



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

ARREGLO EN L Y EN ESQUINA PARA  
TOMOGRFÍA ELÉCTRICA EN 3D EN  
CIUDAD

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA GEOFÍSICA

PRESENTA:

CECILIA DELGADO SOLORZANO

DIRECTOR: ANDRÉS TEJERO ANDRADE



CIUDAD UNIVERSITARIA

MÉXICO D.F. 2013



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.

## **Agradecimientos y dedicatorias.**

A mis padres y hermano: Andrés, Cecilia y Jonathan; ustedes son lo más importante para mí y les agradezco todo lo que hemos vivido juntos.

A toda mi familia y hermanos por elección: mis amigos. No quiero que nadie me falte por nombrar y soy muy afortunada porque la lista es grande y en crecimiento; quiero decirles que todos los recuerdos de sonrisas, esfuerzo, estudio, trabajo en equipo, dedicación, pláticas, diversión, sueños, apoyo, momentos inolvidables que me han regalado, los llevo siempre conmigo en mi corazón.

A mi tutor de tesis por permitirme ser parte del equipo de trabajo de la Facultad de ingeniería, participando en los proyectos de la delegación Álvaro Obregón y Catedral de Morelia, además por aceptar mi proyecto en el CELE para las pruebas de esta Tesis. Estoy agradecida por todo el apoyo, comprensión y paciencia durante todo el proceso.

Agradezco también al equipo de trabajo del Instituto de Geofísica por invitarnos a participar en el proyecto de la Catedral de Morelia, sin duda parte importante de mi tesis.

A cada una de las personas involucradas en los proyectos como los trabajadores de la Delegación Álvaro Obregón que nos ayudaron a colocar el levantamiento.

A todos mis compañeros que participaron en el proyecto de la Catedral de Morelia, así como a protección civil de Morelia.

A mis amigos y mi hermano que me ayudaron en el proyecto del CELE.

« S'il vous plaît... dessine-moi un mouton... »  
... « Ça c'est la caisse. Le mouton que tu veux est dedans »  
Mais je fus bien surpris de voir s'illuminer le visage jube :  
« C'est tout à fait comme ça que je le voulais! »

*Antoine de Saint-Exupéry*  
*Le Petit Prince*

*A veces estamos tan centrados en nosotros, en nuestro problema,  
Que olvidamos que justo en ese momento podríamos hacer el mayor  
Descubrimiento de nuestras vidas.*

*Albert Espinosa*  
*"El mundo amarillo."*



# ÍNDICE

Resumen	2
Objetivo	3
Introducción	3
Capitulo 1. Antecedentes y Fundamentos teóricos de la Tomografía Eléctrica en 3D	
1.1 Desarrollo histórico del método de prospección eléctrica en 3D	5
1.2 Ecuaciones fundamentales del método	6
Capitulo 2. Fundamentos del método eléctrico	
2.1 Resistividad aparente	9
2.2 Arreglos electrodicos	12
2.3 Pseudosección y Profundidad de investigación	15
2.4 Arreglos en 3D	22
Capitulo 3. Arreglos propuestos para tomografía eléctrica en 3D en zonas urbanas	
3.1 Arreglo en L	25
3.2 Arreglo en esquina	29
3.3 Modelo sintético	31
3.4 Lugar de pruebas de campo: Cele	45
Capitulo 4. Tomografía eléctrica en 3D aplicado en ciudades	
4.1 Proyecto: Delegación Álvaro Obregón	53
4.2 Proyecto Catedral de Morelia	64
Capitulo 5 Conclusiones y recomendaciones	73
Anexos.	
Anexo A. Esquema de campo.	76
Bibliografía.	79

## Resumen

Para hacer un estudio eléctrico en las ciudades, se presenta el reto de obtener información debajo de las construcciones sin dañarlas, esto impide hacer los arreglos en rejillas para tomografías eléctricas en 3D que se utilizan hasta el momento para estos fines. Puede utilizarse tomografía eléctrica en 2D pero en ocasiones la información es insuficiente. El presente trabajo de tesis, presenta dos técnicas: "Arreglo en L y Arreglo en Esquina" que permiten obtener información del subsuelo para un estudio en 3D, rodeando las estructuras.

Se realizaron los modelos sintéticos para mostrar que un arreglo en "L" es más efectivo que dos perfiles en 2D en la misma posición, se realizaron pruebas de campo en el Centro de Enseñanza de Lenguas Extranjeras (CELE) para comparar un arreglo en rejilla con los arreglos propuestos, buscando la comparación entre ambos; determinando de esta manera si pueden emplearse para rodear estructuras con resolución semejante a los arreglos empleados actualmente.

Se utilizaron los arreglos en L y en esquina en proyectos de ciudad como fue en el proyecto delegación Álvaro Obregón y proyecto catedral de Morelia que nos permiten verificar su eficacia al rodear construcciones, con resultados satisfactorios; volviéndose una herramienta indispensable en trabajos de ciudad y en monumentos a conservar.

## Objetivo.

- Desarrollar una técnica para tomografía eléctrica en 3D que permita obtener información eléctrica bajo una construcción sin utilizar líneas en paralelo, ya que dicha construcción impide su uso.
- Comprobar la eficacia de las técnicas por medio de modelos de inversión y con pruebas de campo.
- Comparar los arreglos propuestos con las técnicas más utilizadas de tomografía eléctrica en 3D.
- Utilizar las técnicas en sitios urbanos para su aplicación.

## Introducción

En las últimas dos décadas se han desarrollado técnicas para la tomografía eléctrica en 3D como la “técnica Roll-along para adquisición de datos en 3D” (Dahlin y Bernstone, 1997) la cual consiste en colocar líneas paralelas cubriendo el área de estudio, midiendo en la dirección “x” y en la dirección “y”; emplea preferentemente el arreglo polo-polo. Con esta técnica se obtiene una gran cantidad de datos del subsuelo, sin embargo, se dificulta el procesado de los mismos, tomando en algunos casos, mucho tiempo de inversión.

Para disminuir la cantidad de datos sin perder gran resolución y calidad en el procesado, Loke (1996) diseñó la técnica “cross-diagonal survey” en la cual las mediciones de potencial son realizadas en los electrodos a lo largo de las líneas horizontal, vertical y diagonal a 45 grados que pasan por el electrodo de corriente; la cantidad de datos se reduce a más de la mitad que con la técnica anterior, sin perder calidad y resolución significativa.

Para la formación de las rejillas Aizebeokhai (2009) recomienda una separación máxima entre perfiles de “4a”, siendo “a” la separación eléctrica, para garantizar buena calidad y alta resolución en la imagen.

La técnica quasi-3D se hace a partir de perfiles 2D pero no son recomendados para detallar las características del medio y se requiera mucha resolución (Chambers et al. 2002)

Estas técnicas pueden ser empleadas en lugares abiertos para búsqueda en zonas kársticas (Deceuster & Kaufman, 2003), trabajos geotécnicos y contaminación (Dahlin, Bernstone y Loke, 2002; Olgilvy et al, 2002).

En la actualidad, las manchas urbanas se extienden ganando terreno a los espacios abiertos. Debido a las construcciones las técnicas mencionadas anteriormente no pueden emplearse. Puede utilizarse tomografía eléctrica en 2D sobre las calles, pero no son ideales para obtener una cobertura completa de la zona a tratar (Deceuster y Kaufmann, 2003)

Para el caso de las rejillas o Quasi-3D la distancia entre calles puede ser mucho mayor al recomendado por Aizebeokhai (2009), provocando que no sea confiable una interpretación de este estilo.

Las ciudades presentan el reto de obtener información de la distribución de resistividades cuando existen construcciones tales como casas, museos, escuelas, monumentos históricos, que impiden la colocación de perfiles en paralelo para formar rejillas; tampoco pueden hacerse perforaciones en cualquier lado, debido a la cantidad de cables de luz, teléfono, tuberías de gas o drenaje. Para solucionar este problema, en el presente trabajo de tesis se propone dos técnicas denominadas “arreglo en L” y “arreglo en esquina” que permite adquirir información confiable de la distribución de respuesta eléctrica para todos estos casos, sin necesidad de perforaciones dentro de dichas construcciones.

# Capítulo 1 Antecedentes y Fundamentos Teóricos de la Tomografía Eléctrica

## 1.1 Desarrollo histórico del método de prospección eléctrica en 3D.

En las últimas 3 décadas se han desarrollado técnicas para la tomografía eléctrica en 3D como la “técnica Roll-along para adquisición de datos en 3D” (Dahlin y Bernstone, 1997) la cual consiste en colocar líneas paralelas cubriendo el área de estudio, midiendo en la dirección “x” y en la dirección “y”; emplea preferentemente el arreglo polo-polo. Con esta técnica se obtiene una gran cantidad de datos del subsuelo, sin embargo, se dificulta el procesado de los mismos, tomando en algunos casos, mucho tiempo de inversión.

Para disminuir la cantidad de datos sin perder gran resolución y calidad en el procesado, Loke (1996) diseñó la técnica “cross-diagonal survey” en la cual las mediciones de potencial son realizadas en los electrodos a lo largo de las líneas horizontal, vertical y diagonal a 45° que pasan por el electrodo de corriente; la cantidad de datos se reduce a más de la mitad que con la técnica anterior, sin perder calidad y resolución significativa.

Para la formación de las rejillas Aizebeokhai (2009) recomienda una separación máxima entre perfiles de “4a”, siendo “a” la separación electródica, para garantizar buena calidad y alta resolución en la imagen.

La técnica quasi-3D se hace a partir de perfiles 2D pero no son recomendados para detallar las características del medio y se requiera mucha resolución (Chambers et al. 2002)

Estas técnicas pueden ser empleadas en lugares abiertos para búsqueda en zonas kársticas (Deceuster & Kaufman, 2003), trabajos geotécnicos y contaminación (Dahlin, Bernstone y Loke, 2002; Olgilvy et al., 2002).

En la actualidad, las manchas urbanas se extienden ganando terreno a los espacios abiertos. Debido a las construcciones las técnicas mencionadas anteriormente no pueden emplearse. Puede utilizarse tomografía eléctrica en 2D sobre las calles, pero no son ideales para obtener una cobertura completa de la zona a tratar (Deceuster y Kaufmann, 2003)

Para el caso de las rejillas o Quasi-3D la distancia entre calles puede ser mucho mayor al recomendado por Aizebeokhai (2009), provocando que no sea confiable una interpretación de este estilo.

## 1.2 Ecuaciones Fundamentales del método.

El método eléctrico tiene sus bases en las ecuaciones de Maxwell que al considerar una corriente estacionaria y un medio heterogeneo, anisótropo y lineal, dichas ecuaciones se pueden expresar como:

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (1.01)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (1.02)$$

El campo eléctrico  $\vec{E}$  y  $\vec{J}$  se encuentran ligados a través de la ecuación de Ohm:

$$\vec{J}(\vec{r}) = \sigma(\vec{r})\vec{E}(\vec{r}) \quad (1.03)$$

La ecuación 1.02 es válida para cualquier punto en el espacio e inclusive donde se inyecta la corriente al subsuelo, que se puede considerar una fuente puntual. Supongamos una fuente puntual en la superficie de la tierra en  $Z=0$

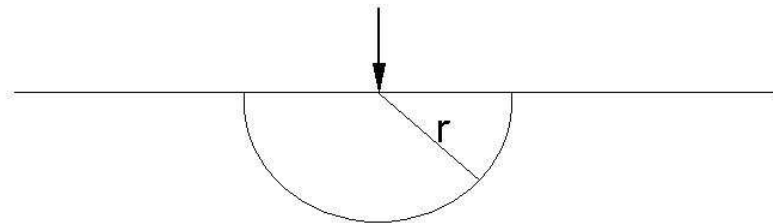


Figura 1 Representación de una fuente puntual en una superficie  $z=0$

$$\int_v \nabla \cdot \vec{J}(\vec{r}) = \int_s \vec{J}(\vec{r}) \cdot d\vec{s} = I \quad (1.04)$$

La ecuación (1.04) indica que la integral de flujo del balance entre la corriente  $I$  que entra al sistema y el vector densidad de corriente debe ser igual a cero. La corriente  $I$  en el subsuelo se puede representar de la siguiente manera:

$$I = \int I\delta(\vec{r})dV \quad (1.05)$$

Al substituir ecuación (1.05) en ecuación (1.04):

$$\int_v \nabla \cdot \vec{J}(\vec{r}) = \int_v I\delta(\vec{r})dV \quad (1.06)$$

Y por lo tanto se puede decir que la divergencia de  $\vec{J}$  es:

$$\nabla \cdot \vec{J}(\vec{r}) = I\delta(\vec{r}) \quad (1.07)$$

Ahora bien, la ecuación 1.01 al ser el rotacional de  $\vec{E}$  igual con cero, el teorema de Helmholtz permite expresar al campo eléctrico  $\vec{E}$  de la siguiente manera:

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\nabla\phi(\vec{r}) \quad (1.08)$$

Sustituyendo la ecuación 1.03 y 1.08 en la ecuación 1.07 tendremos:

$$\nabla \cdot [\sigma(\vec{r})\nabla\phi(\vec{r})] = -I\delta(\vec{r}) \quad (1.09)$$

La ecuación 1.09 define la ecuación diferencial que satisface el potencial eléctrico ( $\Phi$ ) debido a una fuente puntual. Del principio de superposición se puede obtener el potencial total cuando hay más fuentes puntuales en el terreno.

En prospección eléctrica se mide una diferencia de potencial entre dos puntos en la superficie o pozo de la tierra es decir:

$$\Delta\varphi(\vec{r}) = \int_{r_1}^{r_2} \vec{E}(\vec{r}) \cdot d\vec{l} \quad (1.10)$$

Si sustituimos la ecuación 1.03 en la 1.10 tendremos:

$$\Delta\varphi(\vec{r}) = \int_{r_1}^{r_2} \rho(\vec{r}) \vec{J}(\vec{r}) \cdot d\vec{l} \quad (1.11)$$

Donde:

$$\rho(\vec{r}) = \frac{1}{\sigma(\vec{r})}$$

La ecuación 1.11 fundamenta el método de prospección eléctrica bajo el régimen de corriente estacionaria, donde  $\vec{J}(\vec{r})$  es el vector densidad de corriente total, es decir, las corrientes primarias más las secundarias que se originan por la heterogeneidad del subsuelo;  $\rho(\vec{r})$  es la resistividad en cualquier punto del subsuelo heterogéneo; así mismo, esta ecuación expresa el potencial que se mide.

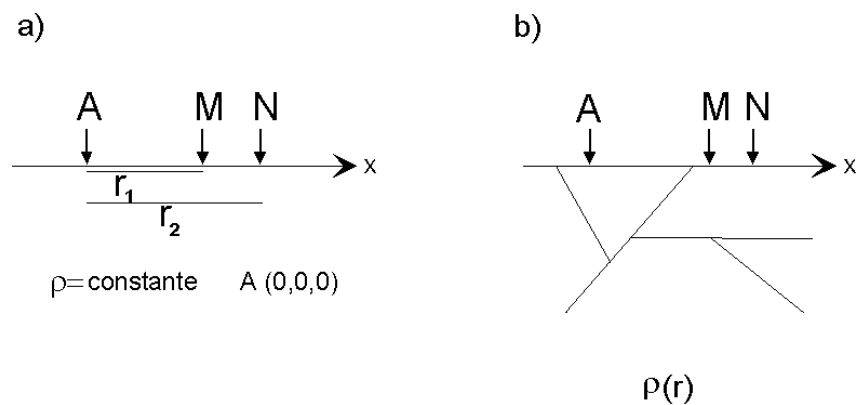
Sin embargo, para obtener información del subsuelo mediante las medidas de diferencia de potencial ( $\Delta\Phi$ ) es necesario establecer un medio de referencia que permita definir un parámetro anómalo. Estos conceptos serán tratados con mayor detalle en el Capítulo 2.



## Capítulo 2 Fundamentos del método eléctrico

### 2.1 Resistividad Aparente.

Consideramos una fuente puntual y dos electrodos donde se mide una diferencia de potencial en un espacio homogéneo, representado en la figura 2.01a



**Figura 2.01 Representación de una fuente puntual y dos electrodos.**  
 a) En un espacio homogéneo; b) En un espacio heterogéneo.

De la ecuación 1.07 aplicada al electrodo A de la figura 2.01a, podemos demostrar que el vector de densidad de corriente primaria es (Orellana, 1972):

$$\vec{J}(\vec{r}) = \frac{I\vec{r}_u}{2\pi r^2} = \frac{I}{2\pi} \frac{\vec{r}}{r^3} \quad (2.01)$$

Donde

$\vec{r}_u$  Vector unitario

$\vec{r}$  Vector de posición relativa entre el electrodo A y un punto del semiespacio.

Entonces la diferencia de potencial  $\Delta\phi$  que se mediría entre M y N homogéneo e isotrópico sería:

$$\Delta\phi = \int_{r_1}^{r_2} \frac{\rho I}{2\pi} \frac{\vec{r}}{r^3} d\vec{l} = \frac{\rho I}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{\vec{r} \cdot d\vec{x}\hat{i}}{r^3} \quad (2.02)$$

$$\vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}$$

$$\vec{r} \cdot \hat{i} = x$$

Como solo estamos midiendo en la dirección x entonces  $y=0, z=0$

Por lo que la ecuación (2.02) queda:

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \frac{\rho I}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{x}{x^3} dx = \frac{\rho I}{2\pi} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dx}{x^2} \\ \Delta\phi &= \frac{\rho I}{2\pi} \left(-\frac{1}{x}\right)_{r_1}^{r_2} = -\frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right) \\ \Delta\phi &= \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \end{aligned} \quad (2.03)$$

Si se define la siguiente ecuación como el factor geométrico

$$k = 2\pi \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)^{-1} \quad (2.04)$$

Entonces es posible encontrar el valor de la resistividad verdadera del semiespacio homogéneo de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{\Delta\phi}{I} k \quad (2.05)$$

Este valor es constante en una tierra homogénea; sin embargo, si la tierra es heterogénea, no podríamos obtener un valor constante de  $\rho$ , se mediría una diferencia de potencial  $\Delta\phi$  (ecuación 1.11), que al ser sustituida en la ecuación 2.05 nos daría por resultado:

$$\rho = \frac{k}{I} \int \rho(\vec{r}) \vec{J}(\vec{r}) \cdot d\vec{l} \quad (2.06)$$

Ciertamente la integral de la ecuación (2.06) daría como resultado un valor que diverge de una constante, recordando que  $\rho(\vec{r})$  es la resistividad de cualquier punto en el subsuelo y  $\vec{J}$  el vector densidad de corrientes totales.

Definimos, entonces, a la ecuación (2.05) como la ecuación para determinar el parámetro anómalo denominado aparente

$$\rho_a(\vec{r}) = \frac{\Delta\phi(\vec{r})}{I} k \quad (2.07)$$

La ecuación (2.06) indica que la resistividad aparente es función de la distribución de resistividad del subsuelo y de las corrientes totales que existan.

Según Hallof (1957) la resistividad aparente es un parámetro abstracto que representa el valor constante de resistividad que el semi-espacio debería tener para generar la diferencia de potencial medida, cuando la corriente es aplicada o en otras palabras indica que el valor del parámetro anómalo medido no se debe a un semi-espacio homogéneo e isótropo. Este hecho permite, entonces, establecer la pregunta ¿Qué provocó que la tierra no respondiera como un medio homogéneo e isótropo?

Esto conduce a interpretar qué cuerpos provocaron la respuesta observada, que nos lleva a considerar con qué arreglos es posible medir el parámetro anómalo.

## 2.2 Arreglos Electródicos

En este apartado se presentan los arreglos electródicos más usados y sus características principales. La nomenclatura utilizada representa a los electrodos de Corriente como  $C_1$  y  $C_2$  mientras que los electrodos de potencial se representan como  $P_1$  y  $P_2$ .

### *Arreglo Wenner.*

Es un arreglo robusto, es mas sensitivo a los cambios verticales que a los cambios horizontales, por lo que es bueno para resolver los cambios verticales que corresponden a estructuras verticales, pero se le dificultan los cambios horizontales que corresponden a las estructuras verticales. La profundidad de investigación media es aproximadamente 0.5 del espaciamento "a" utilizado. El factor geométrico es  $2\pi a$ . Es un arreglo con muy buena señal que no se ve afectado por el ruido ambiental.

#### *Arreglos tipo Wenner*

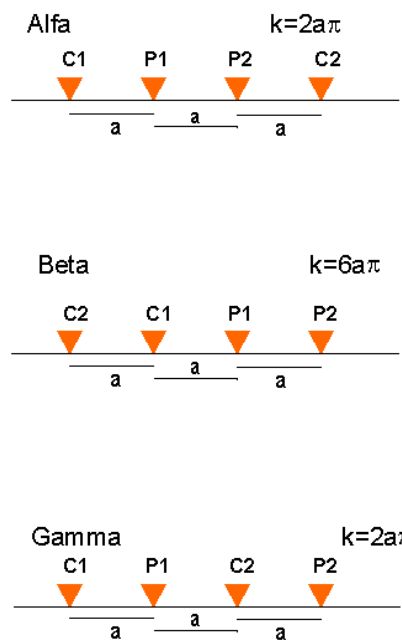


Figura 2.02 Se muestran los arreglos tipo Wenner. La parte superior representa al tipo alfa; en la parte central el tipo beta y en la parte inferior el tipo gamma. Los triángulos representan a los electrodos Loke (1996-2010).

### **Arreglo dipolo-dipolo.**

Tienen el mismo espaciamiento entre electrodos de potencial y de corriente denominado  $a$ . Con la letra  $n$  se denomina el factor de separación entre los electrodos de corriente y potencial, el cual aumenta conforme aumenta la profundidad de investigación.

Es muy sensitivo a los cambios entre cada par dipolar, pero poco sensitivo a los cambios verticales de resistividad, es decir que es bueno para estructuras verticales como diques y cavidades, pero difícilmente detectará estructuras horizontales como la estratificación.

La profundidad media de investigación depende de los factores de separación " $a$ " y " $n$ ". Para una  $n$  grande tendrá problemas con la señal de recepción. Esto puede arreglarse incrementándose el espaciamiento " $a$ " entre los electrodos de corriente así como de los electrodos de potencial.

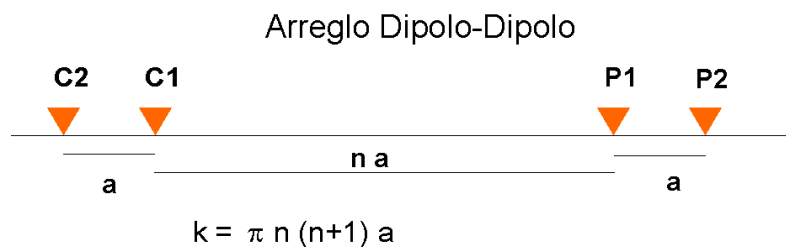


Figura 2.03 Representación del arreglo dipolo-dipolo Loke (1996-2010).

### **Arreglo polo-polo.**

Este arreglo utiliza 1 polo de corriente y 1 polo de potencial, sin embargo, es necesario tener 2 polos de corriente y 2 de potencial, para lograr el efecto, el segundo electrodo de corriente y de potencial se colocan a una distancia mayor a 20 veces la máxima separación entre los electrodos de corriente y potencial usados en el estudio.

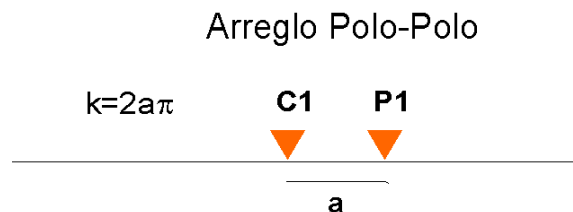


Figura 2.04 Representación del arreglo polo-polo Loke (1996-2010).

### ***Arreglo schlumberger.***

Utiliza un sistema de espaciamiento constante entre los electrodos. El factor "n" para este arreglo es la distancia entre los electrodos  $C_1$  y  $P_1$  ( o  $P_2$  y  $C_2$ ) en proporción con la distancia entre los electrodos de potencial  $P_1 P_2$



**Figura 2.05 Representación del arreglo Schlumberger. Loke (1996-2010).**

### ***Arreglo polo-dipolo***

Es un arreglo asimétrico, en ocasiones esta asimetría puede influir en el resultado de la inversión.

Una forma de disminuir este efecto es hacer el arreglo en forma invertida al combinar los datos de ida y regreso se pueden eliminar los problemas de asimetría pero puede incrementar el tiempo de toma de datos. Este arreglo es más sensible a estructuras verticales.

Este arreglo consiste de un electrodo remoto que debe ser colocado lo suficientemente lejos de la línea de estudio. Aproximadamente la posición sería el cuadrado de la distancia entre  $C_1$  y  $P_1$  será la distancia entre  $C_2$  y  $P_2$ .



**Figura 2.06 Representación del arreglo polo-dipolo. Loke(1996-2010).**

## 2.3 Pseudosección y Profundidad de investigación

Los datos de resistividad aparente ( $\rho_a$ ) se representan en una gráfica llamada pseudosección, donde se representa la  $\rho_a$  en función de las coordenadas X y Z cuando es una representación 2D. En una representación 3D no es costumbre representar los valores de resistividad aparente.

Una pregunta que siempre ha inquietado al explorador se relaciona con la profundidad de Investigación o la Z, es decir ¿Cuál profundidad o Z debería ser asignada a  $\rho_a$ ? La respuesta de esta pregunta ha involucrados a muchos investigadores en tratar de dar una respuesta correcta.

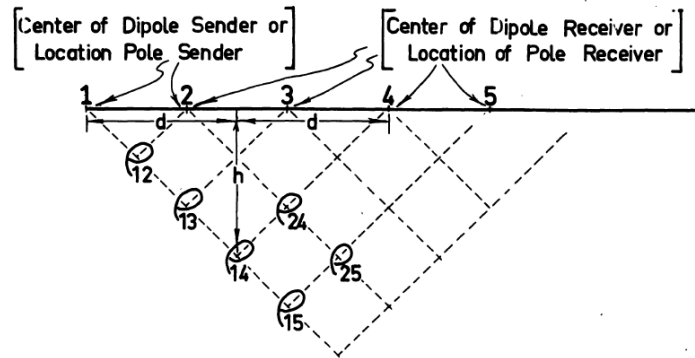
**Evjen (1938)** fue el primero en definir la profundidad de investigación de una manera clara como aquella profundidad en donde se logra la máxima contribución en la señal medida de una capa delgada y horizontal del suelo. Utilizó la equivalencia entre el campo estacionario y el estático encontrando los siguientes valores:

Arreglo	Profundidad de Investigación
Polo-polo	0.35L
Dipolo ecuatorial o acimutal ( $\theta_1=\pi/4$ )	0.25L
Dipolo perpendicular ( $\theta_1=\pi/4$ )	0.20L
Polo o dipolo radial ( $\theta_1=\pi/4$ )	0.195L
Dipolo paralelo ( $\theta_1=\pi/4$ )	0.18L
Schlumberger	0.125L
Wenner	0.11L

Tabla 1. Resultados de Evjen (1938)

Tomando en cuenta L como la distancia entre los electrodos extremos de cada arreglo.

**Hallof (1957)** en su tesis de licenciatura concentra su investigación en el arreglo dipolo-dipolo y propone hacer la pseudosección colocando cada medición en la intersección de 2 líneas que salen del centro de cada dipolo con un ángulo de 45 grados, este ángulo es completamente arbitrario, pero permite identificar las anomalías bien contorneadas causado por una geometría particular de la fuente. Es simplemente un método conveniente para mostrar todos los resultados evidentes a lo largo de una línea dada. Cada línea de datos horizontal está asociada con un valor específico de n y por tanto con una profundidad de investigación efectiva; con lo cual se obtienen cambios verticales en la resistividad aparente. Su diagrama se muestra en la figura 2.07.



EXPLANATION OF DATA PLOTTING

Figura 2.07 Puntos de atribución para el arreglo dipolo-dipolo de la tesis de Hallof (1957)

**Alp'in et al (1966)** trabajó la profundidad de investigación para arreglo dipolares y el caso específico de una tierra estratificada con la última capa completamente aislada. Obtuvo las siguientes relaciones al comparar las curvas de sondeo de resistividad aparente con sus asíntotas:

Fórmula para Profundidad de Investigación	Tipo de Arreglo
$OQ = AB$	Arreglo dipolar Radial
$OQ = \frac{1}{2} AB$	Arreglo dipolar Acimutal
$OQ = \frac{3\cos^2\theta - 1}{2\cos 2\theta}$	Arreglo dipolar Paralelo
$OQ = \frac{3}{4} AB$	Arreglo dipolar Perpendicular

Tabla 2. Resultados de Alp'in et al (1966)

En donde OQ es la distancia entre los dipolos de corriente y de potencial; AB es la distancia entre los electrodos de corriente en el arreglo Schlumberger,  $\theta$  es el ángulo acimutal para arreglos dipolares.

**Keller y Frischkecht (1966)** estudiaron la relación entre la profundidad de investigación entre los arreglos Schlumberger y Wenner encontrando que si para el primero es la unidad, para el segundo sería 0.92.



**Keller (1966)** se basó en el trabajo de Al'pin considerando 2 casos: 1) en el arreglo polo-dipolo la longitud dipolar no es pequeña más profunda no está completamente aislada; 2) la orientación de los polos es arbitraria.comparada con la separación al polo y la capa

**Roy y Apparao (1971)** su investigación fue para un medio inhomogéneo, homogeneizaron la longitud L para diversos arreglos y definieron la profundidad de investigación, de una manera muy ambigua, como la profundidad a la cual se encuentra la mayor contribución del total de la señal medida en la superficie del terreno, de tal manera que relacionan la profundidad de investigación con el valor máximo de la curva formada a partir de sus ecuaciones obteniendo los siguiente resultados:

Arreglo	Profundidad de investiación
Polo polo	0.35
Dipolo ecuatorial o acimutal	0.25
Dipolo perpendicular ( $\theta_1 = \frac{\pi}{4}$ )	0.20
Dipolo radial o polar ( $\theta_1 = \frac{\pi}{4}$ )	0.195
Dipolo paralelo ( $\theta_1 = \frac{\pi}{4}$ )	0.18
Unipolo modificado	1.18
Laterolog superficial (I=0.1L)	0.17
Laterolog superficial (I=0.2L)	0.135
Schlumberger	0.125
Wenner	0.11

**Tabla 3. Resultados de Roy y Apparao (1971)**

**Edwards (1977)** Analizó el método de Hallof (1957) dándose cuenta de que al utilizar diferentes longitudes de dipolo se obtienen pseudosecciones flexiblemente diferentes, lo que impide utilizar diferentes longitudes dipolares para una misma pseudosección. Además de que las profundidades representadas no están directamente relacionadas a alguna profundidad efectiva, al menos, para el arreglo dipolo-dipolo y la escala vertical por lo tanto no tiene significado preciso.

Analizó la geometría del arreglo dipolo-dipolo, encontrando que es el arreglo que tiene más variaciones en su geometría interna al cambiar "a" o "n" por lo tanto combinar diferentes longitudes dipolares en una misma pseudosección era imposible. Se preguntó si existía la posibilidad de encontrar una función que permitiera mezclarlas en una misma

pseudosección y de ser posible se podría encontrar una profundidad de investigación fija para cada valor medido que fuese lo más cercano a la realidad.

Para su estudio planteó lo siguiente: 1) Cada línea vertical en una pseudosección representa una expansión del arreglo con respecto a un centro fijo y constituye una curva de sondeo vertical de la forma  $\rho_a = f(z_e)$  donde  $z_e$  es la profundidad efectiva en la cual se pondrá cada punto en la grafica.

2) El objetivo es escribirlo de la forma  $z_e = c_n a = k c_n a$  donde los coeficientes  $c_n$  son los apropiados para las profundidades de  $n = 1, 2, 3, \dots, 6$  y la constante  $k$  es el factor de escala apropiado.

3) la condición esencial para los coeficientes  $c_n$  es que coloquen cada resistividad aparente a una profundidad fija en la curva de sondeo.

Lo ideal sería que los coeficientes  $c_n$  fueran validos para cualquier modelo para todos los sondeos, cualquier profundidad en cada sondeo y todos los contrastes de resistividad. Obviamente esto es imposible, sin embargo con ciertos límites, Edwards, trato de encontrar la mejor solución.

Escogió 2 modelos básicos para determinar los coeficientes  $c_n$ : un sondeo sobre una tierra estratificada con 2 capas y un sondeo sobre una tierra con un contacto vertical. Asignó valores de  $\rho_2/\rho_1$  y  $k$  y resolvió para  $n = 1, 2, 3, \dots, 6$  y lo normalizó con  $c_6 = 1000$  para comparar. Para obtener los coeficientes precisos y objetivos utilizó aquellos en donde ocurriera el máximo gradiente y ocurriera la convergencia en  $k=0$ .

Comparó sus resultados con los de Roy y Amparo observando que concordaban bastante bien. Algunos de sus resultados se muestran en la tablas 4 - 9 :

Dipolo- Dipolo	$Z_c/a$	$Z_c/L$
n=0.222	0.139	0.063
n=0.5	0.253	0.101
n=1	0.416	0.139
2	0.697	0.174
3	0.962	0.192
4	1.220	0.203
5	1.476	0.211
6	1.730	0.216
7	1.983	0.220
8	2.236	0.224
20	5.25	0.239

Tabla 4. Resultados de Edwards (1977) para arreglo Dipolo-Dipolo

Wenner	$Z_c/a=0.519$	$Z_c/L = 0.173$
--------	---------------	-----------------

Tabla 5. Resultados de Edwards (1977) para Wenner

Schlumberger	$Z_c/a$	$Z_c/L$
"a → 0" ideal		0.192
L=40a	7.66	0.192
L=20 a	3.82	0.192
L=10 a	1.90	0.192
"a → 0" ideal		0.192
L=40a	7.66	0.192
L=20 a	3.82	0.192
L=10 a	1.90	0.192

Tabla 6. Resultados de *Edwards (1977)* para Schlumberger

Polo Dipolo (ideal $C_1 \rightarrow \infty$ )	$Z_c/a$	$Z_c/L$
n= 1 (3 electrodos)	0.519	
2	0.925	
3	1.318	
4	1.706	
5	2.093	
6	2.478	
n= 1 (3 electrodos)	0.519	
2	0.925	

Tabla 7. Resultados de *Edwards (1977)* para Polo dipolo (ideal)

Polo Dipolo (m=20)	$Z_c/a$	$Z_c/L$
n= 1	0.517	0.023
2	0.915	0.040
3	1.293	0.054
4	1.658	0.066
5	2.013	0.077
6	2.359	0.087

Tabla 8. Resultados de *Edwards (1977)* para Polo Dipolo (m=20)

Polo Polo ideal (A, N → ∞)	$Z_c/a$	$Z_c/L$
L=40 a, x=20a	0.777	0.019
L=20 a, x=10 a	0.724	0.036
L=10 a, x=5 a	0.627	0.063
L=40 a, x=10 a	0.758	0.019
L=40 a, x=20a	0.777	0.019
L=20 a, x=10 a	0.724	0.036
L=10 a, x=5 a	0.627	0.063
L=40 a, x=10 a	0.758	0.019

Tabla 9. Resultados de *Edwards (1977)* para Polo Polo (ideal)

## **2.4 Arreglos en 3D**

### ***Técnica Roll-allong para adquisición de datos en 3D***

Esta técnica fue desarrollada por Torleif Dahlin y Christian Bernstone para aplicaciones de ingeniería y del medio ambiente; con la finalidad de aumentar las capacidades de la toma de datos para un arreglo en 3D.

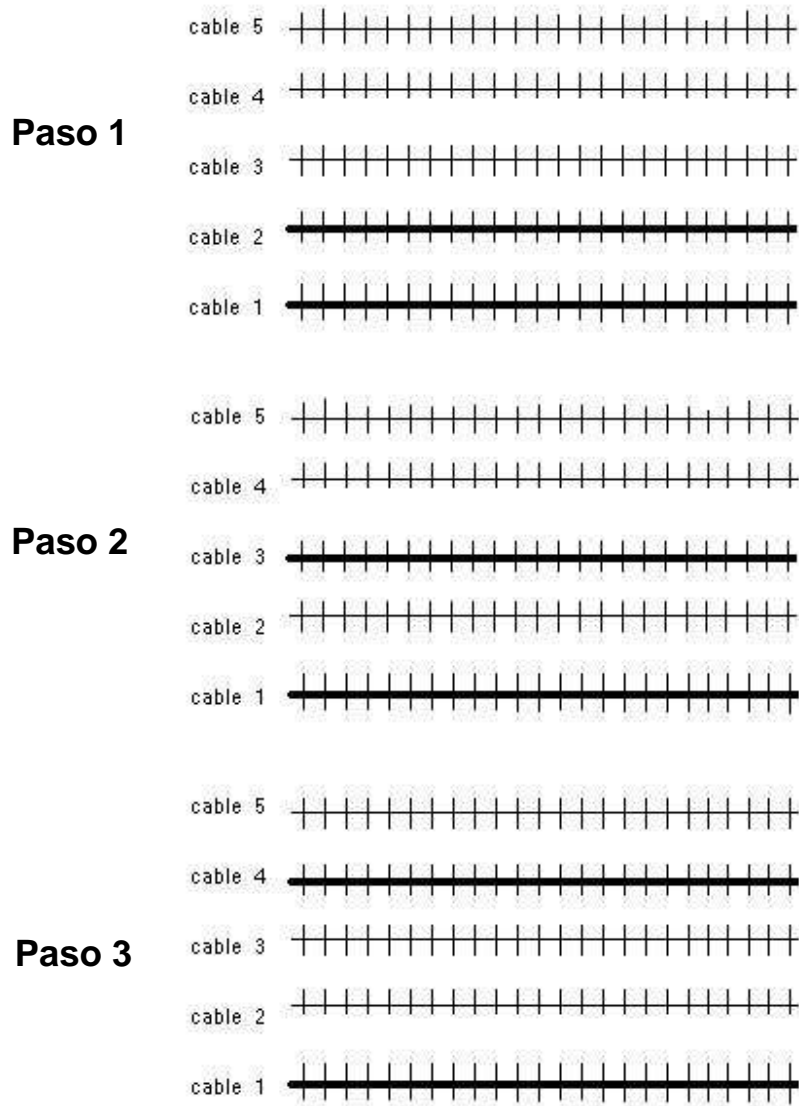
Utilizaron un equipo ABEM Lund Imaging System, con el arreglo polo-polo de la manera siguiente:

Se colocan los cables 1 y 2; se mide a lo largo de ambos cables y entre ellos.

Se colocan los cables 1 y 3; se mide a lo largo del cable 3 y entre los 2 cables.

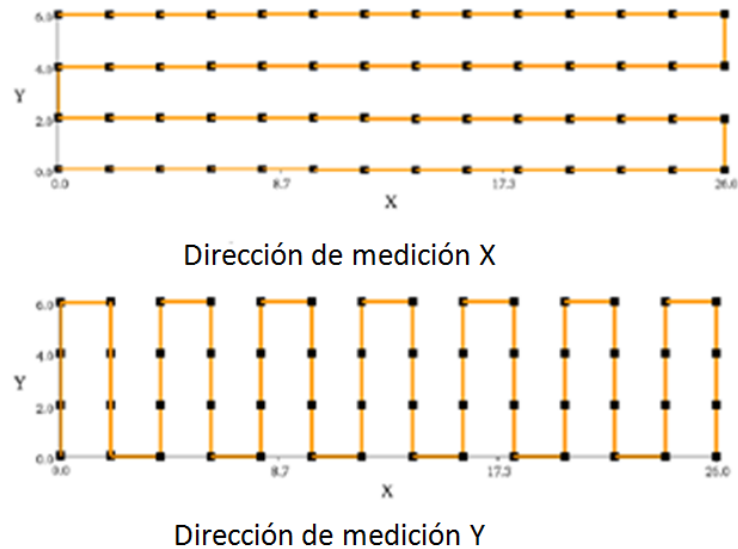
Se colocan los cables 1 y 4; se mide a lo largo del cable 4 y entre los 2 cables.

El proceso continúa hasta terminar los cables, entonces el cable 2 toma el rol del cable 1 sin cambiar de posición y se repite el proceso. Figura 2.08



**Figura 2.08 Pasos a seguir de la técnica Roll-along para adquisición de datos en 3D. Las líneas más gruesas representan las líneas activas o en uso. Como puede observarse en el paso 1 se usan las líneas 1 y 2 en el paso 2 se usan las líneas 1 y 3; en el paso 3 se usan las líneas 1 y 4 y así sucesivamente.**

Describen que es necesario medir en dos direcciones para obtener un verdadero conjunto de datos en 3D (ver figura 2.09)



**Figura 2.09 Toma de datos en las direcciones x (parte superior) y "y" (parte inferior) para la obtención de datos en 3D**

Los resultados los presentaron como pseudosecciones de profundidad de tres diferentes maneras:

1. Tomando los datos de la dirección x.
2. Tomando los datos de la dirección y.
3. Tomando ambas direcciones.

En los tres casos utilizaron triangulación con interpolación lineal.

En general las representaciones concordaban, sin embargo, existen diferencias significativas entre las secciones de diferente dirección, pensaron que se debía probablemente a la dirección del Strike de las estructuras del subsuelo.

También indican problemas con el electrodo remoto debido a la gran distancia que requiere y puede ser un problema de logística.

Casi al mismo tiempo fue desarrollada otra técnica.

### Técnica “cross-diagonal survey”

Desarrollada por Loke y Barker (1996) con la finalidad principal de reducir la cantidad de lecturas tomadas en campo, pero sin perder resolución y calidad en los datos para la inversión.

La logística es la siguiente:

Se colocan perfiles en paralelo para hacer una rejilla de electrodos con igual separación tanto en la dirección x como en la dirección y. Las mediciones de potencial son hechas en los electrodos a lo largo de las líneas horizontal, vertical y diagonal a 45° que pasan por el electrodo de corriente; la cantidad de datos se reduce a más de la mitad que con la técnica anterior, sin perder calidad y resolución significativa. Puede apreciarse la toma de los datos en la siguiente figura:

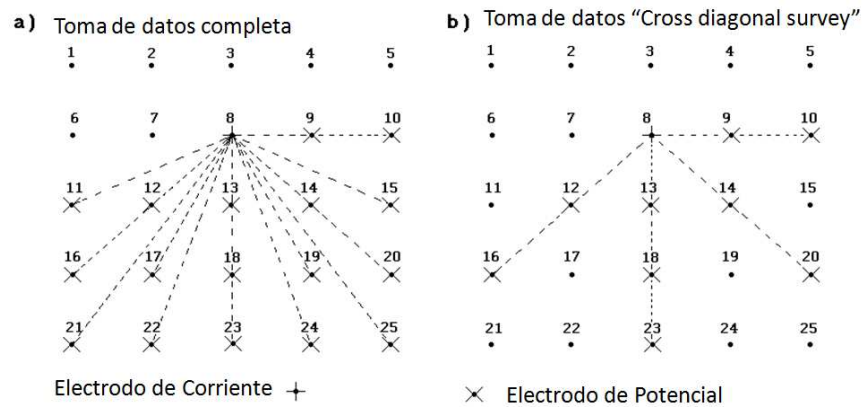


Figura 2.10 a) toma de datos para arreglo 3D con arreglo polo-polo b) Técnica cross diagonal survey

### Otros estudios en 3D

**Aizebeokhai y colaboradores (2009)** realizaron la modelación de una estructura sintética horst para evaluar las capacidades de los distintos arreglos (wenner, wenner-schlumberger, dipolo-dipolo, polo-polo, polo-dipolo) para usarlos en las tomografías eléctricas en 3D.

Primero modelaron una estructura horst tridimensional con series de modelos de estructuras en 2D con separaciones constantes en las direcciones paralelas y perpendiculares.

Los datos de resistividad fueron sintéticos calculados en secciones ortogonales de perfiles 2D con el software RES2DMOD con separación interelectrónica “a” y separación entre líneas  $L(a=2, 4, 5, 10m; L = a, 2 a, 2.5 a, 4 a, 5 a, 10 a)$ .

Los datos obtenidos fueron invertidos con el software RES3DINV.

Define "En teoría el espaciado entre líneas entre los perfiles 2D para ser combinados en un archivo para 3D deben ser el mismo que el espaciado mínimo entre electrodos" esto es para obtener una rejilla uniforme y asegurar la calidad y alta resolución de la imagen.

En sus experimentos en el análisis de inversión de las imágenes y sus mapas de sensibilidad encontraron que un espaciado entre líneas menor o igual a "4a" donde "a" es la separación mínima entre electrodos da una buena calidad y alta resolución en imágenes 3D.

Encontraron también que los arreglos dipolo-dipolo, polo-dipolo y wenner-schlumberger son los más sensitivos entre los arreglos que estudiaron.

**John Deceuster y Oliver Kaufmann (2003)** realizaron un trabajo de tomografía eléctrica en 3D en una zona calcárea en un sinclinal. Su objetivo era delimitar las zonas de inestabilidad antes de realizar una construcción. Mencionan que por la complejidad del fenómeno kárstico presente en esa zona el método geofísico de tomografía eléctrica en 2D no son ideales para el estudio y buscaron la técnica de 3D. Utilizaron un equipo Syscal R1+switch con 48 canales.

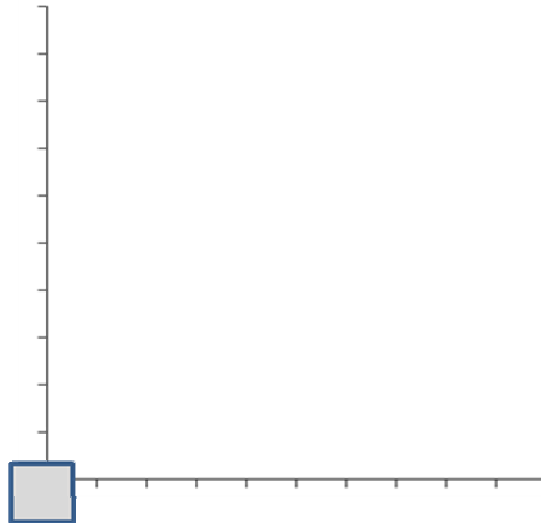


## Capítulo 3 Arreglos propuestos para tomografía eléctrica en 3D en zonas urbanas

Las ciudades presentan el reto de obtener información de la distribución de resistividades cuando existen construcciones tales como casas, museos, escuelas, monumentos históricos, que impiden la colocación de perfiles en paralelo para formar rejillas; tampoco pueden hacerse perforaciones en cualquier lado, debido a la cantidad de cables de luz, teléfono, tuberías de gas o drenaje. Para solucionar este problema, en la presente tesis se proponen dos técnicas denominadas “arreglo en L” y “arreglo en esquina” que permite adquirir información confiable de la distribución de respuesta eléctrica para todos estos casos, sin necesidad de perforaciones dentro de dichas construcciones.

### 3.1 Técnica Arreglo en L.

El “arreglo en L” consiste en dos perfiles perpendiculares entre sí, en las cuales se tomaran los datos del estudio como se especifica más adelante (figura 3.01). El arreglo de electrodos puede ser: dipolo-dipolo, wenner, schlumberger, wenner-schlumberger, polo-polo o polo-dipolo, por mencionar algunos.

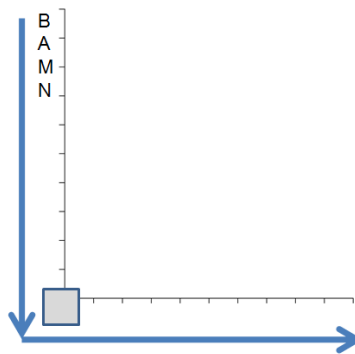


**Figura 3.01 Disposición de los electrodos para el arreglo en “L” el cuadrado representa a la consola del equipo y las líneas a los electrodos.**

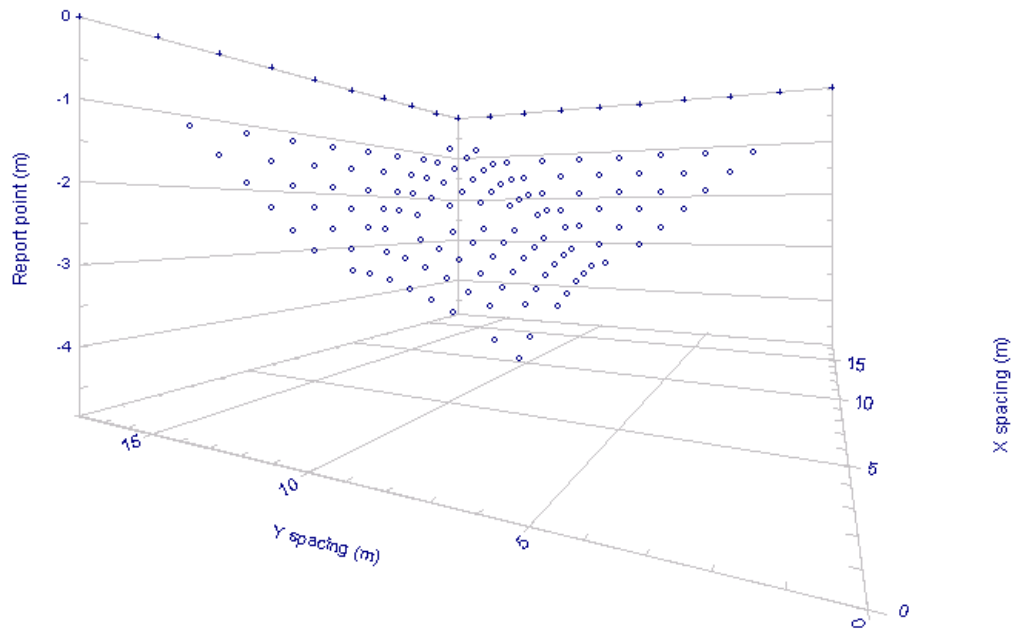
Para discutir la técnica propuesta “Arreglo en L” se empleará un dispositivo Dipolo-Dipolo (DD). Primeramente, se hace un levantamiento en 2D (DD), uno en cada una de las líneas perpendiculares. Posteriormente se dejan los electrodos de corriente en el extremo de una de las líneas y en la otra línea los electrodos de recepción cerca del origen (figura 3.02); el dipolo de recepción se mueve hacia el final de la línea avanzado una abertura electródica y al terminar se regresa el dipolo de recepción al origen y el dipolo de emisión

se mueve una posición electródica hacia el origen de la línea; el proceso se vuelve a repetir hasta que ambos dipolos se encuentren en el origen. Este desplazamiento de los electrodos provoca información en dirección diagonal y hacia el centro del arreglo (Figura 3.03).

Los puntos de atribución se designan de acuerdo a la regla de Edwards (1977), por ejemplo si los electrodos de corriente tienen coordenadas  $A(6,0,0)$  ,  $B(3,0,0)$  y electrodos de potencial  $M(0,3,0)$ ,  $N(0,6,0)$ , al calcular las coordenadas del punto de atribución con el software ElectrePro (Iris Instruments) se tendrá  $(2.3,2.3,-1.6)$ . De igual manera se sigue para las tomografías eléctricas en 2D.



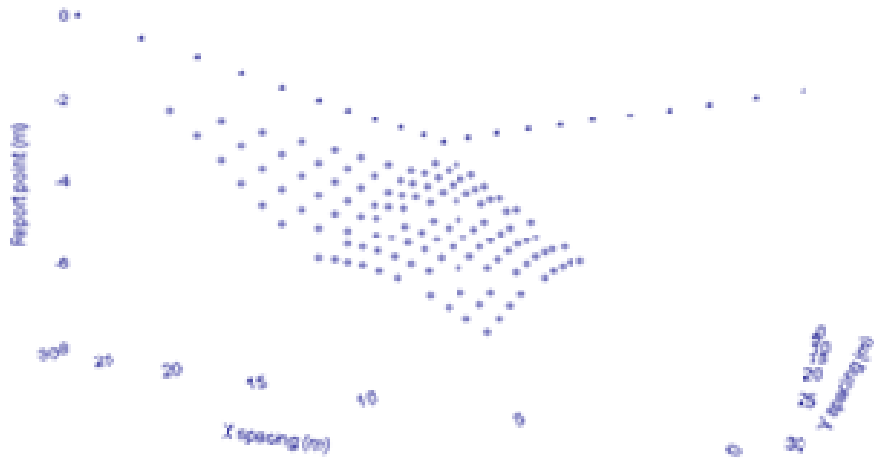
**Figura 3.02. Representación de la toma de datos del arreglo en L.**



**Figura 3.03 Visualización de los puntos de atribución con el software *Electre Pro* (Iris Instruments)**

Pueden combinarse hasta 4 “*Arreglo en L*” para rodear la estructura y formar un cubo de información. Se toma una “*L*” de base y para evitar la repetición de datos se modifican los archivos de lectura, eliminando la información de uno de los laterales de las “*L*” consecutivas y para la última “*L*” que cierra el polígono se eliminan los datos de ambos laterales quedando los puntos de atribución como en la figura 3.04.

a)



b)

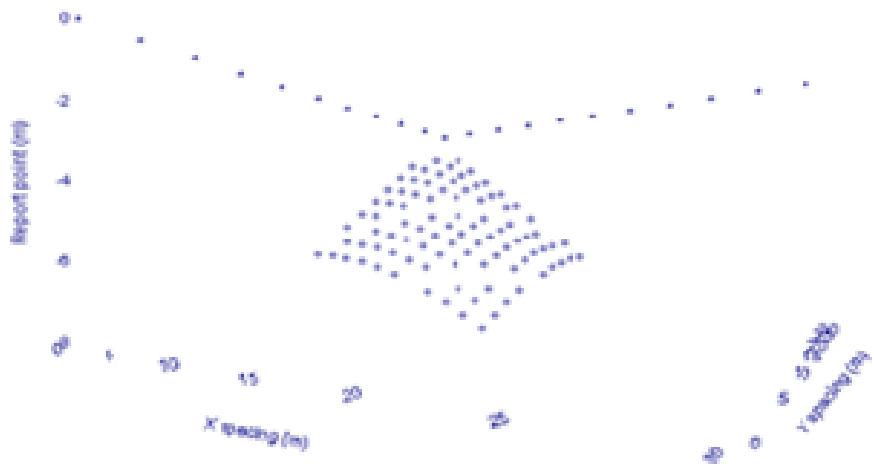


Figura 3.04. a) Modificación del arreglo en L para evitar repetición de datos en la lateral derecha; b) Modificación para la ultima “L” para cerrar un cuadrado, sin la información de las dos laterales dejando los datos centrales.

### 3.2 “Técnica Arreglo en esquina”

Para obtener datos en superficie se diseñó el “*Arreglo en Esquina*”, similar al anterior en cuanto a la colocación de electrodos. El “*Arreglo en Esquina*”, a diferencia del “*Arreglo en L*”, utiliza arreglos ecuatoriales o acimutales dipolares. Los electrodos de corriente se colocan en cada uno de los extremos de las líneas perpendiculares dejándose fijos; los electrodos de potencial se colocan en los electrodos inmediatos a cada uno de los de corriente (arreglo ecuatorial dipolar); los de potencial se moverán de uno en uno hacia la esquina, origen de coordenadas (figura 3.05). Posteriormente los electrodos de corriente se mueven una posición electródica hacia el origen y los de potencial en una posición inmediata a los de corriente; y el proceso se repite nuevamente y termina cuando ambos dipolos están en el origen.

Como última etapa del “*Arreglo en Esquina*” se emplea un arreglo dipolar acimutal, esto consiste en dejar, nuevamente en forma diagonal, los electrodos de corriente en cada extremo de las líneas perpendiculares. El dipolo de recepción se deja en una de las líneas, contiguo a un electrodo de corriente (Figura 3.05b) y se comienzan a mover una posición electródica hacia el origen de coordenadas; posteriormente, el dipolo de emisión se mueve una posición electródica hacia el origen de la línea; el dipolo de recepción se coloca en la misma posición anterior y el proceso se repite nuevamente. El proceso termina cuando ambos dipolos están en el origen. El arreglo dipolar acimutal se repite para la otra línea perpendicular (Figura 3.05c).

Los puntos de atribución, para el “*Arreglo en Esquina*”, son como se muestra en la figura 3.06, calculados de igual manera con la regla de Edwards.

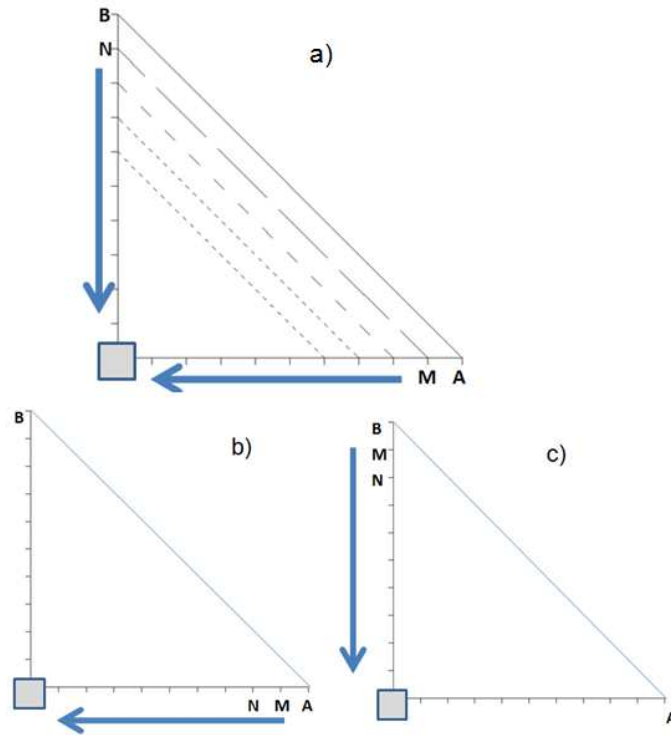


Figura 3.05 Representación de los pasos para tomar las lecturas del arreglo en esquina.

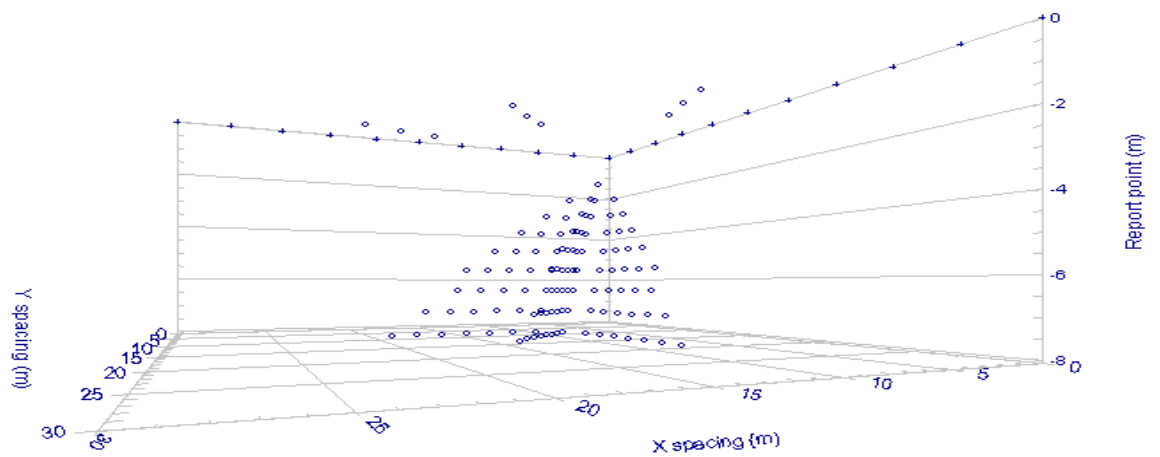


Figura 3.06 Puntos de atribución del arreglo denominado “Esquina” visualizado con el software *Electre Pro*.

### 3.3 Modelo sintético.

Se realizó un modelo sintético con el software *EarthImager 3D (AGI)*, para comprobar la efectividad y confiabilidad de los arreglos “L” y en “esquina”. Se colocó un cuerpo con dimensiones de 5x5x2 unidades de rejilla con resistividad de 1000 ohm-m en un medio circundante de resistividad de 100 ohm-m. El cuerpo fue colocado en las posiciones (15, 15, 3) (figura 3.07), (5, 5, 3) (figura 3.11), (1, 1, 3) (figura 3.15) unidades de rejilla.

Al ubicar el cuerpo hacia el centro (figura 3.07), el arreglo en L tiene la sensibilidad para dar una respuesta al cuerpo (figura 3.08), al combinarlo con el arreglo en esquina tiene una mejor resolución del cuerpo (figura 3.09), pero el arreglo de perfiles perpendiculares en 2D, no logra detectar a dicho cuerpo (figura 3.10). Conforme se aproxima el cuerpo hacia la esquina (figura 3.11) y exactamente en la esquina (figura 3.15), se observa que el arreglo en L tiene muy buena resolución del cuerpo (figuras 3.12 y 3.16); al combinarlo con el arreglo en esquina la resolución es muy buena, así como la ubicación del cuerpo (figuras 3.13 y 3.17), mientras que el arreglo de perfiles perpendiculares en 2D tiene dificultad para detectar el cuerpo aún estando completamente en la esquina (figuras 3.14 y 3.18)

El ejemplo sintético muestra, efectivamente, que un cuerpo puede ser detectado aunque ninguna línea lo cruce, sin embargo, si las dimensiones del cuerpo son pequeñas con respecto a las dimensiones de los arreglos o si éste está en la superficie, hacia el centro del cubo, es posible que no sea detectado o que sus dimensiones encontradas, al invertir los datos de resistividad aparente, no sean correctos. Este hecho ciertamente está relacionado a los diferentes factores que intervienen en la detección de un cuerpo, como es: acoplamiento del dispositivo electródico con el cuerpo, dimensiones físicas del cuerpo con respecto a las dimensiones del dispositivo y en última instancia el programa de inversión empleado, ya que estos últimos consideran, generalmente, una rejilla cuadrada con una distribución de los puntos de atribución regular, que en el caso de los arreglos propuestos los puntos de atribución pueden quedar en una forma compleja.

# Synthetic Resistivity Model

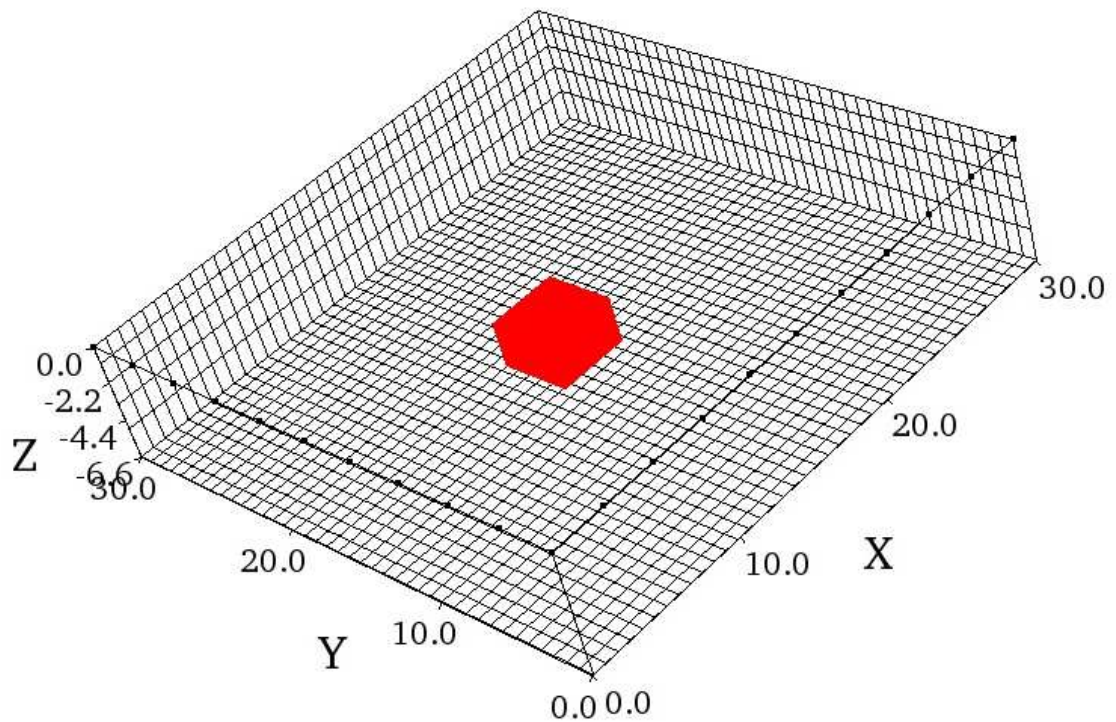
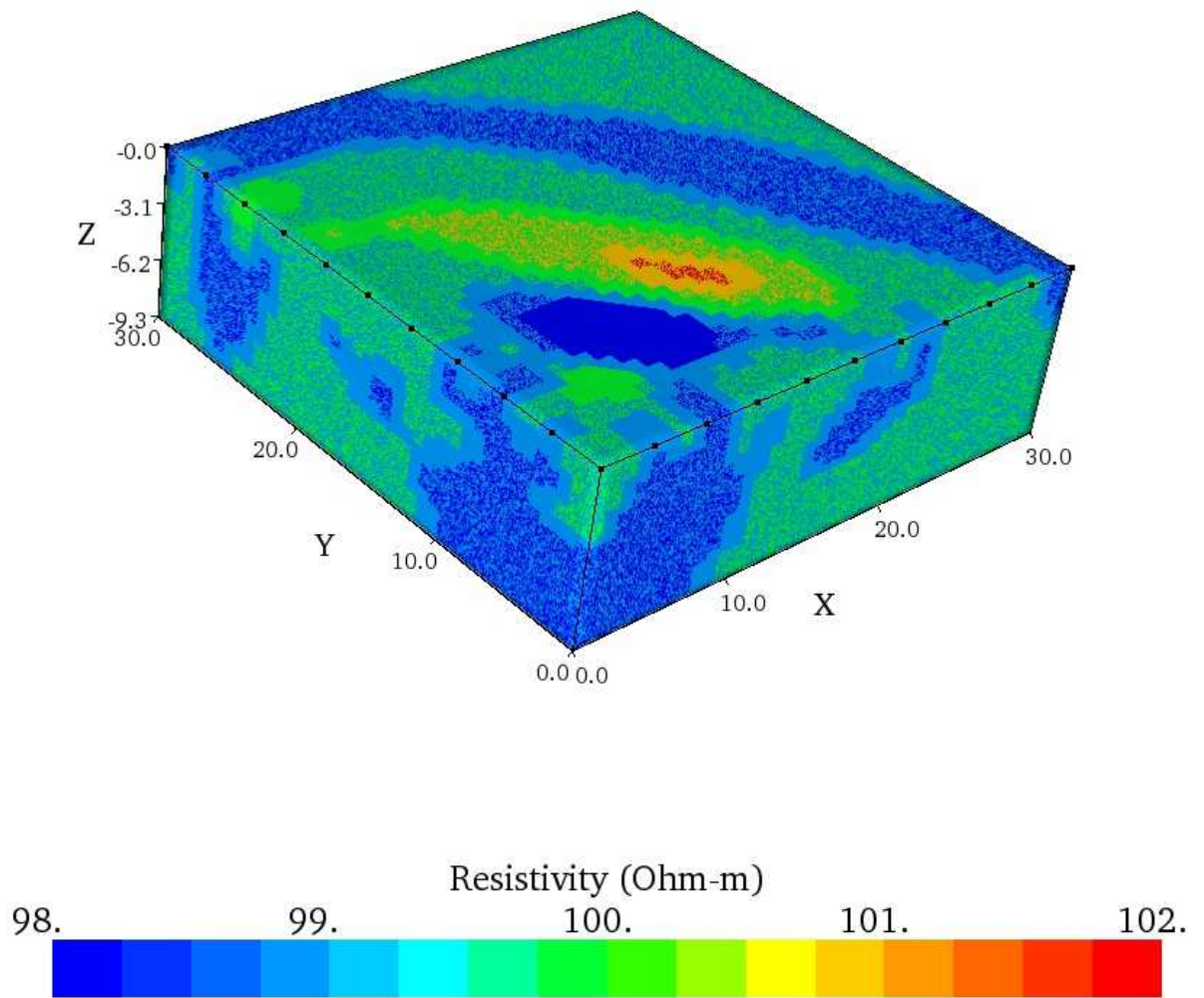


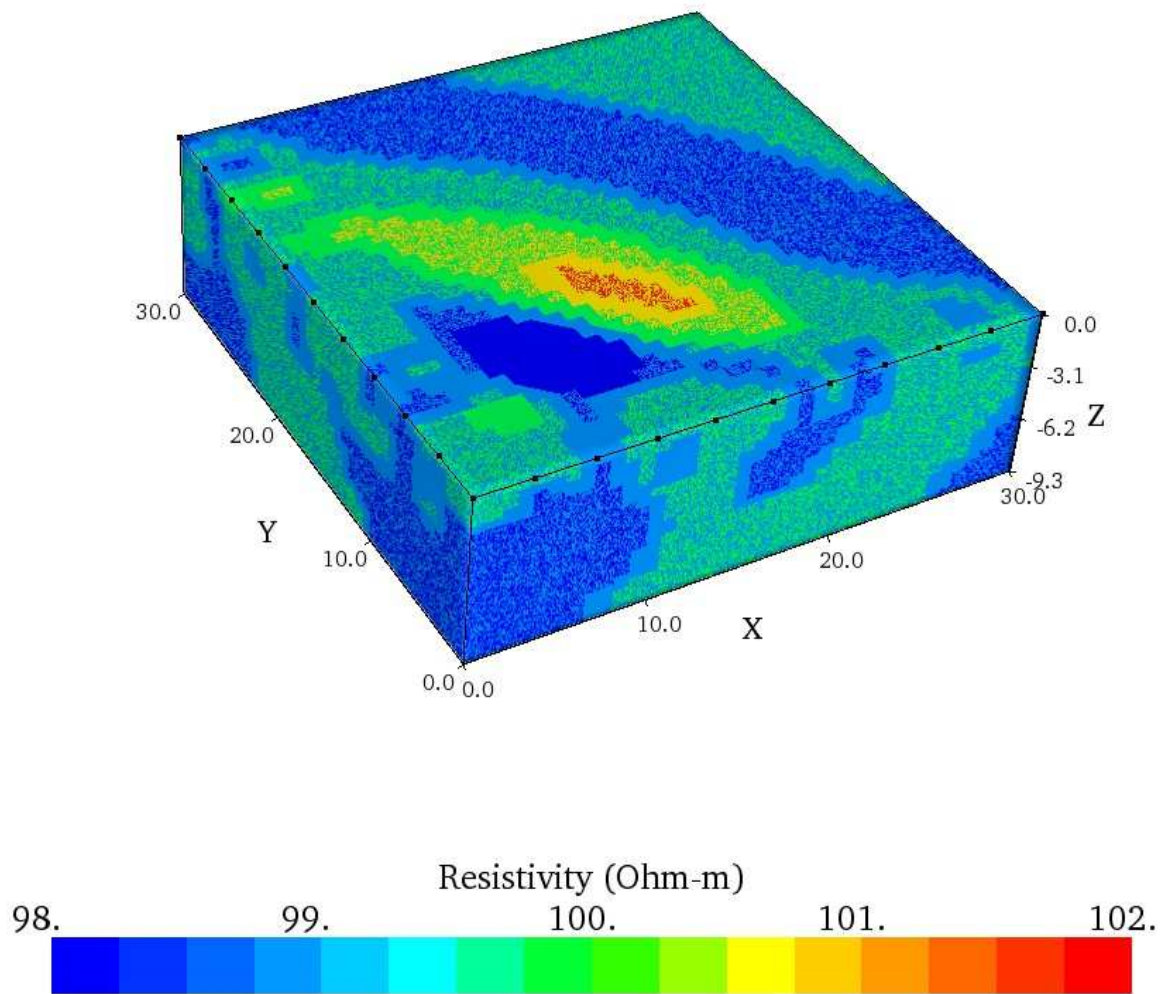
Figura 3.07). Modelado sintético de un cuerpo de dimensiones (5, 5, 3) unidades de rejilla.  
Ubicación (15, 15, 3)



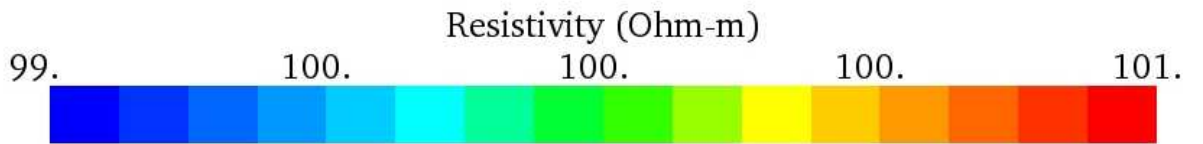
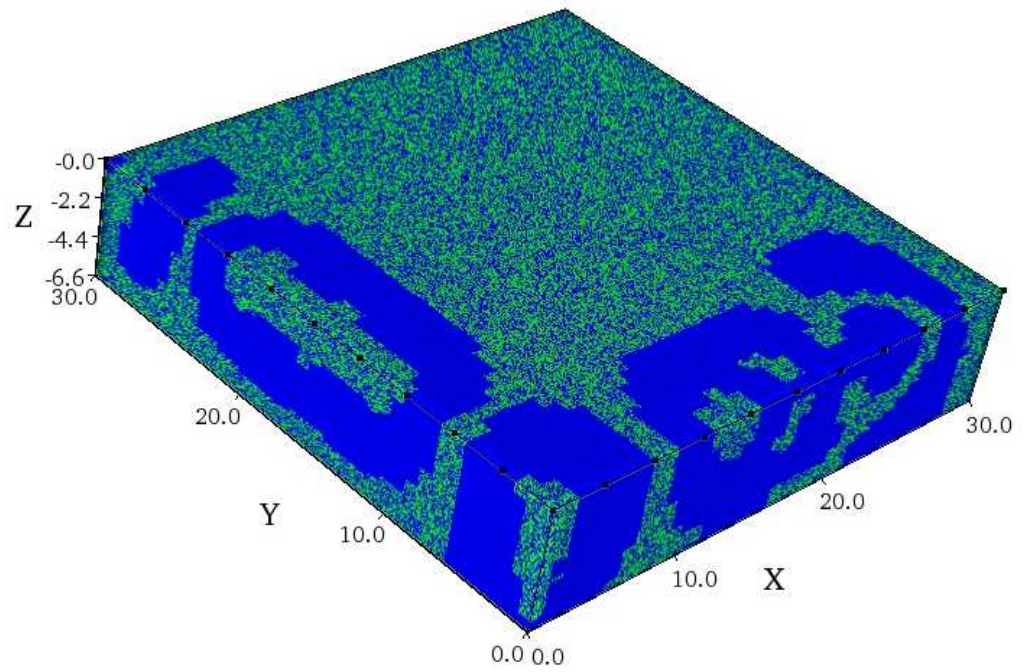


**Figura 3.08) Inversión de los datos del Arreglo en “L” junto con el arreglo en “Esquina” para Modelado sintético de un cuerpo de dimensiones (5, 5, 3) unidades de rejilla.**

**Ubicación (15, 15, 3)**



**Figura3.09 Inversión de los datos con el Arreglo en “L” para Modelado sintético de un cuerpo de dimensiones (5, 5, 3) unidades de rejilla. Ubicación (15, 15, 3)**



**Figura 3.10 Inversión de los datos con Perfiles en 2D perpendiculares;  
 Modelado sintético de un cuerpo de dimensiones (5, 5, 3) unidades de rejilla.  
 Ubicación (15, 15, 3)**

# Synthetic Resistivity Model

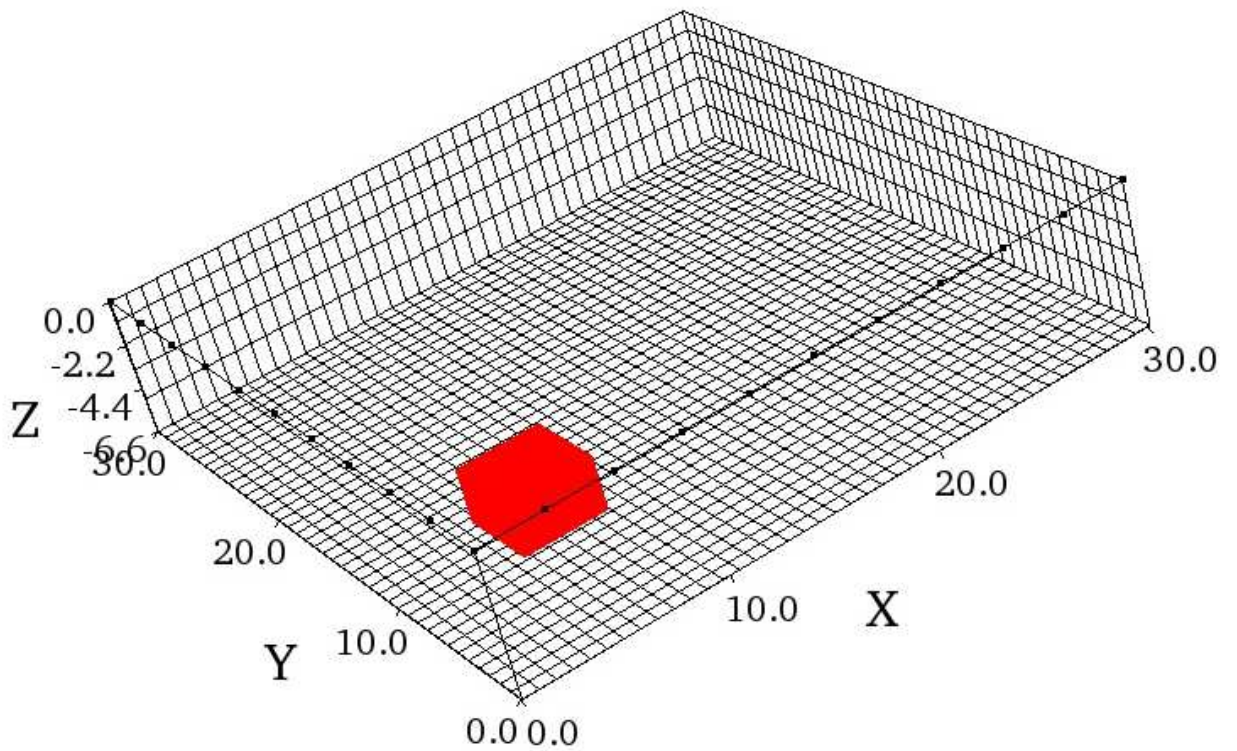


Figura 3.11 Modelado sintético de un cuerpo de dimensiones (5, 5, 3) unidades de rejilla. a) ubicación (5, 5, 3) unidades de rejilla.

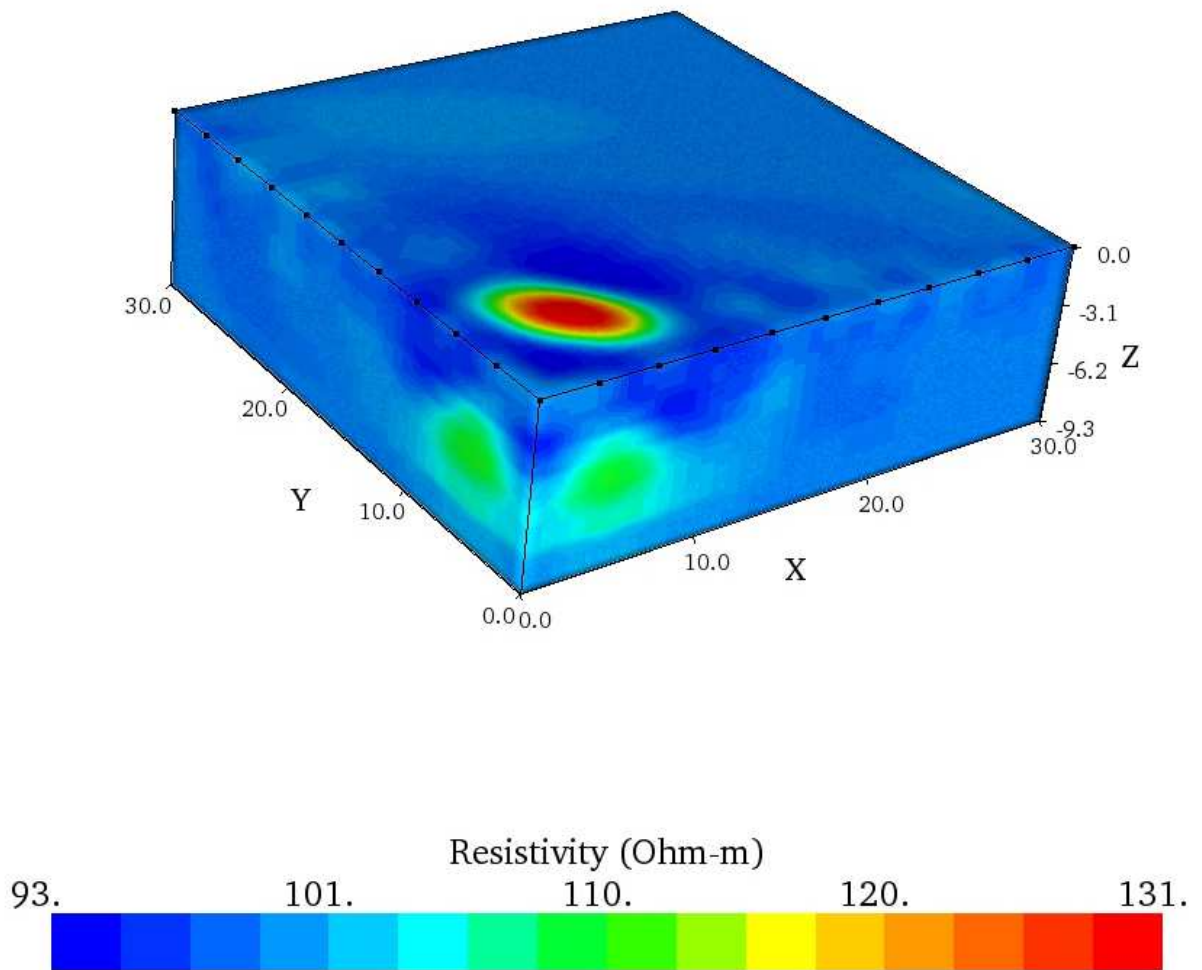


Figura 3.12 Inversión de los datos con el Arreglo “L” junto con el arreglo en “Esquina”, para Modelado sintético de un cuerpo de dimensiones (5, 5, 3) unidades de rejilla. a) ubicación (5, 5, 3) unidades de rejilla.



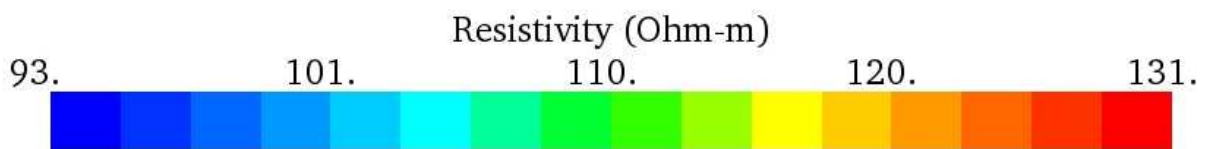
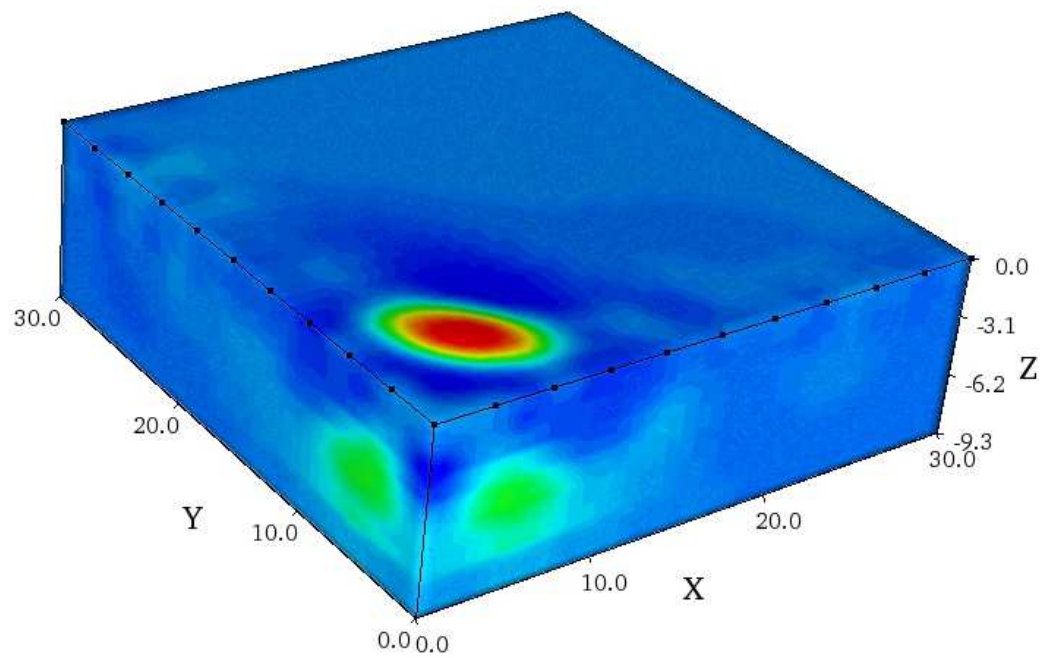
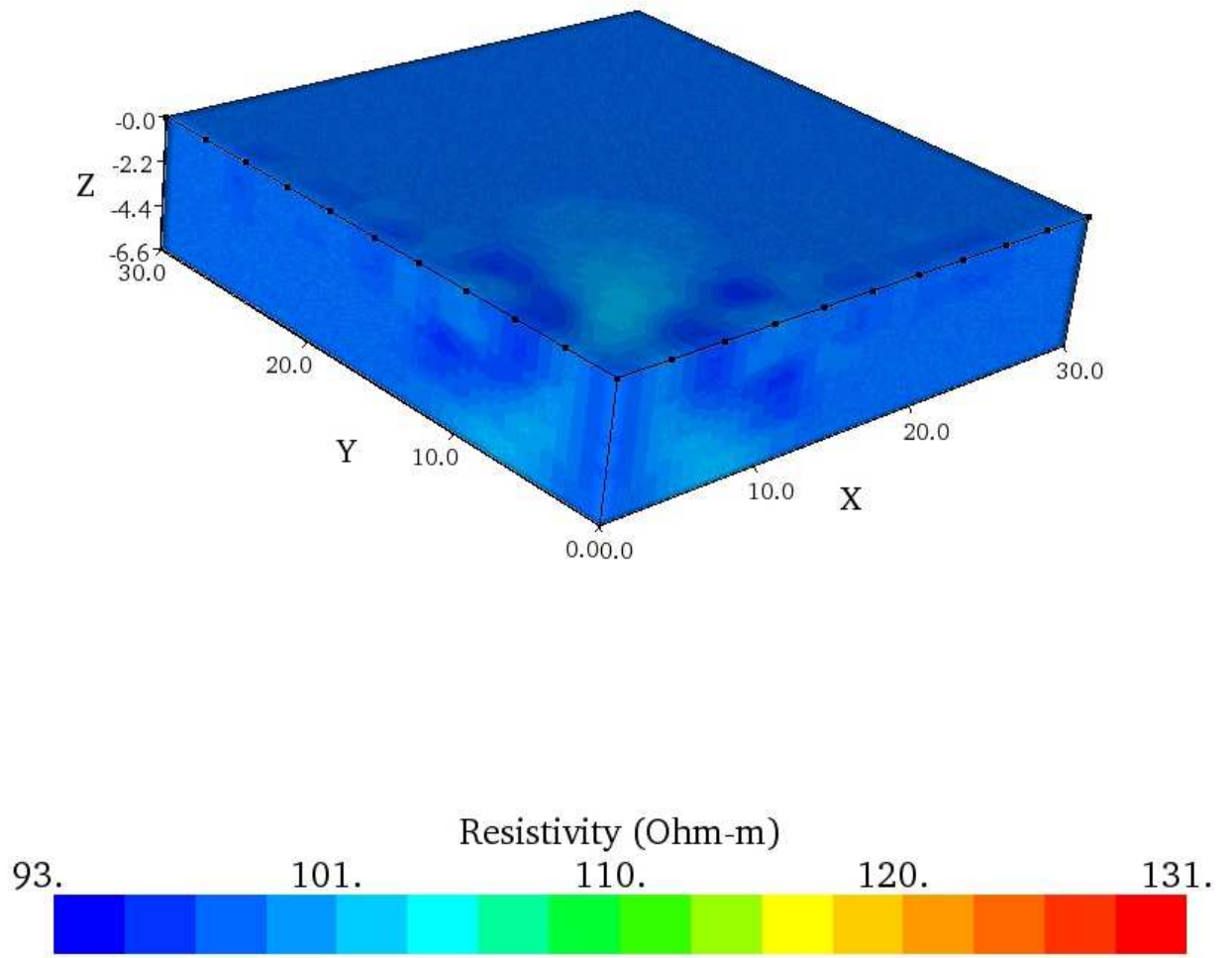


Figura 3.13 Inversión de los datos con el Arreglo en "L", para Modelado sintético de un cuerpo de dimensiones (5, 5, 3) unidades de rejilla. a) ubicación (5, 5, 3) unidades de rejilla.



**Figura 3.14 Inversión de los datos con Perfiles en 2D perpendiculares; para Modelado sintético de un cuerpo de dimensiones (5, 5, 3) unidades de rejilla. a) ubicación (5, 5, 3) unidades de rejilla.**

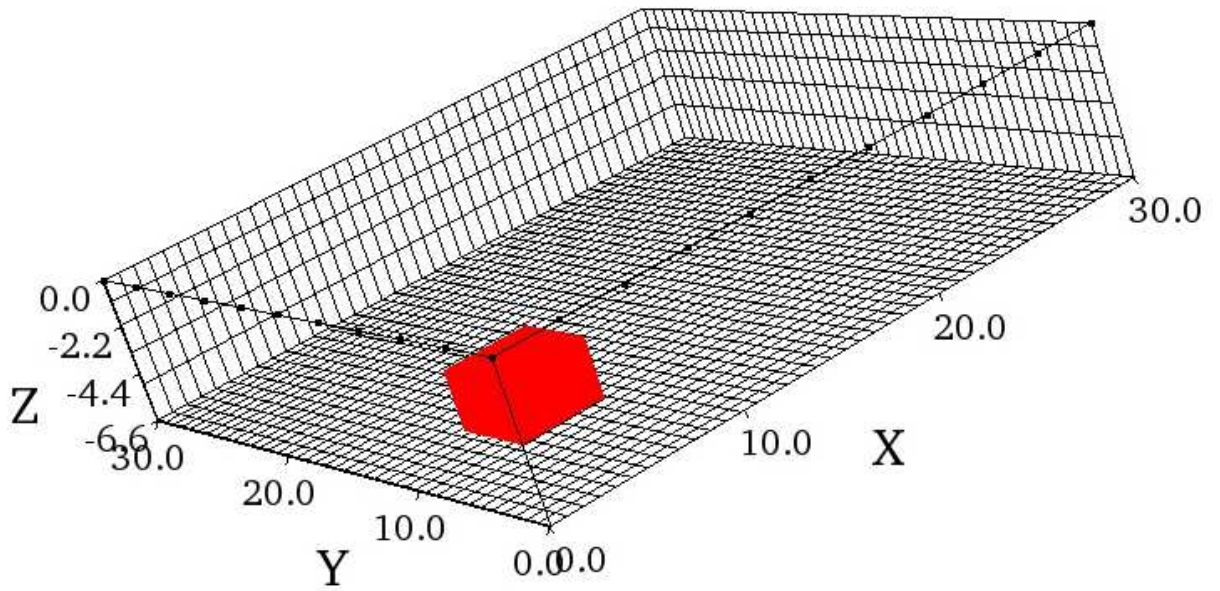
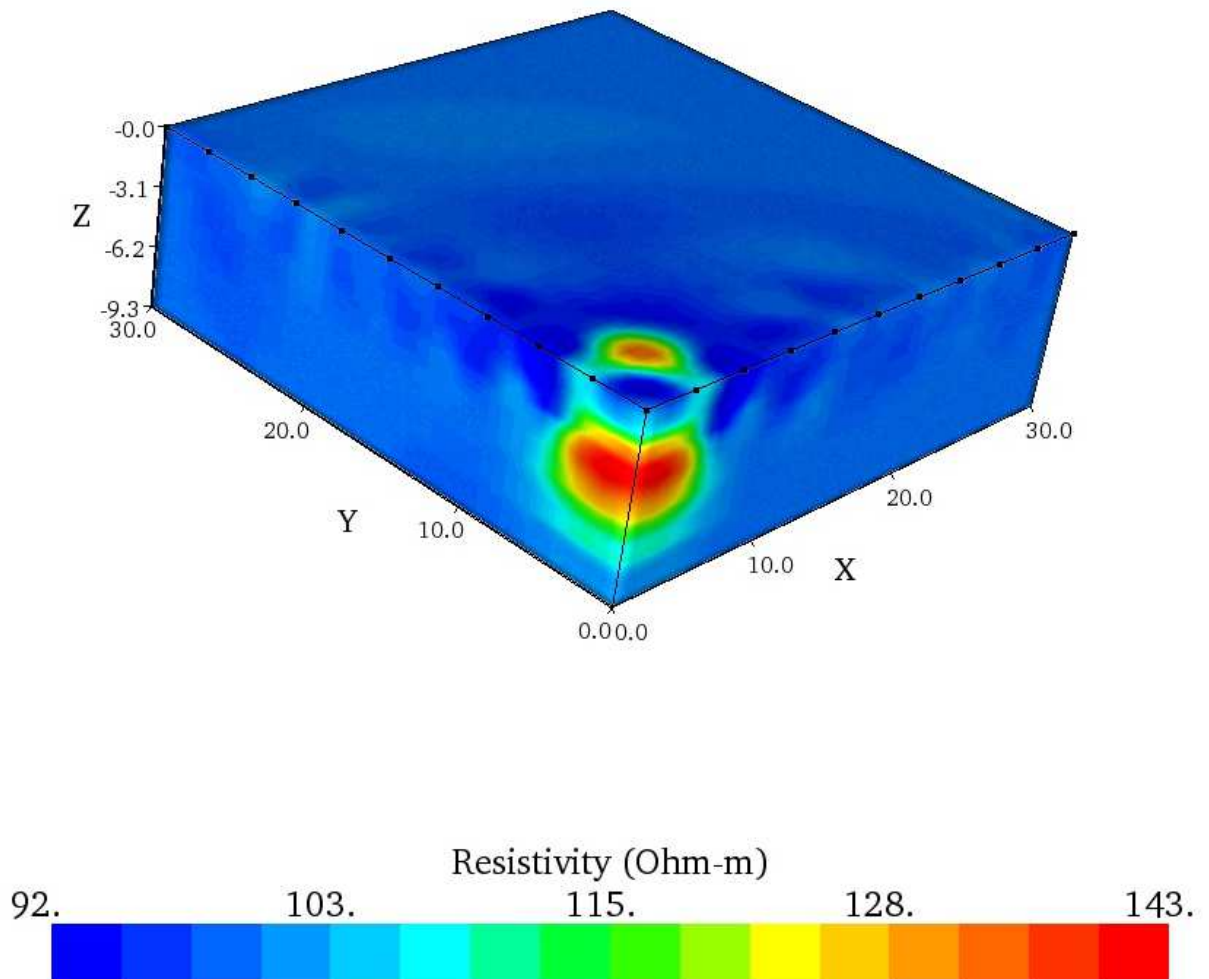


Figura 3.15 Modelado sintético de un cuerpo de dimensiones (5, 5, 3) unidades de rejilla. a) ubicación (1, 1, 3) unidades de rejilla





**Figura 3.16** Inversión de los datos con el Arreglo “L” junto con el arreglo en “Esquina” para Modelado sintético de un cuerpo de dimensiones (5, 5, 3) unidades de rejilla. a) ubicación (1, 1, 3) unidades de rejilla.

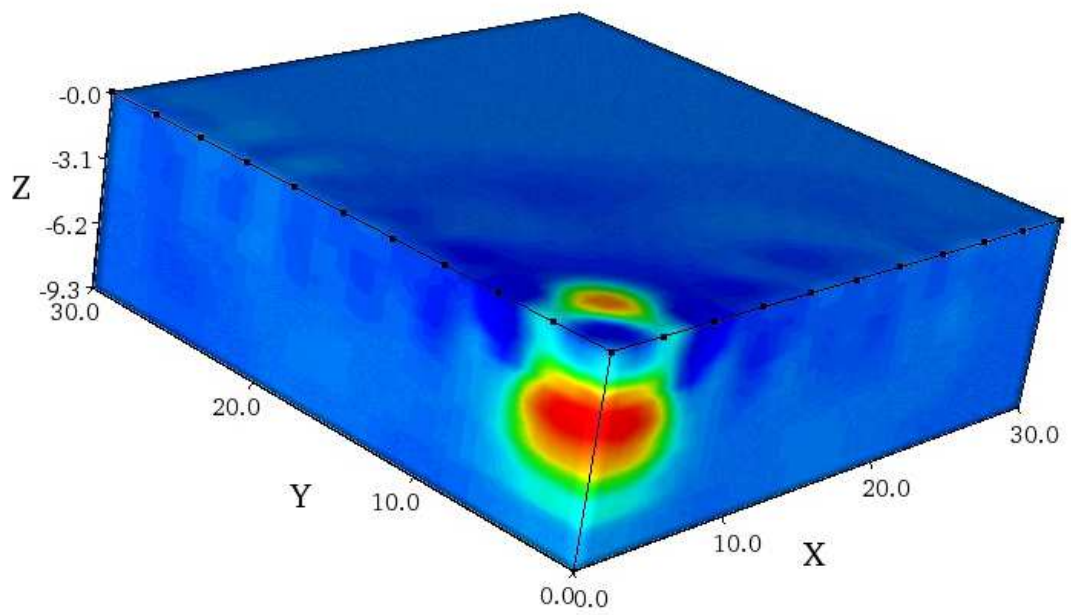
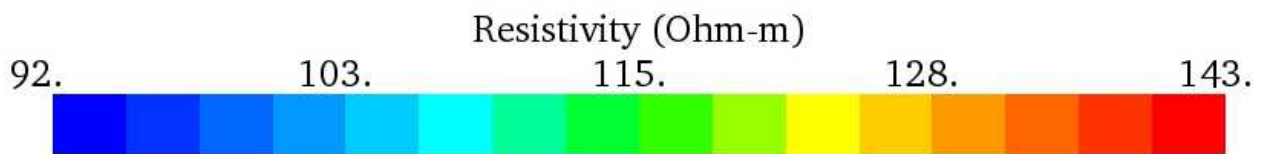
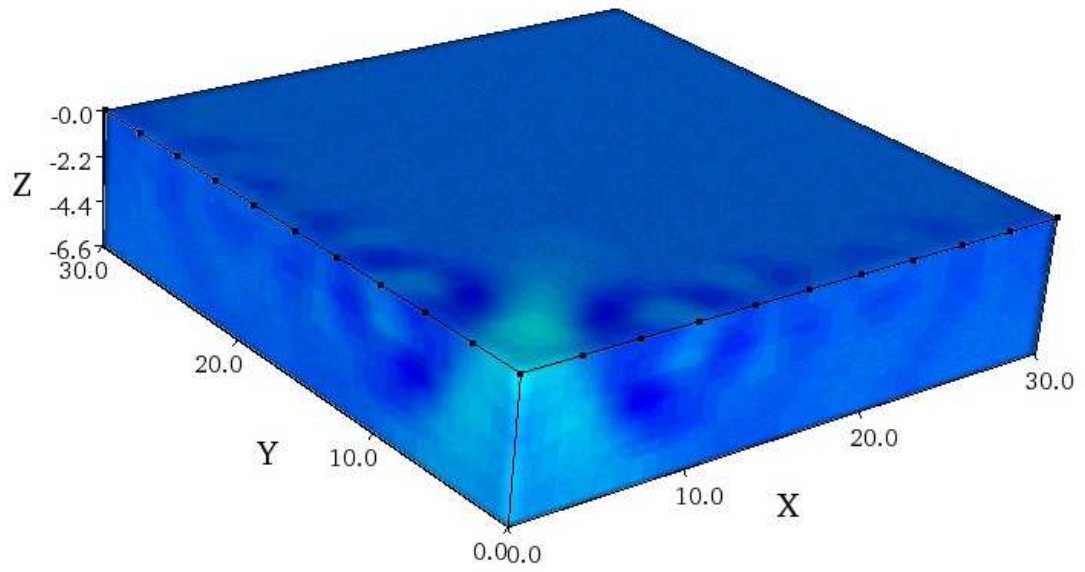


Figura 3.17 Inversión de los datos con el Arreglo en "L" para Modelado sintético de un cuerpo de dimensiones (5, 5, 3) unidades de rejilla. a) ubicación (1, 1, 3) unidades de rejilla.



**Figura 3.18 Inversión de los datos con Perfiles en 2D perpendiculares para Modelado sintético de un cuerpo de dimensiones (5, 5, 3) unidades de rejilla. a) ubicación (1, 1, 3) unidades de rejilla.**

### 3.4 Lugar de pruebas de campo: CELE.

Se realizaron pruebas de campo para comprobar la efectividad de los arreglos presentados en este trabajo, el primero se presenta a continuación:

El jardín ubicado en el Centro de Enseñanza de Lenguas Extranjeras (CELE) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) contiene varios árboles, tomas de agua y cimientos de concreto que sirven de base para los botes de basura. Sobre la geología del lugar se sabe que la base es de basalto proveniente de la erupción del volcán Xitle, pero el terreno fue modificado durante la construcción de la ciudad universitaria rellenándose con suelo y quedando completamente plano, rodeado por edificios al sur, este y oeste; al norte por un estacionamiento.

En este lugar se efectuaron las pruebas para probar “la técnica en L y en esquina para tomografía eléctrica en 3D comparadas con la técnica de perfiles en paralelos.



Fotografía 1 Sitio de pruebas, jardín del CELE

#### ***Principios de la metodología.***

Para los tres tipos de toma de datos, se empleó un equipo *Syscal Pro* (Iris Instruments) con 48 electrodos, dos carretes de cables *multi-core* con 24 canales cada uno y 2 baterías de 12 V.

Se colocaron 40 electrodos (fotografía 2 conexión de los electrodos) con separación de 3m formando un cuadrado de 30m x 30m para hacer las mediciones con el arreglo dipolo-dipolo de cuatro “L” y cuatro “Esquinas” para obtener los datos necesarios para formar un cubo en 3D; mismo que será comparado con un cubo conformado por los datos tomados con 8 perfiles paralelos con longitud de 30m cada uno (4 líneas en la dirección “x” y 4 en la dirección “y”) separados cada 9m los primeros 3 perfiles y un cuarto a 12m lo cual pretende cuidar las recomendaciones de Aizebeokhai (2009) mencionadas en el capítulo anterior, es decir la separación entre líneas es menor a 4 veces la separación electródica (figura 3.19). Los arreglos empleados son: dipolo-dipolo y dipolo-dipolo

ecuatorial y se requirió de 72 electrodos. La toma de datos duró 8 horas completando las 3 técnicas.

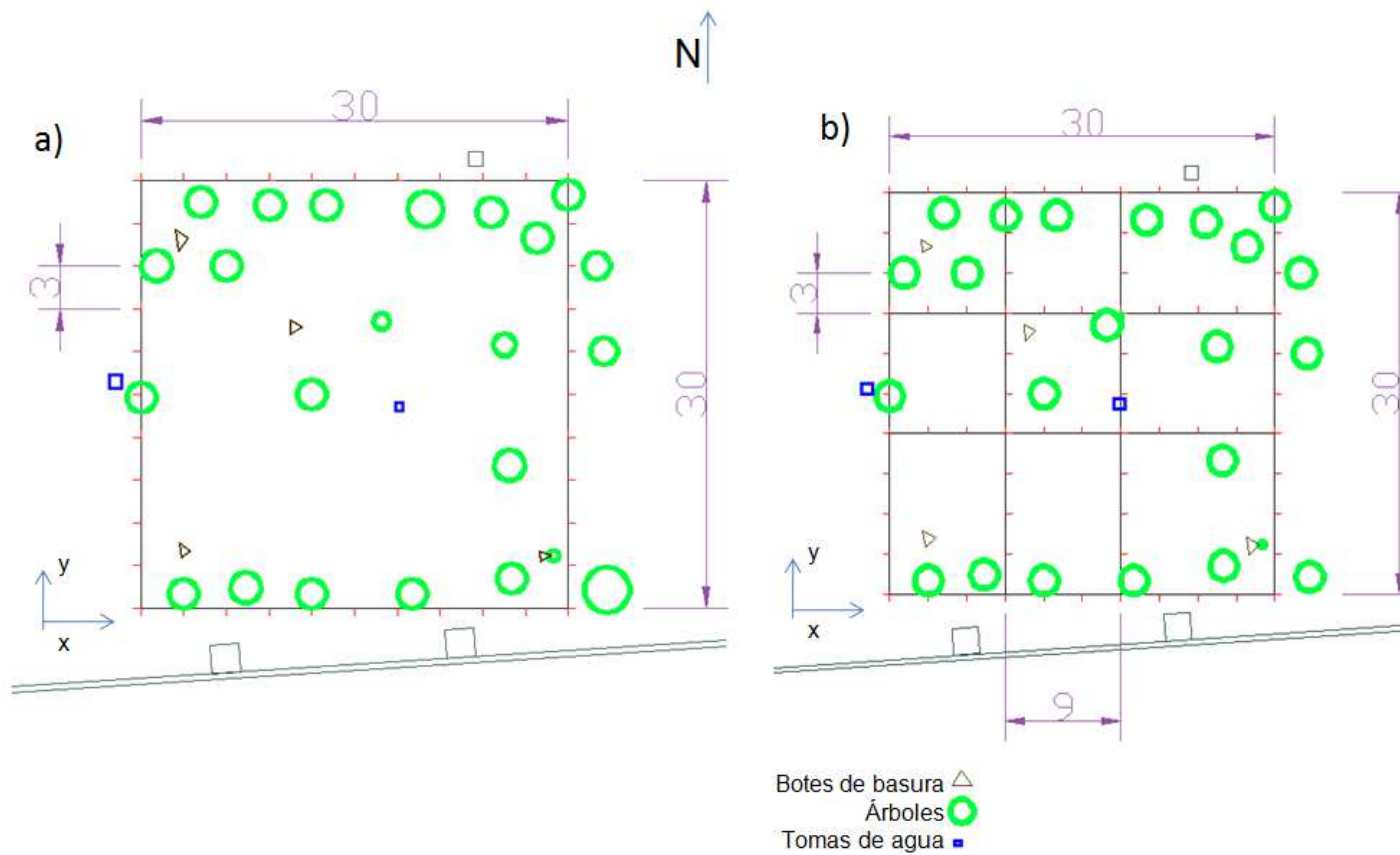


**Fotografía 2 Conexión de un electrodo**

En el anexo A se propone una manera de llevar la bitacora de campo con los arreglos propuestos dado que es muy importante conservar el orden en la toma de los datos para evitar errores.

En el croquis de la figura 3.19 en donde se presenta tanto la distribución de los electrodos, como los objetos presentes en el lugar de estudio, tales como son árboles (representados por círculos verdes); los botes de basura (triángulos cafés); y tomas de agua (cuadrados azules)

En la figura 3.20 se muestra una imagen satelital de la zona.



**Figura 3.19 a) Croquis de ubicación de los electrodos para un cubo de 30x30 m con arreglo en “L.” b) Croquis de ubicación de los electrodos con líneas paralelas. En ambos croquis la separación electródica es de 3 m. Los círculos verdes representan los árboles, los puntos azules las tomas de agua y los puntos marrón los botes de basura. En la parte de abajo se representa con dos líneas grises una barda construida con basalto, tomado de la zona.**





Figura 3.20 Imagen satelital del CELE. Los círculos encierran algunas copas de los árboles

### ***Interpretación y Resultados de las pruebas en el CELE.***

La inversión de los datos con los datos de los arreglos en L y en esquina consistió en 15 iteraciones con un error del 5.8%  $L2= 1.3$  para lograr este resultado fue necesario eliminar el 3% de los datos ruidosos. Por otro lado la inversión de los datos de perfiles en paralelo fue con 15 iteraciones con un RMS del 8.2% y  $L2=2.7$ . Al comparar ambos cubos se puede apreciar que tiene resultados semejantes. En la figura 3.21 se muestran vistas del plano superior donde se puede observar los objetos que resaltan en ambas inversiones; se han enumerado estos objetos para poderlos comparar con mayor facilidad.

Por la ubicación se deduce que los números 1, 3 al 8; 10 al 13 corresponden en ambos casos a raíces de los árboles.

El número 2 de ambas figuras probablemente sea la cimentación de un bote de basura que se encuentra en la zona identificado en la figura 3.19 (a y b) como un triángulo.

Los números 14 son un cuerpo encontrado, pero que no se puede asociar con algún árbol, tubería o cimiento, pero por las características del lugar de estudio se asocia a una roca basáltica enterrada.

El número 15 puede ser parte de las raíces de un árbol o bien de la cimentación de un bote que está muy próximo.

Por otro lado, existen diferencias entre ambos estudios como el tamaño y ubicación desfasada de los objetos 1, 2, 3 de ambas figuras a y b.

Las raíces de los árboles 4, 5, 6 fueron mejor definidas con el arreglo en L y esquina, mientras que el arreglo en paralelo los presenta más pequeños y con menor resistividad.

El objeto 16 en el arreglo con líneas paralelas se observa como 3 cuerpos diferentes y el arreglo en L y esquina lo presenta como un solo cuerpo, pueden ser asociados a basaltos.

El número 9 en la figura 3.21b corresponde a una toma de agua, que no fue detectada en la figura 3.21a. Por el contrario el arreglo en L y esquina se detectó un cuerpo (17) que no fue identificado en las líneas paralelas, o bien, pudiera ser que el cuerpo 8 y 17 de la figura 3.21 sea un mismo objeto o que sean 2.

La figura 3.22 se presentan los cubos desde el suroeste y en la figura 3.23 se presentan los cubos desde el suroeste pero con opacidad. En donde puede verse diferencias notables en cuanto a la distribución de las resistividades en cuanto a dimensiones de los cuerpos; por ejemplo el cuerpo 3 se nota de mayor tamaño en el arreglo L y esquina (figura 3.23) y de menor tamaño en el arreglo de líneas paralelas (figura 3.23b) Otro ejemplo notable es el cuerpo 16 en el cubo del arreglo L y esquina (figura 3.23 a) se observa vertical, mientras que en las líneas en paralelo (figura 3.23 b) se puede apreciar el cuerpo 9 el cual no se puede apreciar en el arreglo L y en esquina. Esto puede deberse a que se encuentra hacia el centro y es superficial.



Esto puede interpretarse como que el arreglo en L y en esquina notiene mucha resolución hacia el centro del cubo.

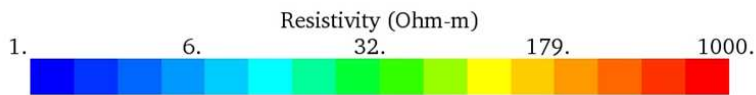
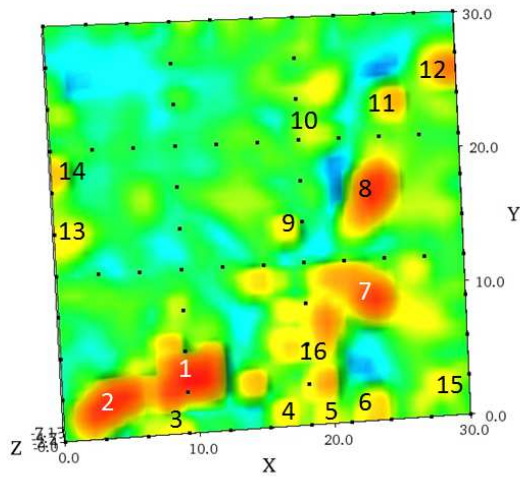
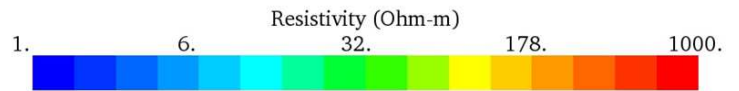
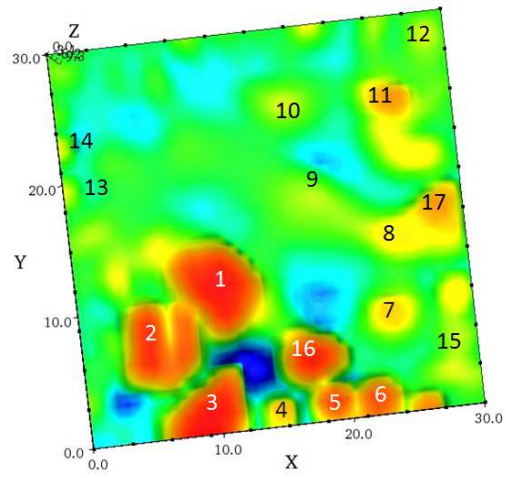
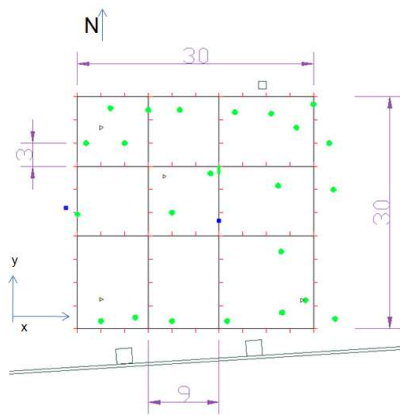


Figura 3.21 vista superior de los cubos en 3D. a) cubo de datos en L y en esquina; b) cubo de datos de perfiles en paralelo.

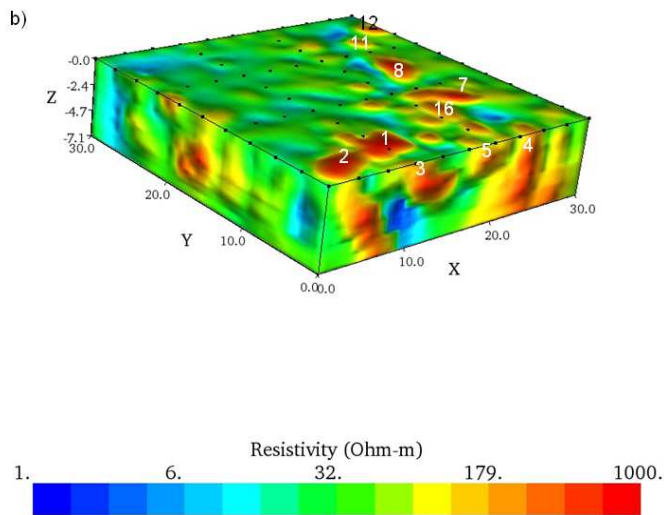
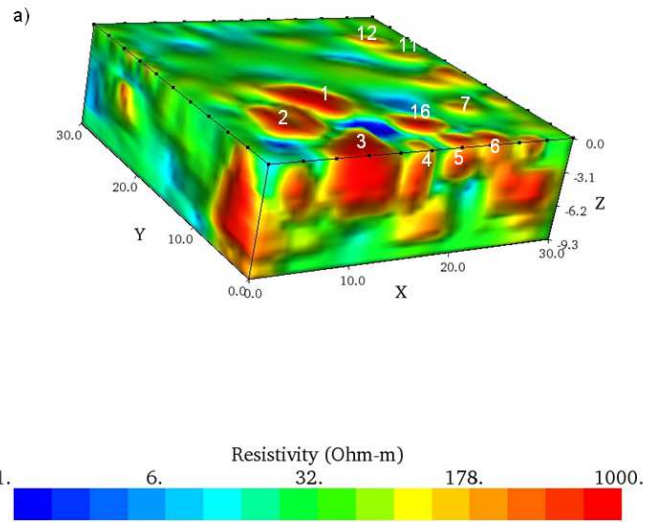
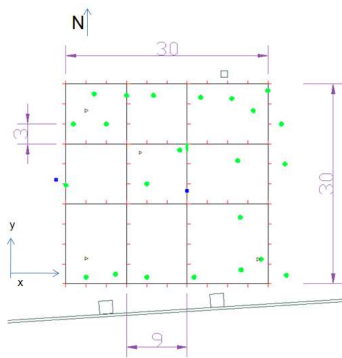


Figura 3.22 vista desde el suroeste a) cubo de datos de arreglos en L y esquina; b) cubo con datos de perfiles en paralelo.

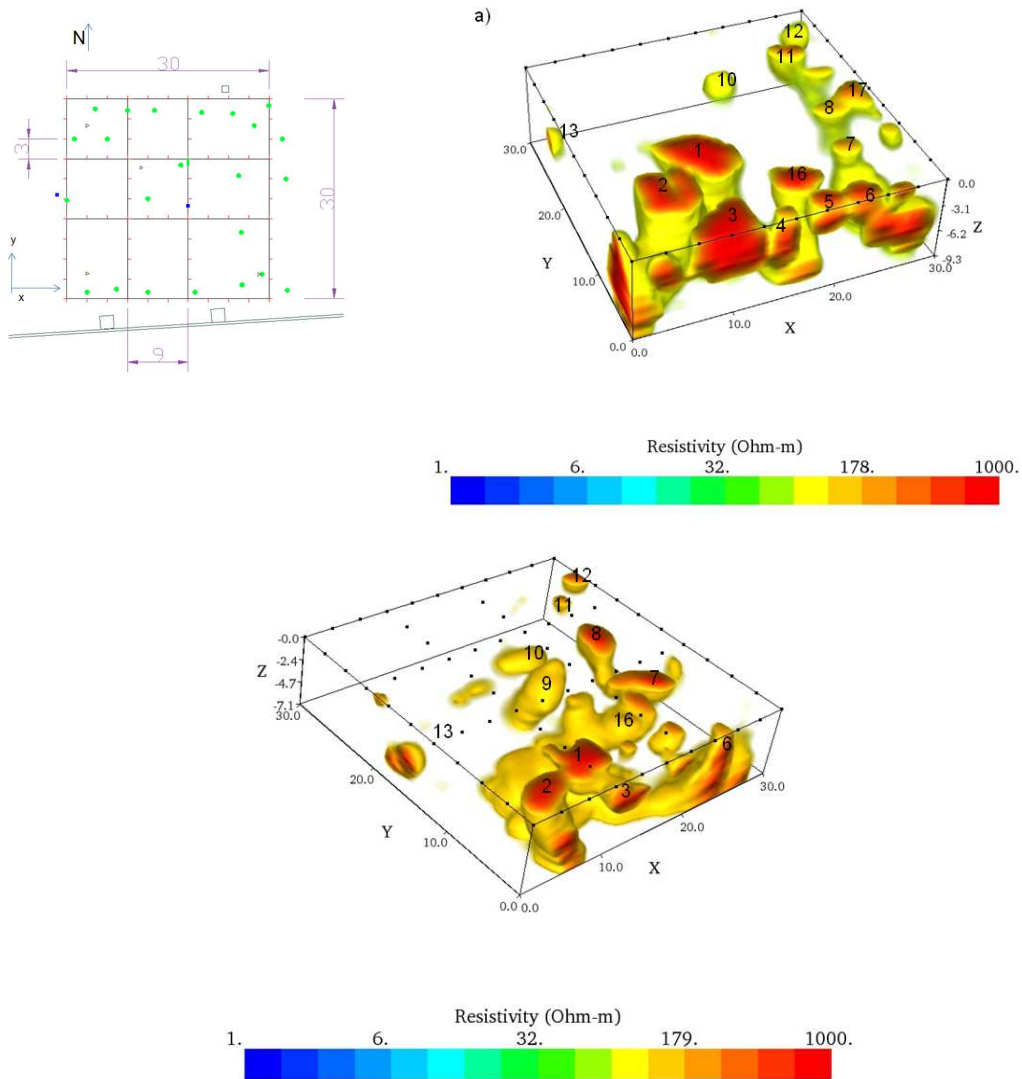


Figura 3.23 Vista desde el suroeste con opacidad a) cubo de arreglo L y en Esquina b) cubo de arreglo en perfiles en paralelo

## **Capítulo 4 Tomografía eléctrica en 3D aplicado en ciudades**

En este capítulo se presentan 2 proyectos que fueron los primeros en realizarse en ciudad con las técnicas presentadas; cumpliendo la finalidad de esquivar los obstáculos (casas y la Catedral de Morelia) para lo cual fueron diseñadas.

### **4.1 Proyecto: Delegación Álvaro Obregón**

#### ***Objetivo.***

Caracterización de la mina a través de la obtención de información con el arreglo en L rodeando las casas.

#### ***Geología.***

La zona de estudio se encuentra ubicada en la Formación Tarango, la cual se formó en el Mioceno Tardío hasta el Pleistoceno. Bryan (1948) la definió como una secuencia de 200 a 300 metros de tobas aglomeradas, grava volcánica y capas delgadas de pómez depositadas en las montañas que limitan la cuenca de México. Por su parte Mooser (1962) asignó a la formación Tarango que descansa sobre rocas volcánicas del Terciario Medio y está cubierta por lavas recientes de la formación Chichinautzin que se diferencia en 2 partes: Inferior y Superior basándose en que la segunda discordante está constituida principalmente por gruesos depósitos de ceniza y pómez.

La edad de la zona fue determinada por Mooser (1962) tomando en cuenta 3 hechos importantes: 1). La Formación Las Cruces descansa con fuerte discordancia erosional sobre rocas que son de edades comprendidas entre el Oligoceno Tardío y el Mioceno Medio. 2). La base de la vertiente occidental de la Sierra de las Cruces está cubierta por los depósitos Plio-Pleistocénicos de la Formación Tarango. 3) Hacia el norte, los derrames más recientes de esta formación se encuentran interdigitados con la Formación Tarango. Por estas circunstancias la Formación Las Cruces puede representar el lapso de tiempo comprendido entre el Mioceno Medio o Tardío hasta el Plioceno Tardío o posiblemente hasta el Pleistoceno Temprano.

#### ***Antecedentes.***

La delegación Álvaro Obregón fue una zona minera de extracción de materiales de construcción para la ciudad de México. Para el año de 1970 las minas fueron abandonadas debido a que la población comenzó a crecer de una manera desmedida sin control o planeación urbana, de modo que las calles quedaron muy estrechas, con escaleras e incluso sin salida. Los pobladores de esta delegación taparon las entradas a las minas.

En un principio las casas eran de un solo piso, pero las necesidades de espacio por la sobrepoblación obligaron a convertir casas en edificios de 3, 4 y hasta de 5 pisos, aumentando el riesgo de colapso de las minas por el aumento de peso en la superficie aunado a la migración del techo de la mina hacia la superficie, provocado por la erosión causada por el agua de lluvias, fugas en el drenaje, a la vibración del paso de los camiones pesados que transportan gas, refresco o aquellos que distribuyen alimentos en la zona.

La delegación Álvaro Obregón hizo un convenio con la Facultad de Ingeniería con la finalidad de localizar las minas y así poder rellenarlas antes de que sufrieran un colapso.

Estos estudios fueron realizados en primer lugar con la técnica de tomografía eléctrica en 2-D obteniendo buenos resultados y encontrando una de las minas más grande de los últimos 10 años (Tejero, 2010), sin embargo debido a que se necesitaba mayor resolución de la zona, la incertidumbre de que la ubicación de las minas fuese debajo de las casas y el método lo reflejara, pero no pudiese determinar con precisión, era necesario implementar una técnica que permitiera encontrar información por debajo de las casas.

El 24 de octubre de 2009 ocurrió un hundimiento en la calle Ladera número 5A, colonia Barrio Norte en la delegación Álvaro Obregón. Las dimensiones fueron de ocho metros de diámetro por 12 metros de profundidad.

Los habitantes de esta zona están conscientes de la existencia de las minas e incluso saben en donde se encontraban las entradas, sin embargo, las taparon y construyeron sus casas encima. Muestra de esto son las declaraciones hechas a la periodista Johana Robles del periódico "El Universal" publicado el 26 de octubre de 2009:

"Uno está consciente de que hay minas, pero las autoridades también tienen conocimiento de eso; se les avisa y no hacen nada."

Javier Dávila. Vecino del lugar.

El secretario de Protección civil del D.F. Elías Miguel Moreno Brizuela declaró para el periódico "La Jornada" que se pensaba que la causa era por una fuga de agua pero se dieron cuenta que se trataba de una mina que no se encontraba incluida en el atlas de riesgos de la ciudad.

### ***Metodología.***

Se diseñó un arreglo en L, como se explicó en el capítulo anterior, con 39 electrodos, la separación entre ellos fue de 3 m; la disposición se muestra en la figura 4.01. Se utilizaron dos carretes de cables inteligentes con separación entre sensores de 5 m, el equipo utilizado fue un SyscalPro48 de última generación (Automatic Earth Resistivity and IP System) fabricado por Iris Instruments con sede en Orleáns, Francia. Y fue necesario utilizar algunos topes de protección para los cables por estar atravesando calles, incluso

se cerró el tránsito en la calle de Benito Juárez. Además se realizaron dos tomografías eléctricas en 2D en la misma posición que con el arreglo en L, para realizar un pseudo 3D y compararlos.

El origen de las coordenadas se ubicó en la esquina de la calle Ladera y calle Benito Juárez coincidiendo la primera con el eje X y la segunda con el eje Y

Analizaremos los casos de 2D y 3D por separado, en ambos casos la disposición eléctrica fue la misma y se muestra en la figura 4.01a) La inversión de los datos fue realizada con el software Earthimage 3D de AGI con sede en Austin, Texas.

Posteriormente se igualaran las escalas de colores para poder comparar las imágenes, esto no las altera en cuanto a propiedades, pero nos permite visualizar la gama detectada por cada arreglo.





Figura 4.01 Imagen satelital de la zona. Posición de los electrodos.



## **Resultados.**

Veamos primero el arreglo en 2D colocado para pseudo 3D.

En la figura 4.02 se muestra la inversión de datos de dos tomografías eléctricas en 2D colocadas en forma perpendicular para ser invertidas como pseudo 3D y de ahora en adelante se le denominará de esta forma. La escala de colores nos indica que la resistividad se encuentra en el rango de 23 a 113 ohm/m.

Con líneas punteadas blancas se ha separado la zona con datos de la zona sin datos. El círculo blanco muestra la zona de derrumbe y relleno a 34 m del origen en dirección x aproximadamente. Hacia el metro 66 en dirección x se encuentra otra anomalía sin llegar a la máxima resistividad, pero que según vecinos es una zona donde han rellenado anteriormente.

En el eje Y aparecen varias zonas con alta resistividad sin llegar a la resistividad máxima, pueden ser un material resistivo como el asfalto o algún relleno previo, pero no puede suponerse alguna zona de debilidad ya que no existen evidencias superficiales como hundimientos o grietas en las banquetas.

En el caso del arreglo en L para 3D

En la figura 4.03 se muestra la inversión de datos del arreglo en L para tomografía eléctrica en 3D. La escala de colores muestra el rango de resistividad entre 14 a 610 ohm/m.

Las líneas punteadas blancas en diagonal delimitan la zona con datos de la que no tiene datos. Se observa una anomalía en la dirección X en 34 m aproximadamente, y otras 2 de importancia en los metros 66 y 95 aproximadamente que podrían coincidir con zonas de relleno previas. En la gama de resistividad correspondiente a la resistividad 92 ohm/m se observa una estructura hacia el centro del triángulo formado con la diagonal blanca.

Se marcan 4 anomalías en la dirección Y sin llegar a la máxima resistividad.

# 2D Álvaro Obregón

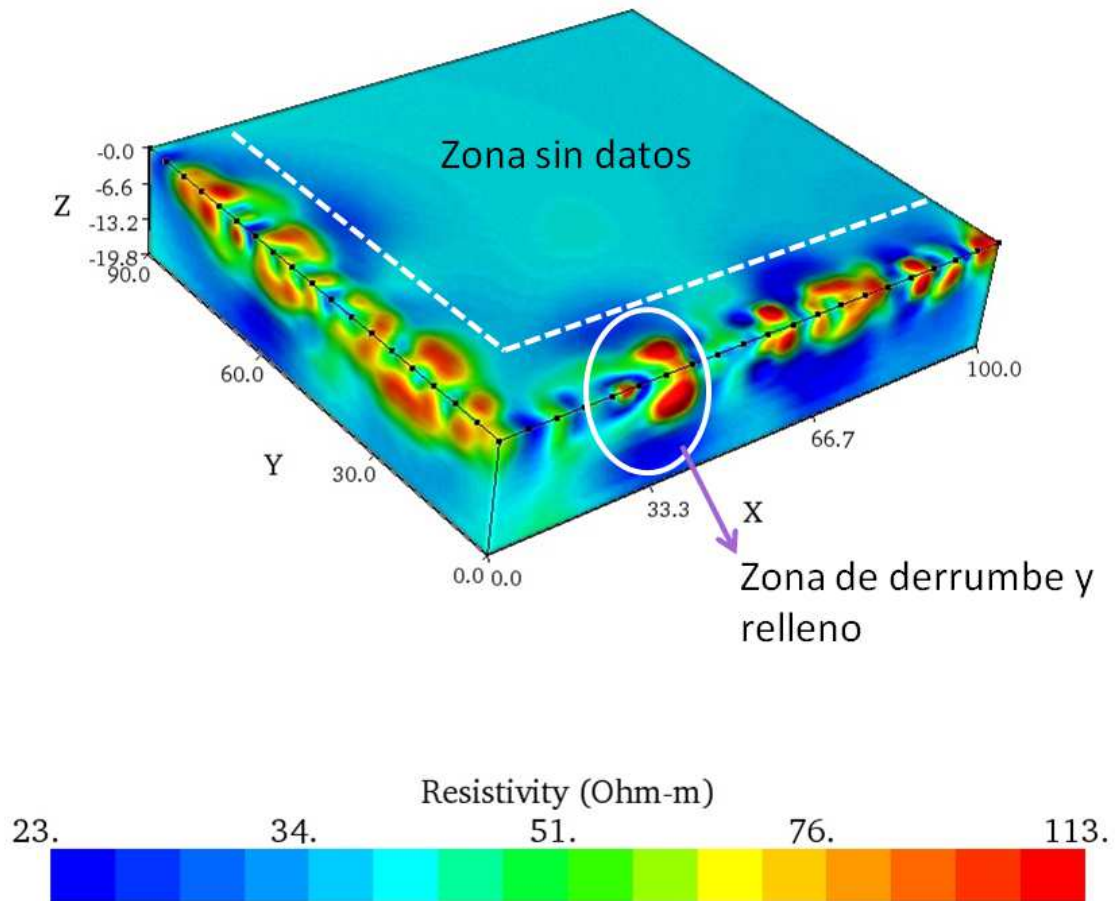


Figura 4.02 Inversión de los datos 2D de dos líneas perpendiculares

Inversión de datos en 3D de Barrio Norte con arreglo en L

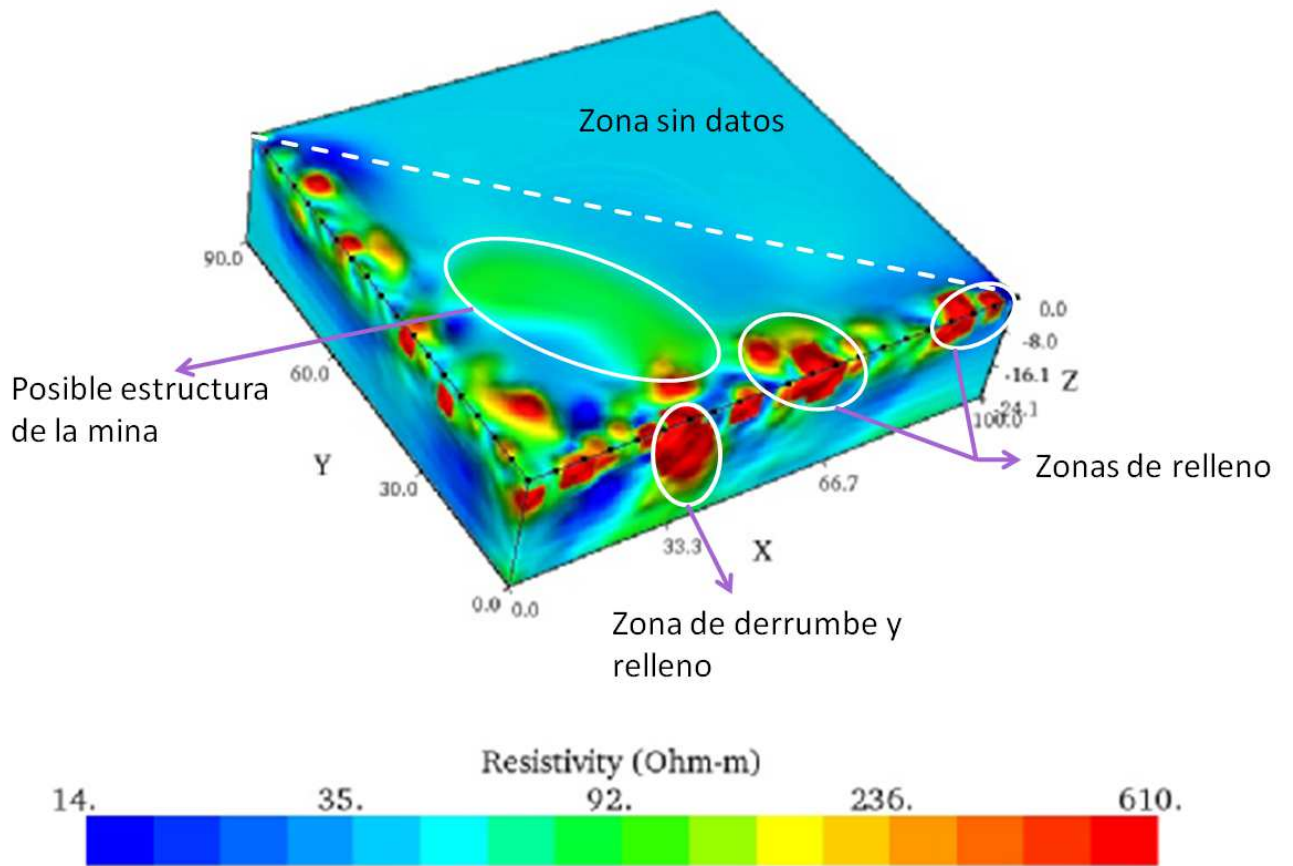
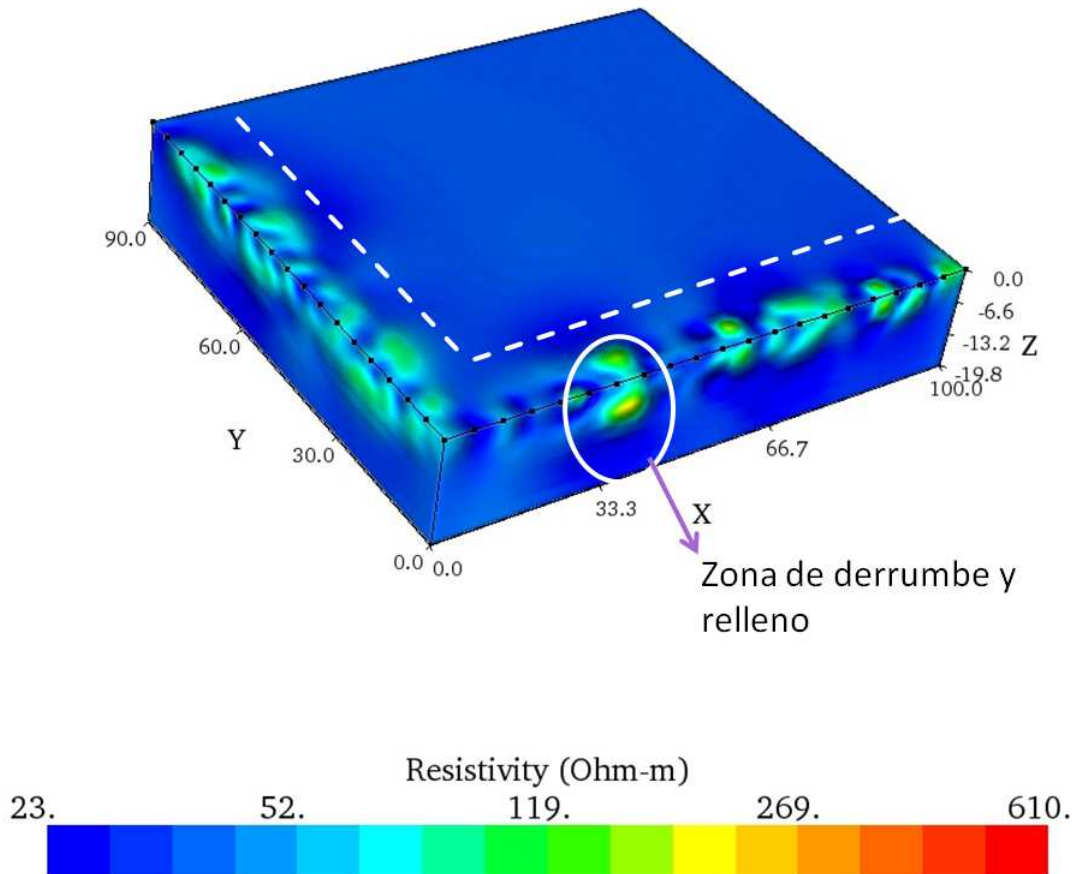


Figura 4.03 inversión de los datos del arreglo en L en la delegación Álvaro Obregón

Ahora bien, para comparar ambos cubos se homogeneizó la escala de colores con la de mayor amplitud. Esto provoca que el cubo de pseudo 3D quede coloreado en la gama de azules de bajas resistividades como se muestra en la siguiente figura

### Pseudo 3D con escala homogeneizada



**Figura 4.04** Inversión de las líneas en 2D homogeneizando la escala de colores con la del arreglo en L.

Como se puede observar es mas difícil visualizar las anomalías antes mencionadas, sin embargo, siguen estando presentes, es decir es solo un efecto visual.

Buscando observar mejor las estructuras se realizó una transparencia en ambos casos.

De tal modo que la transparencia realizada para el pseudo 3D (figura 4.05) nos revela que las anomalías no tienen una estructura que pueda verse hacia el centro de las casas, pero en la zona que no tiene datos podemos observar una anomalía falsa que es producto de la interpolación (marcada con un círculo blanco) de la inversión. No se eliminó la misma gama que en el 3D porque era importante mostrar este último rasgo que podría provocar errores en la interpretación.

Por otro lado en el caso de 3D (figura 4.06) la transparencia muestra una estructura curva que se interpretó como la posible estructura de la mina. Se observa también que la estructura ubicada en el metro 66 aproximadamente presenta una estructura que se conecta con la mencionada anteriormente lo que nos indica que pudiese existir una zona de debilidad en dicha zona, sin embargo, se recomienda que la anomalía sea verificada mediante perforación.

Con esta comparación puede concluirse que el arreglo en I tiene mejor efectividad que 2 líneas de tomografía en 2D en la misma posición y que al ser invertidos como un pseudo 3D puede llevar a anomalías falsas producto del programa de inversión.

## Pseudo 3D homogeneizado con transparencia

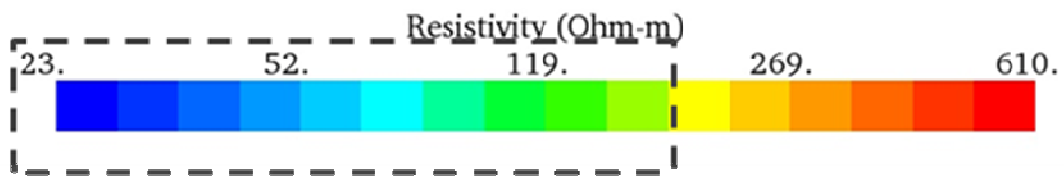
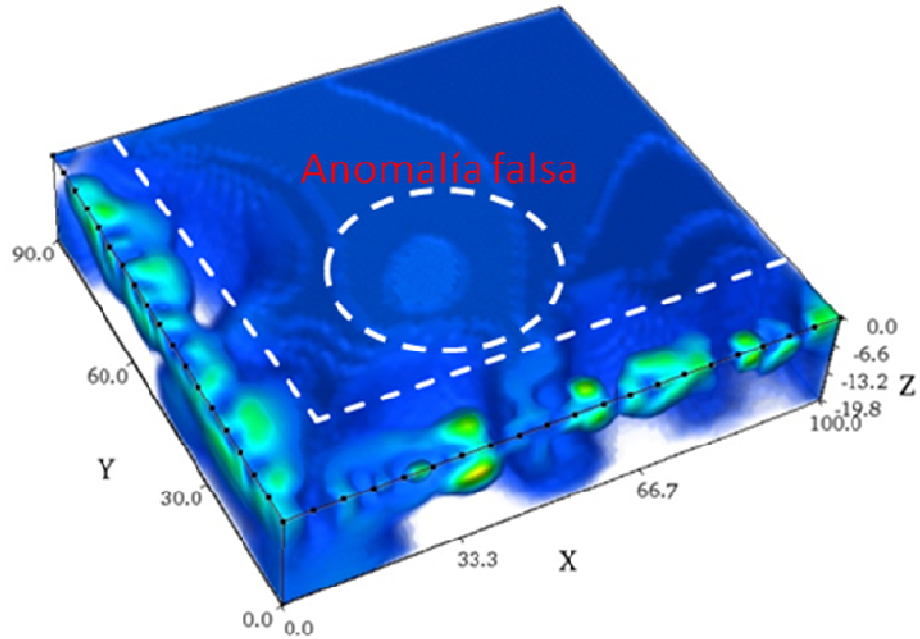


Figura 4.05 Vista con opacidad y una escala homogeneizada al 3D de los datos de 2 líneas perpendiculares en 2D. La anomalía marcada con un círculo blanco puede deberse al programa de inversión probablemente por errores de cálculo. El recuadro marca las resistividades utilizadas.

Vista de los datos de Barrio Norte con arreglo en L eliminando resistividades de 14 a 35 ohm-m

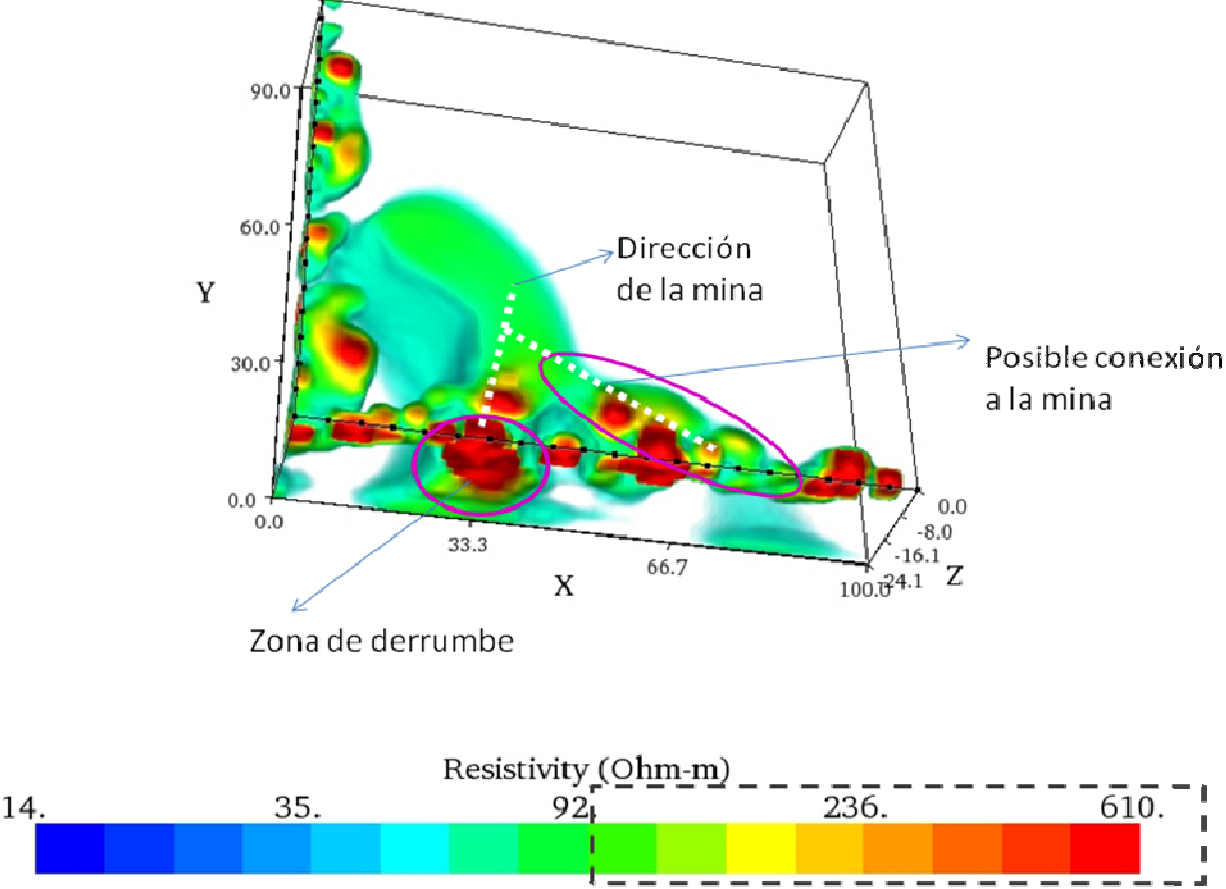


Figura 4.06 Vista con opacidad de los datos del arreglo en L. El recuadro marca las resistividades utilizadas.

## **4.2 Proyecto: La Catedral de Morelia.**

### ***Objetivo.***

Obtención de datos resistivos por debajo de la catedral de Morelia, sin dañar el recinto religioso, para búsqueda de túneles.

### ***Antecedentes.***

La construcción de la Catedral de Morelia comenzó en el año de 1660, con material de la localidad que corresponde a la roca volcánica Riolita- Dacita de la Era Cenozoico, periodo Terciario, Época o piso neógeno, cuya edad fluctúa de 33.4 a 14.1 Ma. Se terminó para el año de 1744; fue declarada Patrimonio de la humanidad desde 1991.

Existen rumores de la construcción de túneles que servían de comunicación entre edificios en la época de la revolución. Por tal motivo se solicitó un estudio al Instituto de Geofísica en el cual colaboró la Facultad de Ingeniería haciendo la logística para un levantamiento con 4 arreglos en L y 4 arreglos en Esquina, los cuales permitirían obtener información por debajo de la catedral sin dañar dicha obra conservando así este Patrimonio de la Humanidad.

### ***Metodología.***

Durante 4 días se realizó el estudio en la Catedral de Morelia utilizándose 3 técnicas diferentes:

-El método capacitivo: su principio es establecer un contacto capacitivo a través de una corriente variable en el subsuelo, el equipo utilizado fue el ohm-mapper y fue empleado adentro de la catedral donde no podía hacerse ninguna perforación. El detalle de esta técnica queda fuera de los alcances de esta tesis, pero pueden consultarse en el reporte de la Catedral de Morelia (2010).

-Se utilizaron 4 líneas de tomografía eléctrica en 2D en cada uno de los lados de la catedral para rodearla y un par de perfiles paralelos ecuatoriales colocados en el lado E y W. Los resultados de los mismos quedan fuera del alcance de la presente tesis.

- Se diseñaron 4 arreglos en L y 4 arreglos en esquina como se ha detallado en capítulos anteriores para hacer un estudio en 3D de la catedral de Morelia. La única diferencia de diseño fue en la esquina SW en la cual por la construcción de las oficinas, se utilizaron unos electrodos denominados fantasmas para rodear dicho obstáculo y colocar los electrodos en el lado W.





**Fotografía 3 equipo Syscal pro**

Se diseñaron 4 arreglos en L de la siguiente manera



**Fotografía 4 Vista Norte de la catedral de Morelia**



**Fotografía 5 Vista de la esquina NW de la catedral de Morelia**



**Fotografía 6 Vista W de la catedral de Morelia**



**Fotografía 7 Vista E de la catedral de Morelia**



**Fotografía 8 Acercamiento a los electrodos lado E de la catedral de Morelia**

### **Resultados Morelia.**

El estudio del cubo en 3D de Morelia utilizó 98 electrodos, con un total de 2318 datos adquiridos que corresponden a las 4 L y 4 esquinas diseñadas para este estudio; el volumen total alcanzado es de 151980 m<sup>3</sup>.

El siguiente cubo de inversión figura 4.08 esta visto desde el lado NE y permite observar la parte superior del cubo. La escala de colores indica resistividades de 3 a 173 ohm-m. Se indica con el número 1 las zonas que pudiesen ser el material insitu.

Con los números 2 (perfil del lado Este) y 3 (perfil del lado Norte) se muestran unas anomalías de interés, ubicadas por debajo del material insitu, ambas con una profundidad aproximada de 14 m. El número 4 presenta una anomalía ubicada hacia el lado sureste que coincide con la ubicación de la cripta de los obispos.

Los rectángulos blancos señalan la zona que puede corresponder a los cimientos del recinto.

## Catedral de Morelia Vista NE

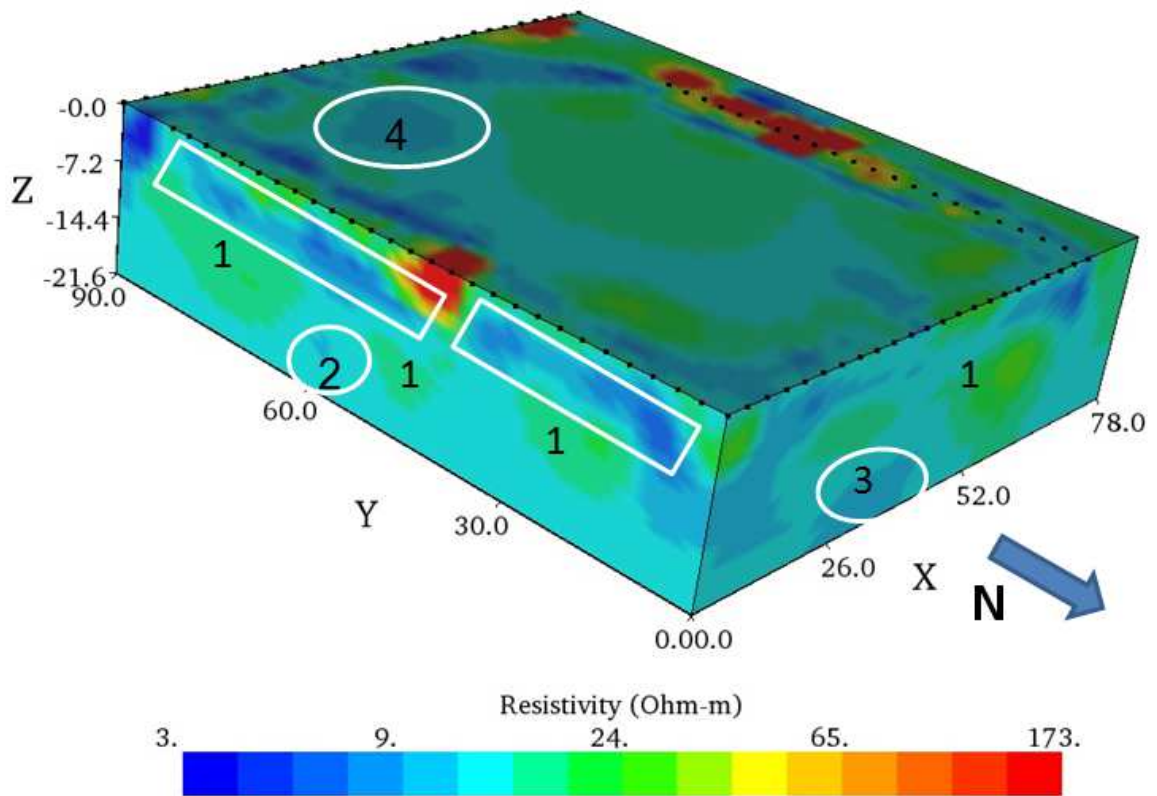
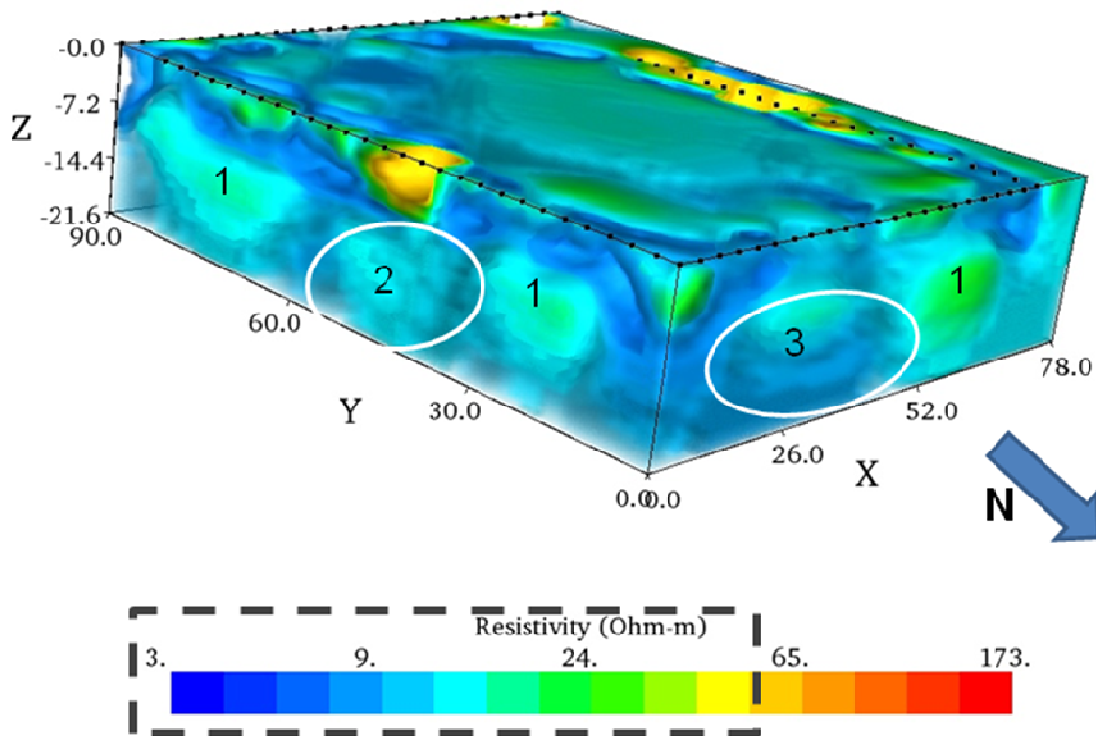


Figura 4.08. Cubo en 3D de la catedral de Morelia. El detalle de los números de encuentra en el texto.

A continuación en la figura 4.09 se presenta el mismo cubo pero con opacidad, es decir se ha dejado solo el rango de resistividades menor a 50 ohm-m, con esto se logra observar a mayor detalle las estructuras marcadas con los números 2 y 3.

## Vista NE con opacidad



**Figura 29. Cubo de resistividad en 3D de la catedral de Morelia, con opacidad, resistividades menores a 50 ohm-m en recuadro.**

También se presenta la vista suroeste (figura 4.10) a primera vista se puede observar los rasgos del material circundante marcado con el número 1 y además con el 4 la anomalía antes mencionada que coincide con la cripta de los obispos. Al quitarle las resistividades



mayores a 50 ohm-m salen a la vista otros rasgos de interés marcados con los números del 5 al 8.

## Catedral de Morelia Vista SW

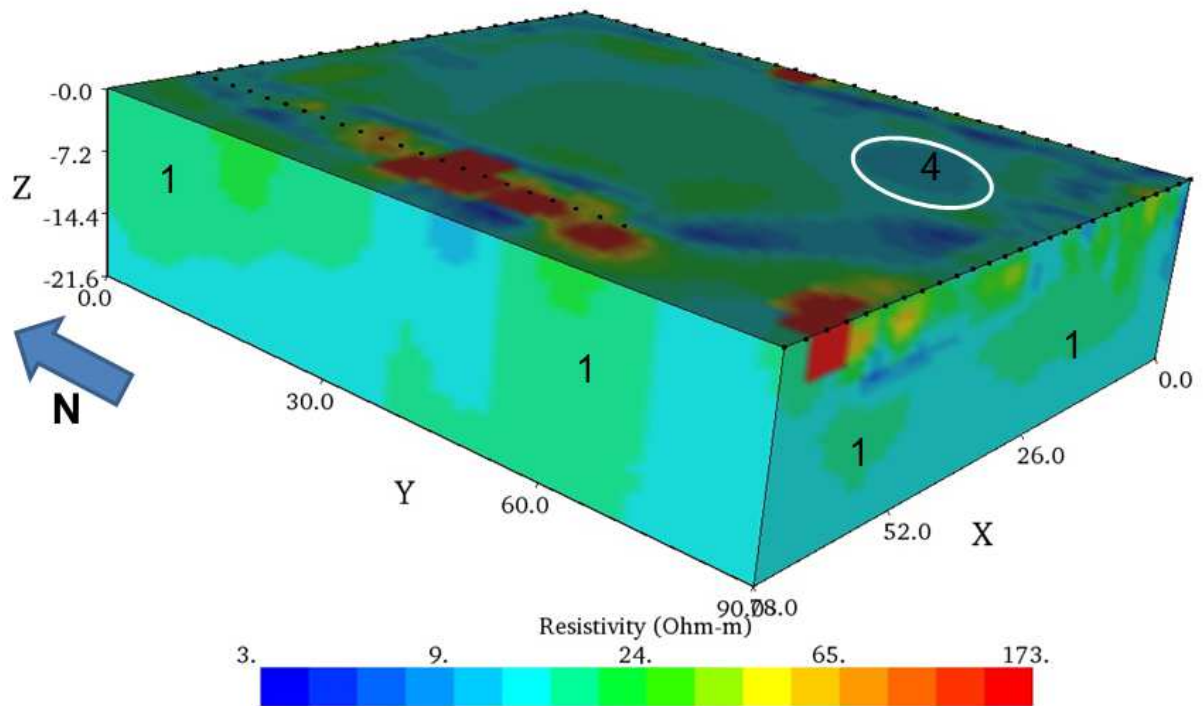


Figura 4.10. cubo en 3D de la catedral de Morelia Vista SW. Se observa el material insitu (1) y la estructura que coincide con la cripta de los obispos (4)

## Vista SW con opacidad

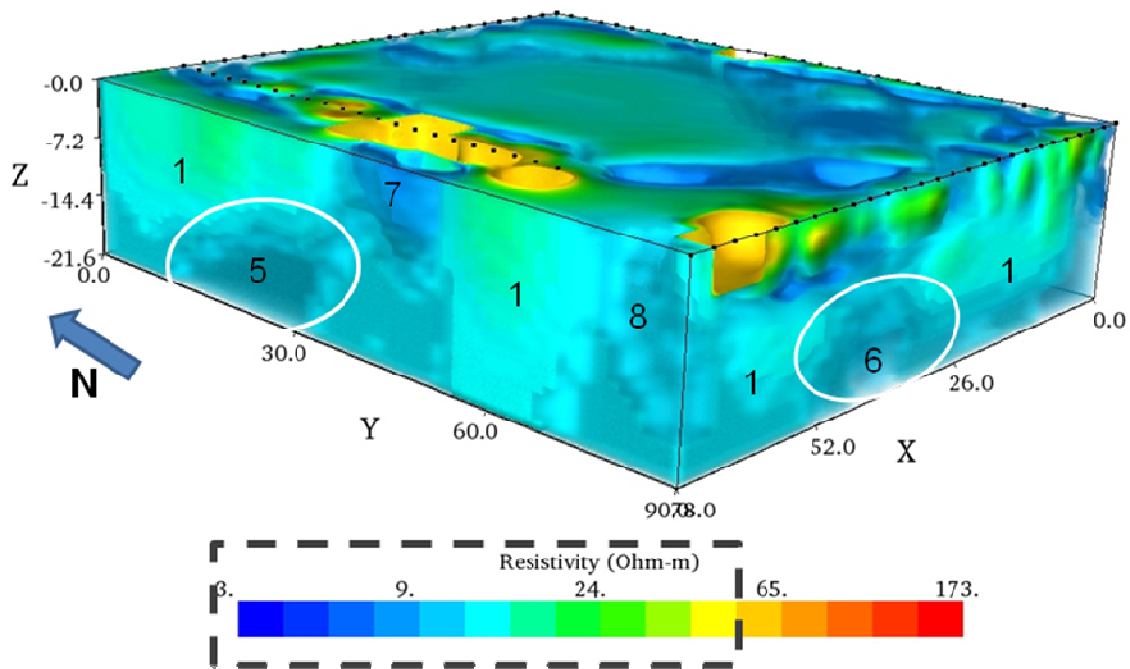


Figura 4.10. Cubo 3D catedral de Morelia con opacidad resistividades menores a 50 ohm-m. El recuadro marca las resistividades utilizadas.

Por debajo del material insitu marcado con el número 1 se encuentran los rasgos marcados con los números 2,3,5,6; su estructura asemeja la de un tunel o cavidad, se resalta que se encuentra una de cada lado del recinto.

La estructura 7 puede ser parte de alguna excavación por remodelación o relleno para nivelación; de igual manera la estructura 8 debio ser algun trabajo de nivelación para la construcción de las oficinas de este monumento.



## Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones.

En el capítulo 1 y 2 se presentaron los fundamentos teóricos del método, así como los arreglos en 2D y 3D más utilizados hasta el momento.

La propuesta de los arreglos L y en esquina para tomografía eléctrica en 3D fue realizada en el capítulo 3 donde a través de modelos sintéticos se comenzó a buscar la eficacia de estos arreglos encontrando que se obtenía buena respuesta al encontrar los cuerpos en las posiciones propuestas.

Así mismo, muestran que un arreglo en L es más efectivo que dos perfiles en 2D en la misma posición. La zona para detectar una estructura con una sola L está limitada por el triángulo formada por ambas líneas perpendiculares y la diagonal que une sus extremos; una estructura fuera de esta zona no será detectada.

Las pruebas de campo en el CELE (capítulo 3.4) muestran que se obtienen resultados comparables a un arreglo en rejilla como se utilizan actualmente; puesto que los cuerpos que se observan en las figuras 3.21, 3.22 y 3.23 son muy semejantes entre sí, mismos que corresponden a las raíces de los árboles, tuberías, cimientos ubicados en el mapa de la figura 3.19 o bloques de basalto que se encuentren enterrados. Así mismo tiene la ventaja de eliminar el problema de interpretación provocado por la orientación de las líneas que está influido por el strike de las rocas.

Con los arreglos L y esquina es posible cubrir la zona de estudio con menos posiciones de electrodos (42 para el cubo de 4 L), mientras que se emplearon 72 para el cubo de líneas paralelas y puede obtenerse información en ambas direcciones "x" y "y" al mismo tiempo.

Como vimos en el capítulo 4.1 de las pruebas en la delegación Álvaro Obregón se comparó dos líneas perpendiculares en 2D invertidas como un 3D con el arreglo en L. Se observa que el arreglo en L tuvo resistividades mayores que las líneas perpendiculares en 2D; por lo cual se toma la decisión de homogeneizar la escala de colores para compararlos en el mismo rango, sin embargo, al aplicar opacidad se encontró un efecto por la inversión de los datos que podría provocar errores de interpretación. Ahora bien, este tipo de arreglo no resolvió la búsqueda de cavidades, siendo diferente para el caso del arreglo en L que encontró con mejor resolución la cavidad y al aplicar la opacidad se logra visualizar la posible estructura de la mina por debajo de las casas.

En el capítulo 4.2 de la catedral de Morelia, los arreglos L y en esquina permitieron obtener una imagen del subsuelo del recinto sin dañarlo.

Para obtener dicha imagen se hicieron múltiples inversiones hasta lograr la de mejor calidad y permitiera localizar los objetivos.

Se encontró que la mejor inversión fue aquella en la cual el límite inferior y superior de resistividad, en la escala de inversión, se acercaban más a los límites de las resistividades medidas.

El software Earthimager le permite al usuario manejar los límites inferior y superior, según sea necesario; así el software pondrá en el límite superior a los cuerpos de mayor resistividad (aunque supere la resistividad medida) sin embargo, los cuerpos seguirán en los valores a los que respondieron en el estudio; de tal forma que si la escala de colores tiene un límite muy alto y la respuesta del subsuelo está en resistividades más bajas, esta respuesta puede verse ocultada o disimulada por la escala de colores empleada como fue el caso de las líneas en 2D usadas para una inversión en 3D (con la escala modificada) del estudio en la delegación Álvaro Obregón.

Por tanto para obtener una buena inversión hay que tomar en cuenta los límites superior e inferior de los datos medidos y cuidar que la inversión se quede en esa escala, si los estudios 2D y 3D concuerdan en estas escalas podrán compararse; de otra manera la comparación puede verse afectada por las escalas de colores.

Hay que tomar en cuenta también, que en ocasiones la distancia de la anomalía con respecto a los perfiles 2D puede afectar en la respuesta de resistividad que capte de dicha anomalía, es decir, pudiera el arreglo 2D detectarlo con una menor resistividad a la que tiene realmente, si el cuerpo está muy alejado. En este caso el arreglo en L y esquina tienen una mejor respuesta. Esto nos lleva a la conclusión de que si los perfiles 2D y 3D tienen una respuesta semejante en los límites superior e inferior la comparación puede hacerse igualando las escalas; de lo contrario la que tenga menor respuesta quedaría oculta en la escala de resistividades mayor.

Por otro lado, en los arreglos propuestos (L y Esquina) se pueden obtener valores de resistividad aparente negativos, que no constituyen errores de medición, por lo que deben utilizarse para la inversión de los datos; contrario a lo que sucede en estudios de ERT en 2D en donde se recomienda eliminarlos.

La desventaja que presentan los arreglos propuestos es la dificultad para definir objetos someros en el centro del cuadrado formado por 4 L, sin embargo, puede detectar cuerpos a profundidad.

Finalmente podemos decir que en las ciudades, donde los arreglos para tomografías eléctricas en 3D mas usados hasta el momento, no pueden emplearse por su logística y que los perfiles en 2D no proporcionen la suficiente información, los arreglos en "L" y en "Esquina" tienen buena resolución y calidad de los datos, así como una buena profundidad de investigación. Por lo que pueden utilizarse como alternativa para un estudio de tomografía eléctrica en 3D cuando el terreno de estudio tenga una construcción u obstáculo que impida realizar los perfiles en paralelo.

La técnica en L y en esquina propuesta en el presente trabajo es un procedimiento alternativo, que se puede combinar en forma exitosa con las diferentes arreglos y técnicas que se han desarrollado en la prospección eléctrica y de esta manera obtener una mejor información del subsuelo.

## **Anexo A**

### **Esquema de campo.**

En este tipo de estudio, el control inadecuado del número de electrodo o la dirección de los cables, así como el uso de una misma línea con diferente número de electrodo en varias ocasiones, puede provocar errores en la logística.

Para evitar confusiones y facilitar el orden del estudio se ha diseñado un esquema de campo, en el cual se debe incluir información como: nombre del lugar de estudio, fecha, ingeniero a cargo o jefe del proyecto, operador, equipo empleado.

En el esquema se representa, con líneas perpendiculares, los lugares donde se harán los arreglos L o en esquina en los extremos de estas líneas se debe indicar el número de electrodo que corresponde con ese extremo, de tal forma que se especifica el primer electrodo y el último en uso para ese arreglo.

Se indicará el origen del sistema del estudio en cada uno de los arreglos siempre en la esquina superior izquierda y a un costado se sugiere indicar el norte del estudio.

En la parte inferior cuenta con símbolos para diferenciar el tipo de arreglo que se empleará, es decir se puede indicar si es un estudio en L colocando un trapecio donde hay datos en 2D y una flecha para los datos en diagonal. Por su parte el arreglo en esquina será indicado con tres flechas en la diagonal.

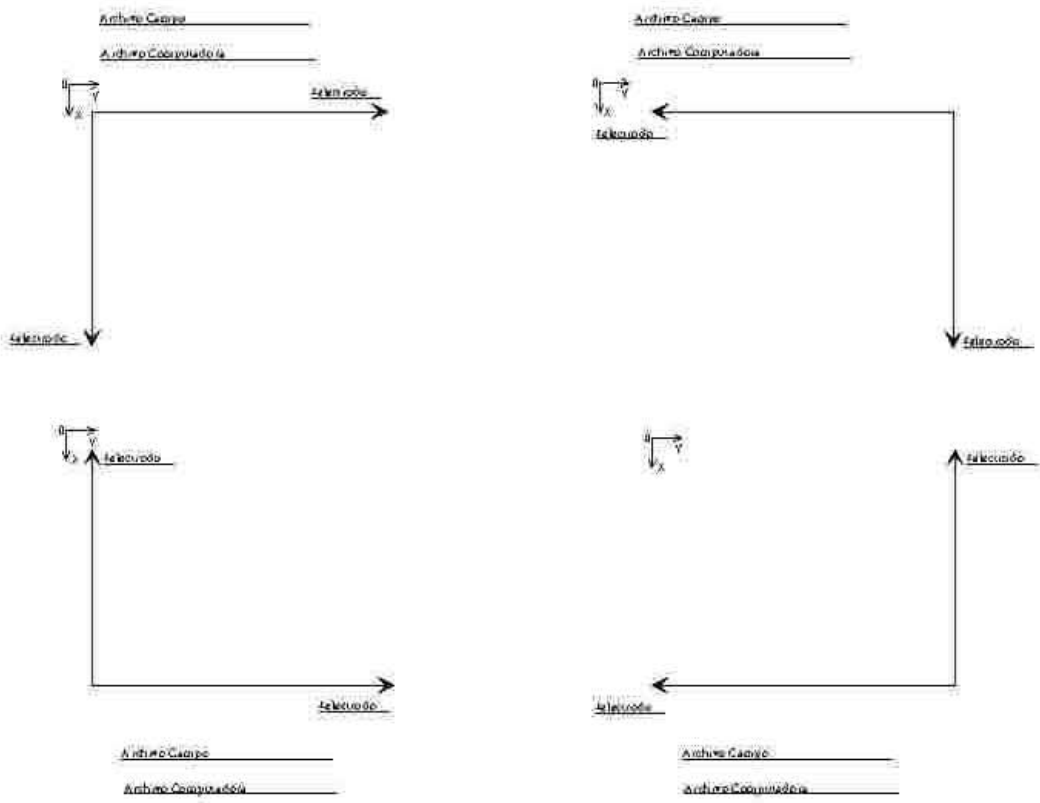
Este esquema cuenta además con un recuadro para notas.

Se sugiere realizar un esquema por separado por cada cuatro arreglos.

Se presenta a continuación el esquema de campo y un ejemplo llenado con diferentes formas de arreglos.

Proyecto: \_\_\_\_\_  
 Operador: \_\_\_\_\_  
 Equipo: \_\_\_\_\_  
 Jefe del proyecto: \_\_\_\_\_  
 Fecha: \_\_\_\_\_  
 Lugar: \_\_\_\_\_

Notas:  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_



**Simbolos del Esquema de Campo**



Datos en 2D



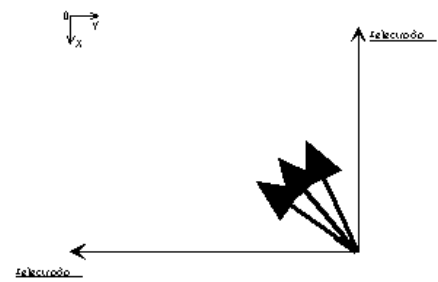
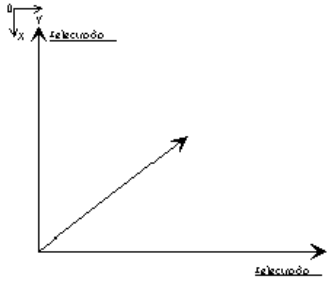
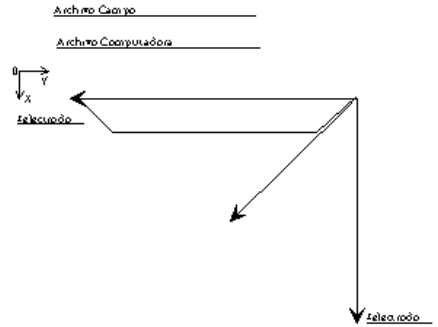
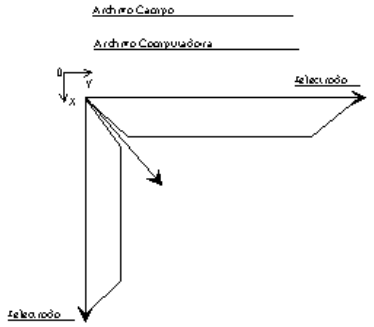
Datos en Diagonal






Datos en Esquina

Proyecto: \_\_\_\_\_  
 Operador: \_\_\_\_\_  
 Equipo: \_\_\_\_\_  
 Jefe del proyecto: \_\_\_\_\_  
 Fecha: \_\_\_\_\_  
 Lugar: \_\_\_\_\_

Notas:  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_



**Simbolos del Esquema de Campo**

		
Datos en 2D	Datos en Diagonal	Datos en Esquina

# Bibliografía

## Libros

- ❖ Danko Juan y Aida Azz Pavon, *Geoelectricidad I*, Universidad de la Habana, 1972.
- ❖ Espinosa Puig, Albert, *El mundo amarillo*, Grijalbo, España, 2008.
- ❖ Orellana Ernesto, *Prospección Geoeléctrica en corriente continua*, Paraninfo, Madrid, España, 1972.
- ❖ Philip kearey, *An introduction to Geophysical Exploration*, Blackwell publishing, USA, 2002, pp. 183.
- ❖ Saint-Exupéry de, Antoine, *Le petit prince*, Éditions Gallimard, 1946.

## Artículos

- ❖ Aizebeokhai A.P., A.I. Olayinka, and V.S. Singh, 2009, *Numerical evaluation of 3D geoelectrical resistivity imaging for environmental and engineering investigations using orthogonal 2D profiles* SEG Houston 2009 International exposition and annual meeting.
- ❖ Al'pin, L.M., Berdichevskii, M.N., Vedrintsev, G.A., and Zagarmistr, A.M., 1966, *Dipole methods for measuring earth conductivity*. transl. by G.V. Keller, New York, consultants bureau.
- ❖ Bruner, I. Friedel, S., Jacobs, F., and Danckwardt, E., 1999, *Investigation of a Tertiary maar structure using three dimensional resistivity imaging*: Geophysical Journal International, 136, 771-790.
- ❖ Chambers, J.E., Ogilvy, R.D., Kuras, O., Cripps, J.C., and Meldrum, P.I., 2002, *3D electrical imaging of known targets at a controlled environmental test site*: Environmental Geology, 41, 690-740.
- ❖ Dahlin, T., Bernstone, 1997. *A roll-along technique for 3D resistivity data acquisition with multi-electrode arrays*: 10th Annual Meeting, Symposium on the application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, Proceedings, 927-35.
- ❖ Dahlin, T., Loke MH, 1997. *Quasi-3D resistivity imaging-mapping of the three dimensional structures using two dimensional DC resistivity techniques*. In Proc 3<sup>rd</sup> Meeting environmental and engineering geophysics. Environmental an engineering geophysics society, European section, Aarhus, Denmark, pp143-146.
- ❖ Dahlin, T., Bernstone, C., and Loke, M.H., 2002, *A 3-D resistivity investigation of a contaminated site at Leernaken, Sweden*: Geophysics, 67, no. 6, pp. 1692-1700.
- ❖ Deceuster John & Kaufmann Olivier, 2003, *Applications des tomographies en résistivité électrique 3D à la reconnaissance d zones Karstifiées*, Belgique : Actes du 4<sup>ème</sup> Colloque GEOFCAN, 23-24september 2003, 143-150.
- ❖ Evjen, H. M., 1938, *Depth factor and resolving power of electrical measurements* : Geophysics, v. 3, p. 78-95.
- ❖ Edwards L.S., 1977, *A modified pseudosection for resistivity and IP*, Geophysics, vol. 42, No. 5, p. 1020-1036

- ❖ Hallof P.G. 1957 *On the interpretation of resistivity and induced polarization field measurements*, thesis for the degree doctor of science, Massachusetts Institute of Technology
- ❖ Hallof P.G. *A comparison of the various parameters employed in the variable-frequency induced-polarization method*, geophysics, v. 29, p. 425, 1964.
- ❖ Harold Seigel, Misac Nabighian, Dattatray S. Parasnis, Keeva Vozoff, 2007, *The early history of the induced polarization method*, The leading edge, p. 312-321
- ❖ Kaufmann, O., and Deceuster, J., 2004, *3D electrical imaging of contaminated soil near a gas station at Brugelette*, Belgium: SAGEEP 2004 Meeting, 22-26, february 2004, Colorado Springs, USA, p. 330-341.
- ❖ Kaufmann, Oliver, and Deceuster. 2007, *A 3D resistivity tomography of a LNAPL Plume Near a Gas station at Brugelette (Belgium)*. En JEEG, Volumen 12, Issue 2. Pp. 207-19.
- ❖ Keller, G.V., 1966, *Dipole method for deep resistivity studies*: Geophysics, v. 31, p. 1088-1140
- ❖ Keller, G.V., and Frischknecht, F.C., 1966, *Electrical methods in geophysical prospecting*: Oxford, Pergamon Press
- ❖ Loke, M.H., and Barker, R.D., 1996, *Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion*: Geophysical Prospecting, v. 44, p. 499-523.
- ❖ Ogilvy, R., Meldrum, P., Chambers, J., and Williams, G., 2002, *The use of 3D electrical resistivity tomography to characterise waste and Leachate distribution within a closed landfill*, Thriplow, U.K.: Journal of Environmental and Engineering Geophysics, v. 7(1), p. 11-18.
- ❖ Roy, A. and Apparao, A., 1971, *Depth of investigation in direct current methods*: Geophysics, vol. 36, No. 5, P. 943-959.

Las siguientes páginas fueron visitadas el 3 de junio de 2009:

- ❖ <http://www.ambos.com.mx/DFL05000.html>
- ❖ [http://www.coremisgm.gob.mc/productos/cartas/cartas250/geología/metadatos/ciudad\\_de\\_mexico.html](http://www.coremisgm.gob.mc/productos/cartas/cartas250/geología/metadatos/ciudad_de_mexico.html)
- ❖ [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/DR\\_1312.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/DR_1312.pdf)
- ❖ <http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/572/57219106.pdf>