, un ancho de 4 m y la profundidad a la que se detecta es 4 m teniendo una altura 5 m. La imagen también nos deja ver, que existe un horizonte de resistividades bajas por encima de S3_B, por debajo del perfil dos, no presenta una forma homogénea.

Los cuerpos alto resistivos se observan de forma nítida, las formas de estos cuerpos son muy parecidos al modelo directo planteado en los modelos 1 y 2, sus dimensiones son muy similares a los planteados inicialmente, lo cual nos da un indicativo de que S1 y S2 no se ven afectados por la forma, dimensión y profundidad a la cual se encuentra el cuerpos de la anomalía S3_B.

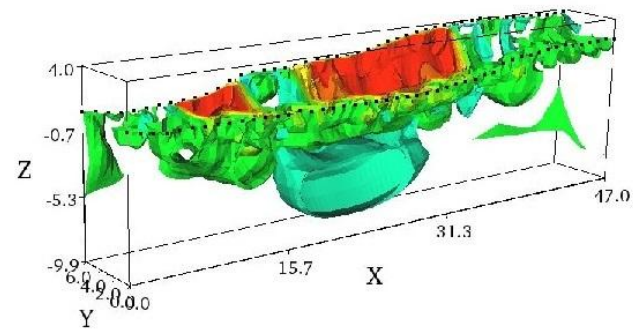
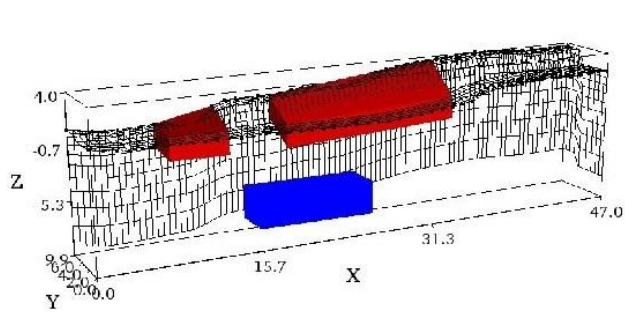
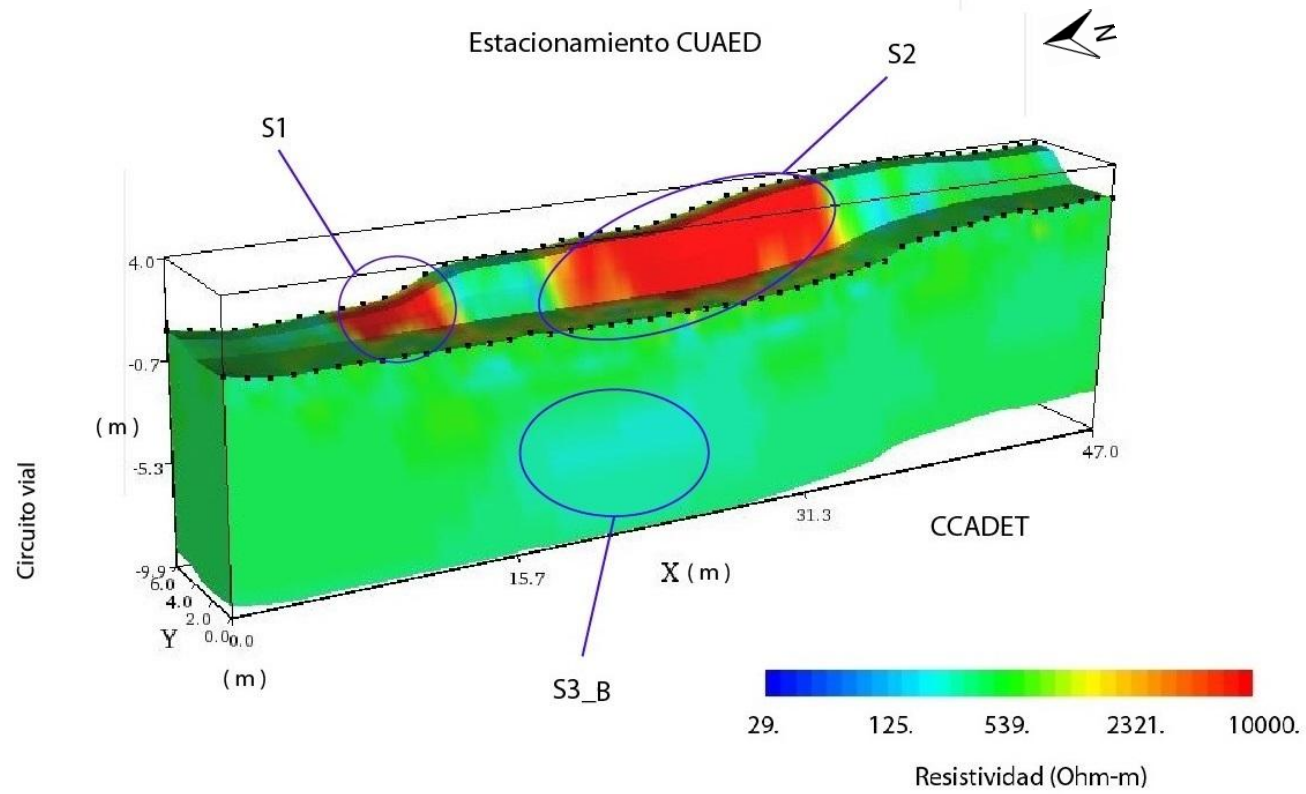


Figura 28. Imagen en 3D de los datos invertidos para el tercer modelo sintético.

Del segundo y tercer modelo que se generó, se puede indicar, que los datos que presentaron cambios después de las inversiones de los modelos directos, fueron las estructuras S3_A y S3_B. Se perciben cambios en los datos de resistividad que son distintas al medio donde se encuentran, a una profundidad de aproximadamente 3 metros, esto ocurre a una distancia de $x = 16$ m.

La segunda imagen de la inversión de los datos (Fig. 27), muestra una anomalía bajo resistivo S3_A, los límites de esta anomalía no se logran distinguir con mucha claridad, la profundidad a la cual se comienza apreciar es de 3 metros, se presenta una correlación en las dimensiones horizontales las cuales presenta datos bajo resistivos en un volumen más amplio en los valores de S3_A con referencia a los datos del CCADET. La inversión del tercer modelo sintético, nos permite observar un cuerpo bajo resistivo a una profundidad de 4 m, tiene una forma horizontal este cuerpo, presenta una menor similitud con los datos de campo, por la ubicación, el volumen de S3_B se encuentra a 18 m del origen, con una extensión de 10 m.

Con base en los resultados anteriores se puede inferir, que de los modelos sintéticos propuestos en esta tesis, la correlación más aproximada entre los 3 modelos de datos sintéticos y los datos medidos, es el segundo modelo (Fig. 27). Existe una buena correlación entre las anomalías 1 y 2, con los cuerpos S1 y S2, la profundidad de 3 metros aproximadamente para estos cuerpos altos resistivos. El modelo sintético con el cuerpo S3_A es el que presenta mayor cantidad de datos de baja resistividad en la zona de la anomalía 3, cuyas dimensiones dan forma a un cuerpo vertical (Fig. 29). Cabe mencionar que durante el procesado de datos de campo, se aplicó un filtro media móvil, para poder disminuir el ruido, este paso permitió delimitar de mejor manera las estructuras de los datos de campo.

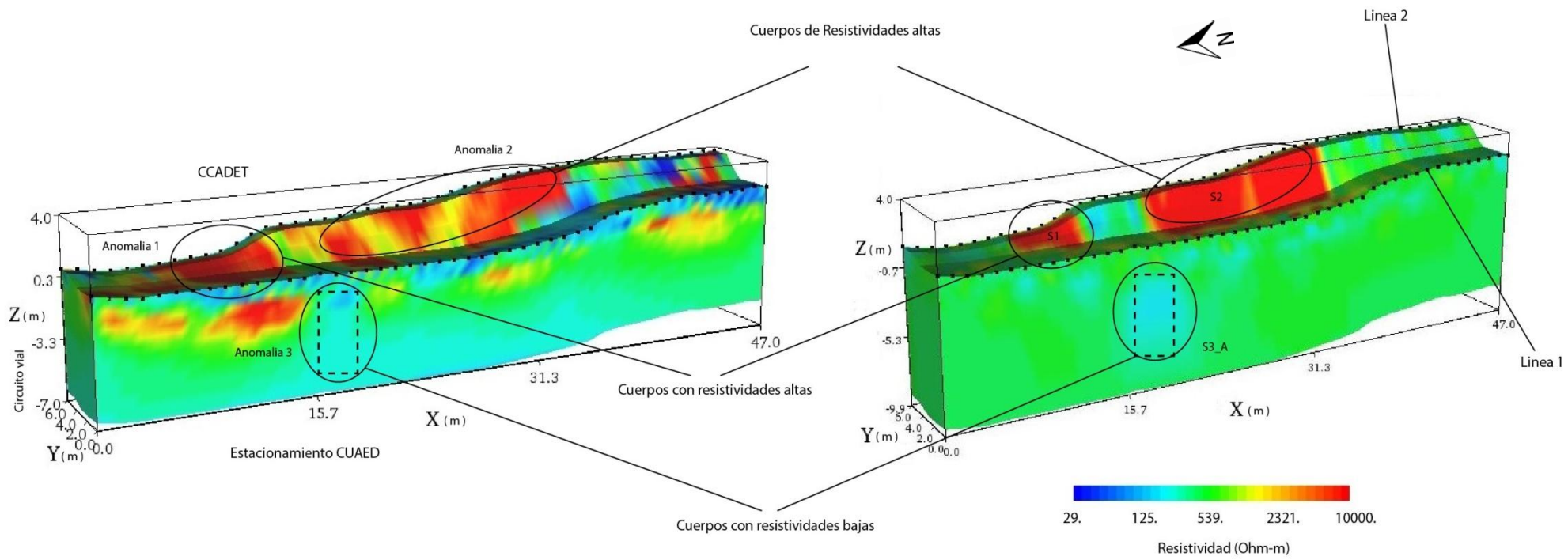


Figura 29. Imagen comparativa en 3D del modelo invertido de los datos en el CCADET (lado izquierdo) y el segundo modelo directo (lado derecho).

Dentro del cubo de resistividades del CCADET vemos que existe valores bajo resistivos en la segunda línea de electrodos, en esta parte a los electrodos se les vertía una mezcla de agua con sulfato de cobre, para mejorar la resistencia de contacto, más la presencia de precipitación fluvial durante el estudio darían origen a este conjunto de datos, estos valores bajos parecen darle una mayor presencia cerca de la superficie a la anomalía 3. El cuerpo de resistividades bajas (Anomalía 3) puede ser asociado a una zona con una alta saturación de agua, a zona muy porosa o cavernosa con presencia de agua. Junto con el procesado de los datos de CCADET y la modelación, aumenta la certeza de la posible existencia de alguna de estas condiciones geológicas dentro del área interés.

El cuerpo S2 se desarrolló con la idea de que en este tramo del perfil 1, se encontraba un suelo mal consolidado, la sensación al caminar sobre esta sección de terreno fue de inconsistencia, lo cual se confirmó al colocar los electrodos, ya que estos no lograban tener una buena superficie de contacto, dando paso a la utilización de los electrodos incrustados en una solución de sulfato de cobre. Al correlacionar las imágenes del modelado y la de los datos medidos, la anomalía 1 presenta dos discontinuidades en su volumen, este tipo de formas es común encontrarlas en zonas donde el material se encuentra altamente fracturado y/o poroso, otro origen de las discontinuidades en la anomalía 1 puede ser por el ruido en los datos. En caso de que exista la presencia de estas fracturas daría origen a que el bloque de la anomalía 2 presente discontinuidades en su forma, mismas que no se observan en el cuerpo S2 al ser considerado como un solo cuerpo. Los cuerpos de las anomalías 1 y 2 toman mayor relevancia, debido a que, podrían ser cuerpos altamente fracturados alcanzando una profundidad de 2 m, lo cual deberá ser tomado en cuenta para la posible cimentación de un inmueble del CCADET.

7. Conclusiones

El proceso de modelación genera beneficios cuando se lleva a cabo en la etapa de planeación del estudio, ya que nos puede dar información acerca de la ubicación de los puntos de atribución, la profundidad que logra el arreglo, la forma en que se detecta el objetivo y las limitantes de las configuraciones empleadas. Toda esta información nos permite direccionar el rumbo de la investigación para lograr un trabajo satisfactorio. Al correlacionar los datos medidos en campo con otros estudios o información a priori, la modelación puede ofrecer un punto de partida para poder estimar la certeza en el procesado de los datos e interpretación de la inversión.

La modelación sintética que se realizó en esta tesis permite tener una opción junto al procesamiento e interpretación de los datos de campo para poder identificar la presencia de tubos lávicos, estructuras cavernosa o falla-fracturas y su ubicación, los cuales presentan un riesgo para una cimentación. La información que nos muestra la inversión de los datos medidos y la geología del lugar nos permitieron, estimar los posibles cuerpos anómalos (Anomalías 1, 2 y 3), que con la modelación sintética, se pudo tener una mayor certeza de su existencia.

Durante el análisis discutimos que el segundo modelo sintético (cuerpo S3_A) y los datos del CCADET mantienen una mayor similitud en los resultados, esto nos aumenta la certeza de que este cuerpo exista, cuya resistividad es más baja que la del medio y con características similares a la de estructuras porosas con presencia de humedad o a zonas donde existe material de relleno el cual retiene la humedad, dicha anomalía no presenta características similares a las de un tubo basáltico, por lo cual se puede descartar la existencia de esta estructura en la zona de interés. Los cuerpos de las anomalías 1 y 2, también presentaron buena correlación con los cuerpos S1 y S2, en los tres modelos, los cuales podrían estar asociados a una zona de alto fracturamiento.

7.1. Recomendaciones

- Cuando no hay información suficiente para poder realizar la modelación de los objetivos, al principio del trabajo, se puede realizar el modelamiento de estos cuerpos, posterior al procesado he inversión de datos obtenidos en campo con el fin de tener una mejor idealización del problema.
- Realizar una nueva toma de datos, tomando en cuenta los datos recopilados en esta tesis, en una etapa diferente del año, donde las condiciones climáticas sean diferentes para ver el comportamiento de las zonas de interés y ver si la anomalía 3 cambia de forma y valores de resistividad, para replantear la interpretación geológica-geofísica.
- De ser posible realizar perforaciones en las ubicaciones donde se presenta las anomalías 1,2 y 3, para poder confirmar el material y sus características de las que están constituidas las anomalías.

8. Bibliografía

Aizebeokhai, A. P., Olayinka, A. I. & Singh, V. S., (2009), Numerical evaluation of 3D geoelectrical resistivity imaging for environmental and engineering investigation using orthogonal profiles. *SEG Expanded Abstracts*, 1440, doi:10.1190/1.3255120.

AGI, 2009. Instruction Manual for EarthImager 3D Version 2.4.0 Software. Austin, Texas

Eunice Álvarez Barrientos., (2015), Tomografía eléctrica resistiva 3D en la caracterización del subsuelo bajo estructuras civiles. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. Facultad de Ingeniería, Tesis de Licenciatura.

Badilla-Cruz, R., (1997), Estudio Petrológico de la lava de la parte Noreste del Pedregal de San Ángel, Boletín de la sociedad Geológica Mexicana, Instituto de Geología, UNAM, México, D.F., 1, 40-57.

Barker R.D. (1992). A simple algorithm for electrical imaging of the subsurface. *First Break*, 10, 53-62.

Barker, R., (1989): Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, 54(8): p. 1031-1037.

Burden R. L., Faires J. D., (1997), "Numerical Analysis". Brooks/Cole *publishing Company*, USA, 6 edn. p. 746-747

Campos-Enriquez., (2015), The Aztlán Fault System: control on the emplacement of the Chichinautzin Range volcanism, southern Mexico Basin. Seismic and Gravity characterization. *Boletín de la sociedad Geológica Mexicana, Instituto de Geología*, UNAM, México. Vol.67, Núm. 2, p. 315-335.

Cecilia Delgado Solorzano., (2013), Arreglo en L y en esquina para Tomografía Eléctrica en 3D en Ciudad. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. Facultad de Ingeniería, Tesis de Licenciatura.

Aguirre Días Pablo, Esteves Robles Sandra, (2015), Análisis y eliminación de ruido en Tomografía Eléctrica Resistiva. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. Facultad de Ingeniería, Tesis de Licenciatura.

Luciano Daniel Constantino R., (2011). Métodos de tomografía eléctrica para determinar estructura volcánicas. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. Facultad de Ingeniería, Tesis de Licenciatura , 7,14-13.

Chávez, G., (2011), Modelación 3D de datos de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) con arreglo tipo "L". Tesis de Maestría. Instituto de Geofísica. UNAM.

Edwards L. S., (1977), A modified pseudosection for resistivity and IP. *Geophysics*, Vol. 42, No. 5, p. 1020-1036.

Evjen, H., (1938). Depth factor and resolving power of electrical measurements. *Geophysics*, 3(2), p.78-95.

Gómez-Tuena, A., Orozo-Esquivel, & Ferrari, L. (2005). Petrogénesis ígnea de la faja volcánica Transmexican. *Boletín de la sociedad Geológica Mexicana*, Tomo LVII, n.3

Gunn, B.M., & F. Mooser, (1971), Geochemistry of the volcanic of central Mexico, Bull. Vol. 34, p. 577-616.

http://www.igc.cat/web/es/geofisica_tec_electrica.html (vista 10 de junio de 2014).

http://geotech.mex.tl/986328_geofisica.html (vista 29 de julio de 2014).

http://data.proteccioncivil.cdmx.gob.mx/mapas_sgm/mapa_geologico_df_b_1280_1349.jpg (visita 28 de septiembre de 2016).

"http://www.pumagua.unam.mx/sistema_informacion.html". (visita 1 de abril 2016).

"http://sierra-madre-oriental.blogspot.mx/2014_03_01_archive.html" (visita 5 de mayo 2016).

Iris Instruments, 2005. *User's Manual of Syscal Pro Standard & Switch*, 48 -72 or 96 Version, 10 channels Resistivity-meter for Resistivity and IP measurements,85 p.p.

Kaufman, A., (1992). *Geophysical Field Theory and Method, Part A: gravitacional, electric and magnetic field*. 2 edn. Editorial Academic press, INC..

Loke M.H. and Barker, R.D., (1995). Improvements to the Zohdy method for the inversion of resistivity sounding and pseudosection data. *Computers & Geoscience*, 21, 321-332.

Loke, M. H., (2000). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys*, 68 p.

Loke, M. H. and Baker, R. D., (1996a), rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by Quasi-Newton method. *Geophysical prospecting*, 44, 131-152 pp.

Loke M. H., (2004), *Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys*.

Lugo-hubp. J., (1984), *Geomorfología del sur de la cuenca de México*: Instituto de Geografía, UNAM, México, Serie Varia 1(8): 1-95.

Martin del Pozzo A., Espinoza, R., & Barba, L., López, J., (1997b), *Volcanic Impact in central México, Puerto Vallarta, General Assembly, México, Field Guide*, p. 19-24.

Martin-Del Pozzo A., Cordova C., & Lopez J., (1997), *Volcanic Impact on the Basin of Mexico during the Holocene*. *Quatern. Intern.*, 43, p. 181-224.

Menke, W., (1989), *Geophysical data analysis: Discrete Inverse Theory*. *International Geophysics Series*, Vol. 45, p. 149.

Minor G. O., (1978), Comparación entre dos posibles soluciones al diseño estructural, en 1930 y contemporánea, para el edificio La Nacional primer rascacielos en México. Tesis de licenciatura en Ingeniería civil. Facultad de Ingeniería, UNAM.

Orellana, E., (1982). Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua. Editorial Paraninfo, Madrid, España.

Roy, A., Apparao, A., (1971). Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, Vol. 36, p.943-958.

Roy, A., (1972). Depth of investigation in Wenner, three electrode and dipole-dipole dc resistivity methods. *Geophysics Prospecting*. Vol. 20, p.329-340.

Francisco Sequera Jiménez., (2015), Estudio de tomografía Eléctrica resistiva 2D para localizar la muralla limítrofe de la gran Tenochtitlán, Centro Histórico, C.D. de México. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. Facultad de Ingeniería, Tesis de Licenciatura.

Sasaki, Y., (1992), Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40, 453-464.

Siebe C., (2009), La erupción del volcán Xitle y las lavas del pedregal de San Ángel hace 1670 +/- 35 años AP y sus implicaciones- Biodiversidad del ecosistema del Pedregal de San Ángel, UNAM.

Siebe C., (2000), Age and archaeological implications of Xitle volcano, southwestern basin of México city. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* p. 104: 45-64.

Iriarte Sierra Lizbeth., (2012), Imágenes 3D de tomografía eléctrica en la zona arqueológica de Pahñu Edo. de Hidalgo. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. Facultad de Ingeniería, Tesis de Licenciatura.

Swinamer, R.T., (1989). the geomorphology, geochemistry and petrogenesis of the volcanic rocks in the sierra del Chichinautzin, Mexico. M.Sci., Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, Tesis de maestría 212 p. 1984.

Tejero, A., Gerardo, C., Chávez, R., E., & Aideé E., (2015), L-and CORNER-arrays for 3D electric resistivity tomography: an alternative for geophysical surveys in urban zones. *Near Surface Geophysics*, 13, doi:10.3997//1873-0604.2015015

Tejero, A., Chávez, R., E., Urbieto, J., and Flores-Márquez E., L., (2002), Cavity Detection in the Southwestern Hilly portion of México City by Resistivity Imaging. *Journal of Engineering and environmental Geophysics*, 7-3, 130-139.

Telford W.M., Geldart L.P., & Scheriff R.R., (1992), *Applied Geophysics*, 2 edn. , Cambridge University Press.

Diana Vargas García., (2015), Arreglos no convencionales de tomografía de resistividad Eléctrica 3D. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México. Facultad de Ingeniería, Tesis de Licenciatura.