



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

EVALUACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS 2D Y 3D  
CON TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA EN POZO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS**

P R E S E N T A

**JAVIER URBIETA GÓMEZ**

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. ELSA LETICIA FLORES MÁRQUEZ





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 mis padres, María, Claudia y Elisa  
Por todo su amor, apoyo, valor e  
inspiración, incondicional.

## ***AGRADECIMIENTOS***

Un especial agradecimiento a la Dra. Elsa Leticia Flores Márquez por su apoyo y confianza en un momento tan crítico cuando todo parecía indicar que no llegaría a la meta para concluir este trabajo.

A la Dra. Claudia Arango Galván por el interés y apoyo mostrado a lo largo de la realización de este trabajo.

Un inmenso agradecimiento al Dr. Alejandro Marcuello Pascual, del departamento de Geodinámica y Geofísica de la Universidad de Barcelona, que aún sin conocerme me brindó todo su apoyo técnico incondicionalmente.

Al Dr. José Manuel Romo Jones por su exhaustiva y dedicada atención en la revisión de este trabajo, agradezco mucho su crítica constructiva.

Al Dr. Omar Delgado Rodríguez, por sus comentarios, observaciones y el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo.

Al Ing. José Luís Arcos Hernández por su amistad, convivencia y trabajo académico que hemos realizado a lo largo de todos estos años.

A la Universidad Nacional Autónoma de México que me brindó la oportunidad para concluir este trabajo.

# ÍNDICE

Resumen		1
Introducción		2
Objetivo		6
<b>Capítulo 1.-Fundamentos teóricos de resistividad eléctrica</b>		<b>7</b>

1.1	Distribución del potencial eléctrico de un medio homogéneo	7
1.2	Metodología de los métodos eléctricos de Tomografía de Resistividad Eléctrica en pozo 2D, 3D y Tomografía de Resistividad Eléctrica 3D en superficie	10
1.2.1	Dispositivo eléctrico o arreglo geométrico de superficie y pozo	10
1.2.2	Concepto de resistividad aparente	12
1.2.3	Configuraciones geométricas de electrodos de TRE 2D en pozo	15
1.3	Metodología de las secuencias de mediciones para las diferentes configuraciones de TRE 2D en pozo	22
1.4	Configuraciones geométricas de electrodos de pozo 3D	26
1.4.1	Tipos de arreglos para estudios de pozo 3D	26
1.4.2	Metodología de las secuencias de mediciones para las diferentes configuraciones de TRE 3D en pozo	27
1.5	Configuraciones geométricas de electrodos de superficie 3D	30
1.5.1	Tipos de arreglos para estudios 3D	30
1.6	Propiedades eléctricas de diferentes materiales	36

## **Capítulo 2.-Fundamentos de Teoría de Inversión 2D y algoritmos de inversión      40**

2.1	El problema directo	40
2.2	Descripción de un modelo 2D	40
2.3	Programa de modelado directo 2D	41
2.4	Descripción de un modelo 3D	44
2.5	Programa de modelado directo 3D	45
2.6	Teoría de sensibilidad	46
2.7	El problema inverso	47
2.8	Teoría básica de inversión	48
2.9	Métodos de discretización para un modelo 2D	55
2.10	Programa de inversión 2D	57
2.11	Programa de inversión 3D	59
2.12	Programa que calcula los puntos de atribución para formar los arreglos de las diferentes configuraciones utilizadas en TRE 2D en pozo	61

## **Capítulo 3.-Diseño y aplicaciones de modelos sintéticos TRE 2D en pozo      63**

3.1	Análisis de sensibilidad para las diferentes configuraciones de electrodos que se emplean en TRE 2D en pozo	63
3.2	Descripción de los modelos sintéticos	72
3.3	Arreglo polo-polo ( $A-M$ )	74
3.3.1	Configuración Pozo a Pozo (P-P)	74

3.3.2	Configuración de dos Pozos a Superficie (2P-S)	76
3.3.3	Configuración de un Pozo a Superficie (1P-S)	78
3.4	Arreglo polo-dipolo ( <i>A-MN</i> )	81
3.4.1	Configuración de Pozo a Pozo (P-P)	81
3.4.2	Configuración de dos Pozos a Superficie (2P-S)	84
3.4.3	Configuración de un Pozo a superficie (1P-S)	86
3.5	Arreglo dipolo-dipolo	89
3.5.1	Configuración 1 AM-BN	89
3.5.1.1	Configuración Pozo a Pozo (P-P)	89
3.5.2	Configuración 2 AB-MN	92
3.5.2.1	Configuración Pozo a Pozo (P-P)	92
3.5.3	Configuración dos Pozos a Superficie (2P-S)	94
3.6	Arreglo Gradiente ( <i>A-MN-B</i> )	97
3.6.1	Configuración Pozo a Pozo (P-P)	97

**Capítulo 4.-Modelos sintéticos para estudios 3D en superficie y TRE 3D en pozo 102**

4.1	Descripción de los modelos sintéticos utilizados en TRE 3D en superficie	102
4.2	Arreglo polo-polo completo	105
4.3	Arreglo polo-polo diagonal	105
4.4	Arreglo polo-polo in-line	108
4.5	Arreglo polo-dipolo	109
4.6	Arreglo dipolo-dipolo	111
4.7	Arreglo Wenner- Schlumberger	112
4.8	Descripción de los modelos sintéticos para TRE 3D en pozo	115
4.9	Arreglo polo-polo para pozo 3D (Modelo de un cuerpo rectangular)	117
4.10	Arreglo polo-dipolo para pozo 3D (Modelo de un cuerpo rectangular)	118
4.11	Arreglo polo-dipolo para pozo 3D (Modelo de cuatro cuerpos).	119
4.12	Arreglo dipolo-dipolo para pozo 3D (Modelo de dos cuerpos rectangulares)	120

**Capítulo 5.-Ejemplos de aplicación 122**

5.1	Delta Llobregat, Barcelona, España.	122
5.1.1	Geología general del delta del Llobregat.	122
5.2	Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D en pozo.	125
5.2.1	Interpretación.	126
5.3	Delegación Álvaro Obregón.	130
5.3.1	Ubicación Geográfica.	130
5.3.2	Geología.	131
5.4	Perfiles de Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D y 3D en superficie.	132
5.4.1	Equipo de campo utilizado	133
5.4.2	Descripción de los resultados	134
5.4.3	Primera Etapa, descripción de los perfiles 2D independientes.	134
5.5	Segunda Etapa, descripción de la TRE 3D en superficie.	138

**Conclusiones ..... 143**

**Referencias ..... 146**

---

**RESUMEN.**

En este trabajo, se presentan las ventajas y eficacia de la Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D y 3D en pozo y 3D en superficie utilizando diferentes configuraciones de electrodos para cinco de los arreglos más populares: polo-polo, polo-dipolo, dipolo-dipolo, wenner-schlumberger y gradiente. El estudio se realizó utilizando varios modelos sintéticos con el propósito de obtener secciones 2D y cubos de resistividad utilizando los programas de modelado directo (RES2DMOD y RES3DMOD) y modelado inverso (RES2DINV, EARTHIMAGER 2D y RES3DINV) demostrando las capacidades de la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) con estos arreglos multipolos. La generación de los modelos constó de 4 etapas: en la primera etapa se elaboró un archivo que contiene la geometría del o de los cuerpos con sus respectivos valores de resistividad, en la segunda se creó un archivo que contiene el número total de puntos de atribución que se van a generar para un arreglo y configuración en particular con la ayuda de un código de computadora hecho en lenguaje FORTRAN 90, en la tercera etapa se generó el archivo de resistividades aparentes con los cuales se realizó la inversión; y en la cuarta, y última se procesaron los diferentes conjuntos de datos sintéticos con ayuda de los algoritmos de inversión para identificar la distribución de resistividades reales. Finalmente las secciones 2D y cubos de resistividad sintéticas son configuradas para su interpretación con los programas Surfer (2D) y Voxler (3D).

Los resultados muestran la versatilidad y poder de resolución de la Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D y 3D en pozo para cada uno de los diferentes arreglos de cuatro electrodos, tales como el dipolo-dipolo y gradiente contra los arreglos de dos y tres electrodos como el polo-polo y polo-dipolo, respectivamente. Los arreglos de cuatro electrodos comparados con los arreglos de dos y tres electrodos, pueden reducir o eliminar el efecto de electrodos remotos (error sistemático) y producir imágenes de buena resolución. También se demuestra que, para cualquier arreglo de electrodos, la Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D en pozo utilizando las configuraciones de dos pozos a superficie definieron mejor las imágenes que las configuraciones de pozo a pozo y un pozo a superficie. Para la Tomografía de Resistividad Eléctrica 3D en pozo, las configuraciones de cuatro pozos definieron mucho mejor las imágenes.

También se presentan dos aplicaciones de datos reales: La primera, se realizó con Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D en pozo en una zona de delta en los alrededores del aeropuerto de Barcelona, España, con el fin de identificar diferentes unidades geológicas utilizando un equipo SYSCAL PRO (IRIS Instruments), un arreglo dipolo-dipolo (*AM-BN*) y la configuración pozo a pozo. La adquisición de datos se llevó a cabo en dos pozos separados 15 metros, en cada pozo se instalaron 24 electrodos con un espaciamiento de un metro. La inversión de los datos de resistividad aparente fue realizada utilizando el algoritmo RES2DINV. Las imágenes eléctricas definen de manera clara las diferentes interfases de las unidades geológicas a pesar de que la zona no presenta mucho contraste de resistividad. La segunda aplicación, se realizó con Tomografía de Resistividad Eléctrica 3D en superficie para el mapeo de túneles en la zona oriente de la ciudad de México utilizando un sistema STING and SWIFT R1-IP (Advanced Geosciences Inc.). La adquisición de datos se llevó a cabo con un arreglo dipolo-dipolo (*AB-MN*) y la construcción de un cubo de resistividad con una rejilla compuesta de 4 líneas separadas 40 metros y de 28 electrodos cada una. Cada línea tiene una separación entre electrodos de 5 metros y una longitud total de 135 metros. La inversión de los datos de resistividad aparente se realizó con el algoritmo RES3DINV. La imagen eléctrica 3D muestra claramente el trazo del túnel sobre las calles y casas.

---

## INTRODUCCIÓN.

Los métodos geofísicos hacen uso de diferentes campos físicos que interactúan con los materiales existentes. El objetivo es encontrar un concepto (o modelo) de las estructuras terrestres a partir de sus propiedades físicas. Como se sabe, es poco probable que un estudio directo genere modelos confiables del subsuelo, en la mayoría de los casos la interpretación de las mediciones geofísicas representan un problema inverso.

En particular los métodos de resistividad eléctrica de corriente continua han sido utilizados por muchos años para investigar el subsuelo. En analogía con la Tomografía de impedancia en imágenes médicas, los voltajes medidos, causados por las corrientes inyectadas, revelan información acerca de la estructura de resistividad terrestre.

Por muchos años, dentro de los métodos con corriente continua se han aplicado las técnicas de sondeo eléctrico vertical y calicatas eléctricas, las cuales permiten la reconstrucción de modelos de resistividad 1D o 2D, respectivamente. Antes del año 1990 no existían sistemas automatizados multi-electrodos; las mediciones convencionales para la adquisición de datos con estas técnicas eran obtenidas con mucho esfuerzo. Estas técnicas generalmente involucran de 10 a 30 lecturas para realizar la construcción de modelos que resultan muy poco confiables. A principios de 1990 se desarrollaron los sistemas multi-electrodos (Griffiths *et al.* 1990) los cuales permitieron emplear combinaciones arbitrarias de electrodos con los que se puede obtener un denso muestreo de datos a partir de un arreglo de electrodos pre-diseñado y debido a la ley de reciprocidad pueden actuar como fuente y transmisor para diferentes geometrías. Actualmente, se pueden medir muchos datos individuales de resistividad haciendo uso de otras técnicas superficiales como son la Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D, que involucran alrededor de 100 a 1000 mediciones, la Tomografía de Resistividad Eléctrica 3D y la Tomografía de Resistividad Eléctrica en pozo, que involucran miles de mediciones.

El subsuelo frecuentemente muestra características tridimensionales por lo que las técnicas tradicionales 1D y 2D han sido sustituidas por técnicas más sofisticadas. Debido al acelerado desarrollo de los sistemas multi-electrodos, e.g., por el uso de registros multi-canal, se hace cada vez más interesante llevar a cabo mediciones que permitan una reconstrucción 3D. Los “datos 3D” se adquieren de dos maneras, por varios perfiles 2D paralelos o por el uso de una rejilla de electrodos, cuyas líneas perpendiculares y diagonales se utilizan para la construcción de cubos de resistividad eléctrica (Loke y Baker, 1996b). Esto también, ha sido posible debido al rápido avance de las computadoras personales que permiten la aplicación de algoritmos de inversión multi-dimensional.

En años recientes el incremento en mediciones de pozo a superficie y pozo a pozo ha sido notable (La Breque y Ward, 1990; Daily y Owen, 1991; Kemna *et al.* 2004). A partir de entonces los estudios de pozos se han aplicado en muchas áreas, en las cuales se incluyeron electrodos de subsuelo en la adquisición de datos. Esto ayudó a mejorar la calidad de resolución de estructuras a profundidad (Sugimoto, 1999; Zhou y Greenhalgh, 2000).

La exploración del subsuelo en nuevos campos necesita del desarrollo de nuevas herramientas y técnicas de adquisición de datos. Pocos métodos ofrecen a la exploración mayor detalle en la información que las técnicas de Tomografía de Resistividad Eléctrica 3D y pozos. Estas

técnicas tienen una resolución mayor y además, pueden extender el área de investigación junto con los métodos geofísicos superficiales que se están utilizando actualmente.

En la literatura se reportan diferentes tipos de mediciones de resistividad para los problemas de fuente y receptor enterrados, las técnicas originalmente se desarrollaron para configuraciones de electrodos en superficie, haciendo uso de esta misma teoría se ha desarrollado lo que actualmente se conoce como Tomografía de Resistividad Eléctrica en pozos. Las diferentes configuraciones de electrodos enterrados son: pozo a pozo (crosshole), pozo a superficie (borehole) y un solo pozo (inline).

Las mediciones de pozo a pozo se realizan colocando un polo o un dipolo como fuente (electrodo de corriente) en un pozo y un polo o un dipolo como receptor (electrodo de potencial) en un pozo adyacente. El potencial causado por la fuente es medido en puntos discretos en el pozo receptor. La fuente puede ser sujeta en una posición estacionaria (fuente fija) para todas las mediciones de potencial o puede ser movida cuando se realiza cada una de las mediciones de potencial (fuente móvil).

Las mediciones de superficie a pozo se realizan colocando un polo o un dipolo como fuente (electrodo de corriente) dentro de un pozo y con un polo o dipolo como receptor en superficie (electrodo de potencial) y radialmente desde la superficie hacia el pozo o dentro del mismo pozo. Los estudios teóricos de potenciales superficiales debidas a fuentes de corriente dentro del pozo han sido descritos por Alfano (1962), Merkel (1971), Merkel y Alexander (1971) y Snyder y Merkel (1973).

Los arreglos en un solo pozo (inline) con diferente espaciado entre electrodos, utilizan un polo o dipolo como fuente (electrodo de corriente) y un polo o dipolo como receptor (electrodo de potencial) en el mismo pozo. Se pueden utilizar diversos espaciados entre la fuente y el receptor, obteniendo con esto un conjunto de mediciones similares a las que se hacen con los convencionales arreglos polo-polo, polo-dipolo y dipolo-dipolo en superficie. Estas mediciones requieren únicamente un pozo y puede ser hecha con un dispositivo de cable de acero.

El método de resistividad eléctrica tradicional es uno de los métodos de prospección geofísica más practicados. En el pasado esta técnica usualmente, ha sido aplicada en la exploración de agua subterránea y recursos naturales del subsuelo. Recientemente, el método ha sido extensivamente desarrollado para generar imágenes de estructuras del subsuelo con mayor resolución y se ha aplicado en varios campos, especialmente en las áreas de ingeniería civil y ambiental.

La Tomografía de Resistividad Eléctrica en pozos, ha demostrado ser una poderosa herramienta para caracterizar litoestratigrafía entre pozos (e.g. Newmark *et al.* 1994). Anteriormente también ha sido utilizada para mapear procesos del subsuelo tal como infiltración de fluidos (Daily *et al.* 1992), inyección de energía y calor óhmico (Ramírez *et al.* 1993, 1995) mapeando cambios espaciales y temporales de la resistividad en el subsuelo debidos a cambios en la saturación de líquido y temperatura. También se ha usado para monitorear la remoción de contaminantes en acuíferos (Newmark *et al.* 1998). La presencia de cantidades apreciables de fases separadas, fluidos aislados eléctricamente, en forma local

incrementa la resistividad eléctrica. La remoción de estos fluidos durante el bombeo produce una caída en la resistividad eléctrica, debido a que los fluidos aislantes son desplazados por una formación fluida relativamente conductiva.

Los estudios que se realizan con la técnica de Tomografía de Resistividad Eléctrica en pozo son muy someros debido a que su aplicación directa se remite a problemas de contaminación y de ingeniería, en la mayoría de los casos en zonas urbanas.

Una parte esencial de cada uno de los esquemas de inversión es la simulación numérica de las mediciones para la distribución de un parámetro dado. Este procedimiento directo es realizado con la solución de ecuaciones diferenciales parciales.

No fue hasta principios de 1980, que la aproximación para la inversión 2D fue desarrollada, e.g. los trabajos de Inman (1975) y Tripp *et al.* (1984). El artículo de Loke y Baker (1996b) fue la base del programa de inversión de resistividad RES2DINV comercialmente disponible, el cual ha sido ampliamente probado en la práctica. Los fundamentos para el cálculo directo basado en diferencias finitas fueron dados por Dey y Morrison (1979a), Spitzer (1995) y otros autores. La introducción de las condiciones de frontera mejorada por Zhang *et al.* (1995) y la técnica de eliminación de singularidades por Lowry *et al.* (1989) mejoró la calidad de los resultados del modelado significativamente. La velocidad y precisión de los diferentes esquemas de discretización y la solución de las ecuaciones han sido investigadas por Spitzer y Wurmstich (1995). Como resultado del rápido avance de las computadoras, ahora es posible calcular modelos grandes con altos contrastes de resistividad y una adecuada precisión computacional.

La primera inversión de datos de polo-polo hecha por Park y Van (1991) fue seguida por otros esquemas de Newton, e.g. Li y Oldenburg (1999). Alternativamente, los algoritmos basados en los métodos de gradientes conjugados no lineales fueron propuestos (Ellis y Oldenburg, 1994b; Zhang *et al.* 1995). Los esquemas sencillos de inversión para datos de polarización inducida fueron desarrollados por Beard *et al.* (1996) y con algoritmos complejos son los descritos por Kemna *et al.* (2000) u Oldenburg y Li (1994).

La mayoría de los programas de inversión suponen una tierra con superficie plana. La incorporación de la topografía en los modelos 2D puede ser acompañada utilizando una Transformada Schwarz-Christoffel (Tong y Yang, 1990). Si la topografía es considerada para problemas 3D, el cálculo directo no puede ser resuelto realísticamente por diferencias finitas. En este caso, las técnicas de elemento finito producen soluciones idóneas (Sasaki, 1994; Sugimoto, 1999).

La mayoría de las técnicas de exploración Geofísica apuntan a la aplicación de Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D y 3D en pozo. La Tomografía de Resistividad Eléctrica en pozos es una metodología relativamente reciente en el mundo, tiene sus orígenes en los años noventa y es una extensión directa de la Tomografía de Resistividad Eléctrica en superficie.

Este trabajo se ha dividido en cinco capítulos:

En el capítulo 1 se presentan los fundamentos teóricos, las diferentes configuraciones geométricas de electrodos para TRE 2D y 3D en pozo, así como en 3D superficial y las metodologías para las secuencias de adquisición de datos con la finalidad de determinar la distribución de la resistividad del subsuelo haciendo mediciones sobre la superficie y en pozo con diferentes configuraciones de electrodos.

En el capítulo 2 se explican los principios básicos de la teoría de la modelación para la inversión de datos de resistividad. También el funcionamiento del programa para crear el archivo con los puntos de atribución de los diferentes arreglos 2D y 3D, así como los programas de modelado directo RES2DMOD y RES3DMOD, y modelado inverso RES2DINV y RES3DINV para elaborar los diferentes modelos sintéticos de TRE 2D y 3D en pozo.

En el capítulo 3 se experimenta el comportamiento de cuatro modelos sintéticos que asemejan anomalías de resistividad en el subsuelo con la finalidad de hacer una recreación de estructuras geológicas y estudiar el efecto que tendrían con un estudio de TRE 2D en pozo. Para lograr esto, cada uno de los modelos se calculó con cinco arreglos de electrodos diferentes y sus respectivas configuraciones en pozo para la obtención de la TRE.

Además, se realiza un análisis de sensibilidad para cada uno de estos arreglos con sus respectivas configuraciones en pozo con el propósito de comprobar cuál de estas configuraciones es la más adecuada basándonos en su respuesta de sensibilidad.

Para el despliegue final de las imágenes de TRE en 2D correspondientes a los modelos elaborados con el algoritmo de inversión, RES2DINV se utilizó el programa Surfer.

El capítulo 4 contiene modelos sintéticos que asemejan anomalías de resistividad que se pueden encontrar en el subsuelo, para comprobar la eficacia de la respuesta de estas anomalías con los estudios 3D en superficie y TRE en pozo con diferentes modalidades de electrodos. Además, para una fácil comparación de las imágenes obtenidas con los diferentes arreglos de electrodos se utilizó el algoritmo de inversión, RES3DINV y el programa Voxler para construir cubos de resistividad.

En el capítulo 5 se presentan dos estudios de aplicación de la Tomografía de Resistividad Eléctrica: el primero es la TRE 2D en pozo para el mapeo del delta ubicado en los alrededores del aeropuerto de Barcelona, España y el segundo es para la localización de túneles en la Delegación Álvaro Obregón al poniente de la ciudad de México. Este último estudio consta de dos etapas: la primera es detección de cavidades con secciones 2D y la segunda un estudio de TRE 3D en superficie.

Finalmente se presentan las conclusiones derivadas de este trabajo.

**OBJETIVO.**

El objetivo de este trabajo es evaluar la versatilidad de los métodos de Tomografía de Resistividad Eléctrica bidimensional y tridimensional considerando diferentes configuraciones de electrodos en pozos y superficie con la finalidad de proporcionar secciones de resistividad y cubos de resistividad eléctrica con mayor resolución.

Con base en estas consideraciones, se producirán imágenes eléctricas sintéticas de pozo como modelos 2D y 3D, que manifieste características de resistividad. El tipo específico a modelar son diferentes arreglos con sus respectivas configuraciones de pozo.

## Capítulo 1. Fundamentos teóricos de resistividad eléctrica

En este capítulo se presentan las bases teóricas de los métodos eléctricos con la finalidad de determinar la distribución de la resistividad del subsuelo haciendo mediciones sobre la superficie y pozo con diferentes configuraciones de electrodos. A partir de estas mediciones, se puede estimar la resistividad verdadera del subsuelo, dado que la resistividad está relacionada con diversos parámetros de interés geológicos tales como tipo de roca y grado de saturación de agua. Los estudios de resistividad eléctrica de pozo recientemente se están aplicando en las áreas de hidrogeología, minería, investigaciones geotécnicas y cada vez más se están requiriendo en estudios ambientales.

### 1.1 Distribución del potencial eléctrico de un medio homogéneo.

La ley física fundamental que se emplea en los estudios de resistividad es la ley de Ohm que rige el flujo de corriente inyectada desde la superficie. La ecuación de la ley de Ohm en su forma vectorial para el flujo de corriente en un medio continuo viene dada por

$$J = \sigma E \quad (1.1)$$

Donde  $\sigma$  es la conductividad del medio,  $J$  es la densidad de corriente y  $E$  es la intensidad de campo eléctrico. En la práctica, lo que se mide es el potencial del campo eléctrico. En estudios geofísicos eléctricos  $\rho$  es la resistividad del medio, la cual es igual al recíproco de la conductividad ( $\rho=1/\sigma$ ), que es la comúnmente utilizada. La relación entre el potencial eléctrico y la intensidad de campo está dado por

$$E = -\nabla U \quad (1.2)$$

Combinando 1.1 y 1.2, se obtiene

$$J = -\sigma \nabla U \quad (1.3)$$

En la mayoría de este tipo de estudios, las fuentes de corriente se encuentran en forma de fuentes puntuales. En este caso, sobre un volumen elemental alrededor de la fuente de una corriente  $I$ , localizada en las coordenadas  $(x_s, y_s, z_s)$  la relación entre la densidad de corriente y la corriente (Dey y Morrison, 1979a) está dada por

$$\nabla \cdot J = I \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad (1.4)$$

donde  $\delta$  es la función delta de Dirac. La ecuación 1.4 se puede reescribir como

$$\nabla^2 U(x, y, z) = -I \rho \delta(x - x_s) \delta(y - y_s) \delta(z - z_s) \quad (1.5)$$

Esta es la ecuación básica que describe la distribución del potencial en el terreno debido a una fuente de corriente puntual. Se han desarrollado un gran número de técnicas para resolver esta ecuación. Este es el problema de modelado directo, es decir, para determinar

el potencial que podría ser observado para una determinada estructura del subsuelo. También se han utilizado muchos métodos analíticos para casos simples, como es el caso de una esfera en un medio homogéneo o una falla vertical entre dos zonas, cada una con una resistividad constante. Para una distribución arbitraria de resistividad las técnicas numéricas son las más recurridas. Para el caso 1D, en el que el subsuelo está restringido a un número de capas horizontales, el método de filtrado lineal digital es de uso común (Koefoed, 1979). Para los casos de 2D y 3D, los métodos de diferencia finita y elemento finito son los más versátiles. En el capítulo 2 se describirá el uso de un programa de computadora de modelado directo para estructuras 2D y 3D de pozo.

En una región donde no existe fuente el potencial satisface

$$\nabla^2 U(x, y, z) = 0 \quad (1.6)$$

que es la ecuación de Laplace donde también la divergencia de  $E(x, y, z)$  es cero.

### 1.1.1 Fuente puntual en un semiespacio homogéneo.

Un semiespacio homogéneo e isótropo se define como un medio de resistividad  $\rho = \text{cte}$ . Separado por una interfase, donde el otro medio es de resistividad infinita (Figura 1.1).

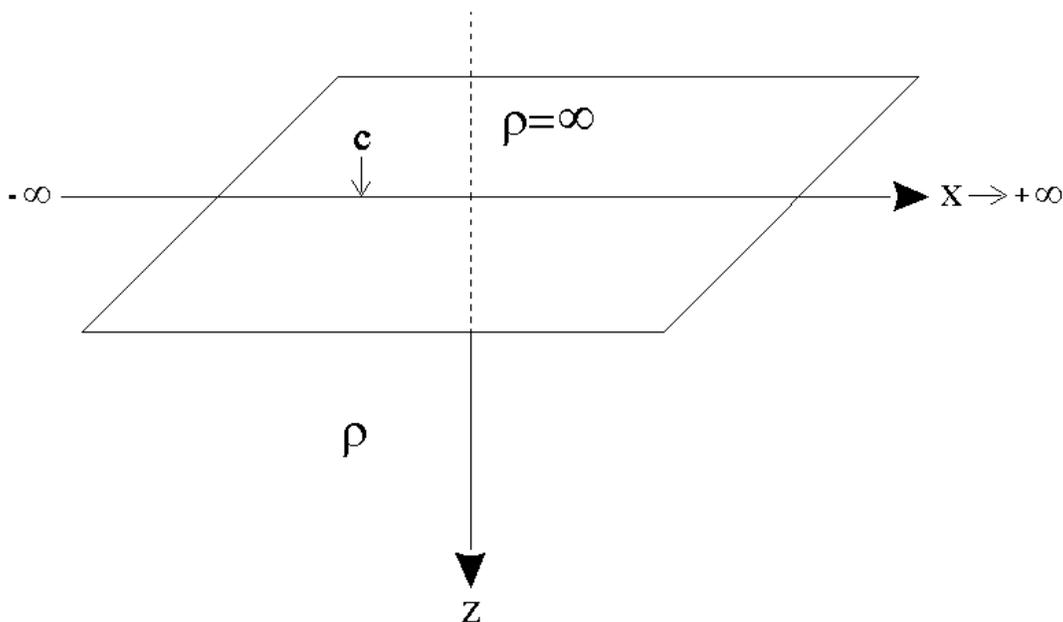


Figura 1.1 Fuente puntual en un semiespacio homogéneo e isótropo.

Para encontrar el potencial producido por una fuente puntual  $c$  en la frontera de ambos semiespacios, el problema se puede expresar como la solución de:

$$\nabla^2 U(\vec{r}) = -I\rho\delta(\vec{r}); \quad \mathbf{z} > \mathbf{0} \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial U(\vec{r})}{\partial \eta} = 0; \quad \mathbf{z} = \mathbf{0} \quad (1.8)$$

Si empleamos funciones de Green (Tijonov, 1980), la solución de la ecuación 1.7 se puede expresar como:

$$U(\vec{r}) = -\int_V G(\vec{r}, \vec{r}') \nabla^2 U(\vec{r}) dv + \int_S \left( G(\vec{r}, \vec{r}') \frac{\partial U(\vec{r})}{\partial \eta} - U(\vec{r}) \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}')}{\partial \eta} \right) ds \quad (1.9)$$

donde la función de Green satisface la ecuación diferencial expresada como (Kaufman, 1992):

$$\nabla^2 G(\vec{r}, \vec{r}') = -\delta(\vec{r}, \vec{r}'); \quad \mathbf{z} > \mathbf{0} \quad (1.10a)$$

$$\frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}')}{\partial \eta} = -k; \quad \mathbf{z} = \mathbf{0} \quad (1.10b)$$

La función de Green para el problema del semiespacio que satisface a las ecuaciones (1.10a) y (1.10b) es (Kaufman, 1992)

$$G(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}} + \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z+z')^2}} \right) + kz' \quad (1.11)$$

Sustituyendo las ecuaciones (1.7), (1.8) y (1.10b) en la ecuación (1.9) el potencial  $U(\vec{r})$  queda expresado por

$$U(\vec{r}) = I\rho \int_V G(\vec{r}, \vec{r}') \delta(\vec{r}') dv \quad (1.12)$$

De las propiedades de las funciones impulso la integral de la ecuación (1.12) es

$$\int_V G(\vec{r}, \vec{r}') \delta(\vec{r}') dv = G(\vec{r}, \mathbf{0}) \quad (1.13)$$

donde  $\delta(\vec{r}') = \delta(0,0,0)$

Sustituyendo la ecuación (1.13) en la (1.12), el potencial

$$U(\vec{r}) = I\rho G(\vec{r}, \mathbf{0}) \quad (1.14)$$

y de la ecuación (1.11) en la ecuación (1.14) se tiene

$$U(\vec{r}) = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{R} \quad (1.15a)$$

El campo eléctrico se obtiene de

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\nabla U(\vec{r}) \quad (1.15b)$$

donde  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ .

## 1.2 Metodología de los métodos eléctricos de Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D, 3D en pozo y Tomografía de Resistividad Eléctrica 3D en superficie.

La tomografía es una técnica de inversión para generar imágenes de la distribución real o espacial de una propiedad física sobre una sección plana o volumen de un objeto sólido realizando mediciones remotas de propiedades físicas. El propósito de la tomografía es reconstruir un modelo cuantificable tal que explique lo mejor posible las mediciones.

La tomografía en Geociencia (Geotomografía) generalmente se propone como problema de pozo cruzado (crosshole) en el cual las fuentes se colocan dentro de un pozo y los receptores se colocan en otro. La geometría descrita anteriormente es para mapear un parámetro físico sobre una sección entre los dos pozos. De acuerdo al tipo de fuente la geotomografía se clasifica en: Tomografía sísmica, Tomografía de radar, Tomografía de Resistividad Eléctrica, etc.

La Tomografía de Resistividad Eléctrica en pozo utiliza un campo potencial estático, mientras la tomografía sísmica y de radar propagación de ondas. En la Tomografía de Resistividad Eléctrica en pozo los electrodos de corriente son colocados como fuentes en un pozo y los electrodos de potencial como receptores en otro pozo, muy similar a como se lleva a cabo en las otras tomografías.

Con la tomografía de resistividad eléctrica en pozos se obtiene la distribución de la resistividad dentro de un volumen, basado en la medición de numerosos potenciales eléctricos que aparecen debido a la aplicación de una corriente estacionaria dentro del mismo volumen. Las imágenes creadas son superficies bidimensionales o volúmenes tridimensionales que reflejan contrastes de resistividad existentes dentro del medio.

### 1.2.1 Dispositivo eléctrico o arreglo geométrico de superficie y pozo.

Una de las limitaciones más severas al realizar estudios de tomografía eléctrica superficial 2D, es la inevitable reducción en la resolución con la profundidad, debido a que el potencial o función potencial de una fuente puntual en un punto de observación es del tipo exponencial, conforme crece la distancia entre la fuente y el punto de observación, el potencial será cada vez más bajo, tendiendo a cero pero nunca llegando a él, excepto en el aspecto matemático de límites. El campo eléctrico decae como  $1/r^2$  (ecuación de Laplace).

Esta es una limitación física fundamental la cual puede ser superada con la reconfiguración de los estudios superficiales o modelos por computadora.

En teoría, la única manera de mejorar la resolución a profundidad es colocar sensores (i.e. electrodos) más cerca de las estructuras de interés. Esto no siempre es posible porque las estructuras se encuentran en el subsuelo, pero cuando existen pozos, los estudios de pozo pueden dar resultados mucho más confiables a diferencia de solo emplear estudios de superficie. Actualmente, en el caso de estudios de TRE 2D en pozo resultan todavía más confiables cuando se utilizan al mismo tiempo electrodos en superficie y pozo, así como estudios de TRE 3D en pozo.

La medición del potencial eléctrico en un semiespacio homogéneo se realiza con un dispositivo eléctrico o arreglo de electrodos (Figura 1.2).

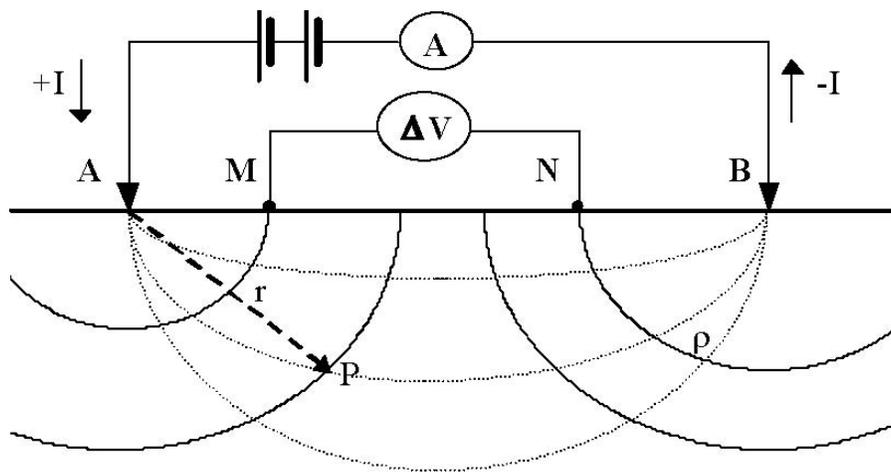


Figura 1.2. Medición del potencial en un semiespacio homogéneo

Sean  $A-B$  los electrodos de corriente, positivo y negativo respectivamente, y  $M-N$  los electrodos de potencial. Si  $\Delta U$  es la diferencia de potencial entre  $M$  y  $N$  despejando la resistividad  $\rho$  de la ecuación 1.15a se obtiene el parámetro que se desea conocer del subsuelo, por lo tanto se tiene

$$\rho = 2\pi R \frac{\Delta U}{I} \quad 1.16$$

Donde  $2\pi R$  se le define como factor geométrico asociado directamente a la posición de los electrodos de este arreglo. Ahora, tomando en cuenta que se pueden definir diversos tipos de dispositivos geométricos de electrodos, la ecuación se puede generalizar y representar como

$$\rho = k \frac{\Delta U}{I} \quad 1.17$$

donde  $k$  es un factor que depende únicamente de la geometría de los cuatro electrodos

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

Un dispositivo electródico consta de cuatro electrodos, dos por medio de los cuales se envía corriente  $A$  y  $B$ , y los otros dos  $M$  y  $N$  entre los cuales se mide la diferencia de potencial o caída de voltaje creada por la aplicación de la corriente estacionaria enviada por los electrodos de corriente.

En principio, los cuatro electrodos pueden adoptar cualquier disposición geométrica en superficie o pozo. Estas disposiciones geométricas se denominan *dispositivos, modalidades, configuraciones o arreglos*.

### 1.2.2 Concepto de resistividad aparente.

La variable índice experimental que expresa los resultados de las mediciones en la mayoría de los métodos geoelectrónicos y la que se toma como base en la interpretación es la resistividad aparente  $\rho_a$ .

Para comprender mejor este concepto supongamos un semiespacio homogéneo de resistividad  $\rho$  en donde se realizan mediciones de  $\Delta U$  e  $I$  con cualquier dispositivo electródico, el valor de la resistividad que se obtendría con la ecuación (1) para cualquier posición, sería la resistividad verdadera. En la práctica, no existen medios homogéneos. Por lo tanto en las mediciones realizadas lo que se obtiene es un valor convencional con dimensiones de resistividad afectado por todas las heterogeneidades en el subsuelo que influyen en la distribución de los potenciales en un determinado volumen. A esta, magnitud se le denomina resistividad aparente ( $\rho_a$ ). Es necesario aclarar que bajo ninguna condición la  $\rho_a$  coincide con la resistividad promedio de las rocas del subsuelo, sino que cada valor de  $\rho_a$ , es una medición individual, que se asocia al punto inmediatamente bajo el centro del dispositivo empleado, del espaciamiento de los electrodos y de la distribución real de la resistividad.

Para calcular la resistividad aparente con un dispositivo en particular, tenemos que determinar el factor geométrico  $k$  correspondiente, debido a que se utiliza en la ecuación 1.6. Con la  $k$  calculada se obtiene la localización del punto al cual se le atribuye el valor de resistividad aparente, a este se le conoce como punto de atribución.

Como también se aprecia en la ecuación 1.6, si las distancias entre los electrodos se mantienen fijas, ello implicará que  $k = \text{cte}$ . Por otra parte, el valor de  $I$ , puede ser controlado, entonces el valor calculado de  $\rho_a$ , dependerá casi exclusivamente de las variaciones de  $\Delta U$ , que a su vez dependerá de las heterogeneidades y propiedades del medio por donde circule la corriente.

El factor geométrico es “un parámetro que al multiplicarse por una medida de resistencia convierte la resistencia en resistividad [valor absoluto de] para un medio uniforme” (Keller y Frischknecht, 1966). Para una configuración convencional de superficie, en la cual la fuente y/o receptor están en la superficie, la ecuación de la resistividad aparente es la conocida fórmula de 4 electrodos

$$\rho_a = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} \frac{(U_M - U_N)}{I} \quad (1.18)$$

Donde  $AM$ ,  $AN$ ,  $BM$  y  $BN$ , son las distancias respectivas entre los electrodos  $A$ ,  $M$ ,  $N$  y  $B$ ;  $U_M$  y  $U_N$  son el potencial eléctrico en los puntos  $M$  y  $N$ , respectivamente; e  $I$  es la corriente eléctrica.

El factor geométrico que se utiliza para los electrodos de pozo es muy diferente a los usados para electrodos de superficie. En los estudios de pozo la fuente y el receptor son enterrados, por lo tanto, la ecuación para el cálculo de la resistividad aparente para arreglos de electrodos en pozo se convierte en:

$$\rho_a = \frac{4\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} + \frac{1}{A'M} - \frac{1}{A'N} - \frac{1}{B'M} + \frac{1}{B'N}} \frac{(U_M - U_N)}{I} \quad (1.19)$$

El factor geométrico para arreglos de electrodos enterrados es,

$$k = \frac{4\pi}{\frac{1}{AM} + \frac{1}{A'M} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{B'M} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{A'N} + \frac{1}{BN} + \frac{1}{B'N}} \quad (1.20)$$

Los arreglos de electrodos enterrados introducen variables que no están presentes en los arreglos de superficie (o arreglos de pozo a superficie) que causan problemas en la interpretación de los datos.

En el caso de una fuente enterrada el campo eléctrico de las cargas que inducen la superficie es equivalente al campo de una fuente puntual "imagen". Para una fuente ubicada en la superficie, la fuente imagen coincide con la fuente, a esto se le conoce como teoría de la imagen. La teoría de la imagen establece que cada frontera actúa como un espejo semitransparente para la corriente eléctrica, la cual permite remover el plano de la superficie y colocar una fuente imagen virtual en el otro lado del plano de la superficie, esta fuente imagen ficticia es necesaria para satisfacer las condiciones de frontera en la interfase aire-tierra. Esta teoría puede utilizarse considerando cargas eléctricas en los electrodos de corriente y esta basada en la teoría de la óptica en donde la fuente localizada en el punto  $A$  afecta la intensidad de señal en un punto  $M$  a través de una serie de reflexiones y transmisiones dentro de los espejos semitransparentes localizados en la frontera entre los dos medios. La teoría de la imagen consiste en considerar todas las posibles trayectorias entre  $A$  y  $M$ . Cada trayectoria esta asociada a una imagen de igual intensidad al producto de los coeficientes de reflexión y transmisión, y una localización aparente con una coordenada vertical igual a la suma de la distancia vertical de cada segmento (Figura 1.3).

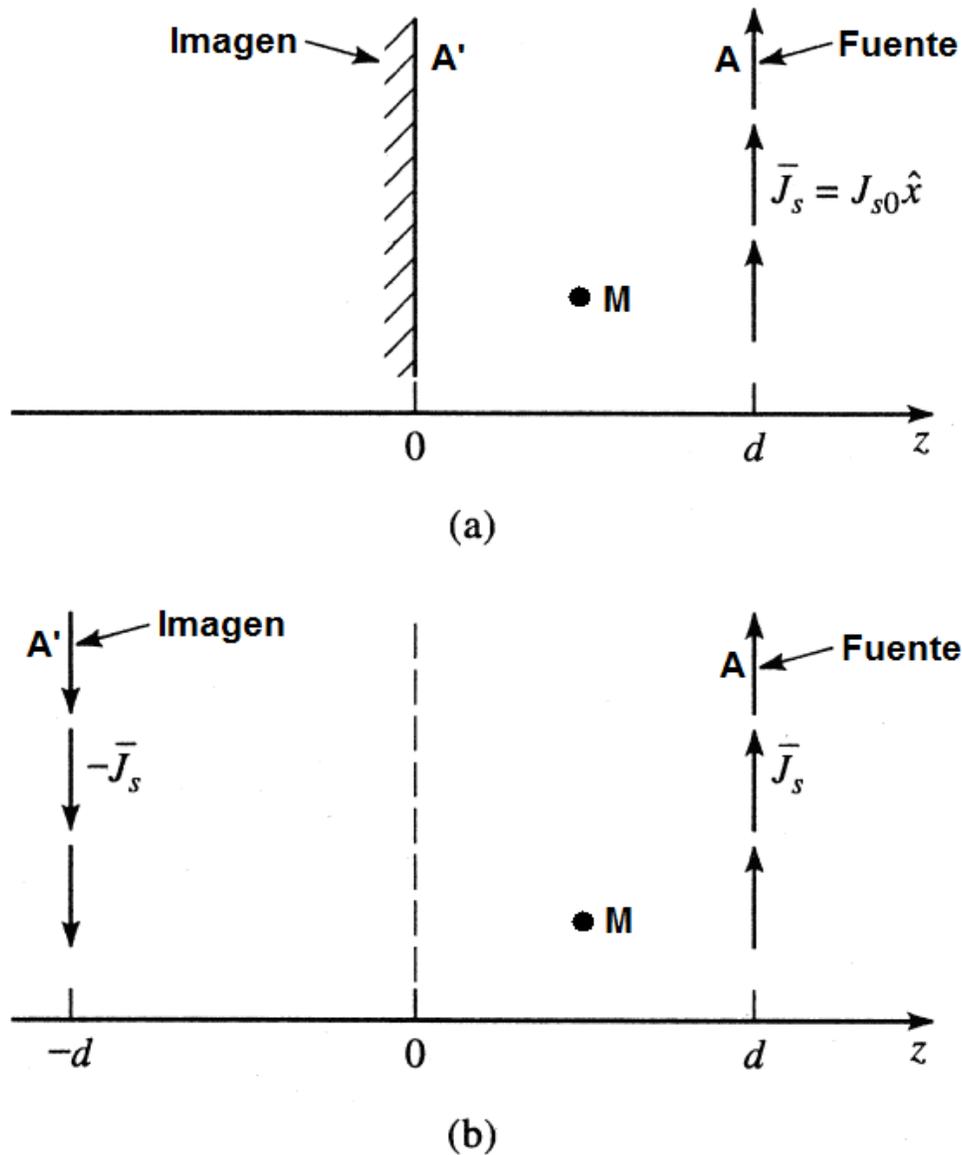


Figura 1.3 Esquema de la teoría de la imagen aplicada a una fuente de corriente eléctrica en un plano contiguo a la superficie del terreno. (a) Superficie eléctrica con densidad de corriente paralela al plano del terreno. (b) El plano del terreno de (a) reemplazado con una corriente imagen en  $z = -d$ .

En teoría, cualquier configuración geométrica de electrodos utilizada en estudios superficiales se puede adaptar a estudios de pozo. De esta manera se pueden tener configuraciones geométricas de electrodos en pozo con dos, tres y cuatro electrodos convencionales y no convencionales como los mostrados en la Figura 1.4.

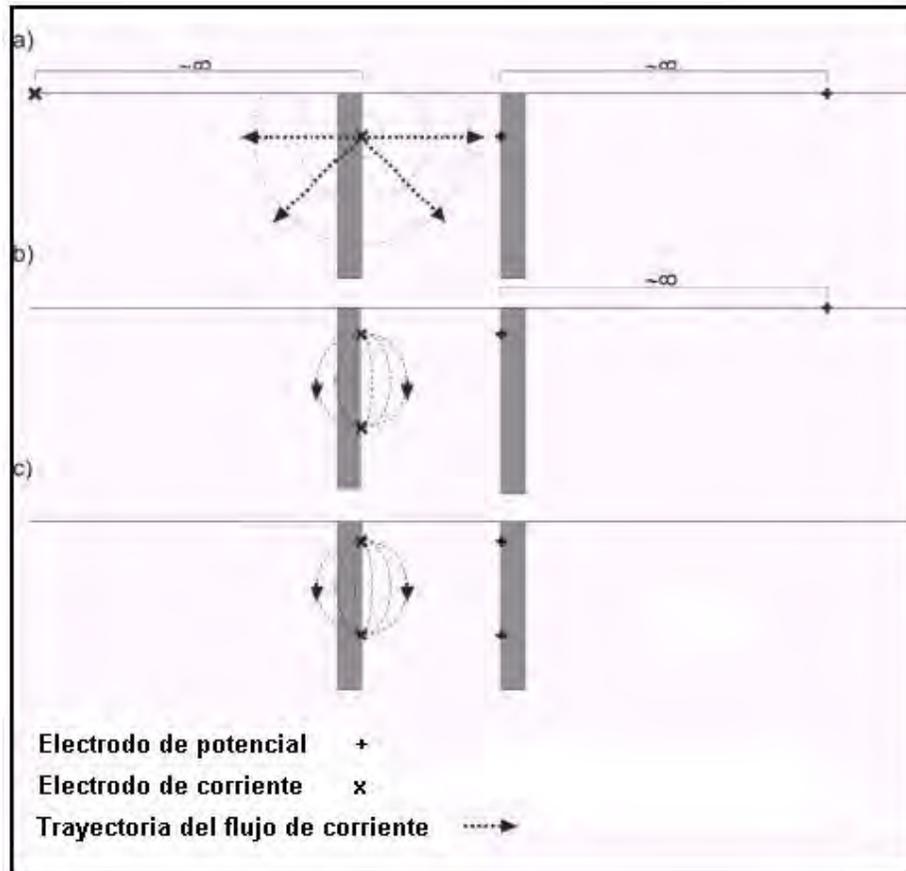


Figura 1.4 Arreglos de electrodos polo-polo (a), dipolo-polo (b) y dipolo-dipolo utilizados en la Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D en pozo.

### 1.2.3 Configuraciones geométricas de electrodos de TRE 2D en pozo.

En esta sección se describen todas las posibles configuraciones con las cuales se puede medir TRE 2D en pozo con cuatro electrodos. En cuanto a representar las diversas configuraciones de arreglos de electrodos polo-polo, polo-dipolo y dipolo-dipolo se adoptan primero la siguiente convención de símbolos, las letras  $A$  y  $B$  denotan electrodos de corriente positivo (fuente) y negativo (sumidero), mientras que  $M$  y  $N$  denotan los electrodos de potencial. El guión que separa las cuatro letras representa una configuración de TRE en pozo de un tipo de arreglo específico, es decir,  $A-M$  denota la configuración de un estudio de TRE en pozo polo-polo en el cual el electrodo de corriente positivo  $A$  se coloca en el pozo izquierdo y el electrodo de observación de potencial  $M$  se coloca en el pozo derecho. Las letras que no aparecen ( $B$  y  $N$ ) implican electrodos remotos.

### 1.2.4 Configuración geométrica de dos electrodos. Arreglo polo-polo.

Los estudios que utilizan el arreglo polo-polo se realizan llevando un electrodo de corriente y uno de potencial a una distancia bastante alejada del lugar de medición (infinito),

mientras que los otros electrodos de corriente y de potencial se colocan en el pozo a una distancia finita (Figura 1.5).

Existen cuatro configuraciones posibles para este arreglo, ambos electrodos pueden colocarse en dos pozos diferentes (Figura 1.5a), en dos pozos y superficie (Figura 1.5b), un electrodo en superficie y otro en un pozo (Figura 1.5c) y en el mismo pozo (Figura 1.5d). Si se tienen un cierto número  $n$  de electrodos (incluidos los electrodos de superficie, si existen) hay un total de  $n(n-1)/2$  posibles mediciones independientes. La mayoría de los autores recomiendan la medición de todas las posibles lecturas en los demás electrodos para un electrodo de corriente, igualmente medir todas las posibles combinaciones. Uno de los problemas con este arreglo es la ubicación física de los dos electrodos remotos,  $B$  y  $N$ , los cuales deben estar lo suficientemente lejos para que la aproximación polo-polo sea lo suficientemente precisa. Esto significa que se deben colocar a una distancia de por lo menos 20 veces la separación máxima entre los electrodos  $A$  y  $M$  ubicados en los pozos. La extensa separación utilizada entre los electrodos  $M$  y  $N$  provoca contaminación por ruido telúrico. Estos problemas son exactamente los mismos a los que se enfrenta el arreglo polo-polo en estudios de superficie.

El arreglo polo-polo de pozo es una ilustración útil del cambio en el factor geométrico para diferentes configuraciones de pozo. Se sabe que para el arreglo polo-polo con ambos electrodos localizados en la superficie de un semiespacio, el factor geométrico  $k$  esta dado por

$$k = 2\pi a \quad (1.21)$$

donde  $a$  es el espaciamiento entre los electrodos.

Para el caso del arreglo polo-polo donde ambos electrodos se encuentran en un medio infinito, el factor geométrico esta dado por

$$k = 4\pi r \quad (1.22)$$

donde  $r$  es la distancia entre los electrodos de corriente y de potencial. Para el caso en donde  $A$  y  $M$  son electrodos que se localizan en  $(x_1, z_1)$  y  $(x_2, z_2)$  respectivamente, bajo la superficie de un semiespacio el factor geométrico  $k$ , esta dado por

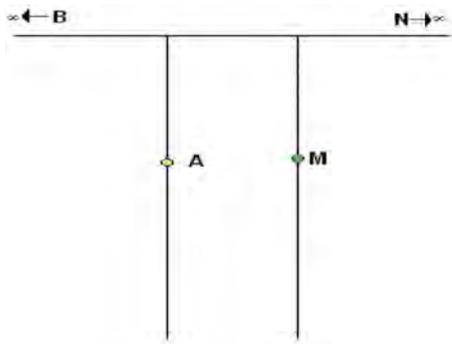
$$k = 4\pi / (1/r + 1/r') \quad (1.23)$$

donde

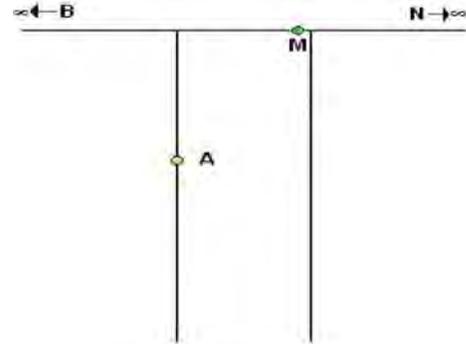
$$\begin{aligned} r &= \sqrt{(dx^2 + dz^2)} & r' &= \sqrt{(dx^2 + Dz^2)} \\ dx &= x_1 - x_2 & dz &= z_1 - z_2 \\ Dz &= z_1 + z_2 \end{aligned}$$

Donde  $r'$  es la distancia de la imagen reflejada de la corriente (Figura 1.6) a partir del electrodo de potencial,  $x$  y  $z$  son las coordenadas a cada electrodo.

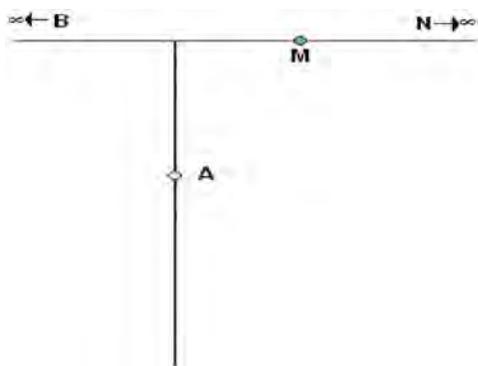
a) Configuración de pozo a pozo



b) Configuración de dos pozos a superficie



c) Configuración de un pozo a superficie



d) Configuración de un solo pozo

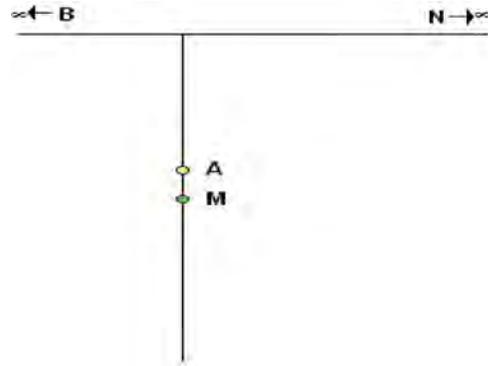


Figura 1.5 Las posibles configuraciones de electrodos que se utilizan en TRE de pozo para el arreglo polo-polo. Los dos pozos se representan con las dos líneas verticales de color negro y la superficie con una línea horizontal también de color negro.

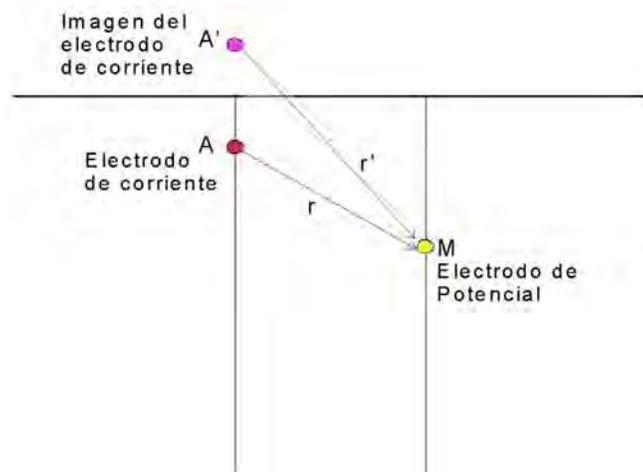


Figura 1.6 Diagrama esquemático de dos pozos bajo la superficie. El potencial medido en M puede ser considerado como la suma de la contribución del electrodo de corriente A y su imagen A' sobre la superficie del terreno.

**1.2.5 Configuración geométrica de tres electrodos. Arreglo polo-dipolo.**

Los estudios con el arreglo polo-dipolo se llevan a cabo colocando un electrodo de corriente a una distancia bastante alejada del sitio de medición (infinito), y el otro en cualquiera de los dos pozos, mientras que los dos electrodos de potencial se colocan en cualquiera de los dos pozos.

De acuerdo a Zhou y Greenhalg (1997), existen seis posibles configuraciones independientes para el arreglo polo-dipolo (sin considerar electrodos de superficie). De estas seis configuraciones existen dos combinaciones básicas, una de estas combinaciones es el conocido arreglo polo-dipolo (A-MN) Figura 1.7f.

La otra combinación es el arreglo que consta de un electrodo de corriente y uno de potencial en el primer pozo y el otro electrodo de potencial en el segundo pozo (AM-N) Figura 1.7a.

Este es el tradicional arreglo polo-dipolo (A-MN) que se utiliza comúnmente en superficie a la cual Zhou y Greenhalg (1997) hacen mención. Este arreglo consta de un electrodo de corriente en un pozo y dos electrodos de potencial en el otro pozo, y a diferencia del arreglo (AM-N) puede considerar electrodos de superficie (Figura 1.8). Al igual que para el arreglo polo-polo existen cuatro configuraciones posibles para este arreglo, se pueden colocar electrodos en dos pozos diferentes, sin considerar electrodos en superficie, un electrodo en un pozo y los otros dos electrodos en otro pozo (Figura 1.8a). En la configuración de dos pozos y superficie; se coloca un electrodo en pozo y los otros dos en superficie o viceversa, un electrodo en superficie y los otros dos en pozo (Figura 1.8b). Para la configuración de un pozo y superficie; al igual que la configuración anterior se coloca un electrodo en pozo y los otros dos en superficie o también un electrodo en superficie y los otros dos en pozo (Figura 1.8c). Por último tenemos la configuración de un solo pozo en la cual los tres electrodos están en el mismo pozo (Figura 1.8d)

Para el caso en donde A, M y N son electrodos que se localizan en (x1, z1), (x2, z2) y (x2, z3) respectivamente, bajo la superficie de un semiespacio el factor geométrico k, esta dado por

$$k = 4\pi / (1/r_1 - 1/r_2 + 1/r_1' - 1/r_2') \tag{1.24}$$

(A,B: electrodos de corriente; M,N: electrodos de potencial)

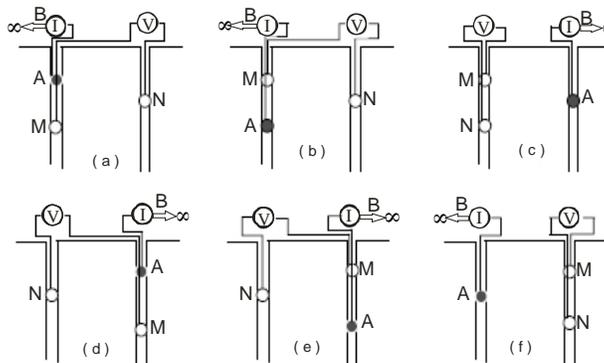
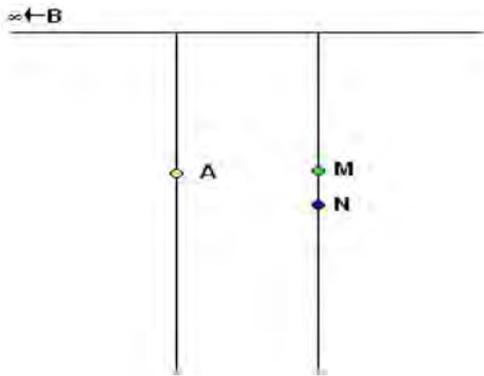
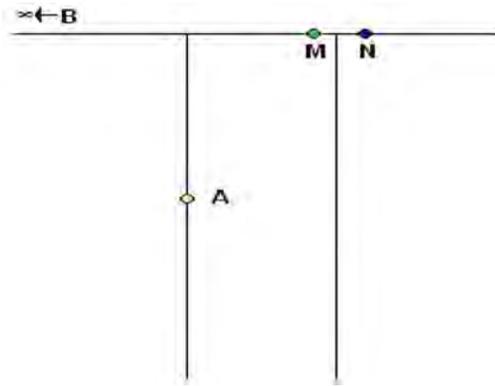


Figura 1.7 Seis configuraciones independientes para la TRE de pozo con el arreglo polo-dipolo: (a) AM-N, (b) MA-N, (c) MN-A, (d) N-AM, (e) N-MA y (f) A-MN.

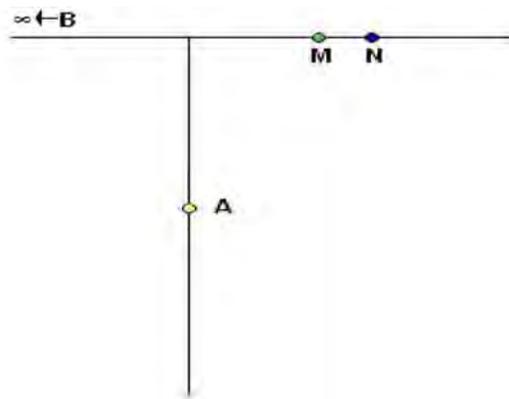
a) Configuración de pozo a pozo



b) Configuración de dos pozos a superficie



c) Configuración de un pozo a superficie



d) Configuración de un solo pozo

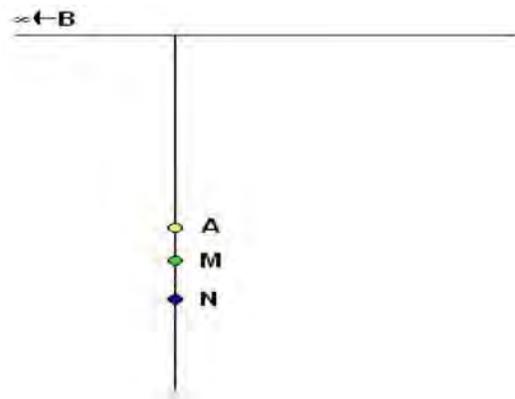


Figura 1.8 Las posibles configuraciones de electrodos que se utilizan en TRE de pozo para el arreglo polo-dipolo. Los dos pozos se representan con las dos líneas verticales de color negro y la superficie con una línea horizontal también de color negro.

### 1.2.6 Configuración geométrica de cuatro electrodos. Arreglo dipolo-dipolo.

Los estudios con el arreglo dipolo-dipolo tienen los cuatro electrodos en el área de influencia, es decir, estas configuraciones colocan los cuatro electrodos a una distancia finita (Figura 1.9).

Zhou y Greenhalg (1997) listan 3 posibles configuraciones independientes para este arreglo; consideran 2 combinaciones básicas, el arreglo dipolo-dipolo ( $AM-BN$ ) el cual se muestra en la Figura 1.9a y el tradicional arreglo dipolo-dipolo ( $AB-MN$ ) Figura 1.9c.

El arreglo dipolo-dipolo ( $AB-MN$ ) es el tradicional, el cual consta de dos electrodos de corriente en un pozo y dos electrodos de potencial en otro pozo (Figura 1.10) y a diferencia del arreglo dipolo-dipolo ( $AM-BN$ ) toma en cuenta electrodos de superficie. Al igual que para los arreglos polo-polo y polo-dipolo existen cuatro configuraciones posibles para este arreglo, se pueden colocar electrodos en dos pozos diferentes, sin considerar electrodos en superficie, dos electrodos en un pozo y los otros dos electrodos en otro pozo (Figura 1.10a),

configuración en dos pozos y superficie, se colocan dos electrodos en pozo y los otros dos en superficie (Figura 1.10b), configuración en un pozo y superficie, al igual que en la configuración anterior se colocan dos electrodos en el pozo y los otros dos en superficie (Figura 1.10c). Por último, la configuración de un solo pozo en la cual los cuatro electrodos están en el mismo pozo (Figura 1.10d).

El arreglo dipolo-dipolo ( $AM-BN$ ) coloca un electrodo de corriente y uno de potencial en un pozo, un electrodo de corriente y uno de potencial en otro pozo (Figura 1.11a), solo considera la configuración de pozo a pozo para realizar las mediciones. El arreglo fue desarrollado con la intención de eliminar los problemas de obstáculos en superficie y de enviar uno o dos electrodos remotos. No se consideran electrodos de superficie. En estudios urbanos algunas veces o casi siempre es difícil o complicado extender un electrodo o dos al infinito (arreglos polo-polo y polo dipolo, respectivamente), debido a que existen construcciones. También es complicado colocar electrodos de superficie debido a que se requiere hacer un mapeo por debajo de estas construcciones, por lo que es adecuado recurrir a configuraciones de pozo a pozo que además contengan los cuatro electrodos dentro de los pozos y un número mayor de adquisición de datos. Por lo que este arreglo resulta una excelente propuesta.

El arreglo de gradiente al igual que el arreglo dipolo-dipolo ( $AM-BN$ ) es otra buena opción cuando no se pueden colocar electrodos remotos o en superficie. Este arreglo también fue desarrollado con la intención de eliminar los problemas de obstáculos en superficie que se presentan en las zonas urbanas. No considera electrodos de superficie. Este arreglo solo considera la configuración de pozo a pozo, colocando un electrodo de corriente, seguido de los dos de potencial y por último el otro de corriente en un mismo pozo o en un pozo diferente (Figura 1.11b).

Para el caso en donde  $A$ ,  $B$ ,  $M$  y  $N$  son electrodos que se localizan en  $(x_1, z_1)$ ,  $(x_1, z_2)$ ,  $(x_2, z_3)$  y  $(x_2, z_4)$  respectivamente, bajo la superficie de un semiespacio el factor geométrico  $k$ , está dado por

$$k = 4\pi / (1/r_1 + 1/r_1' - 1/r_3 - 1/r_3' - 1/r_2 - 1/r_2' + 1/r_4 + 1/r_4') \quad (1.25)$$

(A,B: electrodos de corriente; M,N: electrodos de potencial)

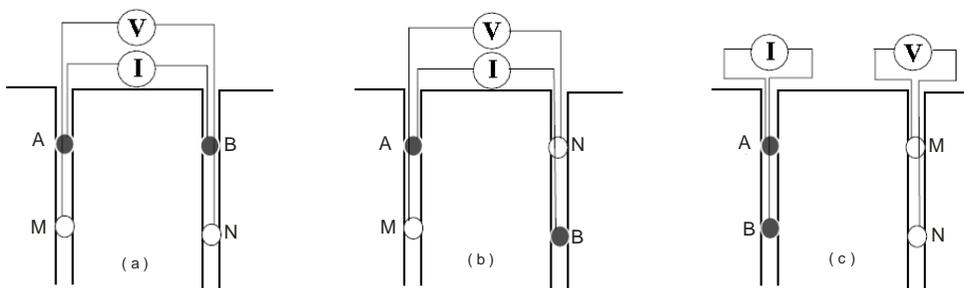
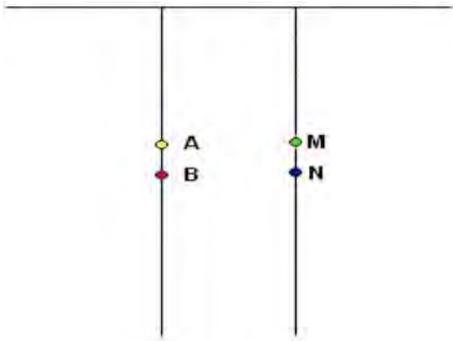
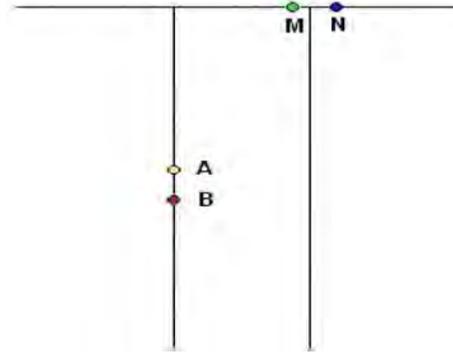


Figura 1.9 Tres configuraciones independientes para la TRE de pozo con el arreglo dipolo-dipolo: (a)  $AM-BN$ , (b)  $AM-NB$  y (c)  $AB-MN$ .

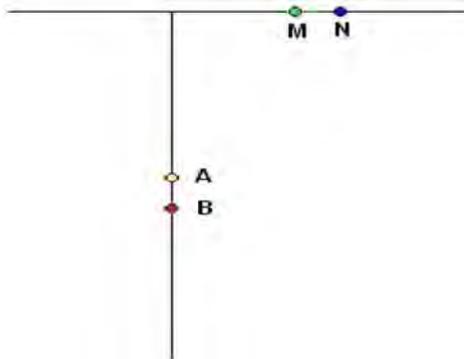
a) Configuración de pozo a pozo



b) Configuración de dos pozos a superficie



c) Configuración de un pozo a superficie



d) Configuración de un solo pozo

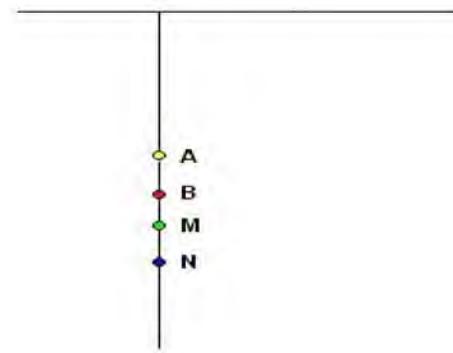
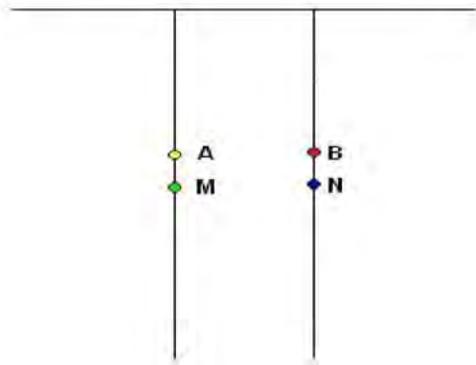


Figura 1.10 Las posibles configuraciones de electrodos que se utilizan en TRE de pozo para el arreglo dipolo-dipolo. Los dos pozos se representan con las dos líneas verticales de color negro y la superficie con una línea horizontal también de color negro.

a) Configuración de pozo a pozo para el arreglo dipolo-dipolo (AM-BN)



b) Configuración de pozo a pozo para el arreglo Gradiente

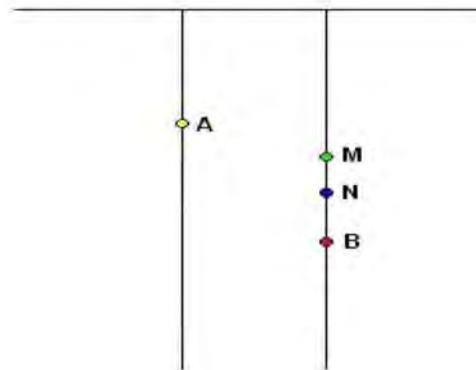


Figura 1.11 Configuraciones de electrodos pozo a pozo que se utilizan en TRE de pozo para los arreglos dipolo-dipolo (AM-BN) y Gradiente. Los dos pozos se representan con las dos líneas verticales de color negro y la superficie con una línea horizontal también de color negro.

### 1.3 Metodología de las secuencias de mediciones para las diferentes configuraciones de TRE 2D en pozos.

En esta sección se ilustran las posibles secuencias de mediciones de los diferentes arreglos. La técnica funciona de la siguiente manera: se transmite una corriente conocida desde una fuente puntual dentro de la superficie conductiva, y el resultado se observa en otras posiciones sobre la superficie y dentro de los pozos. Se calcula la diferencia de potencial entre alguno de los dos puntos (Figura 1.12a). Entonces la posición de los electrodos de inyección de corriente se mueve a otra posición hasta que se tienen todas las combinaciones posibles de los lugares de transmisión de corriente y medición de voltaje (Figura 1.12b).

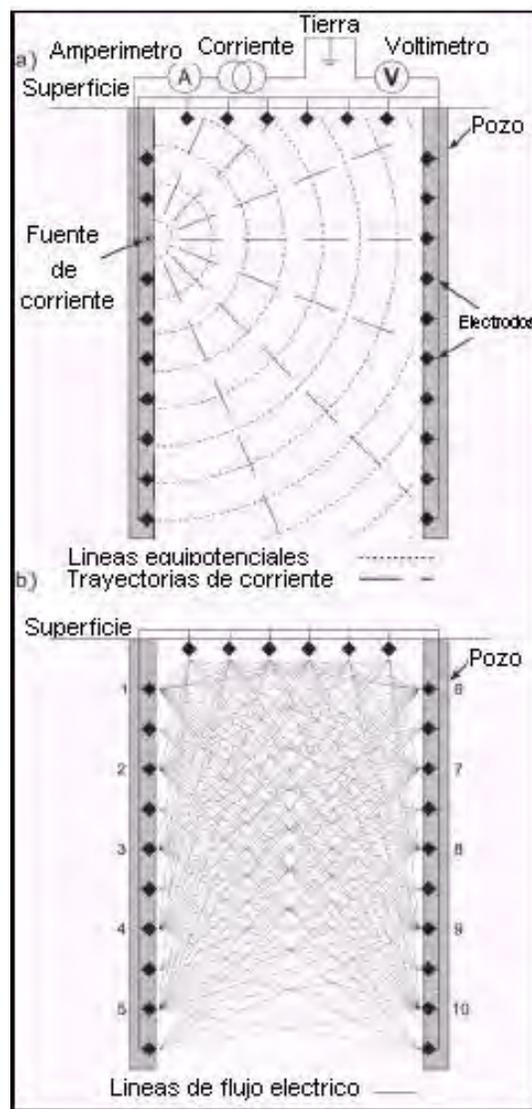
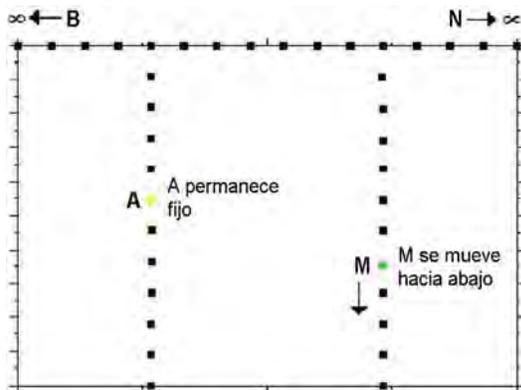


Figura 1.12 (a). Un sistema de Tomografía que transmite una corriente conocida desde un punto fijo y registros de potencial en otro sitio con otros electrodos. Este proceso es repetido secuencialmente rotando la transmisión de corriente (números 1-10) con sus respectivos electrodos de potencial.  
(b) Trayectorias esquemáticas de la corriente.

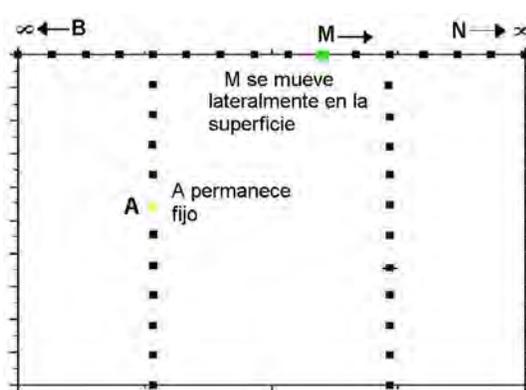
### 1.3.1 Configuraciones de dos electrodos.

La Figura 1.13 muestra la secuencia de mediciones con las diferentes configuraciones para el arreglo polo-polo. La Figura 1.13a muestra la secuencia de mediciones del electrodo de corriente  $A$  en un pozo y el de potencial  $M$  en otro pozo. La Figura 1.13b muestra la secuencia de mediciones del electrodo de corriente  $A$  en pozo y el de potencial  $M$  en superficie y por ultimo la Figura 1.13c muestra la secuencia de mediciones a lo largo de un solo pozo

a) Mapeo secuencial de pozo a pozo



b) Mapeo secuencial de pozo a superficie



c) Mapeo secuencial a lo largo del mismo pozo

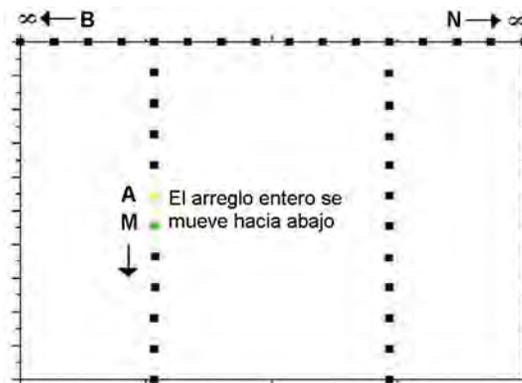


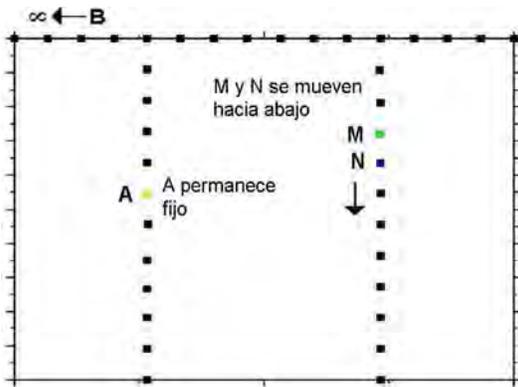
Figura 1.13 Secuencias de mediciones para las diferentes configuraciones del arreglo polo-polo.

### 1.3.2 Configuraciones de tres electrodos.

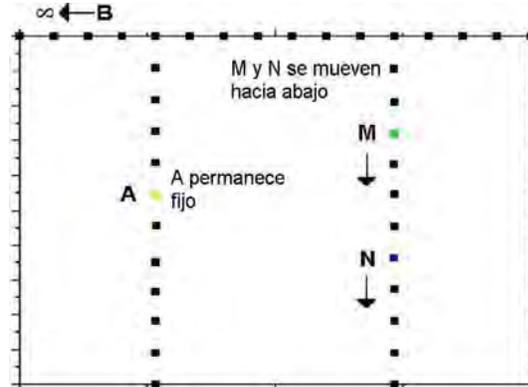
En la Figura 1.14 se muestra la secuencia de mediciones con las diferentes configuraciones para el arreglo polo-dipolo. La Figura 1.14a muestra la secuencia de mediciones de pozo a pozo con un espaciamiento constante entre los electrodos  $M$  y  $N$ . La Figura 1.14b muestra la secuencia de mediciones de pozo a pozo con un espaciamiento diferente entre los electrodos  $M$  y  $N$ . La siguiente Figura 1.14c muestra la secuencia de mediciones de pozo a

superficie y por último la Figura 1.14d muestra la secuencia de mediciones a lo largo de un solo pozo.

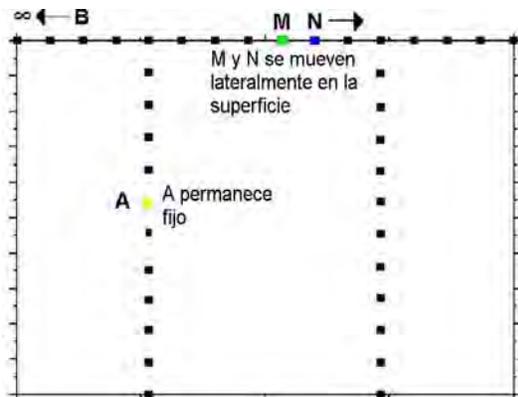
a) Mapeo secuencial de pozo a pozo con un espaciamiento constante



b) Mapeo secuencial de pozo a pozo con un espaciamiento diferente



c) Mapeo secuencial de pozo a superficie



d) Mapeo secuencial a lo largo del mismo pozo

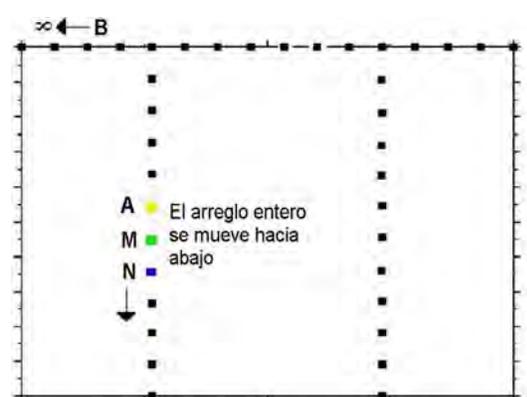


Figura 1.14 Secuencias de mediciones para las diferentes configuraciones del arreglo polo-dipolo.

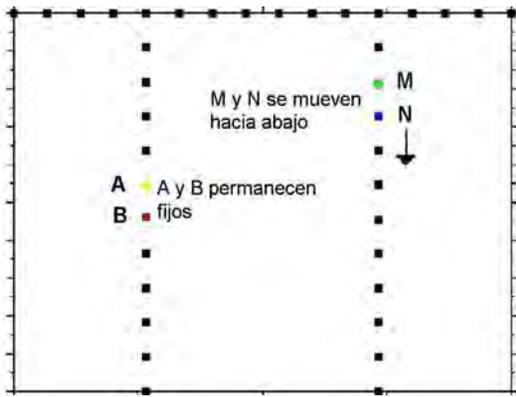
### 1.3.3 Configuraciones de cuatro electrodos.

En la Figura 1.15 se muestra la secuencia de mediciones con las diferentes configuraciones para el arreglo dipolo-dipolo ( $AB-MN$ ). La Figura 1.15a muestra la secuencia de mediciones de pozo a pozo con espaciamiento constante entre los electrodos  $A-B$  y  $M-N$ . En la Figura 1.15b se muestra la secuencia de mediciones de pozo a pozo con un espaciamiento diferente entre los electrodos  $A-B$  y  $M-N$ . La siguiente Figura 1.15c muestra la secuencia de mediciones de pozo a superficie y por último la Figura 1.15d muestra la secuencia de mediciones a lo largo de un solo pozo.

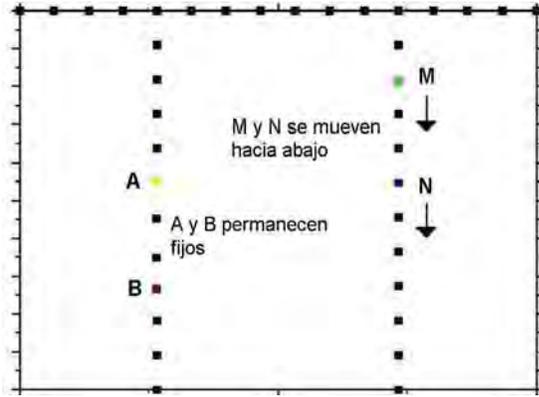
La Figura 1.16 muestra la secuencia de mediciones con la configuración de pozo a pozo para el arreglo dipolo-dipolo ( $AM-BN$ ).

La Figura 1.17 muestra la secuencia de mediciones con la configuración de pozo a pozo para el arreglo gradiente. En la Figura 1.17a muestra la secuencia de mediciones de pozo a pozo. La Figura 1.17b muestra la secuencia de mediciones a lo largo de un solo pozo.

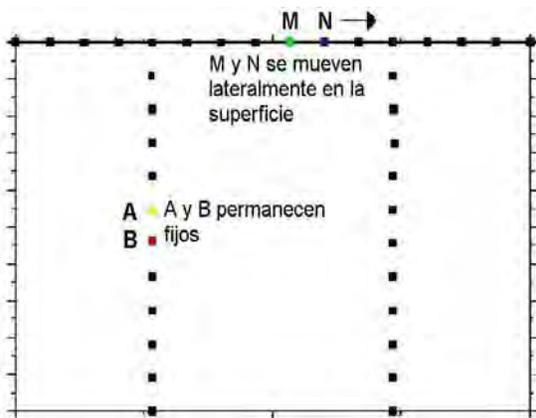
a) Mapeo secuencial de pozo a pozo con un espaciamiento constante



b) Mapeo secuencial de pozo a pozo con un espaciamiento diferente



c) Mapeo secuencial de pozo a superficie



d) Mapeo secuencial a lo largo del mismo pozo



Figura 1.15 Secuencias de mediciones para las diferentes configuraciones del arreglo dipolo-dipolo (AB-MN)

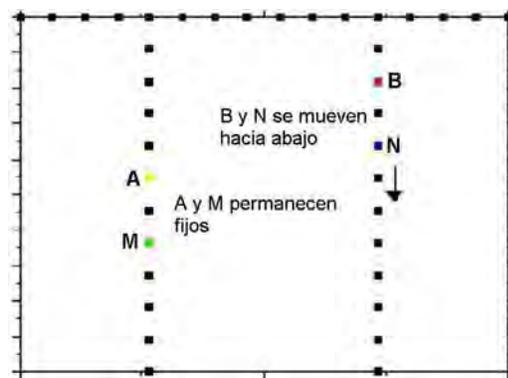
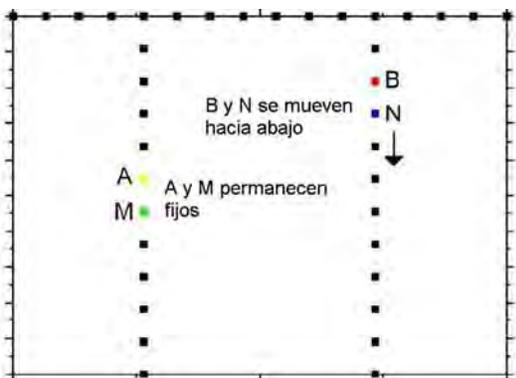
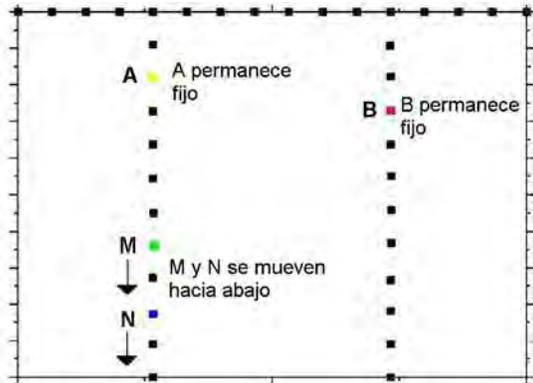


Figura 1.16 Secuencias de mediciones para la configuración de pozo a pozo del arreglo dipolo-dipolo (AM-BN).

a) Mapeo secuencial de pozo a pozo.



b) Mapeo secuencial a lo largo del mismo pozo.



Figura 1.17 Secuencias de mediciones para la configuración del arreglo gradiente.

## 1.4 Configuraciones geométricas de electrodos de pozo 3D.

En esta sección al igual que para la técnica de TRE 2D en pozo se da una descripción de todas las posibles configuraciones para medir TRE 3D en pozo con cuatro electrodos. En cuanto a representar las diversas configuraciones de arreglos de electrodos polo-polo, polo-dipolo y dipolo-dipolo se adoptan primero la convención de símbolos siguiente, las letras *A* y *B* denotan electrodos de corriente positivo (fuente) y negativo (sumidero), mientras que *M* y *N* denotan los electrodos de potencial. El guión que separa las cuatro letras representa una configuración de TRE en pozo de un tipo de arreglo específico, es decir, *A-M* denota la configuración de un estudio de TRE de pozo polo-polo en el cual el electrodo de corriente positivo *A* se coloca en un pozo y el electrodo de observación de potencial *M* se coloca en otros pozos. Las letras que no aparecen (*B* y *N*) implican electrodos remotos.

Las configuraciones de pozo 3D casi nunca se utilizan conjuntamente con los arreglos de superficie debido a que con los cuatro pozos se tiene mayor información (densidad de datos) por lo que cualquier arreglo con TRE 3D en pozo es bueno para la reconstrucción de estructuras del subsuelo. Esta técnica es una extensión directa de la TRE de pozo 2D, debido a que utiliza los mismos arreglos, así como los factores geométricos para el cálculo de los diferentes puntos de atribución y valores de resistividad aparente.

### 1.4.1 Tipos de arreglos para estudios de pozo 3D

Los arreglos que se utilizan con frecuencia para este tipo de estudios son el polo-polo, polo-dipolo y dipolo-dipolo. Debido al limitado número de electrodos colocados en pozo, otros arreglos no son muy convenientes para realizar estos estudios. Las ventajas y desventajas teóricas que tienen estos arreglos para los estudios de pozo 2D son válidas también para los estudios de pozo 3D.

### 1.4.2 Metodología de las secuencias de mediciones para las diferentes configuraciones de TRE 3D en pozos.

En esta sección se ilustran las posibles secuencias de mediciones de los diferentes arreglos que se emplean en la TRE 3D en pozo. La técnica funciona igual que para la TRE 2D en pozo de la siguiente manera: se colocan cuatro pozos con sus respectivos electrodos dentro de cada pozo, posteriormente se transmite una corriente conocida desde una fuente puntual dentro de la superficie conductiva, y el resultado se observa en otras posiciones dentro de los pozos. Se calcula la diferencia de potencial entre alguno de los dos puntos (Figura 1.12a). Entonces la posición de la corriente de inyección se incrementa y los procesos se mapean repetidamente hasta que los datos han generado muchas combinaciones de los lugares de la transmisión de corriente y la medición de voltaje (Figura 1.18).

#### Secuencia de mediciones de TRE 3D en pozo

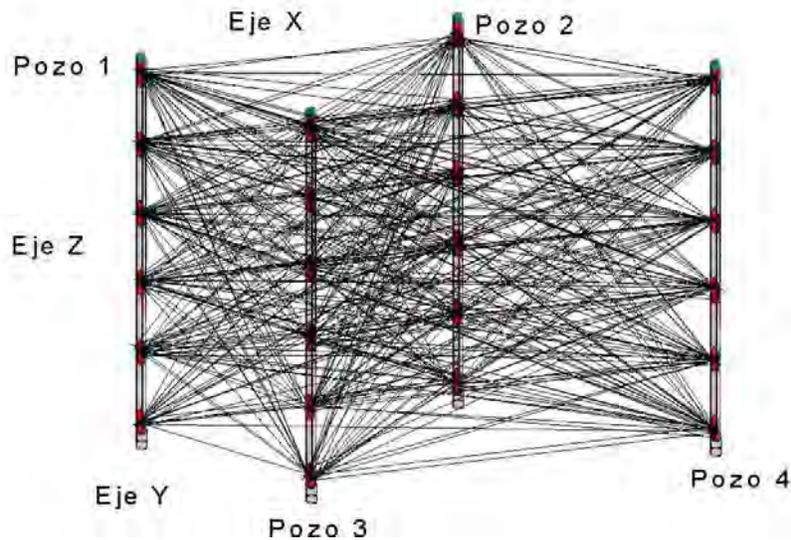


Figura 1.18 Secuencia de mediciones de TRE 3D en pozo para cuatro pozos.

### 1.4.3 Arreglo polo-polo.

Los estudios de TRE 3D en pozo que utilizan el arreglo polo-polo se realizan igual que los estudios en superficie y TRE 2D en pozo llevando un electrodo de corriente y uno de potencial a una distancia bastante alejada del lugar de medición (infinito), mientras que los otros electrodos de corriente y de potencial se colocan en cualquiera de los pozos (Figura 1.19).

La mayoría de los autores recomiendan la medición de todas las posibles lecturas en los demás electrodos para un electrodo de corriente, igualmente medir todas las posibles combinaciones en cada uno de los pozos. Uno de los problemas con este arreglo al igual que los estudios de superficie y TRE 2D en pozo es la ubicación física de los dos electrodos

remotos,  $B$  y  $N$ . Deben estar lo suficientemente lejos para que la aproximación polo-polo sea lo suficientemente precisa. Esto significa que deben de colocarse a una distancia por lo menos 20 veces la separación máxima entre los electrodos  $A$  y  $M$  colocados en los pozos. La extensa separación utilizada entre los electrodos  $M$  y  $N$  provoca el problema de contaminación por ruido telúrico. Estos problemas son exactamente los mismos a los que se enfrenta el arreglo polo-polo en estudios de superficie y TRE 2D en pozo. La Figura 1.19 también muestra la configuración que emplea el arreglo polo-polo en la TRE 3D en pozo y las secuencias de medición de resistividad aparente del electrodo de corriente  $A$  en un pozo y el de potencial  $M$  en los otros tres pozos.

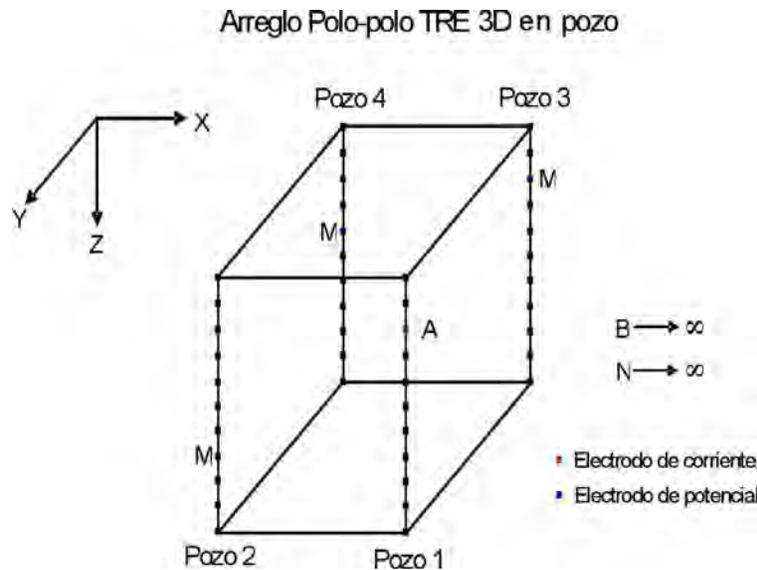


Figura 1.19 Configuración y secuencia de mediciones para el arreglo polo-polo de TRE 3D en pozo

#### 1.4.4 Arreglo polo-dipolo.

Este es el tradicional arreglo polo-dipolo que se utiliza comúnmente en superficie y TRE 2D en pozo. Este arreglo consta de un electrodo de corriente en un pozo y los dos electrodos de potencial en el otro pozo (Figura 1.20).

Este arreglo es una atractiva alternativa al arreglo polo-polo, es menos susceptible al ruido telúrico, ya que ambos electrodos de potencial se mantienen dentro del o de los pozos en estudio. En comparación con el arreglo dipolo-dipolo, este tiene la señal más fuerte. A pesar de que tiene un electrodo "remoto" (electrodo de corriente), el efecto de este electrodo en las mediciones es mucho más pequeño comparada con el arreglo polo-polo. La Figura 1.20 también muestra la configuración que emplea el arreglo polo-dipolo en la TRE 3D en pozo y las secuencias de medición de resistividad aparente del electrodo de corriente  $A$  en un pozo y con un espaciamiento constante entre los electrodos de potencial  $M$  y  $N$  en los otros tres pozos.

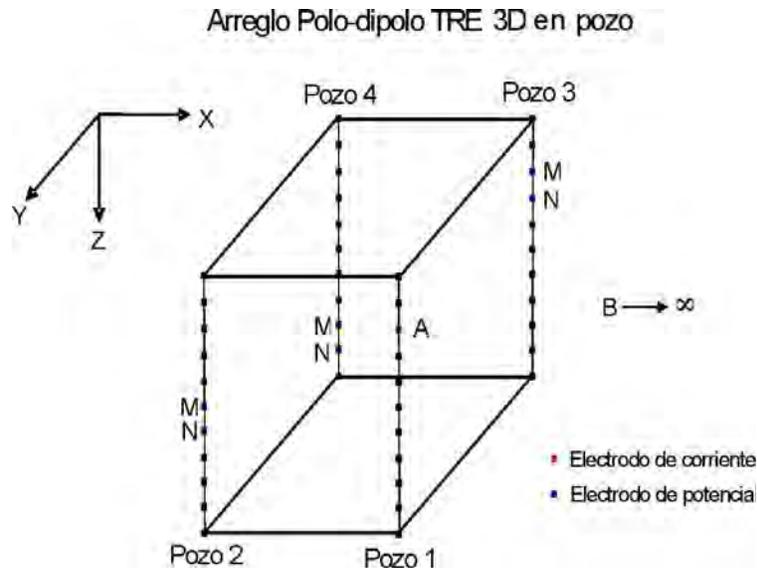


Figura 1.20 Configuración y secuencia de mediciones para el arreglo polo-dipolo de TRE 3D en pozo

#### 1.4.5 Arreglo dipolo-dipolo.

Este arreglo se recomienda debido a que mantiene los cuatro electrodos en una zona finita en los cuatro pozos (Figura 1.21). Como se vio anteriormente en los estudios superficiales o TRE de pozo 2D este arreglo tiene la cobertura horizontal más pobre de datos en los extremos, con esta técnica se soluciona este problema, además de otro que es la comparativamente baja intensidad de la señal. Al igual que los dos anteriores arreglos tiene buena resolución.

Este arreglo al igual que el arreglo dipolo-dipolo de superficie y TRE 2D en pozo, coloca dos electrodos de corriente ( $A-B$ ) en un pozo y dos electrodos de potencial ( $M-N$ ) en cada uno de los pozos restantes (Figura 1.21). El arreglo fue desarrollado con la intención de eliminar los problemas de obstáculos en superficie y de enviar uno o dos electrodos remotos. En estudios urbanos al igual que para la TRE de pozo 2D, algunas veces o siempre es difícil o complicado extender un electrodo o dos al infinito (arreglos polo-polo y polo dipolo, respectivamente), debido a que existen construcciones. También es complicado colocar electrodos de superficie debido a que se requiere hacer un mapeo por debajo de estas construcciones, por lo que es adecuado recurrir a configuraciones únicamente de pozo y que además contengan los cuatro electrodos finitos con una densidad de datos mayor de adquisición. Este arreglo resulta una excelente propuesta. La Figura 1.21 también muestra la secuencia de mediciones de resistividad aparente de pozo a tres pozos con espaciamiento constante entre los electrodos  $A-B$  y  $M-N$ .

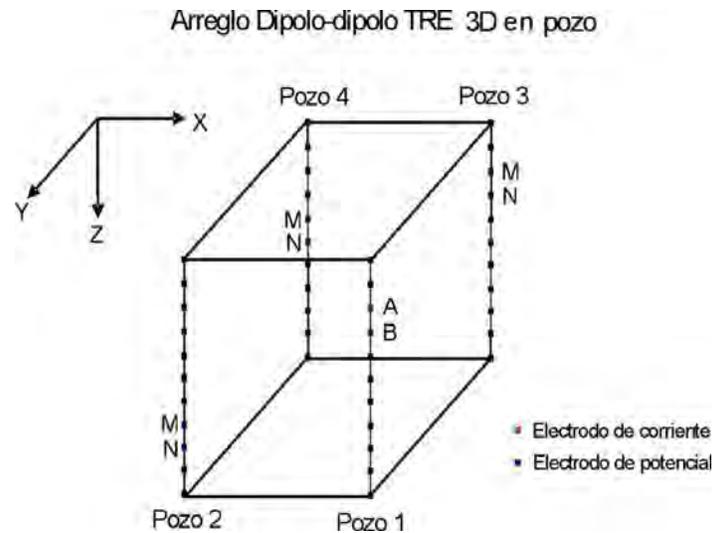


Figura 1.21 Configuración y secuencia de mediciones para el arreglo dipolo-dipolo de TRE 3D en pozo

### 1.5 Configuraciones geométricas de electrodos de superficie 3D.

En esta sección al igual que para las técnicas de TRE 2D en pozo y 3D se da una descripción de todas las posibles configuraciones para realizar estudios 3D de superficie con arreglos compuestos de cuatro electrodos. En cuanto a representar las diversas configuraciones de arreglos de electrodos polo-polo, polo-dipolo y dipolo-dipolo adoptan la siguiente convención de símbolos, las letras *A* y *B* denotan electrodos de corriente positivo (fuente) y negativo (sumidero), mientras que *M* y *N* denotan los electrodos de potencial. El guión que separa las cuatro letras representa una configuración de estudios de resistividad 3D superficial de un tipo de arreglo específico, es decir, *A-M* denota la configuración de un estudio 3D de superficie polo-polo en el cual el electrodo de corriente positivo *A* se coloca en la rejilla y el electrodo de observación de potencial *M* se coloca seguido del electrodo de corriente en la rejilla. Las letras que no aparecen (*B* y *N*) implican electrodos remotos.

#### 1.5.1 Tipos de arreglos para estudios 3D.

Los arreglos que se utilizan con frecuencia para este tipo de estudios son el polo-polo, polo-dipolo, dipolo-dipolo y Wenner-Schlumberger. Esto debido a que otros arreglos tienen una pobre cobertura horizontal cerca de los extremos de la rejilla en estudio. Las ventajas y desventajas que tienen estos arreglos para los estudios en superficie 2D son válidas también para los estudios 3D.

#### 1.5.2 Arreglo polo-polo

La Figura 1.22 muestra una posible disposición de los electrodos para un estudio 3D mediante un sistema automatizado de electrodos múltiples con 25 nodos. Para mayor conveniencia, los electrodos suelen colocarse en una rejilla cuadrada con la misma unidad

de espaciamiento entre electrodos en las direcciones  $x$  e  $y$  (Figura 1.23). Para mapear cuerpos ligeramente alargados, también se puede utilizar una malla rectangular con distinto número de electrodos y espaciamientos en las direcciones  $x$  e  $y$ . La configuración de electrodos polo-polo se utiliza comúnmente para estudios 3D, como el método E-SCAN (Li y Oldenburg, 1992; Ellis y Oldenburg, 1994b). El número máximo de mediciones independientes,  $n_{\max}$  que pueden ser hechas con  $n_e$  son

$$n_{\max} = n_e(n_e - 1)/2 \quad (1.26)$$

En este caso, cada electrodo es a su vez utilizado como electrodo de corriente y potencial, midiendo en todos los otros electrodos. Tenga en cuenta que debido a la reciprocidad, sólo es necesario medir en los electrodos de potencial con un mayor índice que el actual número de electrodos (Figura 1.23a). Para una rejilla de 5 por 5 electrodos, existen 300 posibles mediciones. Para rejillas de 7 por 7 y 10 por 10 electrodos, el estudio para medir el conjunto de datos completo tendría 1176 y 4500 puntos, respectivamente. Para estudios comerciales, rejillas de menos de 10 por 10 son probablemente imprácticas debido a que la zona de cobertura sería demasiado pequeña. Se consume mucho tiempo (por lo menos varias horas) para llevar a cabo un número tan grande de lecturas, en particular con un solo canal típico de resistivímetros de uso común para estudios 2D. Para reducir el número de mediciones necesarias sin degradar gravemente la calidad del modelo obtenido, en la Figura 1.23b se muestra una secuencia de medición alternativa. En este método se propone el "estudio de diagonal cruzada", en el cual las mediciones de los potenciales sólo se hacen en los electrodos a lo largo de la dirección  $x$ , la dirección  $y$  y las líneas diagonales que pasan a través del electrodo de corriente a 45 grados. El número de puntos de datos con este arreglo de una rejilla de 7 por 7 se reduce a 476, la cual es aproximadamente una tercera parte de la requerida para un estudio con un conjunto de datos completo (Loke y Barker, 1996b).

El arreglo polo-polo tiene dos desventajas principales. En primer lugar, tiene la resolución más pobre en comparación con otros arreglos. Las estructuras tienden a ser inferidas en el modelo de inversión final. La segunda desventaja, en particular para espaciamientos grandes entre los electrodos, es que el segundo electrodo tanto de corriente como de potencial se colocan a una distancia lo suficientemente alejados de la rejilla en estudio. Park y Van (1991), utilizaron este arreglo para un experimento de campo con el cual encontraron que aproximadamente el 15% de las mediciones no satisfacía a la reciprocidad debido a que la contribución de los electrodos remotos fueron importantes. Esto probablemente afecta las lecturas con grandes espaciamientos. En pocos casos, los conjuntos de datos 3D para el arreglo polo-polo se construyen a partir de un estudio 2D con un número de líneas paralelas (Figura 1.24)

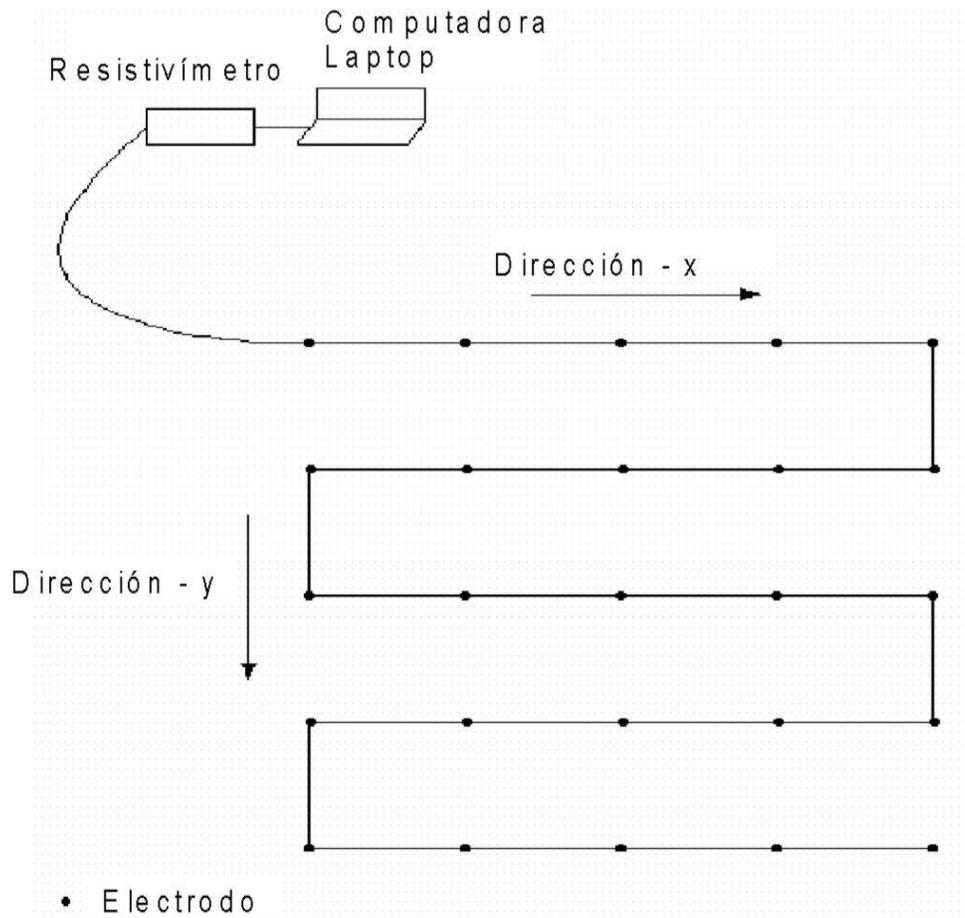


Figura 1.22 Arreglo de electrodos para un estudio 3D con un sistema de electrodos automatizado.

a) Estudio para medir un conjunto de datos completos

b) Estudio en diagonal cruzada

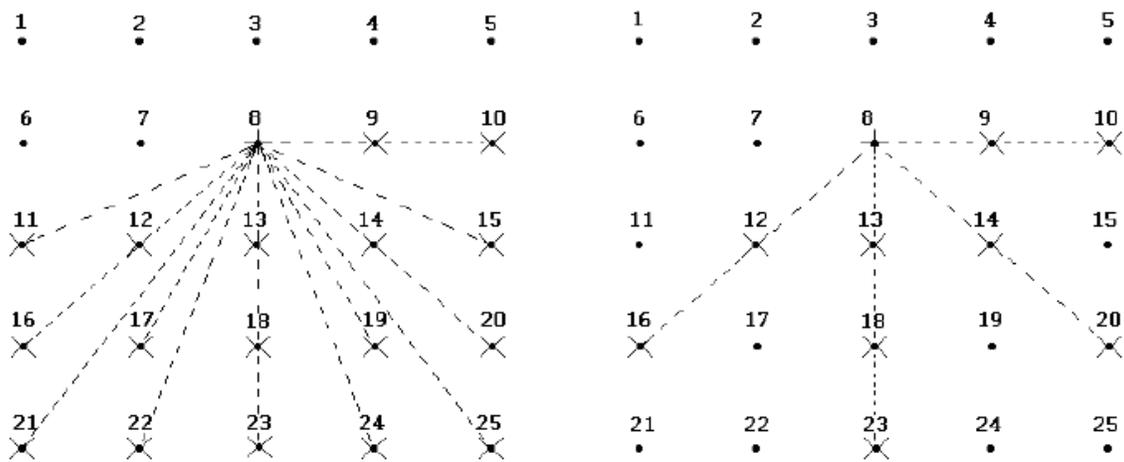


Figura 1.23 Rejilla con dos posibles secuencias de medición para un estudio 3D. (a) Mide un conjunto de datos completos y (b) mediciones en diagonal cruzada.

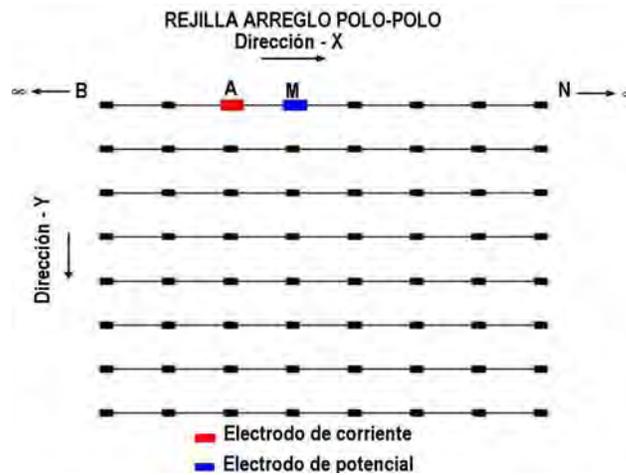


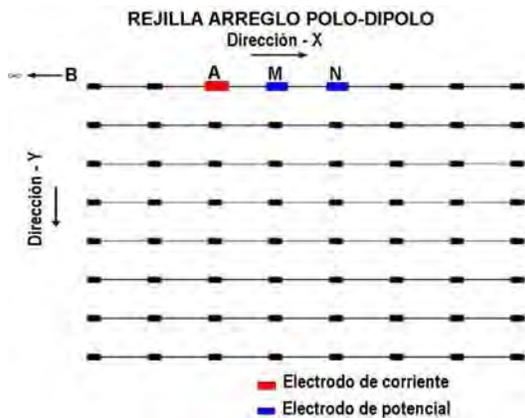
Figura 1.24 Configuración y secuencia de mediciones para el arreglo polo-polo con líneas paralelas.

### 1.5.3 Arreglo polo-dipolo.

Este arreglo es una atractiva alternativa al arreglo polo-polo para realizar investigaciones con rejillas medias y grandes (12 por 12 o superiores). Tiene una mejor resolución que el arreglo polo-polo (Sasaki, 1992), y es menos susceptible al ruido telúrico, ya que ambos electrodos de potencial se mantienen dentro de la rejilla en estudio. En comparación con el arreglo dipolo-dipolo, este tiene la señal más fuerte. A pesar de que tiene un electrodo "remoto" (electrodo de corriente), el efecto de este electrodo en las mediciones es mucho más pequeño comparada con el arreglo polo-polo. Como el arreglo polo-dipolo es un arreglo asimétrico, las mediciones deberán realizarse con arreglos de electrodos hacia "adelante" (Figura 1.25a) y "atrás" (Figura 1.25b). Para superar el problema de la baja intensidad de la señal para los valores del factor "n" (superior a 8), la "a" entre el par dipolar M-N debe aumentarse para conseguir una mayor profundidad de investigación con un factor "n" menor. El uso de mediciones redundantes con la superposición datos de los niveles para aumentar la densidad de datos, en algunos casos, puede ayudar a mejorar la resolución del modelo de inversión resultante. Cuando el factor "n" es mayor, el arreglo es más sensible a las estructuras cerca del dipolo *M-N*.

Si el estudio 3D se realiza con una serie de líneas paralelas (Figura 1.25), y no se realizan mediciones en líneas cruzadas, la distancia entre las líneas debe hacerse preferentemente dentro de dos a tres veces a la unidad en línea del espaciamiento entre los electrodos. Esto es para garantizar que los materiales del subsuelo entre las líneas sean mapeadas adecuadamente por las mediciones en línea.

a) Mediciones con electrodos hacia adelante



b) Mediciones con electrodos hacia atrás



Figura 1.25 Configuración y secuencia de mediciones para el arreglo polo-dipolo con líneas paralelas.

### 1.5.4 Arreglo dipolo-dipolo.

Este arreglo se recomienda sólo para rejillas grandes que tienen más de 12 por 12 electrodos debido a que tiene la cobertura horizontal más pobre de datos en los extremos. El principal problema que comúnmente tiene el arreglo dipolo-dipolo es la comparativamente baja intensidad de la señal, similar a los estudios 2D, este problema puede ser superado aumentando la separación “a” entre los electrodos de potencial  $M-N$  para conseguir una mayor profundidad de investigación debido a que la distancia entre los dipolos  $A-B$  y  $M-N$  se incrementa. Además, se recomienda el uso de la superposición de los niveles de datos.

En muchos casos, los conjuntos de datos 3D para el arreglo dipolo-dipolo se construyen a partir de un estudio 2D con un número de líneas paralelas (Figura 1.26), en particular de estudios previos. El alargamiento de los contornos de sensibilidad de acuerdo con la observación formulada por Dahlin y Loke (1997) el arreglo dipolo-dipolo es más sensitivo a efectos 3D en comparación con los otros arreglos. Este factor es importante cuando el arreglo dipolo-dipolo se utiliza en imágenes 2D en los que se supone que la geología del subsuelo es 2D también. Debido al alargado patrón de sensibilidad, el arreglo dipolo-dipolo puede tolerar probablemente un mayor espaciamiento entre las líneas de estudio (alrededor de tres veces a la unidad en línea de espaciamiento de los electrodos) y todavía contener información 3D de interés.



Figura 1.26 Configuración y secuencia de mediciones para el arreglo dipolo-dipolo con líneas paralelas.

### 1.5.5 Arreglo Wenner-Schlumberger.

Este arreglo se recomienda igual que el arreglo dipolo-dipolo, para rejillas grandes que tienen más de 12 por 12 electrodos debido a que tiene una cobertura horizontal más pobre de datos en los extremos que cualquiera de los arreglos anteriores. Las ventajas principales que tiene este arreglo comparado con los anteriores es la comparativamente alta intensidad de la señal, similar a los estudios 2D y que tiene una mayor profundidad de investigación. En la mayoría de los casos, los conjuntos de datos 3D para el arreglo Wenner-Schlumberger se construyen a partir de un estudio 2D con un número de líneas paralelas (Figura 1.27). Debido a su pobre cobertura lateral y menor cantidad de mediciones para la construcción de la rejilla no es un arreglo muy recomendable para estudios 3D

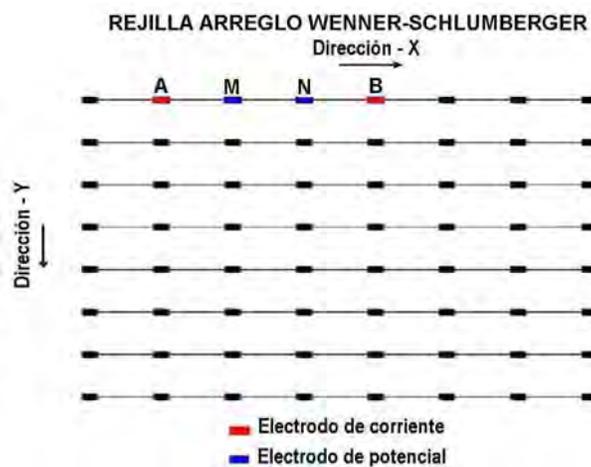


Figura 1.27 Configuración y secuencia de mediciones para el arreglo Wenner-Schlumberger con líneas paralelas.

### 1.5.6 Resumen de los tipos de arreglos de superficie 3D.

Para rejillas relativamente pequeñas de menos de 12 por 12 electrodos, el arreglo polo-polo tiene sustancialmente un posible número mayor de mediciones independientes en comparación con otros arreglos. La pérdida de puntos de datos cerca de los extremos de la rejilla se mantiene al mínimo, y proporciona una cobertura horizontal mejor en comparación con otros arreglos. Este es un arreglo atractivo para estudios con rejillas pequeñas que consideran un espaciamiento relativamente pequeño (menos de 5 metros) entre los electrodos. Sin embargo, tiene la desventaja de requerir dos electrodos "remotos" que deben ser colocados a una distancia lo suficientemente grande de la rejilla en estudio. Debido a la gran distancia entre los dos electrodos de potencial, esta variedad es más sensible al ruido telúrico. El arreglo polo-dipolo es una atractiva opción para rejillas de tamaño medio. Tiene una resolución mayor que el arreglo polo-polo, requiere un solo electrodo de corriente remoto y es mucho menos sensible al ruido telúrico. Para estudios con rejillas grandes, en particular cuando no hay lugar para colocar uno o dos electrodos remotos, el arreglo dipolo-dipolo puede ser una mejor alternativa. Para los arreglos polo-dipolo y dipolo-dipolo, mediciones con la superposición de datos utilizando diferentes niveles de "a" y "n" deberían utilizarse para mejorar la calidad de los resultados. Los electrodos para estudios 3D están normalmente dispuestos en forma de malla rectangular con un espaciamiento constante entre los electrodos (Figuras 1.24, 1.25, 1.26 y 1.27).

### 1.6 Propiedades eléctricas de los materiales terrestres.

Los flujos de corriente en materiales terrestres a profundidades someras se producen por medio de dos efectos principales. La conducción electrónica y la conducción electrolítica. En la conducción electrónica, el flujo de corriente es por medio de electrones libres, tal como los metales. En la conducción electrolítica, el flujo de corriente es a través del movimiento de iones en el agua subterránea. En los estudios de ingeniería y ambientales, la conducción electrolítica es probablemente el mecanismo más común. La conducción electrónica es importante cuando existen minerales conductivos, tales como los sulfuros metálicos y el mineral de grafito.

**Metales (Au, Ag, Cu, Sn, grafito):** enlace metálico con gran movilidad de los electrones de valencia, en consecuencia los electrones tienen gran capacidad de desplazamiento y la resistividad es muy baja ( $\sim 10^{-8}$ - $10^{-7}$  ohm-m). Sin embargo la conducción metálica no es importante a una escala macroscópica dado que la proporción de metales nativos es muy baja, prevaleciendo la resistividad de las impurezas que en general es mucho más alta.

**Semiconductores (Bornita, magnetita, pirrotita, etc.):** No existe la misma facilidad para el movimiento de los electrones, siendo necesaria la presencia de campos eléctricos fuertes para producir la conducción. La conductividad de los semi-conductores aumenta con la temperatura (intrínseca) y con las impurezas.

**Dieléctricos (Micas, feldespatos, cuarzo, calcita, silicatos en general):** En estos compuestos los electrones están fuertemente ligados a los átomos mediante enlaces covalentes o enlaces iónicos (electrolitos sólidos). La mayor parte de los minerales constituyentes de la corteza terrestre son dieléctricos con resistividades del orden de  $10^7$  ohm-m.

**Electrolitos líquidos (soluciones salinas):** En las soluciones acuosas los portadores de la corriente eléctrica son los cationes y aniones. Al aplicar un campo eléctrico los iones presentes en las soluciones acuosas tienden a desplazarse en la dirección de las cargas opuestas neutralizando la polarización del medio. Se llama movilidad de un ion a la velocidad (constante) que adquiere este en un campo eléctrico aplicado. La resistividad de un electrolito es la resistencia eléctrica presentada por un volumen de electrolitos de forma cúbica y un metro de lado al establecer una diferencia de potencial de 1 volt entre dos caras opuestas.

En resumen se aprecia que las propiedades eléctricas de los constituyentes de las rocas, parametrizadas en la resistividad eléctrica, presentan una variabilidad de más de 10 ordenes de magnitud ( $\sim 10^{-7} - 10^7$  ohm-m). Si bien la mayor parte de los constituyentes de las rocas son dieléctricos, lo cual estaría implicando que la conducción eléctrica debería estar ausente en las estructuras corticales (medio aislante). Afortunadamente todas las rocas presentan cierto grado de porosidad, volumen que generalmente esta ocupado total o parcialmente por electrolitos que condicionan una conducción iónica de resistividad muy variable, que dependen fundamentalmente de las características de las soluciones acuosas y el tipo de porosidad y grado de interconexión entre poros.

La resistividad de minerales, rocas comunes, químicos, aguas, materiales de suelo y contaminantes (Keller y Frischknecht, 1966; Daniels y Alberty, 1966; Telford *et al.* 1990) se muestran en la Tabla 1.

La resistividad de los minerales es muy alta en comparación con la resistividad de las rocas que los contienen, esto es debido a la influencia de la porosidad, humedad y la resistividad de los fluidos que rellenan los poros, en la resistividad de la roca. En la Tabla 1 se muestra este ejemplo, en donde los rangos de valores comparativos de la resistividad de los minerales de cuarzo y calcita, y de rocas que los contienen: arenas y calizas respectivamente. El cuarzo tiene un rango de resistividad entre  $10^{12}$  y  $10^{14}$  ohm-m, las arenas están compuestas de cuarzo y su rango de resistividad puede variar de 5 a  $10^3$  ohm-m, dependiendo de la resistividad del agua que la satura. Algo parecido sucede con la calcita, la cual tiene un valor de resistividad del orden de magnitud entre 6 y 9 veces mayor que la roca caliza.

Las rocas ígneas y metamórficas típicamente tienen valores grandes de resistividad. La resistividad de estas rocas es altamente dependiente del grado y el porcentaje de fracturas rellenas con agua subterránea. De esta manera una roca de este tipo puede tener un rango de resistividad, de aproximadamente 1000 hasta 10 millones de ohm-m, dependiendo sí esta húmeda o seca. Esta característica es conveniente en la detección de zonas de fractura y otras características climáticas, tales como estudios de ingeniería y agua subterránea.

Las rocas sedimentarias, las cuales son más porosas y tienen alto contenido de agua, normalmente tienen valores bajos de resistividad comparadas a las rocas ígneas y metamórficas. Los rangos de valores de resistividad de las rocas sedimentarias es de aproximadamente 10 a 10000 ohm-m, pero la mayoría de ellas se encuentra por debajo de 1000 ohm-m. Los valores de resistividad son dependientes en gran medida de la porosidad y el contenido de sales en el agua.

Los sedimentos no consolidados tienen valores de resistividad bajos, muy parecidos a las rocas sedimentarias, con un rango de valores de aproximadamente 10 a un máximo de 1000 ohm-m. Los valores de resistividad van a depender de la porosidad (considerando que todos los poros están saturados) tal es el caso del contenido de arcillas. El suelo arcilloso tiene un valor de resistividad más bajo que un suelo arenoso. Sin embargo, existen valores

de resistividad de las diferentes clases de rocas y suelos se que son iguales o casi iguales. Esto se debe a que la resistividad de una muestra de roca o de suelo en particular depende de factores tales como la porosidad, el grado de saturación de agua y la concentración de sales disueltas.

La resistividad del agua subterránea varía de 1 hasta 100 ohm-m o más en medios terrestres, dependiendo de la concentración de sales disueltas. La baja resistividad del agua de mar (aproximadamente 0.2 ohm-m) es debido al relativamente alto contenido de sal. Esto hace al método de resistividad una técnica ideal para el mapeo de la interfase del agua de sal y del agua fresca en las zonas costeras.

Una ecuación muy simple de la relación que existe entre la resistividad de una roca porosa y el factor de saturación del fluido es la Ley de Archie. Esta ley es aplicable para cierto tipo de rocas y sedimentos, particularmente aquellos que tienen un bajo contenido de arcilla. La conducción eléctrica se asume que es a través de los fluidos que rellenan los poros de la roca. La ley de Archie esta dada por

$$\rho = a\rho_w\phi^{-m} \quad (1.27)$$

donde  $\rho$  es la resistividad de la roca,  $\rho_w$  es la resistividad del fluido,  $\phi$  es la fracción de la roca rellena con el fluido, mientras  $a$  y  $m$  son dos parámetros empíricos (Keller y Frischknecht, 1966). Para la mayoría de las rocas,  $a$  es aproximadamente 1 mientras  $m$  es aproximadamente 2. Para los sedimentos con un contenido de arcilla significativo, se han propuesto otras ecuaciones más complejas (Olivar *et al.* 1990).

También se muestran las resistividades de diversos tipos de minerales. Sulfuros metálicos (tales como la pirrotita, galena y piritita) tienen típicamente valores bajos de resistividad de menos de 1 ohm-m. El valor de resistividad de un cuerpo mineral en particular puede diferir grandemente de la resistividad de los cristales individuales. Otros factores, tales como un cuerpo mineral encontrado en forma natural (masivo o diseminado) tienen un efecto significativo. Por ejemplo, la pizarra granítica tiene un valor de resistividad bajo, similar a los sulfuros metálicos, los cuales dan lugar a problemas en los estudios mineros. La mayoría de los óxidos, como la hematita, no tienen un valor de resistividad significativamente bajo. Una de las excepciones es la magnetita.

Los valores de resistividad de varios contaminantes industriales también se pueden ver en la Tabla 1. Los metales, como el hierro, tienen valores de resistividad extremadamente bajos. Los productos químicos que son electrolitos fuertes, tales como el cloruro de potasio y el cloruro de sodio, reducen en gran medida la resistividad del agua subterránea a menos de 1 ohm-m incluso en concentraciones relativamente bajas. El efecto de los electrolitos débiles, como el ácido acético, es comparativamente más pequeño. Los hidrocarburos, como el xileno ( $6.998 \times 10^{16}$  ohm-m), típicamente tienen valores de resistividad muy altos. Sin embargo en la práctica el porcentaje de hidrocarburos en la roca o suelo suele ser bastante pequeño, y podría no tener un efecto significativo en la resistividad. Como ejemplo, las arenas aceitosas tienen el mismo rango de valores de resistividad que el aluvión.

Rocas ígneas y metamórficas	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Rocas sedimentarias	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )
Granito	$5 \times 10^3 - 10^6$	Arenisca	$8 - 4 \times 10^3$
Granito alterado	1500-10000	Lutita	$20 - 2 \times 10^3$
Granito muy alterado	100-600	Caliza	$100 - 5 \times 10^3$
Basalto	$10 - 1.3 \times 10^7$	Caliza compacta	1000-5000
Ande sita	$4.5 \times 10^4 - 1.7 \times 10^2$	Caliza blanda	100-300
Diorita	$10^5$	Caliza fracturada	500-1000
Gabro	$10^3 - 10^6$	Limonita	$50 - 10^7$
Sienita	$10^2 - 10^6$	Dolomita	$3.5 \times 10^2 - 5 \times 10^3$
Peridotita	$3 \times 10^3 - 6.5 \times 10^3$	Margas secas	$10^2$
Lavas	$10^2 - 5 \times 10^4$	Margas húmedas	10
Pizarra	$6 \times 10^2 - 4 \times 10^7$		
Mármol	$10^2 - 2.5 \times 10^8$		
Cuarcita	$10^2 - 2 \times 10^8$		
Aguas, sedimentos y suelos	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )	Químicos, minerales y materiales	Resistividad ( $\Omega \cdot m$ )
Arenas	30-500	Hierro	$9.74 \times 10^{-8}$
Arena fina	$10^3$	0.01M cloruro de potasio	0.708
Arena seca	$10^3 - 10^4$	0.01M cloruro de sodio	0.843
Arena silíceas	200-3000	0.01M ácido acético	6.13
Arenas con agua dulce	50-500	Xileno	$6.998 \times 10^{16}$
Arenas con agua salada	0.5-5	Aluminio	$2.65 \times 10^{-8}$
Arena Petrolífera	$4 - 2.2 \times 10^2$	Mercurio	$95.8 \times 10^{-8}$
Arcilla	1-100	Madera	$10^8 - 10^{11}$
Arcilla seca	30	Vidrio	$10^{10} - 10^{14}$
Arcilla húmeda	10	Ámbar	$5 \times 10^{14}$
Limos	10-200	Plata	$1.47 \times 10^{-8}$
Aluvión	10-800	Cobre	$1.70 \times 10^{-8}$
Gravas	$50 - 10^3$	Oro	$2.22 \times 10^{-8}$
Gravas húmedas	$5 \times 10^2$	Acero	$20.0 \times 10^{-8}$
Gravas saturadas	$10^2$	Platino	$11.0 \times 10^{-8}$
Conglomerado	$2 \times 10^3 - 10^4$	Tungsteno	$5.25 \times 10^{-8}$
Roca salada	$3 \times 10 - 10^{13}$	Níquel	$6.40 \times 10^{-8}$
Aguas dulces superficiales	$10 - 10^3$	Estaño	$1.5 \times 10^{-8}$
Aguas salobres superficiales	2-10	Plomo	$22.0 \times 10^{-8}$
Agua subterránea (no contaminada)	10-100	Cromo	$13.2 \times 10^{-8}$
Agua marina	0.2	Calcopirita	$1.2 \times 10^{-5} - 0.3$
Agua de lagos salados	0.1-1	Pirita	$2.9 \times 10^{-5} - 1.5$
		Pirrotita	$6.5 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-2}$
		Cinabrio	$2 \times 10^7$
		Galena	$3 \times 10^{-5} - 3 \times 10^2$
		Cobalto	$3.5 \times 10^{-4} - 10^{-1}$
		Bauxita	$2 \times 10^2 - 6 \times 10^3$
		Cuprita	$10^{-3} - 300$
		Cromita	$1 - 10^6$
		Hematita	$3.5 \times 10^{-3} - 10^7$
		Magnetita	$5 \times 10^{-3} - 5.7 \times 10^3$
		Cuarzo	$7.5 \times 10^{17}$
		Azufre	$10^{15}$
		Carbón	$3.5 \times 10^{-5}$
		Anhidrita	$10^9$
		Calcita	$2 \times 10^{12}$
		Fluorita	$8 \times 10^{13}$
		Yeso	1000
		Grafito	$60.00 \times 10^{-8}$
		Silicio	$6.40 \times 10^2$

Tabla 1. Valores de resistividad de rocas, minerales, aguas, sedimentos químicos, minerales y materiales.

---

## Capítulo 2. Fundamentos de Teoría de Inversión 2D y algoritmos de inversión.

El análisis cuantitativo de los datos obtenidos en el campo se realiza resolviendo el problema directo y/o el problema inverso. El problema directo predice resultados cuando la geología y la física del medio son conocidas, a partir de la distribución de las resistividades del subsuelo se calcula la resistividad aparente en superficie para una configuración en particular. De esta forma es posible comparar los datos de campo con modelos conocidos y así verificar cuantitativamente si estos datos provienen de una distribución de resistividades similar a la del modelo propuesto. Por su parte, el problema inverso construye un modelo razonable del subsuelo a partir de los datos obtenidos en el campo. Es decir, a partir de los valores de resistividad aparente medidos en superficie se obtiene la distribución de resistividades del subsuelo.

En este capítulo se explican los principios básicos de la teoría de la modelación para la inversión de datos de resistividad. También el funcionamiento de los programas de modelado directo RES2DMOD y RES3DMOD, y modelado inverso RES2DINV y RES3DINV, para mostrar como se elaboraron diferentes modelos sintéticos de TRE 2D y 3D en pozo.

### 2.1 El Problema Directo.

Antes de encarar el problema de la inversión de los datos de una prospección geofísica es necesario comprender cómo se resuelve el problema directo. Este consiste en hallar una expresión para la diferencia de potencial entre cualquier par de puntos en el espacio como una función de la distribución de resistividades del medio, de la configuración utilizada y de la corriente de entrada. A partir de los valores de potencial calculados se obtienen los de resistividad aparente.

La expresión para los potenciales se obtiene a partir de la aplicación conjunta de la ley de Ohm, del principio de conservación de la carga y de las ecuaciones de Maxwell para campos estacionarios. En general no es posible despejar la solución exacta del problema directo, por lo tanto se recurre a herramientas numéricas para resolverlo, obteniéndose una solución aproximada. La deducción de las ecuaciones que definen el problema directo y su resolución son complejas. Sólo se mencionarán algunos aspectos y consideraciones generales que deben tenerse en cuenta a la hora de implementarlo.

Una vez encontradas las ecuaciones que definen el problema, antes de resolverlo se debe asumir *a priori* algún tipo de distribución de resistividades del subsuelo particular. El subsuelo puede modelarse en forma unidimensional (1D), bidimensional (2D) o tridimensional (3D). Cada dimensión constituye una dirección a lo largo de la cual la resistividad del suelo puede variar.

### 2.2 Descripción de un Modelo 2D.

En el modelo bidimensional se consideran variaciones en los valores de resistividad del subsuelo tanto en profundidad como en una de las direcciones laterales. Para poder calcular el potencial eléctrico en la superficie, dada una distribución de resistividades como la mencionada, el problema se aborda básicamente aplicando dos métodos: el de diferencias finitas (Loke, 1995) y el de elementos finitos (Coggon, 1971). Cada uno de estos métodos encara la resolución del problema directo de modos distintos y utilizando principios físicos

y herramientas de cálculo numérico diferentes, que no se explicarán dada su complejidad. Además requieren modelos de distribuciones de resistividad bidimensionales diferentes, los que mostraremos a continuación.

El modelado 2D por el método de diferencias finitas (Mufti, 1976; Loke, 1995) requiere la división o discretización del subsuelo en bloques rectangulares, utilizando una rejilla rectangular (Figura 2.1). En ésta, cada bloque posee una resistividad constante.

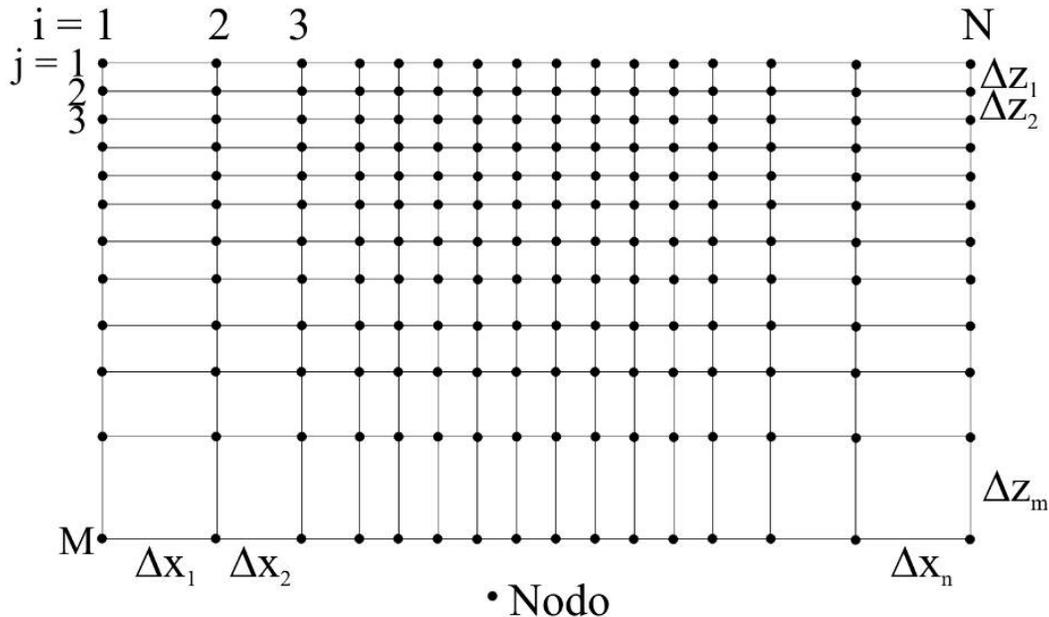


Figura 2.1 Subespacio dividido en celdas rectangulares de resistividad constante.

El método de diferencias finitas determina el potencial en los nodos de la rejilla rectangular y por lo tanto se pueden obtener los valores de resistividad aparente a lo largo del perfil determinado por la rejilla. Destacando que no se pueden obtener valores de resistividad aparente a lo largo de una dirección diferente a la definida por la rejilla. Si la rejilla es lo suficientemente fina la distancia entre  $i$  y  $j$  es pequeña comparada con la longitud del perfil, se pueden modelar estructuras geológicas complejas. Para la técnica de elementos finitos también se discretiza el subsuelo en elementos de resistividad constante pero éstos no tienen por qué ser rectángulos. Se obtienen los potenciales en los nodos de la rejilla y a partir de éstos los valores de resistividad aparente a lo largo del perfil.

### 2.3 Programa de modelado directo 2D.

En el problema de modelado directo, se especifica la distribución de resistividades en el subsuelo, siendo el objetivo calcular los valores de resistividad aparente por medio del programa RES2DINV. La subrutina de modelado directo, es también parte integral de cualquier programa de inversión, ya que es necesario calcular los valores de resistividad aparente en cada paso iterativo. Existen tres métodos principales para calcular los valores de resistividad aparente para un modelo específico. Ellos son (i) los métodos analíticos, (ii) métodos de elementos en la frontera y (iii) los métodos de diferencias finitas y de elementos finitos. Los métodos analíticos son probablemente los métodos más exactos,

pero están restringidos a geometrías relativamente simples (como una esfera o cilindro). Los métodos de elementos en las fronteras son más flexibles, pero el número de regiones con diferentes valores de resistividad que se permite es un tanto limitada (normalmente menos de 10). En estudios de ingeniería y ambientales el subsuelo por lo general tiene una distribución de resistividad arbitraria, de modo que los métodos de diferencia finita y elementos finitos son por lo general la única elección viable. Estos métodos subdividen el subsuelo en miles de celdas a las cuales se les asignan diferentes valores de resistividad. Sin embargo, los métodos analíticos y elementos de frontera usualmente son métodos independientes que se utilizan para comprobar la exactitud de los métodos de diferencia finita y de elemento finito.

En el programa RES2DMOD, se puede elegir el método de diferencias finitas o el de elementos finitos. El subsuelo se divide en una rejilla con un gran número de pequeñas celdas rectangulares (Figura 2.2) y posteriormente se puede especificar el valor de resistividad de cada una de las celdas. El método de diferencias finitas se basa en un método descrito por Dey y Morrison (1979a), pero con una modificación introducida por Loke (1994) para corregir una inconsistencia menor por el método de discretización de zona. El método de elementos finitos utiliza elementos triangulares estándar de primer orden (Silvester y Ferrari, 1990).

Aunque nuestro principal interés es la inversión de datos de campo, el programa de modelado directo RES2DMOD es útil también, sobre todo en la etapa de planificación de estudios superficiales y de pozo. Con este programa se pueden calcular los patrones de sensibilidad para los diferentes arreglos con la finalidad de tener una idea de la respuesta que dará cierto tipo de arreglo para una estructura en particular (por ejemplo una zona de fractura vertical). Antes de llevar a cabo un estudio sobre el terreno, o en pozo se debe tener alguna información acerca de la forma y el tamaño de los objetivos previstos. Al tratar con diferentes arreglos en la pantalla digital de la computadora, se puede evitar el uso de arreglos no adecuados para la detección de estructuras de interés. También se puede tener una idea del espaciamiento adecuado entre los electrodos adyacentes a utilizar, y la máxima separación de electrodos necesaria.

El programa está en gran parte destinado a la enseñanza sobre el uso del método de imágenes 2D, también se puede elegir el arreglo apropiado para diferentes situaciones o de estudios geológicos tanto de superficie como de pozo. Los arreglos que se encuentran dentro del programa para estudios superficiales son los siguientes, Wenner (Alpha, Beta y Gamma), Wenner-Schlumberger, polo-polo, dipolo-dipolo, polo-dipolo y ecuatorial dipolo-dipolo (Edwards, 1977). En cuanto a estudios de pozo o combinación de pozo-superficie el programa cuenta con los siguientes arreglos polo-polo, polo-dipolo, dipolo-dipolo, gradiente y además tiene la opción de realizar arreglos no estándar, en donde se puede diseñar cualquier tipo de configuración. Cada tipo de arreglo tiene sus ventajas y desventajas. Este programa ayuda a elegir cuidadosamente la "mejor" técnica o el "mejor" arreglo para una zona de estudio determinada, después de equilibrar factores como el costo, profundidad de la investigación, la resolución y la aplicación en la práctica.

Este programa se utilizó para calcular los modelos de TRE 2D en pozo que contengan diferentes cuerpos con su respectivo valor de resistividad aparente y diferentes arreglos, con la finalidad de evaluar su respuesta con respecto a un cierto tipo de estructura en particular.

La generación de los modelos y valores de resistividad aparente consta de 3 etapas: para la primera etapa el programa requiere el modelo de valores de resistividad que se ingresan por

separado a través de un archivo de texto. El archivo debe de tener un nombre con extensión mod en el cual se introduce el número de electrodos en cada pozo, coordenadas  $x$  y  $y$  para cada uno de los electrodos, la separación entre electrodos, el tipo de arreglo, el número de cuerpos a utilizar en la malla, los valores de resistividad aparente para cada uno los cuerpos considerados y las dimensiones de la malla. Las dimensiones de la malla para todos los modelos del modelado directo fueron de 60 por 49, lo cual equivale a un total de 2940 bloques, esta malla se muestra en la Figura 2.2. En esta tesis, vamos a utilizar varios modelos de archivos de TRE 2D en pozo para tener una idea de las formas de los contornos en las secciones de resistividad aparente. Al introducir diferentes modelos a este programa, se puede tener una visión de los efectos de tipo de arreglo más de la amplitud, el tamaño y la forma de los contornos en la sección de resistividades aparentes.

En la segunda etapa se creó un código de computadora en lenguaje FORTRAN 90 con el cual se genera un archivo de extensión txt que está constituido por el número total de puntos de atribución que se generan con las diferentes configuraciones de TRE 2D en pozo que se utilizan en el programa RES2DMOD.

En la tercera etapa el programa RES2DMOD también tiene una opción para guardar los valores de resistividad aparente calculados en el formato que utiliza el programa de inversión RES2DINV y EARTHIMGER 2D.

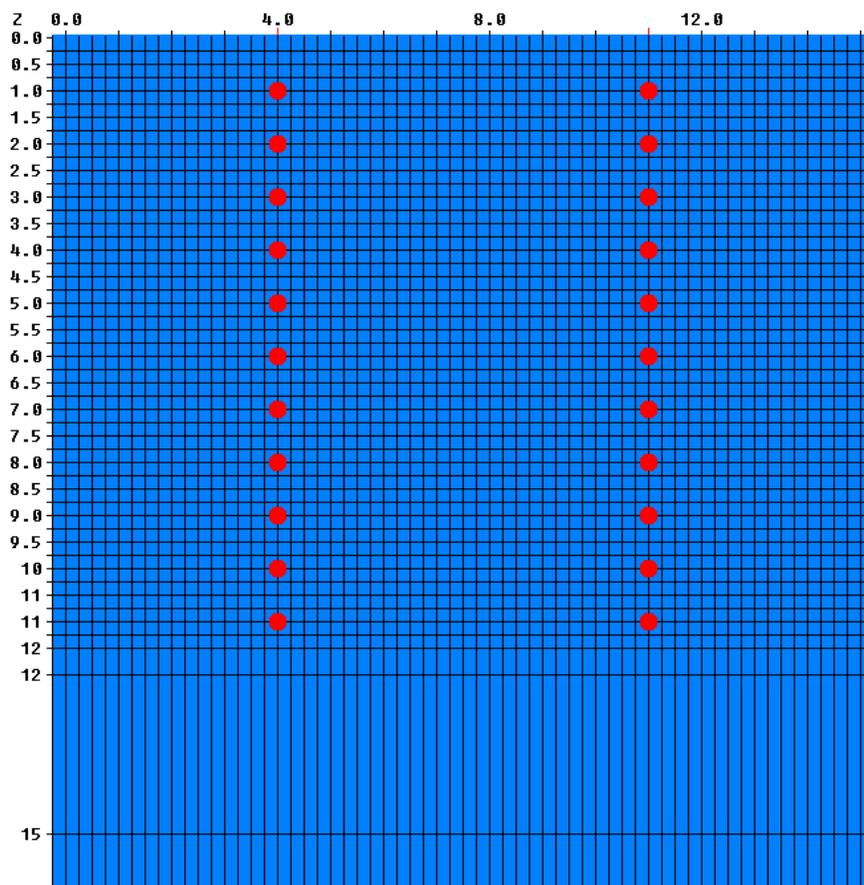


Figura 2.2 Diagrama esquemático de la malla de diferencias-finitas que muestra la localización de los electrodos en pozo utilizada por el programa RES2DMOD para la construcción de los modelos de TRE 2D en pozo.

## 2.4 Descripción de un Modelo 3D.

En este caso, el planteo resulta análogo al de diferencias finitas de modelos 2D (Dey *et al.* 1979; Spitzer, 1995), pero en lugar de discretizar el espacio en bloques cuadrados, se lo hace en cubos de resistividad constante (Figura 2.3).

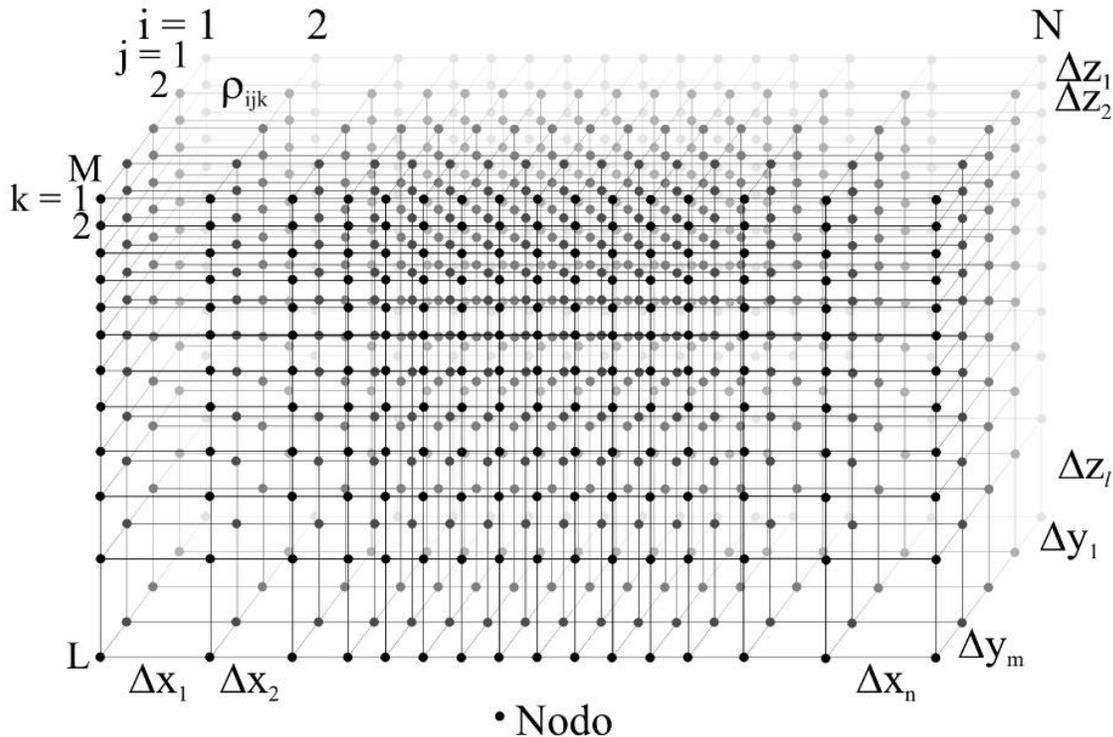


Figura 2.3 Esquema de la rejilla utilizada por el método de diferencias finitas para resolver el problema directo.

Es importante mencionar que al aumentar la dimensionalidad del problema directo aumenta considerablemente su complejidad matemática y los errores de la solución numérica respecto de la real. Por lo tanto es importante determinar correctamente el tipo de modelo del subsuelo que se utiliza para interpretar los datos. Si la distribución de resistividades reales puede modelarse correctamente con un modelo 1D, no es aconsejable utilizar un modelo 2D o 3D para resolver el problema directo porque complicaría innecesariamente la resolución del problema e incrementaría los errores de la solución.

Resolver el problema directo permite obtener información cuantitativa sobre el subsuelo. A partir del análisis cualitativo de los datos y de información adicional (cartas geológicas, información de pozo, documentación histórica, etc.) se puede estudiar si algún modelo de resistividades particular presenta una respuesta similar a la obtenida en el campo. Por esto constituye una herramienta poderosa a la hora de llevar a cabo la interpretación de los datos. Además permite estudiar el tipo de respuesta que se obtendría en el campo para determinados rasgos o estructuras que se deseen prospectar y de esta manera elegir convenientemente las configuraciones y aperturas.

## 2.5 Programa de modelado directo 3D.

Para la interpretación de datos con estudios de imágenes de resistividad 2D, se supone que la geología del subsuelo no cambia significativamente en la dirección que es perpendicular a la línea de estudio. En zonas con geología muy compleja, existen importantes variaciones que podrían afectar en la resistividad del subsuelo en esta dirección (es decir, la geología es 3D), esto podría causar distorsiones en los sectores más bajos del modelo 2D obtenido. El programa de modelado directo de resistividad 3D, RES3DMOD, permite calcular los valores de resistividad aparente de un estudio con una malla rectangular de electrodos sobre una estructura 3D (Figuras 2.4).

Para llevar a cabo la generación de los modelos y valores de resistividad aparente con este programa se utilizaron dos mallas para la TRE 3D en superficie y tres mallas para la TRE 3D en pozo, las cuales se describen a continuación.

Las dos rejillas utilizadas para el modelado directo de la TRE 3D en superficie en este trabajo tienen las siguientes características:

- 1) La rejilla de 8 por 8 con 7 niveles del modelo y dimensiones 37x37x12.
- 2) La rejilla de 11 por 11 con 8 niveles del modelo y dimensiones 43x43x13.

Las tres rejillas utilizadas para el modelado directo de la TRE 3D en pozo en este trabajo tiene las características siguientes:

- 1) La rejilla de 9 por 9 con 7 niveles del modelo y dimensiones 39x39x12.
- 2) La rejilla de 15 por 15 con 9 niveles del modelo y dimensiones 51x51x14.
- 3) Por último la rejilla de 12 por 12 con 8 niveles del modelo y dimensiones 45x45x12.

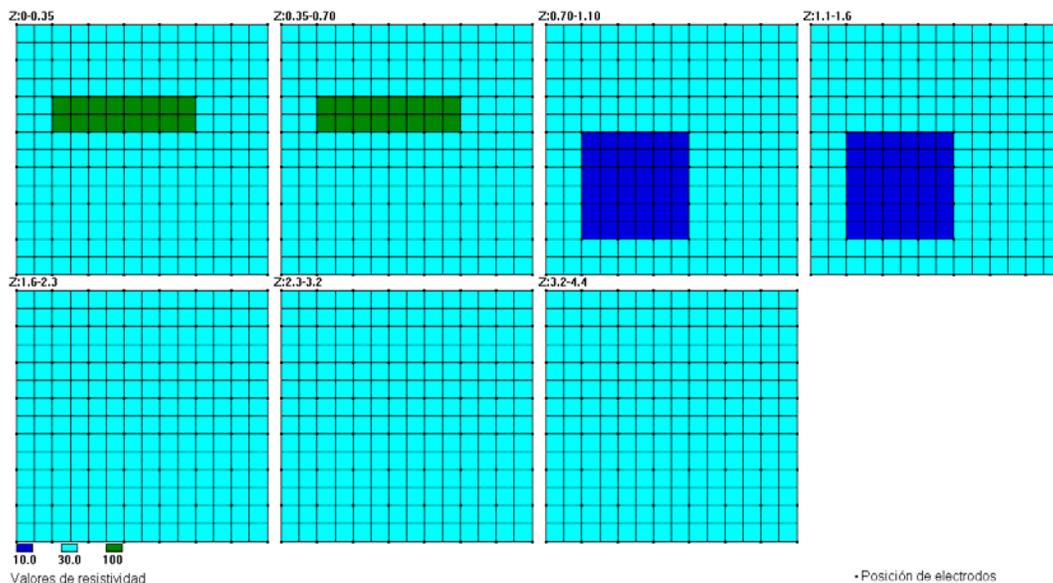


Figura 2.4 Diagrama esquemático de una rejilla de diferencias-finitas de 8 líneas por 8 electrodos de un modelo 3D con dos bloques rectangulares.

Las secciones de resistividad aparente, muestran los valores de resistividad aparente en secciones horizontales, o como secciones verticales tal como se utiliza en los estudios 2D. Al observar las secciones verticales se tiene una idea del efecto de una estructura 3D de las

mediciones en un estudio 2D. En un estudio realizado por Dahlin y Loke (1997), el arreglo dipolo-dipolo resultó ser más sensitivo a efectos 3D mientras que el arreglo Wenner fue el menos sensitivo. El programa RES3DMOD también tiene una opción para guardar los valores de resistividad aparente en un formato que puede ser aceptado por el programa de inversión de datos de resistividad aparente RES3DINV. Los valores de resistividad aparente guardados como archivo de datos RES3DINV se utilizan para llevar a cabo una inversión de este conjunto de datos sintéticos de superficie y pozo 3D.

## 2.6 Teoría de sensibilidad

Un campo eléctrico primario se define como aquel a ser medido en la presencia de un medio conductor uniforme  $\sigma_0$ . Los campos secundarios resultan de inhomogeneidades empotrados en este medio conductor. Si se perturba la conductividad de un pequeño volumen de material, se puede calcular la sensibilidad de la medida del cambio del potencial debida a esa perturbación. Matemáticamente, una pequeña perturbación de la conductividad por unidad de perturbación es conocida como la derivada de Frechet. Por lo tanto, el cambio en la respuesta como resultado de la presencia de un pequeño cuerpo de resistividad particular es, en efecto, la sensibilidad de una sección del subsuelo medida debida a una perturbación en la conductividad para una localización fija de una fuente puntual en la superficie o en pozo. Las gráficas de sensibilidad son derivadas a partir de los cálculos de las derivadas de Frechet.

Para ilustrar la sensibilidad consideremos la ecuación de potencial para un semiespacio inhomogéneo

$$U(\vec{r}) = -\frac{I}{4\pi^2} \int_V \frac{x'(x-x') - y'^2 - z'^2}{[x'^2 + y'^2 + z'^2]^{3/2} [(x-x')^2 + (y-y')^2 + z'^2]^{3/2}} \cdot \rho(x', y', z') dv \quad (2.1)$$

Definiendo la resistividad como:

$$\rho(\vec{r}) = \rho_{ij} W_{ij} \quad (2.2)$$

(McGillivray P.R. y Oldenburg, D.W., 1990)

donde

$$W_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{para } x_k < x < x_{k+1}, \quad z_j < z < z_{j+1}, \\ 0 & \text{fuera del rango anterior.} \end{cases} \quad (2.3)$$

El problema de sensibilidad, se obtiene de la derivada de Frechet de  $U(\vec{r})$  con respecto a  $\rho$  como

$$\frac{\partial U(\vec{r})}{\partial \rho} = \frac{1}{4\pi^2} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \int_{V_{ij}} W_{ij} \frac{x'(x-x') - y'^2 - z'^2}{[x'+y'+z']^{3/2} [(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2]^{3/2}} dV_i \quad (2.4)$$

El valor de sensibilidad es una medida de la cantidad de información acerca de la resistividad de un modelo de bloques contenido en el conjunto de datos medidos. El valor más alto de sensibilidad, es el valor más confiable del modelo de resistividad. En general, los bloques cerca de la superficie a menudo tienen valores altos de resistividad debido a que la función de sensibilidad tiene valores muy grandes cerca de los electrodos. Los bloques en los lados y en el fondo también tienen valores de sensibilidad altos debido a que muchos de estos bloques son de gran tamaño y además se extienden a los extremos de la rejilla de diferencia-finita o elemento-finito.

## 2.7 El Problema Inverso

Opuestamente a lo que sucede en el problema directo, en el problema inverso los valores de resistividad aparente que se obtuvieron en las distintas mediciones de campo o sintéticas constituyen datos y lo que se desea obtener es la distribución de resistividades del subsuelo que se generaron con dichos valores. En otras palabras, la aplicación del problema inverso permite obtener un modelo de la distribución de resistividades del subsuelo a partir de los valores de resistividad aparente medidos en el campo. De esta manera, las ecuaciones que definen al problema inverso son las mismas que las del problema directo. Este es un problema auto consistente que se debe resolver en forma iterativa. La resolución del problema inverso requiere la elección *a priori* del tipo de modelo del subsuelo con el que se va a trabajar, 1D, 2D o 3D según resulte conveniente. Debido a que los valores de resistividad aparente tienen imprecisiones y/o ambigüedades inherentes al proceso de medición, el modelo obtenido no debería reproducir en forma exacta los valores de resistividades aparentes medidas sino dentro de un determinado rango de error. La diferencia entre los valores de resistividad aparente con el modelo calculado y los obtenidos en el campo se denomina desajuste o discrepancia. Para que el modelo obtenido sea realista, el desajuste debe ser del orden de los errores de medición. Adoptar en la inversión un desajuste muy pequeño, puede resultar en estructuras sin sentido físico que son una

manifestación del ruido de la medición. Por otro lado, si el desajuste es muy grande se puede perder información de la estructura interna del subsuelo.

El proceso de inversión de los datos a grandes rasgos es el siguiente:

- 1) se parte de un modelo de resistividades inicial 1D, 2D o 3D
- 2) se calculan los valores de resistividad aparente predichos por el mismo
- 3) se comparan estos valores con los medidos en el campo, es decir se calcula la discrepancia
- 4) Si la discrepancia es mayor que el esperado, se modifica el modelo inicial y se repite el proceso
- 5) si la discrepancia es el esperado, quiere decir que se resolvió el problema.

El algoritmo de resolución del problema inverso, por lo expuesto hasta aquí, debe incluir un algoritmo para la resolución del problema directo, para llevar a cabo el punto 2).

Los problemas inversos no tiene solución única sino que hay infinitos modelos que pueden reproducir los datos en forma adecuada. Debido a esto se le indica al algoritmo de inversión que seleccione un modelo particular de todos los posibles, es decir, que el modelo posea características específicas. De esta forma se logra una gran flexibilidad para generar diversos modelos y es posible incorporar información adicional acerca de la distribución de resistividades del medio y generar un modelo acorde con esa información.

## 2.8 Teoría Básica de Inversión

La teoría de inversión en general, está organizada en un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas (cálculo, algebra matricial, estimación e inferencia estadística, etc.), que tienen la finalidad de reproducir información de las propiedades físicas de un sistema (e.g. la Tierra) partiendo de los datos observados en este sistema.

En la inversión geofísica se trata de encontrar un modelo con una respuesta que sea similar a los valores reales medidos. El modelo es una representación matemática idealizada de una sección de la Tierra. El modelo tiene un conjunto de parámetros que son las cantidades físicas que se pretende estimar a partir de los datos observados. La respuesta del modelo son los datos sintéticos que se calculan a partir de las relaciones matemáticas las cuales definen el modelo de un conjunto de parámetros dados. Todos los métodos de inversión esencialmente tratan de determinar un modelo para el subsuelo cuya respuesta se asemeje con los datos medidos sujetos a ciertas restricciones.

En el método basado en celdas utilizado por los programas RES2DINV y RES3DINV, los parámetros del modelo son los valores de resistividad del modelo de celdas, mientras que los datos medidos son los valores de resistividad aparente. La relación matemática entre los parámetros del modelo y la respuesta del modelo para modelos de resistividad 2D y 3D es proporcionado por los métodos de diferencia finita (Dey y Morrison, 1979a, 1979b) y elemento finito (Silvester y Ferrari, 1990). En todos los métodos de optimización, un modelo inicial es modificado de manera iterativa de tal manera que la diferencia entre la respuesta del modelo y los valores de datos observados se reduzca.

### 2.8.1 Planteamiento del problema no lineal.

El conjunto de datos observados se puede escribir como un vector columna y dado por

$$\mathbf{y} = \text{col}(y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (2.5)$$

donde  $m$  es el número de medidas,  $y_j$  puede ser la resistividad aparente medida o su logaritmo en base  $e$ ; el uso del logaritmo permite reducir el rango de valores con los que se va a trabajar, lo cual es deseable debido a que los valores típicos de resistividad oscilan de menos 1 ohm-m a más de 1000 ohm-m.

Los parámetros del modelo se representan por el siguiente vector columna  $\mathbf{q}$

$$\mathbf{q} = \text{col}(q_1, q_2, \dots, q_n) \quad (2.6)$$

donde  $q_j$  representa las resistividades reales de los  $n$  bloques en los que se divide la malla, es decir, el número de los parámetros del modelo.

La respuesta del modelo  $\mathbf{f}$  se puede escribir en una forma similar

$$\mathbf{f} = \text{col}(f_1, f_2, \dots, f_m) \quad (2.7)$$

La respuesta del modelo contiene los valores de resistividad aparente calculados (o sus logaritmos) a partir de los parámetros iniciales  $\mathbf{q}$ .

Para problemas de resistividad, es común utilizar los logaritmos de los valores de resistividad aparente para los datos observados y la respuesta del modelo, y los logaritmos de los valores del modelo para los parámetros del modelo.

A partir de aquí se plantea que la solución al problema directo (cálculo de resistividades aparentes a partir de los valores de resistividad real del modelo) se expresa como  $y_i = F_i[\mathbf{q}]$  donde  $F_i$  es una función directa no lineal que actúa sobre los parámetros  $\mathbf{q}$  del modelo discretizado para producir una respuesta del modelo.

La diferencia entre los datos observados (resistividades aparentes de las mediciones) y la respuesta del modelo (resistividades calculadas a partir de los parámetros estimados del modelo), esta dado por el vector de discrepancia  $\mathbf{g}$  que está definido por

$$\mathbf{g} = \mathbf{y} - \mathbf{f} \quad (2.8)$$

Además es posible considerar que cada dato  $y_i$  tiene una varianza  $\sigma_j$ .

Para un conjunto de variables aleatorias independientes  $X_1, \dots, X_N$ , la probabilidad  $P(X_1 = x_1, \dots, X_N = x_N)$  es igual al producto  $\prod_{i=1}^N P(X_i = x_i)$ . Entonces si se supone que los errores de las mediciones  $y_i$  son independientes y están distribuidos de manera gaussiana, la probabilidad conjunta de los mismos está dada por:

$$P \propto \prod_{i=1}^N \left\{ \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y_i - f_i}{\sigma_i} \right)^2 \right] \right\} \quad (2.9)$$

Los valores de parámetros que maximizan esta probabilidad son los *estimadores de máxima certidumbre* del modelo. Se puede probar que maximizar esta expresión es equivalente a minimizar la cantidad denominada *chi cuadrado*:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{y_i - f_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad (2.10)$$

Por lo que entonces el ajuste por mínimos cuadrados resulta ser un estimador de máxima certidumbre (Press *et al.* 1997).

Es por esto que la cantidad definida en la ecuación puede utilizarse como una manera de estimar la bondad de un ajuste. En forma matricial, esta ecuación se expresa como:

$$\chi^2 = \| \mathbf{W}\mathbf{y} - \mathbf{W}\mathbf{F}[\mathbf{q}] \|^2 \quad (2.11)$$

donde  $\mathbf{W}$  es una matriz diagonal de peso de  $M \times M$  que se define como:

$$\mathbf{W} = \text{diag} \{ 1/\sigma_1, 1/\sigma_2, \dots, 1/\sigma_m \} \quad (2.12)$$

Para un modelo inicial  $\mathbf{m}_1$ , los primeros dos términos del desarrollo de la serie de Taylor dan la siguiente aproximación:

$$\mathbf{F}[\mathbf{m}_1 + \Delta\mathbf{q}] = \mathbf{F}[\mathbf{m}_1] + \mathbf{J}_1\Delta\mathbf{q} + \quad (2.13)$$

donde es el resto, y  $\mathbf{J}_i$  es la matriz jacobiana de  $M \times N$  de derivadas parciales. Los elementos de  $\mathbf{J}$  están dados por:

$$J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j} \quad (2.14)$$

que representa el cambio en la  $i$ -ésima respuesta del modelo  $\mathbf{F}[\mathbf{q}_i]$  debido al cambio en el  $j$ -ésimo parámetro del modelo. La diferencia

$$\Delta\mathbf{q} = \mathbf{m}_2 - \mathbf{m}_1 \quad (2.15)$$

Es una pequeña perturbación alrededor del modelo inicial.  $\mathbf{F}$  se puede aproximar quitando el término .

Para reducir la discrepancia entre resistividad aparente calculada y medida, se utiliza la ecuación de Gauss-Newton para determinar el cambio en los parámetros del modelo de tal manera que debe reducir la suma cuadrática de los errores (Lines y Treitel, 1984)

$$\mathbf{J}^T \mathbf{J} \Delta\mathbf{q} = \mathbf{J}^T \mathbf{g} \quad (2.16)$$

Después de calcular el vector de cambio del parámetro, se obtiene un nuevo modelo mediante:

$$\mathbf{q}_2 = \mathbf{q}_1 + \Delta \mathbf{q} \quad (2.17)$$

En la práctica, la ecuación (2.16) de mínimos cuadrados rara vez se utiliza en la inversión geofísica. En algunas situaciones el producto de la matriz  $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$  puede ser singular, y por lo tanto, la ecuación de mínimos cuadrados no tiene solución para  $\Delta \mathbf{q}$ . Otro problema común es que el producto de la matriz  $\mathbf{J}^T \mathbf{J}$  es casi singular. Esto puede ocurrir si se introduce un modelo inicial muy diferente al modelo que se busca ajustar. Podría ocurrir entonces que el residuo de un ajuste por mínimos cuadrados creciera en lugar de decrecer (Pelton *et al.* 1978). Para evitar esas divergencias, resulta necesario imponer restricciones en  $\Delta \mathbf{q}$  para asegurar la estabilidad del proceso iterativo.

El cambio del vector de parámetros calculado (ecuación 2.16) puede tener componentes demasiado grandes, de tal modo que el nuevo modelo  $\mathbf{q}_2$  (ecuación 2.17) podría tener valores que no son reales. Un método común para evitar este problema se logra con la modificación de Marquardt-Levenberg (Lines y Treitel, 1984) en la ecuación de Gauss que esta dada por

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{I}) \Delta \mathbf{q} = \mathbf{J}^T \mathbf{g} \quad (2.18)$$

donde  $\mathbf{I}$  es la matriz identidad. El factor  $\lambda$  es conocido como el Marquardt o factor de amortiguamiento, y a este método también se le conoce como el método de regresión (Inman, 1975). El factor de amortiguamiento efectivamente condiciona el rango de valores, cuando se cambian componentes que el vector de parámetros  $\Delta \mathbf{q}$  puede tomar. Si bien el método de Gauss Newton en la ecuación (2.16) intenta minimizar la discrepancia en la suma cuadrática, la modificación del método de Marquardt-Levenberg también minimiza la magnitud del vector discrepancia y el cambio del vector de parámetros. Este método ha sido ampliamente utilizado en la inversión de datos de sondeo de resistividad, en donde el modelo consiste de un pequeño número de capas. Sin embargo, cuando se tiene un número de parámetros del modelo muy grande, tales como en modelos de inversión 2D y 3D los cuales consisten de un gran número de celdas pequeñas, el modelo que produce este método puede tener una distribución de resistividad errática en zonas de resistividad con altos y bajos espurios (Constable *et al.* 1987).

Otra opción es incorporar un suavizado en la ecuación de mínimos cuadrados, con lo cual se minimiza la *rugosidad* del modelo. Para una estructura de dos dimensiones donde  $y$  es la dirección del perfil, una forma de medir la rugosidad, la inversa de la suavidad, puede darse con la siguiente expresión

$$\Phi = \|\partial_y \mathbf{q}\|^2 + \|\partial_z \mathbf{q}\|^2 \quad (2.19)$$

donde  $\partial_y$  es una matriz de rugosidad que deriva lateralmente los parámetros del modelo de los adyacentes.  $\partial_z$  es una matriz de rugosidad que deriva en la dirección vertical los parámetros del modelo de los rectángulos contiguos. Ambas son aproximaciones al

operador gradiente por el método de diferencias finitas (de Groot-Hedlin, 2000). Supongamos que se tiene una malla que consiste de un total de  $m$  elementos, con  $p$  elementos en la dirección horizontal, cada uno de un ancho  $h$ , y  $l$  elementos en la dirección vertical, con anchos  $v_i$ ,  $i = 1 \dots l$  (se esta suponiendo una malla en donde la escala horizontal es constante, pero la escala vertical varía para compensar la pérdida del poder de resolución). Si se enumeran los elementos de izquierda a derecha comenzando en la parte superior izquierda, la matriz de rugosidad  $\partial_z$  de  $M \times M$  es:

$$\partial_z = \begin{bmatrix} -1 & 0 & \dots & 0 & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots \\ 0 & -1 & 0 & \dots & 0 & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \dots \\ \dots & & & & & & & \\ & & & -1 & \dots & & & 1 \\ & & & \mathbf{0} & & & & \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

donde  $\mathbf{0}$  es una matriz de ceros de  $p \times M$ . Hay  $p - 1$  ceros entre las entradas en las columnas de  $\partial_z$ . Por lo tanto  $\partial_z$  actúa de manera tal de derivar los parámetros del modelo entre los bloques adyacentes verticales. La matriz de rugosidad horizontal  $\partial_y$  de  $M \times M$  está dada por:

$$\partial_y = \begin{bmatrix} \partial_{y1} & 0 \\ & \partial_{y2} \\ \dots & \\ 0 & \partial_{yl} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

donde  $\partial_{yi}$  es la matriz de rugosidad para la capa  $i$ , cuya expresión es:

$$\partial_{yi} = \begin{bmatrix} -v_i/h & v_i/h & & & \\ & -v_i/h & v_i/h & 0 & \\ \dots & & & & \\ & 0 & & -v_i/h & v_i/h \\ & & & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Por tanto,  $\partial_{yi}$  deriva los parámetros del modelo entre bloques adyacentes en la capa  $i$ , asignando un peso a las diferencias según la relación entre el ancho y el alto de los bloques de la grilla de discretización.

En este caso el problema se formula como la minimización de la siguiente función:

$$U[\mathbf{q}] = \lambda \left\{ \|\partial_y \mathbf{q}\|^2 + \|\partial_z \mathbf{q}\|^2 \right\} + \|\mathbf{W}\mathbf{y} - \mathbf{WF}\|^2 \quad (2.23)$$

donde  $\lambda$  es un *multiplicador de Lagrange*. La función  $U$  es minimizada en puntos donde el gradiente con respecto al modelo es cero. Las funciones de los datos son no lineales, por lo que la función  $U$  debe ser linealizada y resuelta iterativamente.

El resultado de minimizar la ecuación (2.23) produce un sistema de ecuaciones lineales:

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{C}) \Delta \mathbf{q} = \mathbf{J}^T \mathbf{g} \quad (2.24)$$

donde  $\lambda$  es un *factor de amortiguamiento* (multiplicador de Lagrange), y  $\mathbf{C}$  una matriz que es una combinación lineal (peso) de productos de matrices de suavizado con sus traspuestas:

$$\mathbf{C} = c_z \partial_z \mathbf{q}^T \partial_z \mathbf{q} + c_y \partial_y \mathbf{q}^T \partial_y \mathbf{q} \quad (2.25)$$

Este método alternativo minimiza variaciones en los parámetros del modelo (Modelo de mínimos cuadrados con suavizado), utiliza la norma  $l_2$ . Por lo que tiende a producir un modelo con variaciones suaves de la resistividad, este modelo solo es aceptable si realmente la resistividad del subsuelo varía de manera gradual.

La ecuación de Gauss Newton de mínimos cuadrados se modifica de tal manera que se reducen al mínimo las variaciones espaciales de los parámetros del modelo (igualmente, el modelo de valores de resistividad cambia de una manera suavizada o gradual). La formulación usual de mínimos cuadrados aplica un suavizado sólo sobre el vector  $\Delta \mathbf{q}$  y no directamente sobre los valores de resistividad. Se puede formular un método (*Modelo de mínimos cuadrados con suavizado de valores de resistividad*) donde también los valores de resistividad cambien suavemente. Este método de mínimos cuadrados con condicionamiento suavizado (Ellis y Oldenburg, 1994a) tiene la siguiente forma

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{C}) \Delta \mathbf{q} = \mathbf{J}^T \mathbf{g} - \lambda \mathbf{C} \mathbf{q} \quad (2.26)$$

El método convencional de mínimos cuadrados que minimiza el cuadrado de la diferencia entre los datos calculados y las mediciones en general da mejores resultados si las mediciones tienen fluctuaciones al azar o gaussianas. En el caso que el proceso sea gaussiano el valor esperado de  $\chi^2$  es  $N$ , la cantidad total de datos. Esto significa que el valor esperado para la cantidad definida como:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \chi^2} \quad (2.27)$$

y denominada *error cuadrático medio*, es 1. Esta cantidad será una medida de la bondad del ajuste para todos los modelos de resistividad que se proponen en los capítulos 3 y 4.

Sin embargo, si el ruido no tiene estas características aleatorias, proviene de problemas en el equipo de medición o de equivocaciones, el estimador de máxima certidumbre se obtiene

minimizando la desviación absoluta media entre valores medidos y calculados (Press *et al.* 1997), y suele dar resultados más satisfactorios. Al sustituir el cuadrado por el valor absoluto (es decir, este modelo alternativo utiliza la norma  $l_1$ ), la probabilidad asociada con este estimador decae más lentamente al aumentar las discrepancias. Este modelo es entonces menos sensible a pequeñas separaciones respecto de los supuestos del ajuste, y se lo denomina *robusto*; tiende a producir regiones homogéneas y con límites abruptos, por lo que conviene aplicarlo cuando previamente se esperan estas características en el subsuelo.

Como se dijo anteriormente la ecuación (2.26) procura reducir a un mínimo el cuadrado de los cambios espaciales, o rugosidad, del modelo de valores de resistividad. Es de hecho un método de optimización con condicionamiento suavizado con una norma  $l_2$ . Esto tiende a producir un modelo con una suave variación de los valores de resistividad. Esta aproximación es aceptable si la resistividad del subsuelo varía de forma paulatina y gradual. En algunos casos, la geología del subsuelo se compone de una serie de regiones que son casi homogéneas internamente pero con fuertes límites entre las diferentes regiones. Para tales casos, la fórmula de inversión en la ecuación (2.26) se puede modificar de tal manera que minimiza los cambios en los valores de resistividad del modelo (Claerbout y Muir, 1973). Esto algunas veces da resultados significativamente mejores. Técnicamente esto se conoce como un método de optimización con condicionamiento suavizado con norma  $l_1$ , o más comúnmente conocida como método de inversión de bloques (*Modelo robusto*). Se pueden utilizar un gran número de técnicas para tal modificación. Un método simple para aplicar una norma  $l_1$  basada en la optimización del método de mínimos cuadrados es la formulación iterativa del método de mínimos cuadrados repesados (Wolke y Schwetlick, 1988). La optimización en la ecuación (2.26) se ha modificado para obtener un modelo robusto

$$\left(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \lambda \mathbf{C}_R\right) \Delta \mathbf{q} = \mathbf{J}^T \mathbf{R}_d \mathbf{g} - \lambda \mathbf{C}_R \mathbf{q}, \quad (2.28)$$

Donde

$$\mathbf{C}_R = c_z \partial_z \mathbf{q}^T \mathbf{R}_m \partial_z \mathbf{q} + c_y \partial_y \mathbf{q}^T \mathbf{R}_m \partial_y \mathbf{q} \quad (2.29)$$

donde  $\mathbf{R}_d$  y  $\mathbf{R}_m$  son las matrices de peso que introducen diferentes elementos en la discrepancia y en los vectores del modelo rugoso dándoles el mismo peso en el proceso de inversión.

La ecuación (2.28) proporciona un método general que puede ser objeto de modificaciones si se incluye información conocida sobre la geología del subsuelo. Por ejemplo, si se sabe que las variaciones de la resistividad del subsuelo son comúnmente confinadas a zonas limitadas, los valores del factor de amortiguamiento  $\lambda$  pueden modificarse (Ellis y Oldenburg, 1994a) lo cual permite cambios más grandes en estas zonas.

## 2.9 Métodos de discretización para un modelo 2D

En la sección anterior, se vio que el método de mínimos cuadrados se utiliza para calcular ciertas características físicas del subsuelo, los "parámetros del modelo", partiendo de las mediciones de resistividad aparente. Los "parámetros del modelo" se establecen dividiendo en secciones o cubos las diferentes regiones del subsuelo. La Figura 2.5 muestra las diferentes posibilidades que se pueden emplear.

El método más comúnmente utilizado en modelos 2D y 3D es una interpretación basada únicamente en generar un modelo que divide la sección de interés en celdas rectangulares y asigna a cada una de estas regiones valores de resistividad. Las posiciones de las celdas son fijas y sólo se permiten variar a las que contienen valores de resistividad durante el proceso de inversión. Los parámetros del modelo son las resistividades de cada una de las celdas. Para el ejemplo mostrado en la Figura 2.5, los parámetros del modelo son setenta y dos celdas de valores de resistividad  $\rho_1$  a  $\rho_{72}$ .

Una aproximación radicalmente diferente es una frontera basada en el método de inversión. Este método subdivide el subsuelo en diferentes regiones. La resistividad se supone que es homogénea dentro de cada región. A la resistividad se le permite cambiar de manera arbitraria a través de las fronteras, lo cual es útil en las zonas con una repentina transición en la geología. La resistividad de cada región y las profundidades a las fronteras son modificadas por el método de optimización de mínimos cuadrados con el fin de que los valores de resistividad aparente calculados coincidan con los valores observados. Los "parámetros del modelo" para el ejemplo que se muestra en la Figura 2.5, son dos valores de resistividad ( $\rho_1$  a  $\rho_2$ ) y de las profundidades en cinco puntos ( $z_1$  a  $z_5$ ) resultando a lo largo de la frontera un total de siete parámetros. Si bien este método funciona bien para datos sintéticos, para conjuntos de datos de campo grandes, este esquema numérico puede dar lugar a resultados inestables, con altas oscilaciones en las fronteras (Olayinka y Yaramanci, 2000). Su mayor limitación es, probablemente, la hipótesis de una resistividad constante dentro de cada región. En particular, los cambios laterales de resistividad cerca de la superficie tienen un efecto muy grande sobre los valores de resistividad aparente medidos. Este modelo no toma en cuenta esos cambios laterales, son a menudo erróneamente modelados como cambios en las profundidades de las fronteras.

Esfuerzos recientes han estado combinando los modelos basados en celdas y de frontera en los métodos de inversión (Smith *et al.* 1999). Uno de esos métodos es el de inversión lateralmente condicionado (Auken y Christiansen, 2004). En este método, los cambios laterales (pero no verticales) son permitidos en cada región (Figura 2.5c), así como las transiciones abruptas a través de las fronteras. Los "parámetros del modelo" para el ejemplo de la Figura 2.5 son: veinticuatro valores de resistividad ( $\rho_1$  a  $\rho_{24}$ ) y trece puntos en profundidad ( $z_1$  a  $z_{13}$ ) a lo largo de la frontera, con lo cual se obtiene un total de treinta y siete parámetros. La información de otras fuentes, tales como pozo o datos sísmicos, se pueden utilizar para proporcionar una estimación inicial de la profundidad a la frontera. Una situación común es cuando la información detallada está disponible en un solo pozo. En este caso, la frontera inicial se fija a una profundidad constante. El método de inversión ajusta las profundidades a través de una serie de puntos situados a lo largo de la frontera durante el proceso de inversión. Posteriormente se aplica un condicionamiento suavizado para reducir al mínimo los cambios en las profundidades entre puntos adyacentes en la misma frontera (Smith *et al.* 1999). Este método funciona bien, particularmente cuando el subsuelo se compone de varias zonas sedimentarias.

Otra generalización de este concepto es que permite cambios tanto verticales como laterales dentro de cada región (como en un modelo basado únicamente en celdas) y también cambios en las formas a través de las fronteras (Figura 2.5d). El modelo que se muestra en la Figura 2.5d tiene setenta y dos valores de resistividad y cinco valores de profundidad, lo que da un total de setenta y siete parámetros del modelo. Este tipo de discretización es particularmente útil cuando cerca de la superficie existen inhomogeneidades que se producen dentro de la capa superior las cuales a su vez producen un gran efecto en la medición de valores de resistividad aparente. El modelo de celdas utilizadas hasta el momento tienen formas rectangulares (Figuras 2.5a, 2.5c y 2.5d). Esto en parte debido al uso del método de diferencias finitas con el cual se calculan los valores de resistividad aparente del modelo. Una ligera desventaja es que la frontera es aproximada por una serie de pasos rectangulares. La Figura 2.5e muestra una posible variación cuando se utiliza el método de elemento finito con celdas trapecoidales en donde los bordes de las celdas adyacentes a la frontera son ajustadas con la finalidad de obtener la forma verdadera de la frontera.

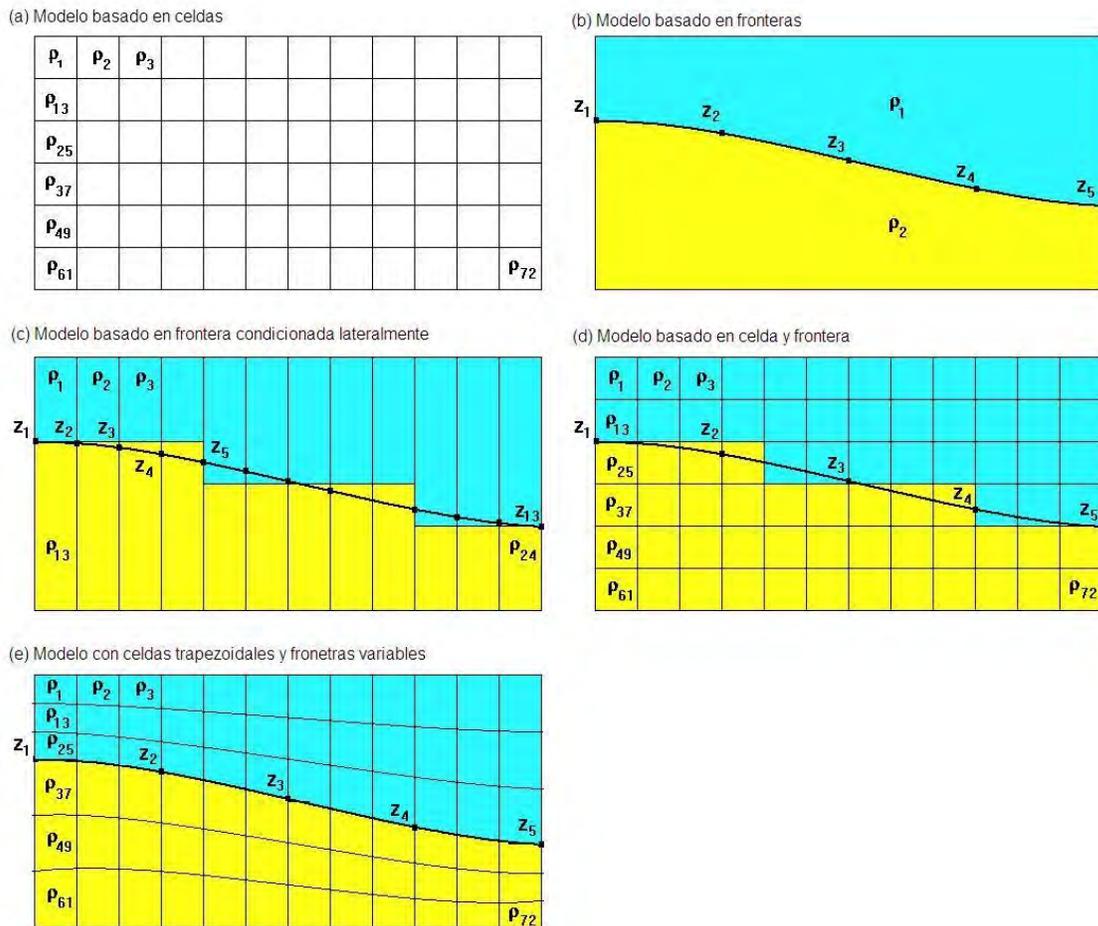


Figura 2.5 Los diferentes modelos para el subsuelo utilizados en la interpretación de datos de estudios de imágenes eléctricas 2D. (a) Modelo compuesto únicamente por celdas. (b) Modelo compuesto únicamente por fronteras. (c) Modelo condicionado lateralmente. (d) Modelo combinado por celdas y fronteras compuesto por celdas rectangulares y (e) Modelo con fronteras compuesto por celdas trapecoidales

La finalidad de la inversión de los datos provistos por una TRE es hallar un modelo, una representación matemática idealizada, de la distribución de resistividades de una sección del subsuelo. De los métodos de inversión descritos anteriormente, el que se aplicó en este trabajo fue el método de mínimos cuadrados con condicionamiento suavizado debido a que este método minimiza las variaciones en los parámetros del modelo (Modelo de mínimos cuadrados con suavizado), con la norma  $l_2$ . Este método produjo modelos con variaciones suaves de la resistividad, por lo tanto los modelos son aceptables dado que realmente la resistividad de los datos sintéticos utilizados en los modelos varía de una manera gradual. La conexión matemática entre los parámetros del modelo y la respuesta del modelo se llevo a cabo con el método de diferencias finitas. En el método de optimización, el modelo inicial, en este caso se utilizó un semiespacio homogéneo, se modifico de manera iterativa de manera tal que la diferencia entre la respuesta del modelo y los valores de las mediciones se minimizaran. Para hacer los valores de resistividades aparentes calculados más exactos, la malla de la rejilla utilizada tuvo 4 nodos entre los electrodos adyacentes de tamaño intermedio.

## 2.10 Programa de inversión 2D.

Después de un estudio sobre el terreno, las mediciones de resistencia normalmente se reducen a valores de resistividad aparente. Prácticamente todos los sistemas comerciales de electrodos múltiples vienen con el programa de computadora para realizar esta conversión. En esta sección, se describirán los pasos involucrados en la conversión de los valores de resistividad aparente en un modelo de sección de resistividad que puede utilizarse para interpretación geológica. Suponiendo que los datos ya se encuentran en el formato RES2DINV. El programa para realizar esta conversión se proporciona junto con muchos sistemas comerciales. Hasta el momento, las que soporta el programa de conversión incluyen Abem, AGI, Campus, Geofysika, Geometrics, Iris, OYO, Pasi y Scintrex. El programa RES2DINV tiene un número de parámetros que pueden ser modificados por el usuario para la obtención de resultados que están más cerca de la geología conocida.

En esta sección se procede a invertir los datos de resistividad aparente producidos por el programa RES2DMOD con los programas de inversión RES2DINV y EARTHIMAGER 2D. Una vez que se obtienen los datos invertidos se proceden a configurar para generar las imágenes eléctricas con tres diferentes paquetes RES2DINV, EARTHIMAGER 2D y SURFER.

Posteriormente los datos invertidos se configuran con estos dos programas mencionados anteriormente para obtener las imágenes eléctricas finales con lo cual se hace una comparación de las imágenes entre los dos programas. El programa RES2DINV permite salvar los datos invertidos en formato ascii para poder ser leídos por el programa de interpolación SURFER con la finalidad de obtener las imágenes eléctricas finales con una mejor interpolación que los dos programas anteriores. Esto es útil para estudiar la resolución del modelo que se puede obtener a través de distintas estructuras mediante el uso de diferentes arreglos y configuraciones de electrodos de pozo 2D.

### 2.10.1 Algoritmo de inversión RES2DINV.

Este algoritmo de inversión 2D genera un modelo de las variaciones laterales y verticales de la distribución de la resistividad del subsuelo por medio de perfiles. El algoritmo utiliza

un método iterativo de inversión de mínimos cuadrados con condicionamiento suavizado. El proceso de inversión minimiza la diferencia entre los valores de resistividad aparente calculados y medidos. El suavizado reduce la cantidad de ruido en el modelo de resistividad (Loke, 1999). El algoritmo determina la resistividad de los “bloques rectangulares” que son los parámetros del modelo y producen una sección de resistividades aparentes que corresponde a los datos obtenidos. El número de bloques rectangulares coincide con el mismo número de datos obtenidos con la sección de resistividades aparentes y además son arreglados de manera similar. El algoritmo también utiliza el método de optimización de mínimos cuadrados de Gauss-Newton con el cual intenta reducir la diferencia entre los valores de resistividad aparente calculados y medidos de los bloques rectangulares (Loke y Baker, 1996). La diferencia entre los valores medidos y modelados está dada por el error cuadrático medio (RMS). Sin embargo, el modelo con el error RMS más bajo posible, no siempre es el más apropiado, algunas veces, puede mostrar variaciones no realistas en los valores de resistividad del modelo y además, no siempre ser el “mejor” modelo desde el punto de vista geológico. En general la aproximación más prudente es elegir el modelo para una iteración, después del cual el RMS no cambia significativamente. Esto usualmente ocurre entre la tercera y quinta iteración. El método convencional de mínimos cuadrados minimiza el cuadrado entre los datos calculados y las mediciones, y tiende a darle gran importancia a datos con una discrepancia muy grande. Esto lo hace sensitivo a datos erróneos, por problemas en las mediciones.

El método de optimización de mínimos cuadrados con condicionamiento suavizado intenta reducir la suma de los cuadrados de cambios espaciales en el modelo de resistividad y los datos desajustados, esto arroja resultados óptimos cuando el subsuelo muestra cambios graduales de resistividad. Sin embargo, el modelo con condicionamiento suavizado puede deformar las fronteras cuando se presenta una fuerte transición de la resistividad en el subsuelo. El algoritmo utiliza los métodos de diferencias finitas y elementos finitos.

### **2.10.2 Algoritmo de inversión EARTHIMAGER2D.**

Al igual que el RES2DINV este algoritmo de inversión 2D utiliza tres algoritmos los cuales son: mínimos cuadrados con amortiguamiento, modelo suavizado e inversión robusta. Este genera un modelo de las variaciones laterales y verticales de la distribución de la resistividad del subsuelo por medio de perfiles. El algoritmo utiliza un método iterativo de inversión. El proceso de inversión minimiza la diferencia entre los valores de resistividad aparente calculados y medidos. El algoritmo determina la resistividad de los “bloques rectangulares” que son los parámetros del modelo y producen una sección de resistividades aparentes que corresponde a los datos obtenidos. El número de bloques rectangulares coincide con el mismo número de datos obtenidos con la sección de resistividades aparentes y además son arreglados de manera similar. El método de inversión es relativamente rápido, pero la reconstrucción del modelo de resistividades tiende a ser rugoso debido a la falta de condicionamiento rugoso. El método de inversión robusta es el que mejor funciona sobre datos ruidosos y resuelve fronteras de resistividades. El método de inversión con suavizado es estable y robusto. Es altamente recomendable para todo tipo de datos. Utiliza la norma  $l_2$ .

### 2.11 Programa de inversión 3D.

Al igual que el algoritmo de inversión 2D el algoritmo de inversión 3D, utiliza los mismos algoritmos. El algoritmo utiliza un método iterativo de inversión de mínimos cuadrados con condicionamiento suavizado. El proceso de inversión minimiza la diferencia entre los valores de resistividad aparente calculados y medidos. El suavizado reduce la cantidad de ruido en el modelo de resistividad (Loke, 1999). El algoritmo determina la resistividad de los “bloques rectangulares” que son los parámetros del modelo y producen un cubo de resistividades aparentes que corresponde a los datos obtenidos. El número de bloques rectangulares coincide con el mismo número de datos obtenidos con las rejillas de resistividades aparentes y además son arreglados de manera similar.

La inversión de un conjunto de datos de campo 3D puede realizarse de una manera similar que la inversión 2D, empleando el método de mínimos cuadrados con condicionamiento-suavizado. Uno de los modelos empleados para interpretar un conjunto de datos 3D se muestra en la Figura 2.6a. El subsuelo se divide en varias capas y a su vez cada capa se subdivide en una serie de celdas rectangulares. El programa de inversión de resistividad 3D, RES3DINV, se utiliza en la interpretación de datos de resistividad aparente para estudios 3D. Este programa intenta determinar la resistividad de las celdas en el modelo de inversión que más estrechamente reproduzcan los valores de resistividad aparente medidos a partir del levantamiento en superficie o pozo. Dentro del programa RES3DINV, el espesor de las capas puede ser modificado por el usuario. Otros dos modelos alternativos que se pueden utilizar con el programa RES3DINV se muestran en las Figuras 2.6b y 2.6c. El segundo modelo de inversión subdivide los primeros niveles, tanto verticalmente como horizontalmente a la mitad. Otra alternativa consiste en subdividir los primeros niveles a la mitad sólo en las direcciones horizontales (Figura 2.6c). Dado que la resolución del método de resistividad disminuye rápidamente con la profundidad, se ha constatado que subdividir los bloques sólo es beneficioso para las primeras dos capas en la parte superior. En muchos casos, subdividir la capa superior es suficiente. Al subdividir las celdas, el número de parámetros del modelo y, por tanto, el tiempo necesario de cómputo para invertir el conjunto de datos puede aumentar drásticamente.

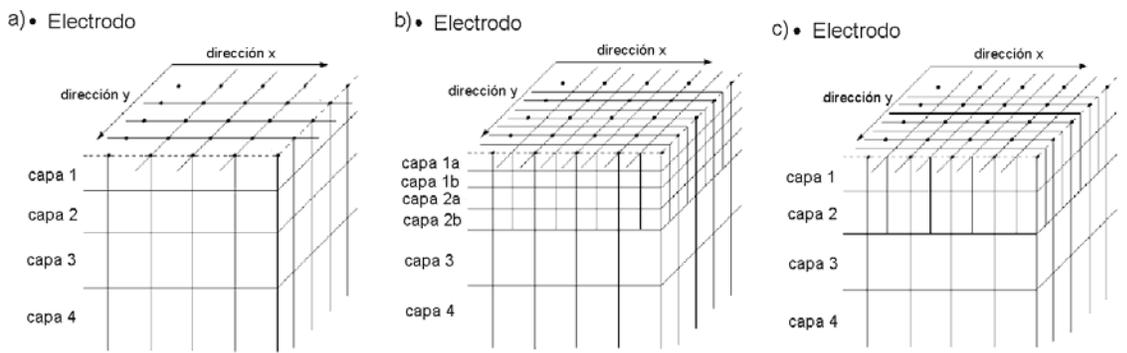


Figura 2.6 Modelos que se utilizan en la inversión 3D. a) Modelo estándar, donde las longitudes de las celdas rectangulares son iguales al espaciamiento unitario entre electrodos en las direcciones x y y. b) Modelo donde los primeros niveles se dividen a la mitad, tanto vertical como horizontalmente, para proporcionar una mejor resolución. c) Modelo en donde las celdas se dividen en la dirección horizontal, pero no en sentido vertical.

### 2.11.1 Algoritmos de inversión 3D y conjunto de datos 3D.

Dos cuestiones interesantes que a veces surgen, en particular en los círculos académicos es la definición de un algoritmo 3D y la inversión de un conjunto de datos 3D. La primera pregunta puede responderse fácilmente, pero la segunda es menos clara. Una característica que define un algoritmo de inversión 3D es que permite al modelo variar los valores de resistividad en las tres direcciones, es decir, en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ . Esto a diferencia de una inversión 2D, donde la resistividad del subsuelo se supone que varía sólo en las direcciones  $x$  y  $z$  pero es constante en la dirección  $y$ , y en 1D, donde la inversión de la resistividad sólo puede cambiarse en la dirección  $z$ . El modelo utilizado por el programa de inversión RES3DINV consta de celdas rectangulares independientes (Figura 2.6) en el que se permiten variar los valores del modelo en las tres direcciones de manera simultánea, por lo que se utiliza un cierto algoritmo de inversión 3D. Se toma en cuenta que un modelo construido a partir de una serie de inversiones 2D a lo largo de una serie de líneas paralelas no es un modelo de inversión 3D verdadero.

Otra característica de un algoritmo de inversión 3D es el uso de una subrutina de modelado directo 3D, tal como en los métodos de diferencias finitas y elemento finito 3D (Dey y Morrison 1979b; Silvester y Ferrari, 1990), para calcular el modelo de resistividad aparente y los valores de la matriz Jacobiana.

Para construir un buen modelo 2D de los datos del subsuelo la cobertura debe ser bidimensional. En un estudio 2D, las mediciones se realizan con diferentes espaciamientos horizontales entre electrodos y en diferentes lugares para obtener dicha cobertura 2D. Sin embargo, el grado de cobertura de los datos necesarios antes de que un conjunto de datos pueda ser considerado "3D" es menos claro. Utilizando el estudio con un arreglo polo-polo como ejemplo, el siguiente sistema de clasificación propuesto para un conjuntos de datos 3D. Se enumeran en orden decreciente según el contenido de la información 3D.

Categoría 1 - Un estudio ideal 3D con los electrodos dispuestos en forma de malla rectangular, y con mediciones en todas las direcciones posibles (como en la Figura 2.6a), es decir, a lo largo de las líneas de cuadrícula así como en diferentes ángulos a la líneas de la rejilla. Un ejemplo de este tipo conjunto de datos 3D "completa" sería un estudio con 56 electrodos en un arreglo en la rejilla de 8 por 7 y que se efectúen todas las posibles mediciones  $1540 (56 \times 55 / 2)$ .

Categoría 2 - Los electrodos están arreglados en una malla rectangular. Todas las mediciones a lo largo de las líneas de la rejilla (es decir, en las direcciones  $x$  e  $y$ ), pero sólo un número limitado de las mediciones en un ángulo a las líneas de la rejilla (por ejemplo, a lo largo de los 45 grados diagonales para rejillas cuadradas como se muestra en Figura 2.6b) se llevan a cabo. Un ejemplo de esta categoría es un estudio con mediciones limitadas en las direcciones angulares. En este caso, el estudio tiene 49 electrodos en una rejilla de 7 por 7 y un total de 468 mediciones. Con un conjunto de datos 3D "completo" se obtienen 1176 mediciones.

Categoría 3 - La toma de datos sólo se hacen en dos direcciones a lo largo de las líneas de la cuadrícula, es decir, en las direcciones  $x$  e  $y$ , y no se hacen mediciones en ángulo en las líneas de la rejilla. Esta secuencia de medición se utiliza con frecuencia, cuando no hay

suficientes nodos en el sistema de electrodos múltiples para cubrir toda la zona de estudio en un solo tiempo

Categoría 4 – Las mediciones en una sola dirección (por ejemplo dirección  $x$ ) a lo largo de una serie líneas paralelas de un estudio 2D. Esta situación es común para datos de antiguos estudios, en particular estudios de polarización inducida para la búsqueda de yacimientos minerales. Para este conjunto de datos, por lo general primero se lleva a cabo una serie de inversiones 2D. En la inversión 3D se utiliza un conjunto de datos combinados con los datos de todas las líneas del estudio, en un intento por obtener nueva información de los datos antiguos, y para ver si los efectos 3D son significativos (es decir, si los resultados de las inversiones 2D son válidos). El éxito de la inversión 3D depende en parte del espacio entre las líneas y el tipo de arreglo utilizado. Como regla general, el espacio entre líneas no debe ser más del doble del espaciamiento entre los electrodos a lo largo de las líneas.

Si bien los datos ideales deberían caer dentro de la categoría 1 o, al menos, de la categoría 2, además de algunos datos angulares, el programa RES3DINV también tiene la capacidad de invertir datos que corresponden a las categorías 3 y 4. La exactitud de los modelos 3D obtenidos con los tipos de datos de las categorías 3 y 4 será menor que los tipos de datos de las categorías 1 y 2, y dependerá en gran medida del espacio entre las líneas y el tipo de arreglo utilizado. Sin embargo, incluso en el caso de los tipos de datos de la categoría 4, los resultados de la inversión 3D deberían proporcionar un indicador útil sobre si los efectos 3D son significativos. Esto puede proporcionar una verificación de la validez de los resultados obtenidos a partir de inversiones 2D de las diferentes líneas independientes de estudio.

### **2.12 Programa que calcula los puntos de atribución para formar los arreglos de las diferentes configuraciones utilizadas en TRE 2D en pozo.**

En esta sección se describe el funcionamiento del programa que genera el archivo arreglo.txt que es el que contiene los puntos de atribución de las diferentes configuraciones utilizadas en el programa RES2DMOD el cual calcula las resistividades aparentes de los modelos sintéticos de pozo 2D. El programa se desarrollo en lenguaje FORTRAN 90; la Figura 2.7 muestra en un diagrama de flujo con los pasos más importantes que sigue el programa para calcular y guardar los puntos de atribución en un archivo txt.

Para poder calcular la resistividad aparente es necesario proporcionar las características generales de la configuración de la malla de pozo 2D a construir (número de electrodos, espaciamiento entre electrodos, tipo de arreglo, tipo de configuración).

Una vez que el programa calcula los puntos de atribución de cualquier tipo de arreglo con su respectiva configuración de pozo el archivo guardado se utiliza en el programa de modelado directo RES2DMOD para calcular las resistividades aparentes junto con el archivo que contiene la malla (Figura 2.2) con las características generales del cuerpo o cuerpos a modelar y la resistividad del medio.

Por lo tanto, para utilizar el programa RES2DMOD se tienen que crear dos archivos diferentes, en uno se colocan las características generales de los arreglos y configuraciones de pozo y en el otro se colocan las características generales del cuerpo o de los cuerpos en la malla.

El programa está diseñado para calcular los puntos de atribución los cuales a su vez se utilizan en el programa RES2DMOD para modelar una TRE 2D en pozo haciendo uso de cualquiera de los arreglos de electrodos más comunes dipolo-dipolo, polo-polo, polo-dipolo y gradiente con sus respectivas configuraciones en pozo.

Una vez ingresada toda la información requerida el programa RES2DMOD realizará el cálculo de las resistividades aparentes asignándolo a su correspondiente punto de atribución, al finalizar el programa RES2DMOD entrega un archivo que contiene las resistividades aparentes correspondientes al modelo con una extensión \*.dat para que pueda ser reconocido por el programa RES2DINV el cual se encarga de realizar la inversión de los datos de resistividad aparente. El mismo procedimiento se lleva a cabo para generar los modelos 3D con el programa RES3DMOD y RES3DINV.

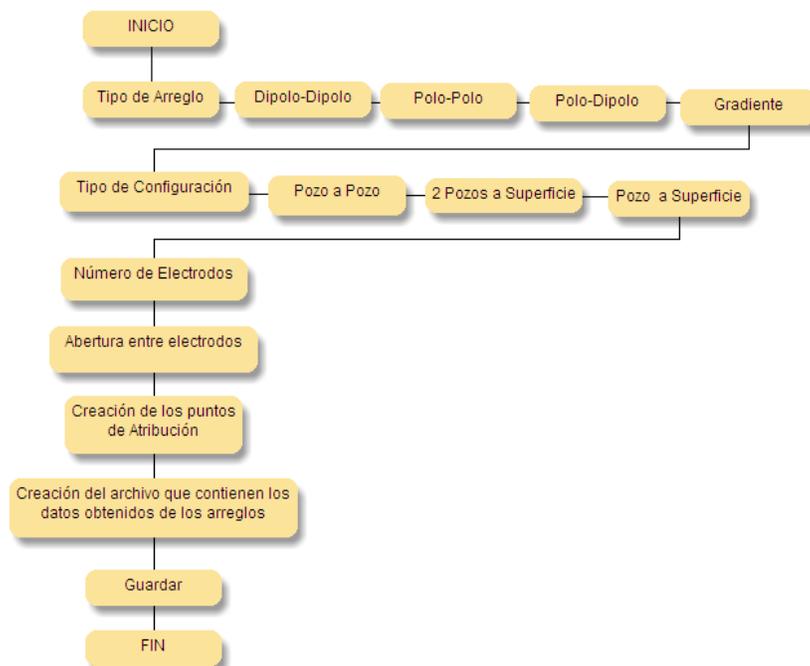


Figura 2.7 Diagrama de flujo del programa que calcula los puntos de atribución.

---

---

### **Capítulo 3 Diseño y aplicaciones de modelos sintéticos con TRE 2D en pozo.**

En el presente capítulo se analiza el comportamiento de tres modelos sintéticos que asemejan anomalías de resistividad en el subsuelo con la finalidad de hacer una modelación de estructuras geológicas y estudiar sus anomalías geoelectricas que tendrían con un estudio de TRE 2D en pozo. Para lograr esto, cada uno de los modelos se calculó con cuatro arreglos de electrodos diferentes y sus respectivas configuraciones en pozo.

Además, se realiza un análisis de sensibilidad para cada uno de estos arreglos con sus respectivas configuraciones en pozo con el propósito de comprobar cual de estas configuraciones es la más adecuada basándonos en su respuesta de valores de sensibilidad, es decir, se examina cuales son las regiones del subsuelo que tienen una mayor contribución utilizando diferentes arreglos de pozo.

El cambio en la respuesta resulta de las diferentes disposiciones geométricas de los electrodos dentro de los pozos con los cuales se calculan los valores de sensibilidad que posteriormente se grafican en escala logarítmica. También se demuestra que la resolución espacial de TRE en pozo, inferida con los patrones de sensibilidad, son más altos cerca de la fuente y del receptor y decae a medida que se alejan de los pozos. La sensibilidad en la región media entre los pozos es mucho más pequeña, la respuesta más fuerte se origina en la vecindad inmediata de la fuente y el receptor, pero además se producen contribuciones que se pueden medir en la región media entre los pozos. Esta contribución entre pozos se incrementa marcadamente para estructuras geológicas elongadas (2D). La resolución más alta se obtiene cuando la fuente y el receptor se encuentran más alejados uno de otro considerando que se tengan más de dos electrodos como se vera en cada uno de los modelos. Esto ofrece grandes ventajas, debido a que se puede diseñar previamente el tipo de arreglo, la abertura entre electrodos, así como la evaluación de la respuesta de las diferentes modalidades de electrodos para la obtención de la TRE en pozo.

#### **3.1 Análisis de sensibilidad para las diferentes configuraciones de electrodos que se emplean en TRE 2D en pozo.**

En esta sección se examinan cuales son las zonas del subsuelo que tienen mayor o menor contribución a la respuesta de resistividad de una sección del subsuelo calculando cuantitativamente estimaciones de sensibilidad a las variaciones de conductividad del medio.

El valor de sensibilidad es una medida de la cantidad de información acerca de la resistividad de un modelo contenido en el conjunto de datos medidos. El valor más alto de sensibilidad es el valor más confiable del modelo de resistividad.

##### **3.1.1 Análisis de sensibilidad para el arreglo polo-polo.**

Existen dos configuraciones posibles para este arreglo: ambos electrodos pueden colocarse en el mismo pozo (Figura 3.1a), o en diferentes pozos (Figura 3.1b). En la Figura 3.1c se considera una tercera posibilidad que con frecuencia no se toma en cuenta en estudios de zonas urbanas. Esta configuración coloca un electrodo en la superficie y el otro en pozo. En todos los casos, las zonas de mayor sensibilidad se concentra cerca de los electrodos, especialmente si los dos electrodos están muy alejados en distintos pozos como en la Figura

3.1b. Se observa que los electrodos no mapean de manera adecuada la zona entre ellos, como se puede esperar para un estudio sísmico con la fuente y el receptor en diferentes pozos, la región entre los dos electrodos en general tiene valores altos de sensibilidad y por consiguiente una área de contribución entre pozos muy grande. En las Figuras 3.1a, 3.1b y 3.1c se observa que el volumen en la vecindad inmediata de la fuente y el receptor exhibe las sensibilidades más altas. En la Figura 3.1a existe una zona de forma alargada con sensibilidades menores en la región media entre la fuente y el receptor. En la Figura 3.1b existe una zona amplia de forma elipsoidal alargada con valores de sensibilidad mayores en la región media de los dos pozos entre la fuente y el receptor a diferencia de la Figura 3.1a. En la Figura 3.1c existe una región de sensibilidad entre la superficie y el pozo demasiado pequeña lo que indica que la contribución con este tipo de configuración no es muy recomendable.

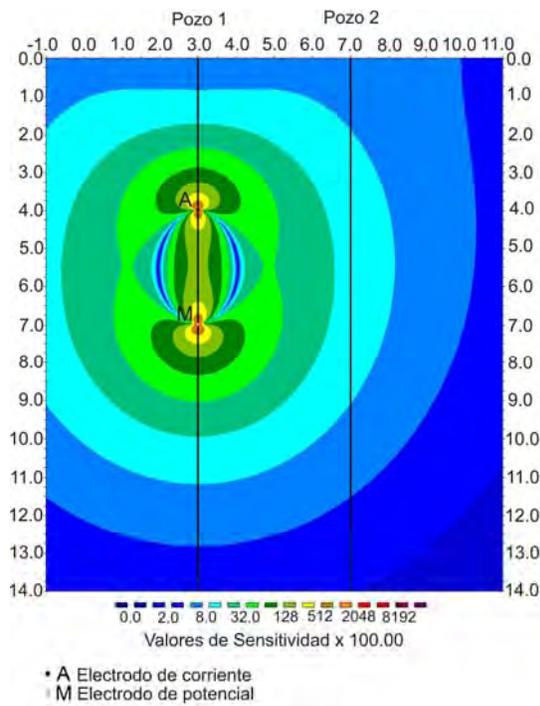
La mayoría de los investigadores han tratado con la TRE en pozo utilizando datos obtenidos con el arreglo polo-polo (e.g Daily y Owen 1991, Shima 1992), el cual es el más sencillo de todos los arreglos de electrodos. En situaciones prácticas es muy versátil, este arreglo tiene dos electrodos remotos adicionales que se colocan a una distancia lo suficientemente alejados del sitio de trabajo (teóricamente se supone que son los puntos de la caída de corriente y el potencial cero ubicados en el infinito, pero en la práctica, no existen). Este arreglo no es adecuado para realizar trabajos en zonas urbanas o lugares de minas, debido a que los datos se contaminan fácilmente por el ruido de fuentes eléctricas (por ejemplo, líneas de energía). La contribución de los dos electrodos finitos introduce un error sistemático en la inversión. Naturalmente, esto lleva a investigar otros arreglos de electrodos para realizar estudios de TRE de pozo.

### 3.1.2 Análisis de sensibilidad para el arreglo polo-dipolo.

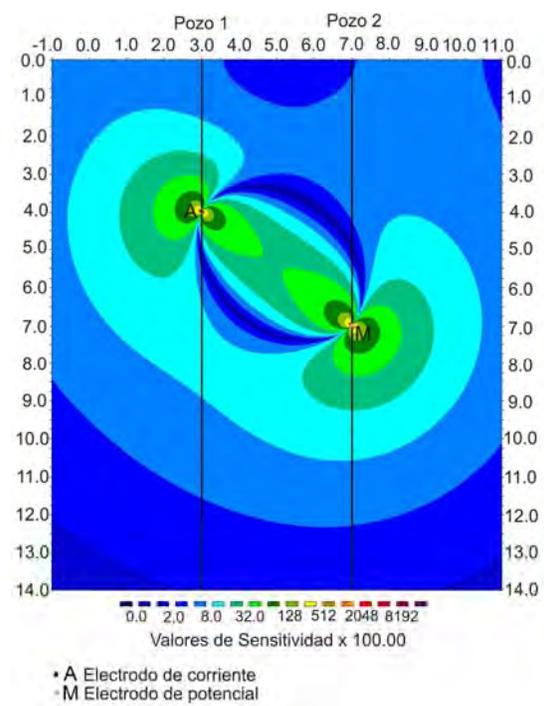
Zhou y Greenhalgh (1997) recomiendan un electrodo de corriente en un pozo y ambos electrodos de potencial en el otro pozo (configuración  $A-MN$ ), en esta configuración existe una zona amplia en forma elipsoidal con valores altos de sensibilidad en la región media de los pozos entre  $A$  y  $M$ , así como entre los electrodos  $A$  y  $N$  (Figura 3.2a). Esto significa que proporciona información importante sobre la resistividad de las diferentes estructuras entre los dos pozos. Sugimoto (1999) afirma que realizar mediciones con este arreglo arroja valiosa información sobre estructuras con buzamiento entre los pozos.

La segunda configuración (Figura 3.2b) consta de un electrodo de corriente y uno de potencial en el mismo pozo, y el segundo electrodo de potencial en otro pozo (configuración  $AM-N$ ). Las zonas con valores de sensibilidad mayores se encuentran entre los electrodos  $A$  y  $M$  en el primer pozo y los valores pequeños de sensibilidad se encuentran a la izquierda del electrodo  $N$  entre los pozos. En la Figura 3.2b, se observa que en esta configuración existe una zona con valores pequeños de sensibilidad entre los electrodos  $N-AM$ , es decir, el arreglo no da información importante acerca de la resistividad en esta zona. Otra posible desventaja de este arreglo es que para algunas posiciones del dipolo  $M-N$ , el valor del potencial medido es muy pequeño o cero. Esto hace que la relación señal/ruido sea pequeña.

a) Un solo pozo



b) Pozo a Pozo



c) Superficie a pozo

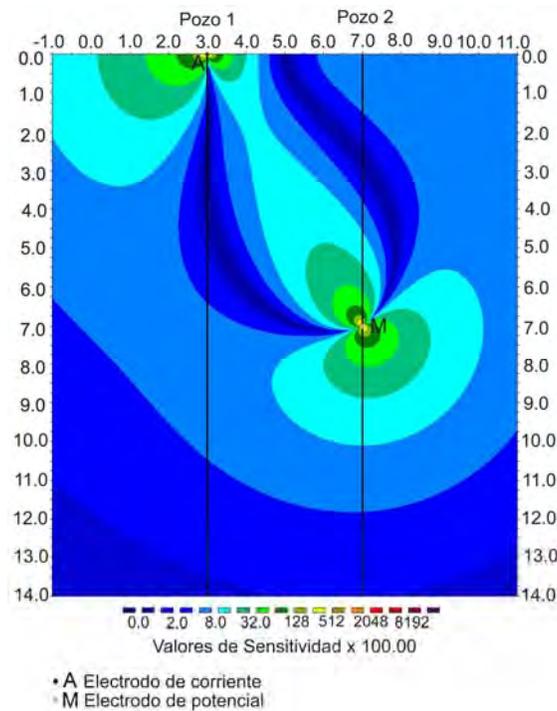


Figura 3.1. Secciones de sensibilidad 2D para las posibles configuraciones de un estudio de pozo del arreglo polo-polo. La localización de los dos pozos son mostrados por las líneas verticales en color negro.

Las Figuras 3.2c y 3.2d, muestran el patrón de sensibilidad cuando el electrodo de corriente se encuentran en la superficie. Los valores de sensibilidad entre los electrodos  $A$  y  $M$  son relativamente pequeños (probablemente debido a la gran distancia entre los dos electrodos), mientras que los valores de sensibilidad entre los electrodos  $M$  y  $N$  tienen sensibilidades moderadas.

La configuración de un pozo (Figura 3.2e) muestra el patrón de sensibilidad cuando los tres electrodos se encuentran en el mismo pozo. Existe un incremento muy importante de los valores cercanos a cero y altos de sensibilidad en las inmediaciones del pozo.

Muchos autores recomiendan este arreglo, debido a que proporciona mejor resolución y es menos sensible al ruido telúrico (debido a que los dos electrodos de potencial se mantienen dentro del área del estudio), en comparación con el arreglo polo-polo. Aunque, en teoría, la resolución del arreglo es ligeramente más pobre que el arreglo dipolo-dipolo, los valores de potencial medidos son significativamente más altos.

### 3.1.3 Análisis de sensibilidad para el arreglo dipolo-dipolo.

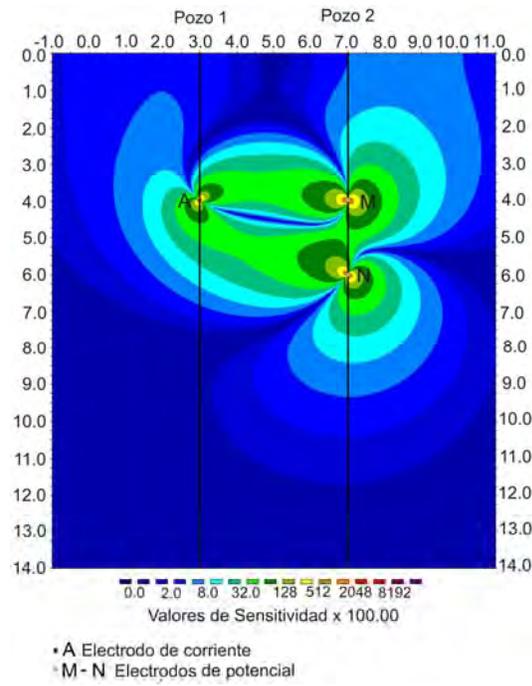
En este arreglo, la configuración  $AM-BN$  (Figura 3.3a) de Zhou y Greenhalgh (1997), cuenta con valores de sensibilidad grandes en la zona media entre los dos pozos. Esta es una propiedad deseable para un arreglo de TRE de pozo de sondeo transversal dado que la intención es mapear diferentes estructuras del subsuelo entre los dos pozos. Los valores más altos de sensibilidad son confinados a la región a lo largo de los electrodos entre  $A$  y  $M$  (y los electrodos  $B$  y  $N$ ).

En la segunda configuración básica (Figura 3.3b), el dipolo de corriente  $A-B$  se encuentra en un pozo mientras que el dipolo de potencial  $M-N$  se encuentra en el otro. También existe una región con valores grandes de sensibilidad entre los dos pozos. Sin embargo, es flanqueado por dos zonas con valores muy pequeños de sensibilidad. Así, la respuesta de este arreglo  $AB-MN$  a inhomogeneidades entre los pozos es más complicada que el primer arreglo. Cuando se reduce la longitud del dipolo, la región con valores de sensibilidad alta se reduce significativamente. Estas características hacen de este arreglo menos deseable para estudios de TRE de pozo. Otra desventaja es que la señal del potencial en el arreglo  $AB-MN$  es más débil en comparación con la configuración  $AM-BN$ .

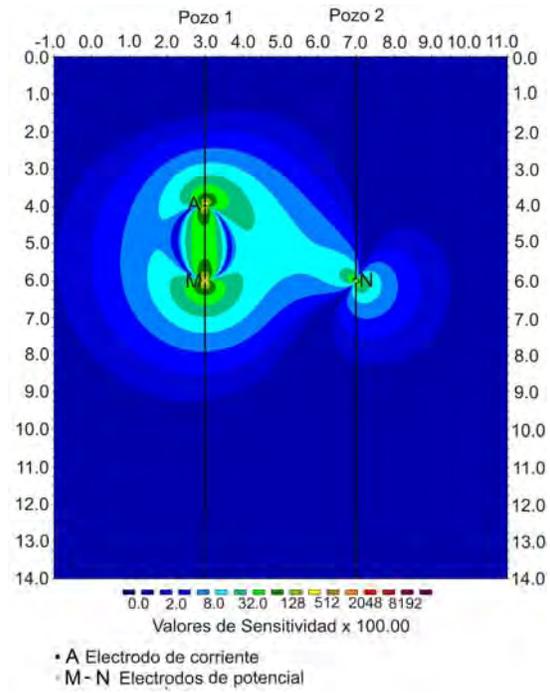
Las Figuras 3.3c y 3.3d muestran dos posibles configuraciones cuando se tienen dos electrodos en superficie y dos electrodos en un pozo.

La configuración (Figura 3.3c) muestra el patrón de sensibilidad cuando se tienen dos electrodos en superficie uno de corriente  $A$  y uno de potencial  $M$  y los otros dos en pozo ( $B$  y  $N$ ). Los valores de sensibilidad entre un electrodo de corriente y un electrodo de potencial son relativamente altos y están flanqueados por dos zonas con valores pequeños de sensibilidad, mientras que los valores de sensibilidad entre los electrodos  $M$  y  $N$  tienen valores de sensibilidad moderado. Existe una región media entre los dos dipolos en la cual se observan valores de sensibilidad relativamente altos. Dado que la intención es mapear el subsuelo entre los dos dipolos, esta configuración puede ser una buena opción.

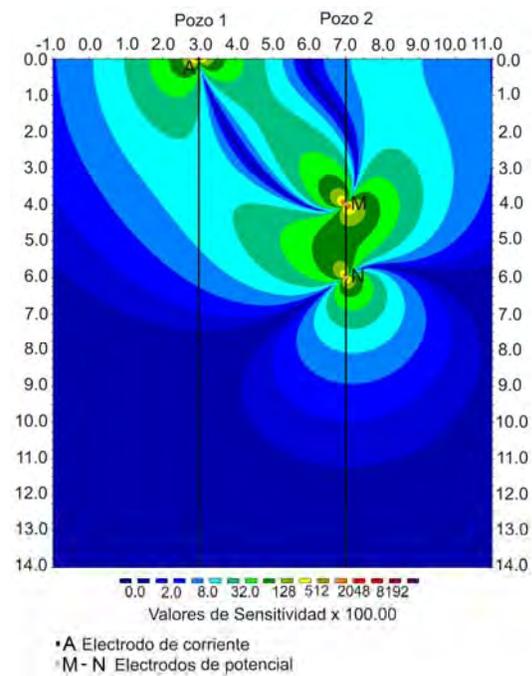
a) Pozo a Pozo (configuración A-MN)



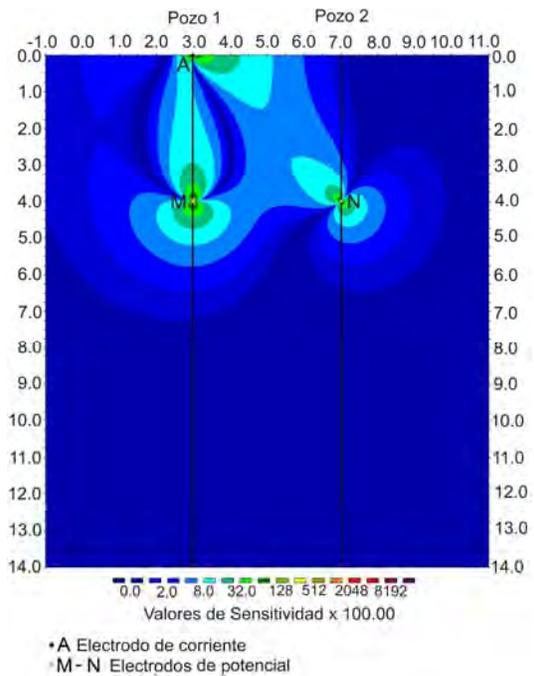
b) Pozo a Pozo (configuración AM-N)



c) Superficie a Pozo (configuración A-MN)



d) Superficie a Pozo (configuración AM-N)



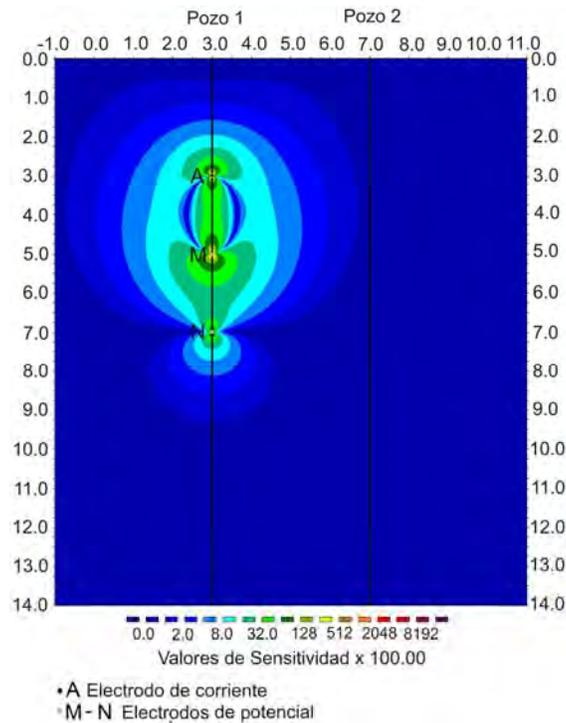
e) Un solo pozo (configuración  $A-MN$ )

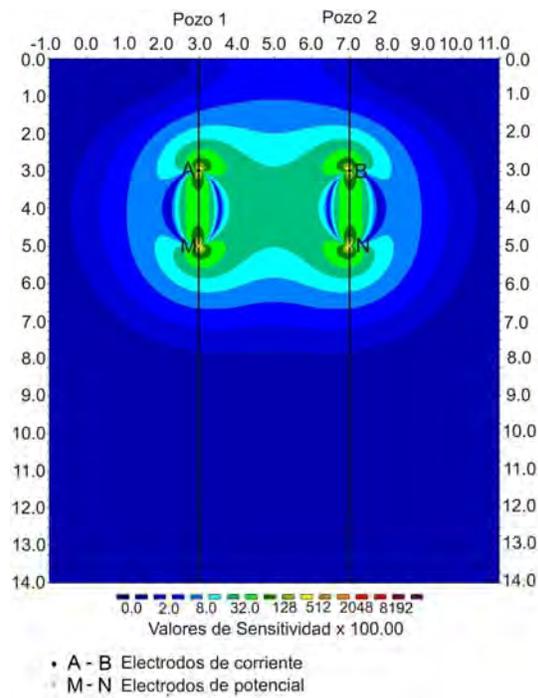
Figura 3.2. Secciones de sensibilidad 2D para las posibles configuraciones de un estudio de pozo del arreglo polo-dipolo. La localización de los dos pozos son mostrados por las líneas verticales en color negro.

En la Figura 3.3d el dipolo de corriente  $A-B$  se encuentra en un pozo mientras que el dipolo  $M-N$  esta en la superficie. Este arreglo tiene valores de sensibilidad grandes entre el dipolo  $A-B$ , y también entre el dipolo  $M-N$ . La región de subsuelo entre los dos dipolos tiene valores de sensibilidad moderado, mientras que una zona aproximadamente paralela se extiende desde el electrodo de corriente  $B$  (que es mayor en el pozo) a la izquierda del electrodo de potencial  $N$  tiene pequeños valores de sensibilidad.

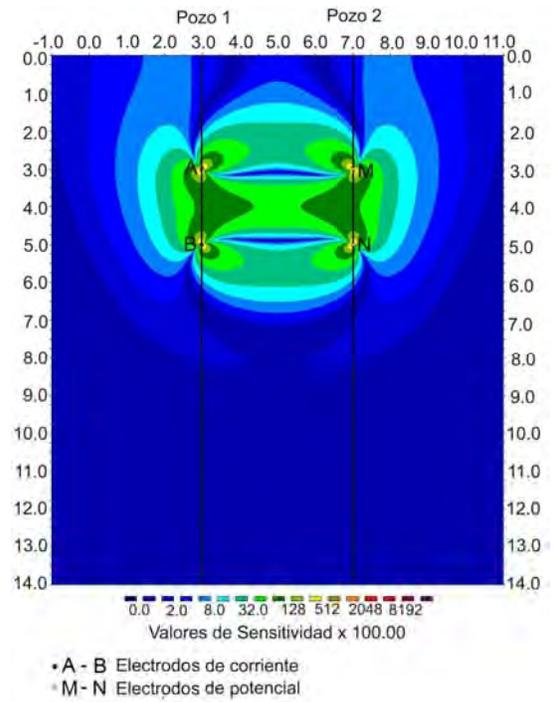
La configuración de un pozo (Figura 3.3e) muestra el patrón de sensibilidad cuando los cuatro electrodos se encuentran en el mismo pozo. Existe un incremento muy importante de los valores cercanos a cero y altos de sensibilidad en las inmediaciones del pozo.

En general, Zhou y Greenhalgh (1997, 2000) recomiendan la configuración  $AM-BN$ . Sasaki (1992) encontró que el arreglo dipolo-dipolo ( $AM-BN$ ) tiene mejor resolución en comparación con los arreglos polo-polo y polo-dipolo. Se debe tomar en cuenta que la longitud de los pozos debe ser semejante a la distancia entre los pozos. De lo contrario, si el espacio entre los electrodos en el mismo pozo es mucho más pequeña que la distancia entre los pozos, las lecturas pueden ser más influidas por los materiales en la vecindad inmediata de los pozos, más que el material entre los pozos. En esta situación, la única alternativa es, probablemente, incluir mediciones superficie-superficie y superficie-pozo.

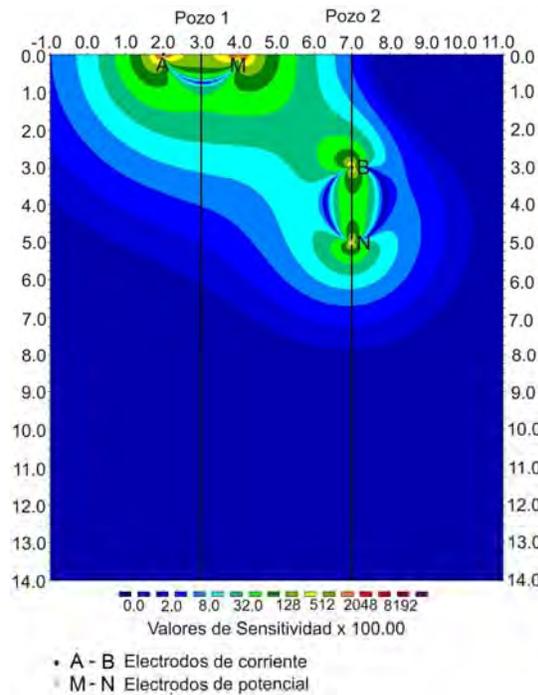
a) Pozo a Pozo (configuración *AM-BN*)



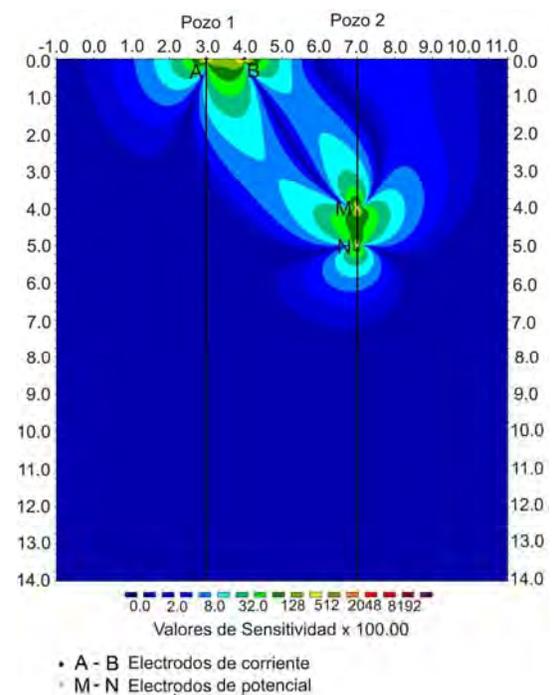
b) Pozo a Pozo (configuración *AB-MN*)



c) Superficie a Pozo (configuración *AM-BN*)



d) Superficie a Pozo (configuración *AB-MN*)



e) Un solo pozo (configuración *AB-MN*)

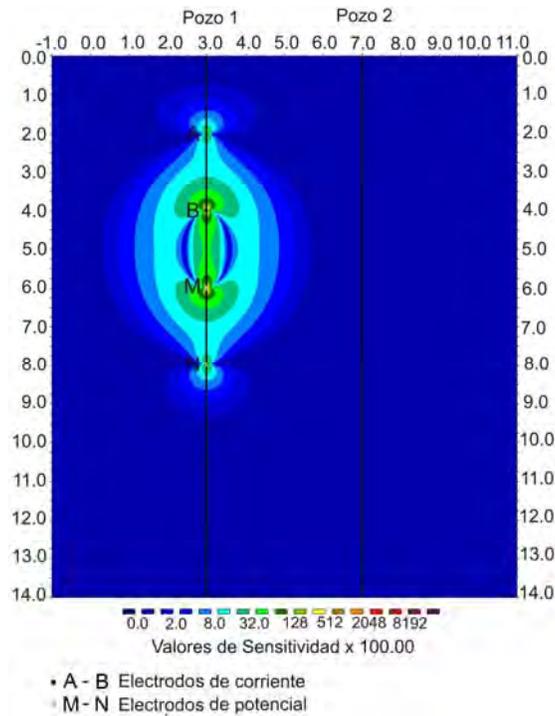
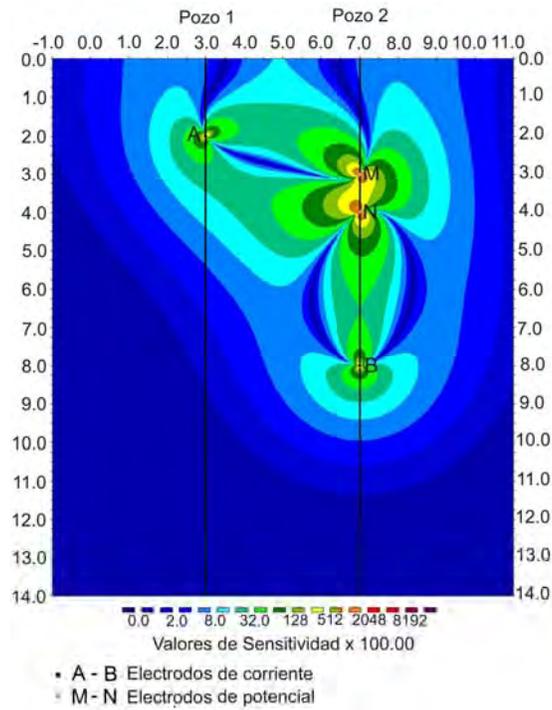


Figura 3.3. Secciones de sensibilidad 2D para las posibles configuraciones de un estudio de pozo del arreglo dipolo-dipolo. La localización de los dos pozos son mostrados por las líneas verticales en color negro.

### 3.1.4 Análisis de sensibilidad para el arreglo gradiente

Este tipo de arreglo es una buena opción cuando no se pueden colocar electrodos de superficie. Es una modalidad que presenta buenas características para utilizarla en estudios de pozo debido al excelente acoplamiento entre los electrodos, no es de uso común. En la Figura 3.4a se observan valores de sensibilidad muy altos entre los electrodos *M-N* y en general valores altos entre las zonas en las que están colocados los cuatro electrodos entre los dos pozos. Entre los electrodos *A* y *MN*, *B* y *MN* existe una zona bastante amplia en la región entre los pozos, lo que sugiere que esta configuración tiene un excelente mapeo de las diferentes estructuras del subsuelo. Este arreglo es similar al arreglo dipolo-dipolo, con la diferencia de que los electrodos de corriente se mantienen en los extremos y los de potencial en medio. Se observa que cualquiera de las configuraciones utilizadas con este arreglo, contribuyen con zonas bastante amplias de valores de sensibilidad alto. En la Figura 3.4b se observa una zona de forma elipsoidal en medio de los electrodos de potencial y los de corriente con valores de sensibilidad altos.

a) Pozo a Pozo



b) Un solo pozo

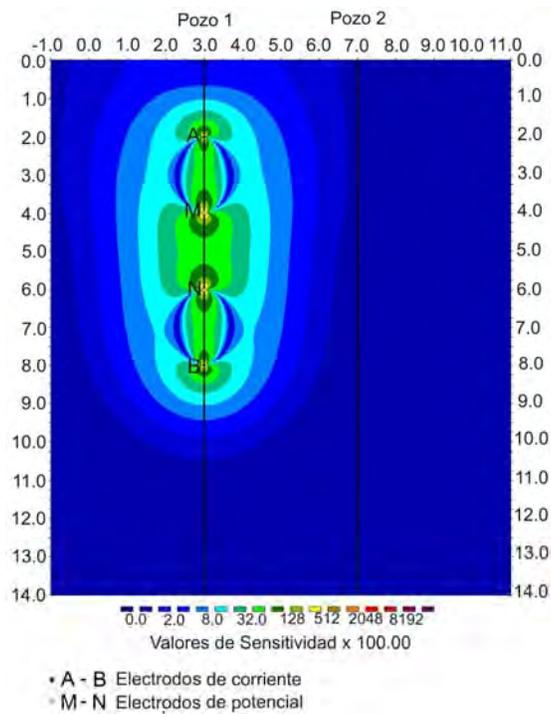


Figura 3.4. Secciones de sensibilidad 2D para las posibles configuraciones de un estudio de pozo del arreglo Gradiente. La localización de los dos pozos son mostrados por las líneas verticales en color negro.

### 3.2 Descripción de los Modelos Sintéticos.

Los experimentos numéricos se implementaron individualmente con las configuraciones de estudios de pozo independientes: pozo a pozo, un pozo a superficie y dos pozos a superficie con sus respectivas modalidades polo-polo, polo-dipolo, dipolo-dipolo y gradiente. Para una fácil comparación de la efectividad de las imágenes con los diferentes arreglos de electrodos se utilizaron dos algoritmos de inversión, el RES2DINV y el EarthImager 2D.

Los modelos sintéticos se desarrollaron con el programa RES2DMOD el cual requiere que se suministren los valores de resistividad de los bloques rectangulares entre las líneas de la malla por medio de un archivo de datos de entrada. Las dimensiones de la malla para todos los modelos del modelado directo fueron de 60 por 49, lo cual equivale a un total de 2940 bloques. El programa genera los valores de resistividades aparentes que posteriormente se utilizan en los algoritmos de inversión RES2DINV y EARTHIMAGER 2D los cuales generan la sección de resistividades verdaderas. En la inversión de cada modelo se utilizó una malla única para todos los arreglos con sus respectivas configuraciones de dimensiones 24 por 22, lo cual equivale a un total de 528 parámetros del modelo. También para un fácil comparación de la efectividad de las imágenes con los diferentes arreglos se utilizó el mismo algoritmo de inversión (método de mínimos cuadrados con condicionamiento suavizado), el mismo modelo inicial el cual fue un semiespacio homogéneo (medio uniforme para modelo 1 de  $\rho=100$  ohm-m y para el modelo 2  $\rho=50$  ohm-m). Durante la inversión se utilizó un factor de amortiguamiento  $\lambda$  de 0.15 para todos los modelos el cual resultó ser un factor óptimo para todas las configuraciones. Para el algoritmo RES2DINV se utilizaron cinco iteraciones para todos los arreglos, mientras que para el algoritmo EARTHIMAGER 2D se utilizaron diferentes números de iteraciones.

Los modelos sintéticos que se ilustran en este trabajo permiten, en principio, estudiar las capacidades de la respuesta del contraste de resistividad de diferentes tipos de estructuras que se encuentran en el subsuelo con diferentes modalidades de electrodos y sus respectivas configuraciones de pozo a partir de un estudio de TRE en pozo.

También los modelos elegidos para los experimentos son ejemplos muy interesantes porque como se ha visto en estudios de tomografía de superficie, la mayoría de las veces el cuerpo que se encuentra más cerca de la superficie enmascara o no define bien el cuerpo ubicado por debajo de este. Además, al utilizar únicamente electrodos de superficie la mayoría de las veces no se puede apreciar en la imagen de una manera clara la separación de los cuerpos. Este problema al parecer ha quedado resuelto al aplicar la TRE en pozo.

Los experimentos sintéticos que se presentan, son 2 modelos (Tabla 2 y Figura 3.5), los cuales se analizan sin agregar ruido aleatorio.

Modelo	Dimensiones (m)	Profundidad (m)	Coordenada del primer vértice de los bloques
Modelo 1 - Dos Bloques verticales	Bloque 1 = 3x3	3	$X_1=6 \quad Z_1=3 \quad Y_1=0$
	Bloque 2 = 3x2	8	$X_2=6 \quad Z_2=8 \quad Y_2=0$
Modelo 2 - Cuatro Bloques	Bloque 1 = 3x3	3	$X_1=6 \quad Z_1=3 \quad Y_1=0$
	Bloque 2 = 1x3	7	$X_2=1 \quad Z_2=7 \quad Y_2=0$
	Bloque 3 = 3x0.8	0.2	$X_3=10 \quad Z_3=0.2 \quad Y_3=0$
	Bloque 4 = 3x2	8	$X_4=10 \quad Z_4=8 \quad Y_4=0$

Tabla 2. Características de los tres modelos empleados en los experimentos sintéticos con TRE 2D en pozo.

a) Modelo 1 Dos bloques verticales

b) Modelo 2 Cuatro Bloques

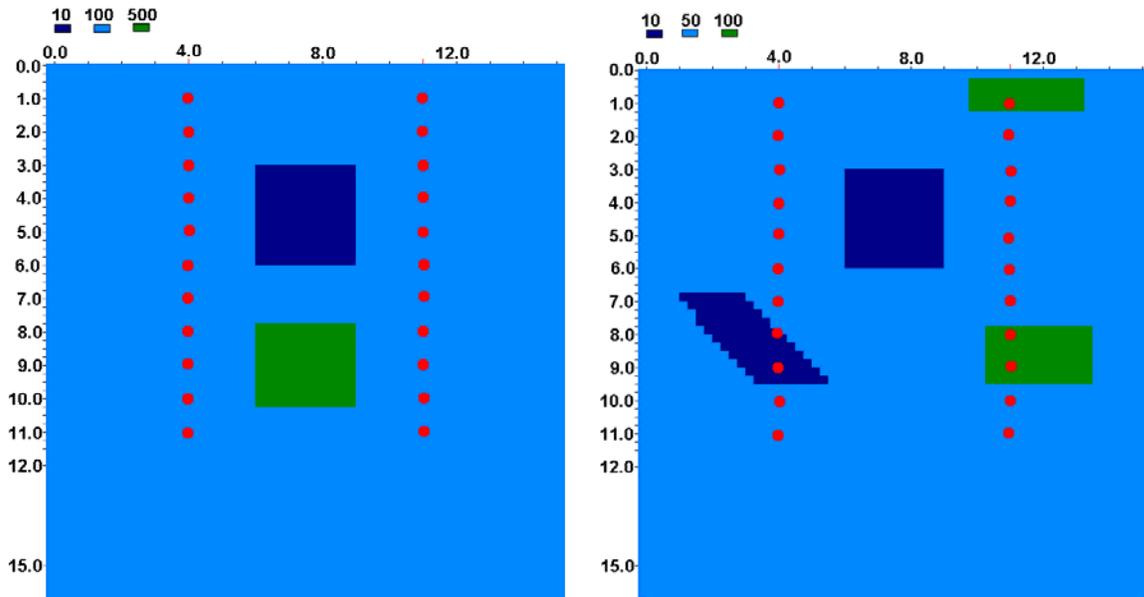


Figura 3.5. Modelos sintéticos utilizados para realizar las imágenes eléctricas de la TRE 2D en pozo.

La realización de los experimentos sintéticos de los tres modelos se llevó a cabo para los arreglos con sus respectivas configuraciones mostradas en la Tabla 3.

Tipo de arreglo	No. de electrodos	Modelo	Configuración
Polo-Polo	2 (A-M)	Modelo 1 - Dos Bloques verticales	Pozo-Pozo (P-P)
		Modelo 2 - Cuatro Bloques	2 Pozos-Superficie (2P-S) 1 Pozo a superficie (1P-S)
Polo-Dipolo	3 (A-MN)	Modelo 1 - Dos Bloques verticales	Pozo-Pozo (P-P)
		Modelo 2 - Cuatro Bloques	2 Pozos-Superficie (2P-S) 1 Pozo a superficie (1P-S)
Dipolo-Dipolo	4 (AM-BN)	Modelo 1 - Dos Bloques verticales	Pozo-Pozo (P-P)
	4 (AB-MN)	Modelo 1 - Dos Bloques verticales Modelo 2 - Cuatro bloques	Pozo-Pozo (P-P) 2 Pozos-Superficie (2P-S)
Gradiente	4 (A-MN-B)	Modelo 1 - Dos Bloques verticales	Pozo-Pozo (P-P)
		Modelo2 - Cuatro Bloques	

Tabla 3. Arreglos con sus respectivas configuraciones y modelos utilizados en los experimentos sintéticos en TRE 2D en pozo.

Todos los modelos incluyen dos pozos que se encuentran separados 7 metros, el pozo uno está ubicado a 4 metros del origen, mientras que el pozo dos se encuentra a 11 metros, cada pozo contiene 11 electrodos con 1 metro de separación, por consiguiente se tiene una profundidad de mapeo de 11 metros. Para la configuración de uno y dos pozos a superficie se incluyen 16 electrodos en superficie con 1 metro de separación (Tabla 4).

Configuración	No. de electrodos en pozo y superficie	Separación entre electrodos	Distancia entre Pozo
Pozo-Pozo (P-P)	11 electrodos en cada pozo Total 22 electrodos	1 metro	Pozo1 $X_1=4$ $Z_1=0$ Pozo2 $X_2=11$ $Z_2=0$
2Pozo-Superficie (2P-S)	11 electrodos en cada pozo y 16 electrodos en superficie. Total 38 electrodos	1 metro en pozo 1 metro superficie	Pozo1 $X_1=4$ $Z_1=0$ Pozo2 $X_2=11$ $Z_2=0$ Sup $X_1=0$ $X_{16}=15$ $Z=0$
1Pozo-Superficie (1P-S)	11 electrodos en el pozo y 16 electrodos en superficie. Total 27 electrodos	1 metro en pozo 1 metro superficie	Pozo1 $X_1=4$ $Z_1=0$ Sup $X_1=0$ $X_{16}=15$ $Z=0$

Tabla 4. Ubicación de pozos y electrodos en pozo y superficie para TRE 2D en pozo.

### 3.3 Arreglo polo-polo (A-M)

Las Figuras 3.1a, 3.1b y 3.1c, así como las Tablas 1, 2 y 3 muestran el conjunto de experimentos que se realizaron con el arreglo polo-polo (A-M).

#### 3.3.1. Configuración Pozo a Pozo (P-P).

##### 3.3.1.1 Modelo 1. Dos bloques verticales.

En la sección de resistividad verdadera (Figura 3.6) se observa que la configuración de los datos sintéticos con SURFER da una resolución excelente, la imagen define con claridad la separación de los dos bloques, una zona de baja resistividad que coincide con la ubicación del bloque 1 y otra que coincide con una zona de alta resistividad que corresponde a la ubicación del bloque 2. En cuanto a las dimensiones se observa que ambos bloques ajustan muy bien con las dimensiones propuestas. El bloque 2 se mapea bastante bien, solo con el pequeño inconveniente de que el algoritmo subestima su valor de resistividad. Respecto a la ubicación, ambos bloques se localizan en la posición espacial exacta. En esta imagen eléctrica también se aprecia claramente que para este arreglo la resolución cuando existe un contraste de resistividad bajo o alto los contornos de los valores de resistividad de los bloques se dibujan perfectamente.

La configuración para este ejemplo define bien los contornos de los valores de resistividad de ambos bloques de acuerdo con el programa RES2DINV.

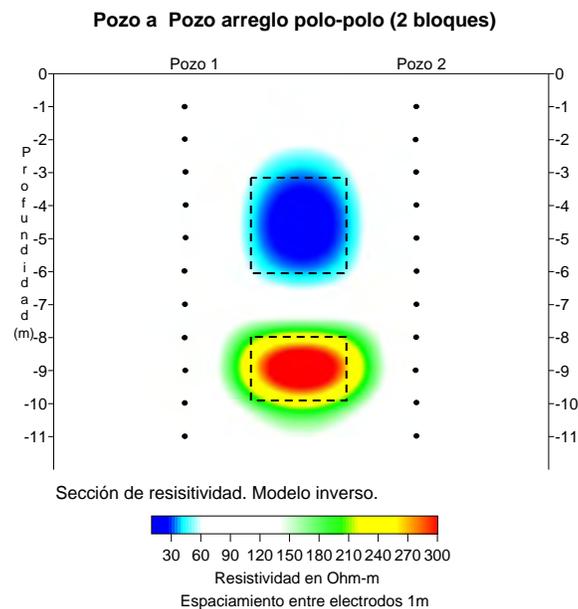


Figura 3.6. Sección de resistividad eléctrica o imagen eléctrica de TRE 2D en pozo de dos bloques rectangulares arreglo polo-polo, configuración de pozo a pozo con el algoritmo Res2dinv, 5 iteraciones. Error RMS 0.3%.

### 3.3.1.2 Modelo 2. Cuatro bloques.

En la imagen eléctrica (Figura 3.7) se observa que la configuración de los datos sintéticos con SURFER da una mejor resolución para los tres bloques (1,2 y 4) que se encuentran a mayor profundidad, a diferencia del bloque 3 que se encuentra en la parte superior derecha (atraviesa el pozo 2), el cual no se alcanza a definir bien. De los cuatro bloques, el bloque 1 ubicado al centro de la imagen en medio de los dos pozos es el que define mejor los contornos de los valores de resistividad, así como su posición espacial. Sin embargo, sus dimensiones son mayores a las reales. En el bloque 2 inclinado ubicado en la parte inferior izquierda de la imagen (atraviesa el pozo 1), los contornos de los valores de resistividad definen bien el bloque, se observa un poco difuminado y alargado, lo cual indica que sus dimensiones no están bien delimitadas, sin embargo, su ubicación está en la posición espacial exacta.

En esta imagen eléctrica también se aprecia claramente que para los otros dos bloques (bloque 3 y 4) aunque tienen un valor de resistividad mayor, solo se pueden ver los contornos de los valores de resistividad para el bloque 4 situado en la parte inferior derecha (atraviesa el pozo 2), el cual además, coincide con las dimensiones y la posición espacial. El bloque 3 ubicado en la parte superior derecha (atraviesa pozo 2) muy cerca de la superficie coincide con una zona que se marca con un valor de resistividad aproximadamente de 80 ohm-m la cual puede ser inferida como un bloque más, debido a esto se puede interpretar como otra anomalía, localizada en la posición espacial exacta y de dimensiones aproximadas a las reales.

La configuración para este ejemplo define bien los contornos de los valores de resistividad de los bloques de acuerdo al algoritmo de Loke.

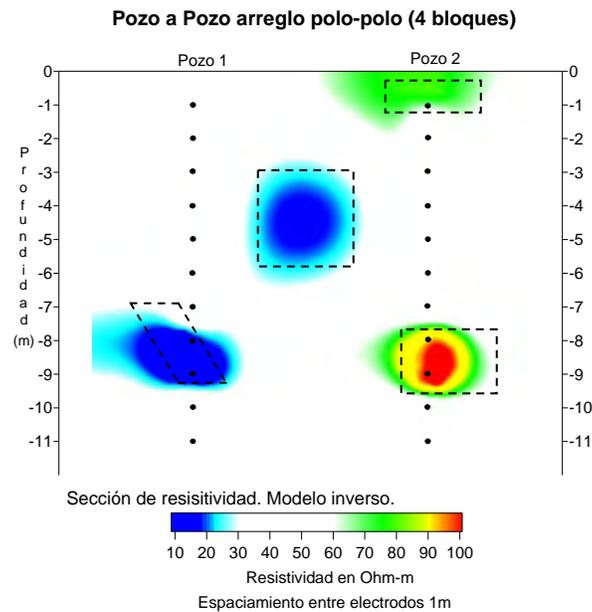


Figura 3.7. Sección de resistividad verdadera o imagen eléctrica de TRE 2D en pozo de cuatro bloques arreglo polo-polo, configuración de pozo a pozo con el algoritmo Res2dinv, 5 iteraciones, error RMS 0.2%.

### 3.3.2 Configuración de dos Pozos a Superficie (2P-S).

#### 3.3.2.1 Modelo 1. Dos bloques verticales.

La Figura 3.8 muestra la sección de resistividad verdadera construida con el algoritmo de Loke de dos bloques rectangulares en posición vertical. En la imagen eléctrica (Figura 3.8) se observa que la configuración de los datos sintéticos con SURFER da una resolución excelente, la imagen define con claridad la separación de los dos bloques, una zona de baja resistividad que coincide con la ubicación del bloque 1 y la otra que coincide con una zona de alta resistividad que corresponde a la ubicación del bloque 2. En cuanto a las dimensiones se observa que ambos bloques ajustan muy bien con las dimensiones propuestas. El bloque 2 se mapea bastante bien solo con el pequeño inconveniente de que el algoritmo nuevamente vuelve a subestimar su valor de resistividad. Con respecto a la ubicación, ambos bloques se localizan en la posición espacial exacta. En esta imagen también se aprecia claramente que para este arreglo la resolución cuando existe un contraste de resistividad bajo o alto los contornos de los valores de resistividad de los bloques se dibujan perfectamente.

Esta configuración define bien los contornos de los valores de resistividad de los bloques de acuerdo con el algoritmo de Loke.

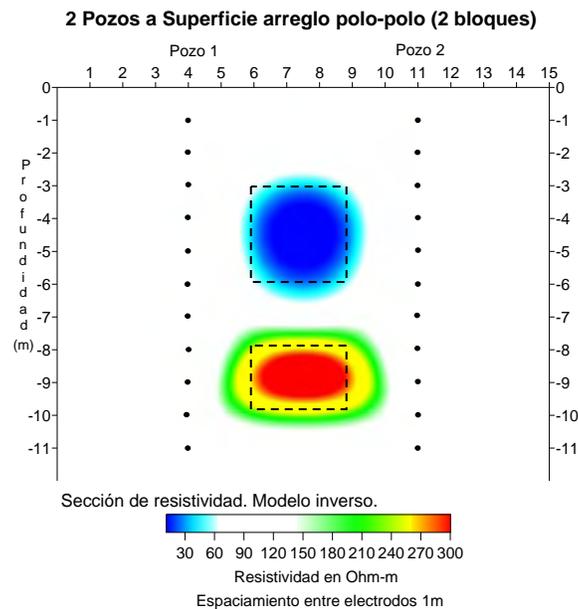


Figura 3.8. Sección de resistividad verdadera o imagen eléctrica de TRE 2D en pozo de dos bloques rectangulares arreglo polo-polo, configuración de dos pozos a superficie con el algoritmo Res2dinv, 5 iteraciones, error RMS 0.1%.

### 3.3.2.2 Modelo 2. Cuatro bloques.

En la imagen eléctrica de la Figura 3.9 se observa que la configuración de los datos sintéticos interpolados con SURFER da una excelente resolución, los contornos de los valores de resistividad de los cuatro bloques se definen de una manera muy clara. Se observan dos zonas de baja resistividad que coinciden con la ubicación del bloque 1 (centro entre los dos pozos) y la otra localizada en la parte inferior izquierda de la imagen (atraviesa el pozo 1) que corresponde al bloque 2, los contornos de los valores de resistividad definen bien ambos cuerpos. Con respecto a los otros dos bloques (bloque 3 y 4) que se ubican en la parte superior e inferior derecha de la imagen (atraviesan el pozo 2), coinciden perfectamente con las zonas de mayor resistividad, los contornos de los valores de resistividad resuelven bien ambos bloques rectangulares. Los cuatro bloques están bien separados, colocados correctamente en su posición espacial y sus dimensiones bien delimitadas.

En esta imagen también se aprecia claramente que para este arreglo la resolución cuando existe un contraste de resistividad bajo o alto los contornos de los valores de resistividad de los bloques se dibujan perfectamente. Al igual que en la imagen de dos bloques (Figura 3.8) esta configuración define excelente los contornos de los valores de resistividad de todos los bloques, ajusto bien los valores de resistividad de los cuatro bloques.

Es importante comentar que la resolución de los bloques de las dos imágenes anteriores mejoró enormemente al considerar un mayor número de datos utilizando esta configuración (2P-S).

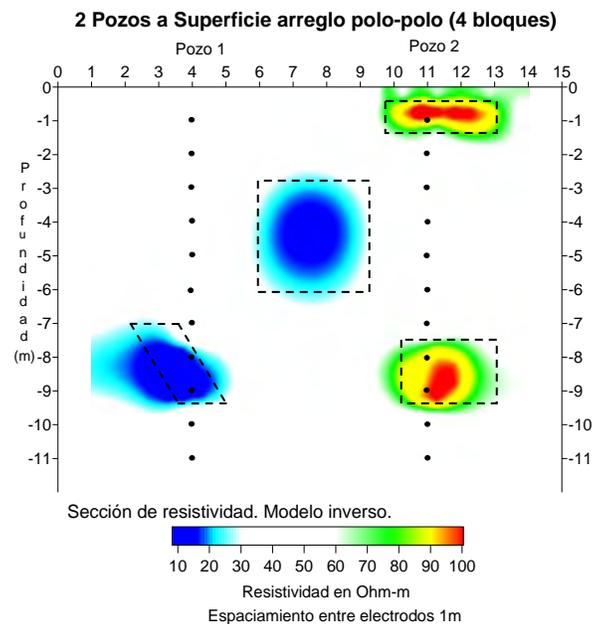


Figura 3.9. Sección de resistividad verdadera o imagen eléctrica de TRE 2D en pozo de cuatro bloques arreglo polo-polo, configuración de dos pozos a superficie con el algoritmo Res2dinv, 5 iteraciones, error RMS 0.4%.

### 3.3.3 Configuración de un Pozo a Superficie (1P-S).

#### 3.3.3.1 Modelo 1. Dos bloques verticales.

Las Figuras 3.10a y 3.10b muestran las secciones de resistividad verdadera construidas con los algoritmos RES2DINV y el EarthImager 2D respectivamente. Este ejemplo es igual o más interesante que las configuraciones anteriores. Se pretende evaluar si la respuesta mejora al tomar datos considerando electrodos en un pozo y superficie, debido a que como se ha visto en estudios de tomografía de superficie, la mayoría de las veces el bloque que se encuentra por encima de otro enmascara o no define bien el bloque ubicado por debajo de este, es decir, se dificulta apreciar en la imagen de una manera clara la separación de los cuerpos. Este problema al parecer ya fue resuelto aplicando la TRE.

En la imagen eléctrica (Figura 3.10a) se observa que la configuración de los datos sintéticos con SURFER da una resolución muy mala para ambos bloques, pero sobre todo para el bloque 2 que se encuentra a mayor profundidad. Las formas de los contornos de los valores de resistividad logran identificar la separación de los dos bloques, una zona de baja resistividad que corresponde al bloque 1 y la otra zona de alta resistividad que corresponde al bloque 2.

En cuanto a las características del bloque 1 se observa que las dimensiones que se muestran en la imagen para este bloque son más grandes que las dimensiones reales, su posición espacial está en el lugar propuesto. Respecto al bloque 2 se mapea muy mal, el algoritmo no logra resolver de una manera eficiente su forma, las dimensiones y la posición espacial, además con referencia a las dos configuraciones anteriores subestima todavía más el valor de resistividad.

En esta imagen también se aprecia claramente que para esta configuración la resolución cuando existe un contraste de resistividad bajo o alto los contornos de los valores de resistividad los cuerpos no se dibujan adecuadamente.

La configuración con este arreglo no define bien los contornos de los valores de resistividad de los cuerpos de acuerdo al algoritmo de Loke.

En cuanto a la imagen configurada con el EarthImager 2D, Figura 3.10b, se observa que el bloque 1 se resuelve muy bien, esto nos sugiere que presenta menos problemas en la resolución para contrastes bajos de resistividad, además aparece aproximadamente en la posición original. En cuanto a sus dimensiones tiene una aproximación aceptable a las dimensiones reales.

Para el bloque 2, la imagen muestra que no define los contornos de los valores de resistividad, lo cual hace que no se resuelva y aparezca desfasado de su posición original.

También, se observó que el algoritmo EarthImager 2D define de una manera muy aproximada los contornos de los valores de resistividad del bloque 1, así como sus dimensiones y posición espacial. Al bloque 2 no logra resolverlo, a diferencia del algoritmo de Loke el cual si resuelve mejor este bloque.

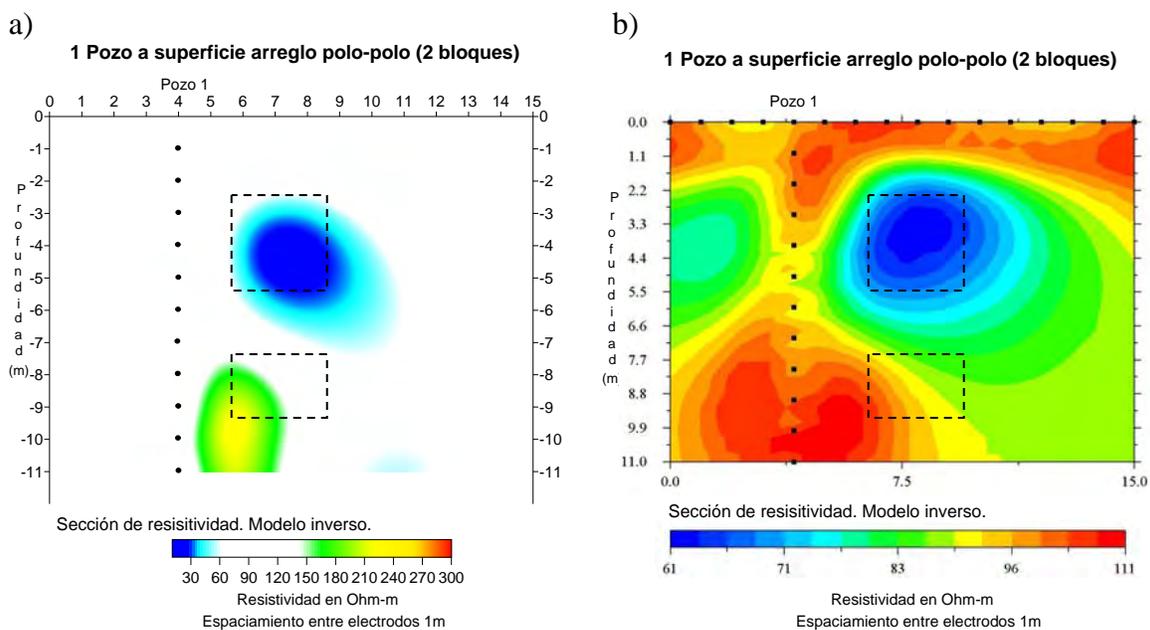


Figura 3.10. Secciones de resistividad verdadera o imágenes eléctricas de TRE 2D en pozo de dos bloques rectangulares arreglo polo-polo, configuración de dos pozos a superficie. (a) Sección de resistividad con Res2dinv 5 iteraciones, error RMS 0.2% y (b) Sección de resistividad con EarthImager 2D, iteraciones 3, error RMS 1.81%.

### 3.3.3.2 Modelo2. Cuatro bloques.

Las Figuras 3.11a y 3.11b muestran las secciones de resistividad verdadera construidas con los algoritmos RES2DINV y el EarthImager 2D respectivamente.

En la imagen eléctrica de la Figura 3.11a se observa que la configuración de los datos sintéticos interpolados con SURFER tiene una resolución razonable para tres bloques (1, 2

y 3), excepto para el bloque 4 situado en la parte inferior derecha (atraviesa pozo 2) el cual no aparece. Los contornos de los valores de resistividad de los bloques (1, 2 y 3) se definen de una manera clara en los contornos de los valores de resistividad. Se observan dos zonas de baja resistividad que coinciden con la ubicación del bloque 1 y la otra ubicada en la parte inferior izquierda de la imagen (atraviesa el pozo 1) que corresponde al bloque 2, los contornos de los valores de resistividad definen bien ambos bloques. Con respecto a los otros dos bloques (3 y 4) de forma rectangular que se ubican en la parte superior e inferior derecha de la imagen (atraviesan pozo 2) respectivamente, el bloque 3 coincide perfectamente con la zona de alta resistividad, los contornos de los valores de resistividad lo resuelven bien. El bloque 4 no se resuelve en la imagen, es decir, no aparece en la zona donde debería estar colocado, por consiguiente no puede ser interpretado. Los bloques (1, 2 y 3) que si aparecen en la imagen están bien separados, colocados correctamente en su posición espacial y sus dimensiones aparecen un poco más grandes de las dimensiones reales ocupando un área mayor que las originales.

En esta imagen eléctrica también se aprecia claramente que para esta configuración la resolución de los bloques cuando existe un contraste de resistividad bajo o alto y además estén cerca de las líneas de medición (pozo o superficie) los contornos de los valores de resistividad se resuelven bien.

Para esta configuración al igual que en la imagen eléctrica de dos bloques utilizando el algoritmo de Loke definió bien los contornos de los valores de resistividad de los tres bloques.

En cuanto a la imagen eléctrica configurada con el EarthImager 2D, Figura 3.11b, se observa que el bloque 1 ubicado al centro de la imagen no lo resuelve, esto sugiere que presenta problemas en la resolución cuando el cuerpo está alejado de las líneas de medición, además de que no aparece en su posición original. En cambio el bloque 2 ubicado en la parte inferior izquierda (atraviesa el pozo 1) lo resuelve bastante bien, los contornos de los valores de resistividad genera el bloque en la posición espacial correcta, su forma muy aproximada al cuerpo propuesto y las dimensiones muy cercanas a las reales, pero como se puede observar el bloque esta extremadamente cerca del pozo.

Para los bloques (3 y 4), la imagen muestra que los contornos de los valores de resistividad del bloque 3 ubicado en la parte superior derecha muy cerca de la línea de electrodos colocados en superficie se definen bien, ubica al cuerpo en la posición espacial correcta, su forma muy aproximada y las dimensiones un poco más grandes a las reales. El bloque 4 situado en la parte inferior derecha no se resuelve al igual como ocurrió con el algoritmo de Loke, es decir, no aparece en la zona donde debería estar colocado, por consiguiente no puede ser interpretado.

Además, se observó que el algoritmo EarthImager 2D para esta configuración resultó menos eficiente que el algoritmo de Loke, definió de una manera muy aproximada los contornos de los valores de resistividad del bloque 2 y del bloque 3, así como sus dimensiones y posición espacial, lo cual no ocurrió para los bloques 1 y 4 el cual no los logro resolver, no aparecieron en la imagen a diferencia del algoritmo de Loke el cual si presenta los bloques 1, 2 y 3.

Es de comentar que la resolución de los cuerpos es regular a mala al considerar solo información para un pozo y superficie a pesar de tener un mayor número de datos que cuando se utiliza la configuración de dos pozos (P-P).

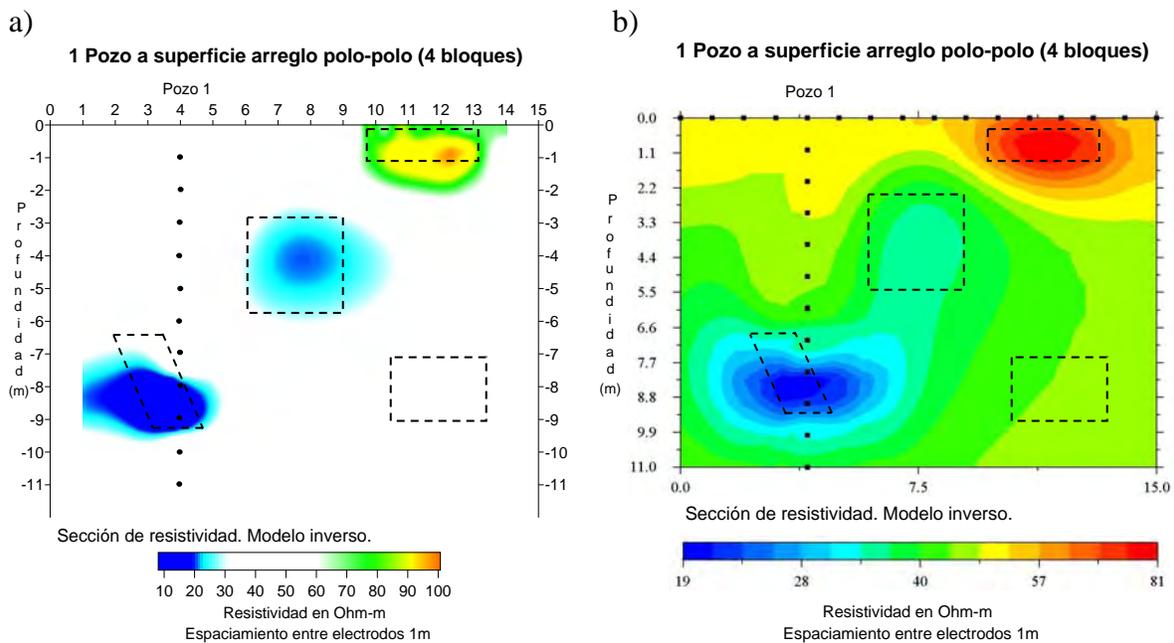


Figura 3.11. Secciones de resistividad verdadera o imágenes eléctricas de TRE 2D en pozo de cuatro bloques arreglo polo-polo, configuración de un pozo a superficie. (a) Sección de resistividad con Res2dinv, 5 iteraciones, error RMS 0.5% y (b) Sección de resistividad con EarthImager 2D, 3 iteraciones, error RMS 2.21%.

### 3.4 Arreglo Polo-dipolo.

Las Figuras (3.2a, b, c, d y e) y las Tablas 1, 2 y 3 muestran otro conjunto de experimentos con la configuración polo-dipolo ( $A-MN$ ).

#### 3.4.1 Configuración de Pozo a Pozo (P-P).

##### 3.4.1.1 Modelo 1. Dos bloques verticales.

Las Figuras 3.12a y 3.12b muestran las secciones de resistividad verdadera construida con los algoritmos RES2DINV y EarthImager 2D respectivamente.

En la imagen eléctrica de la Figura 3.12a se observa que la configuración de los datos sintéticos con SURFER da buena resolución, la imagen eléctrica define con claridad la separación de los dos bloques, una zona de baja resistividad que coincide con la ubicación del bloque 1 y la otra que coincide con una zona de alta resistividad que corresponde a la ubicación del bloque 2. En cuanto a las dimensiones de los bloques se puede apreciar que agranda un poco las dimensiones propuestas para el bloque 1, mientras que el segundo bloque se mapea bastante bien. Con respecto a la ubicación, ambos bloques se localizan en la posición espacial exacta. En esta imagen también se aprecia claramente una vez más que la resolución es satisfactoria, cuando existe un contraste de resistividad alto, los contornos de los valores de resistividad del bloque se dibujan perfectamente.

La configuración para este arreglo define bien los contornos de los valores de resistividad de ambos bloques de acuerdo con el algoritmo de Loke.

En cuanto a la imagen configurada con el EarthImager 2D, Figura 3.12b, se observa que la configuración de los datos sintéticos con este algoritmo da buena resolución, la imagen eléctrica define con claridad la separación de los dos bloques, una zona de baja resistividad que coincide con la ubicación del bloque 1 y la otra que coincide con una zona de alta resistividad que corresponde a la ubicación del bloque 2. El bloque 1 se resuelve muy bien, además de que se aproxima a la posición original. En cuanto a sus dimensiones tiene una aproximación aceptable a las propuestas.

Para el bloque 2, la imagen muestra que define bien los contornos de los valores de resistividad lo cual hace que se resuelva mejor.

El algoritmo EarthImager 2D define de una manera muy aproximada los contornos de los valores de resistividad del bloque 1, así como para las dimensiones y posición espacial. El segundo bloque logra resolverlo de manera eficiente.

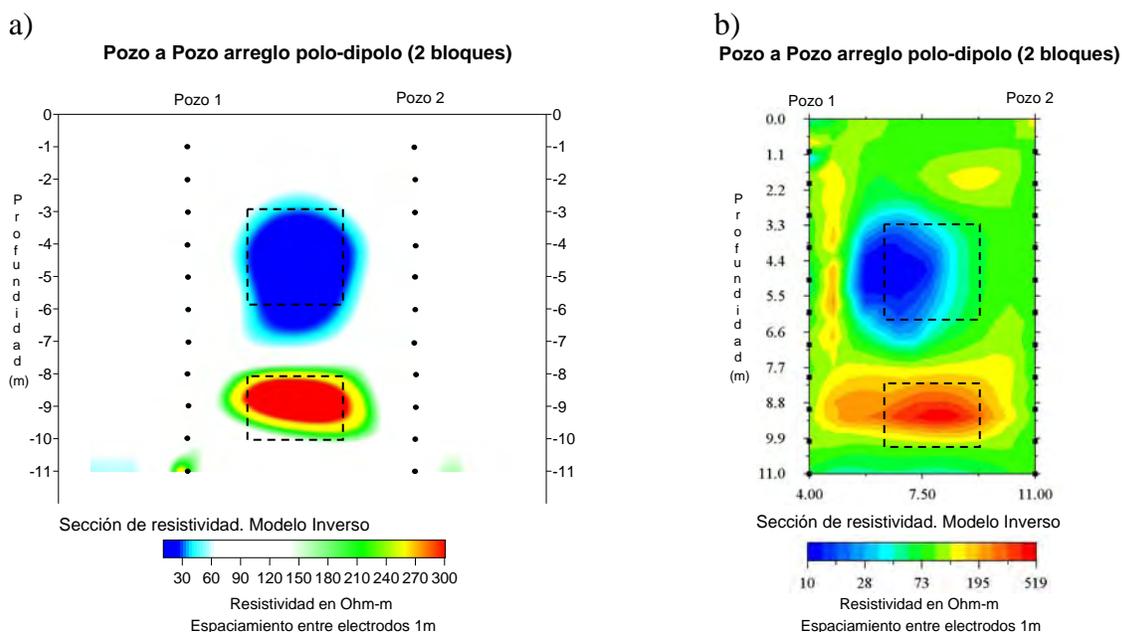


Figura 3.12. Imágenes eléctricas de TRE 2D en pozo de dos bloques rectangulares arreglo polo-dipolo, configuración de pozo a pozo. (a) Sección de resistividad con Res2dinv 5 iteraciones, error RMS 0.3% y (b) Sección de resistividad con EarthImager 2D, 8 iteraciones, error 3.45%.

#### 3.4.1.2 Modelo 2. Cuatro bloques.

En la imagen eléctrica de la Figura 3.13a se observa que la configuración de los datos sintéticos con el SURFER da una razonable resolución para los bloques 1, 2 y 4 que se encuentran a mayor profundidad, excepto para el bloque 3 que se encuentra en la parte superior derecha (atraviesa el pozo 2) y más superficial, el cual se define de manera regular. De los cuatro bloques, el bloque 1 que se ubicó al centro de la imagen en medio de los dos pozos es el que mejor se define con los contornos de los valores de resistividad, así como su

posición espacial y sus dimensiones. El bloque 2 inclinado ubicado en la parte inferior izquierda de la imagen (atraviesa el pozo 1), los contornos de los valores de resistividad lo definen bien, se observa un poco alargado, lo que indica que define de manera aceptable sus dimensiones, con respecto a su ubicación se localiza en la posición espacial exacta.

En esta imagen también se aprecia claramente que para los bloques 3 y 4 aunque tienen un valor de resistividad mayor solo se pueden visualizar los contornos de los valores de resistividad para el bloque 4 situado en la parte inferior derecha (atraviesa el pozo 2) el cual coincide con las dimensiones y la posición espacial, el bloque 3 ubicado en la parte superior derecha (atraviesa pozo 2) muy cerca de la superficie aparece muy desvanecido por lo cual no se puede interpretar como otra anomalía.

Esta configuración define bien los contornos de los valores de resistividad de los bloques de acuerdo con el algoritmo de Loke.

En cuanto a la imagen eléctrica configurada con el EarthImager 2D, Figura 3.13b, se observa que la configuración de los datos sintéticos con este algoritmo resuelve de una manera muy deficiente los cuatro bloques, la sección de resistividad no define con claridad la separación de los cuatro bloques, solo logra resolver una zona de baja resistividad que coincide con la ubicación del bloque 1.

Los otros tres bloques (2, 3 y 4) no se pueden definir en la imagen eléctrica, al contrario aparecen otras zonas que se pueden asociar con otras anomalías.

El algoritmo EarthImager 2D no define ninguno de los contornos de los valores de resistividad de los cuatro bloques, para sus dimensiones y posición espacial.

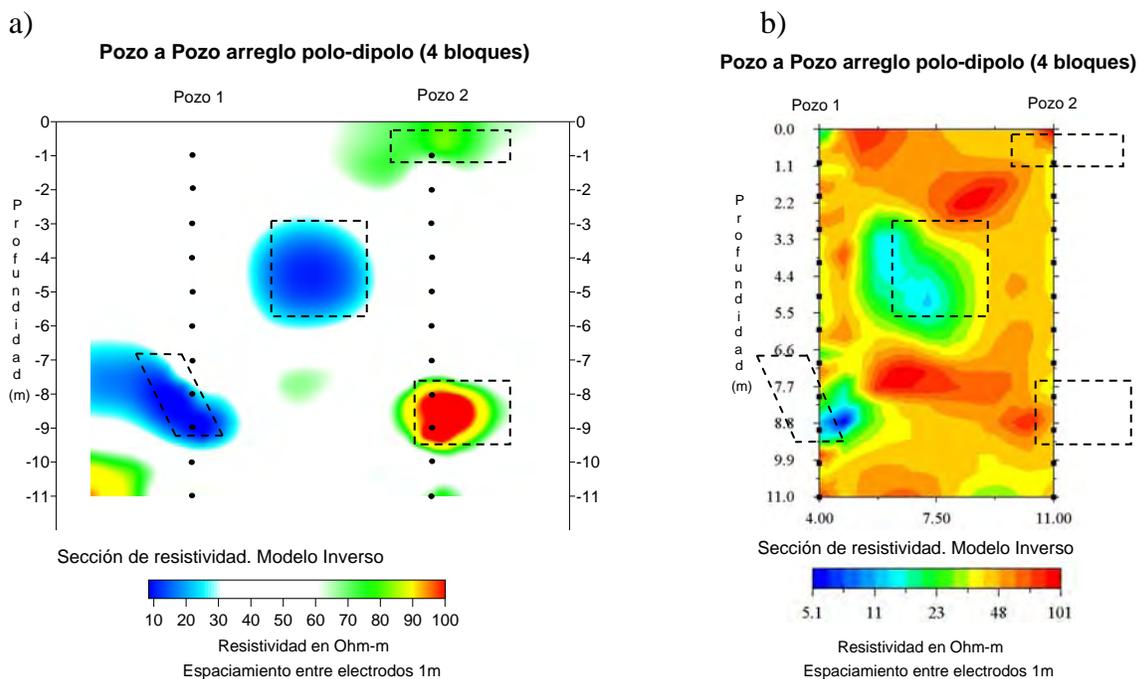


Figura 3.13. Imágenes eléctricas de TRE 2D en pozo de cuatro bloques arreglo polo-dipolo, configuración de pozo a pozo. (a) Sección de resistividad con Res2dinv, 5 iteraciones, error RMS 0.2% y (b) Sección de resistividad con EarthImager 2D, 8 iteraciones, error RMS 5.98%.

### 3.4.2 Configuración de dos Pozos a Superficie (2P-S).

#### 3.4.2.1 Modelo 1. Dos bloques verticales.

En la imagen de la Figura 3.14a se observa que la configuración de los datos sintéticos interpolados con el SURFER da buena resolución, la imagen define con claridad la separación de los dos bloques, una zona de baja resistividad que coincide con la ubicación del bloque 1 y la otra que coincide con una zona de alta resistividad que corresponde a la ubicación del bloque 2.

En cuanto a las dimensiones de los bloques se aprecia que agranda y deforma las dimensiones reales para el bloque 1, mientras que el segundo bloque se mapea bastante bien, aunque como se puede apreciar su tamaño es más pequeño comparado con el tamaño real propuesto. Con respecto a las ubicaciones, el bloque 1 se localiza en la posición espacial correcta y el bloque 2 se ubica en su posición espacial exacta. En esta imagen también se aprecia claramente una vez más que la resolución cuando existe un contraste de resistividad alto los contornos de los valores de resistividad del bloque se dibujan perfectamente.

La configuración para este arreglo define bien los contornos de los valores de resistividad de los dos bloques de acuerdo al algoritmo de Loke.

En cuanto a la imagen configurada con el EarthImager 2D, Figura 3.14b, se observa que el bloque 1 se resuelve muy bien, esto sugiere que presenta menos problemas en la resolución para contrastes bajos de resistividad, además de que se aproxima a la posición original. En cuanto a sus dimensiones tiene una aproximación aceptable con respecto a las dimensiones reales.

Para el bloque 2, la imagen eléctrica muestra que se definen muy bien los contornos de los valores de resistividad lo cual hace que se resuelva bien en la imagen.

El algoritmo EarthImager 2D define de una manera muy aproximada los contornos de los valores de resistividad del bloque 1, así como para las dimensiones y posición espacial. El segundo bloque también logra resolverlo de manera eficiente.

#### 3.4.2.2 Modelo 2. Cuatro bloques.

En la imagen de la Figura 3.15a se observa que la configuración de los datos sintéticos interpolados con el SURFER da una excelente resolución para los cuatro bloques, los contornos de los valores de resistividad de los bloques se definen de una manera muy clara en los contornos de los valores de resistividad. Se observan dos zonas de baja resistividad que coinciden con la ubicación del bloque 1 (centro entre los dos pozos) y la otra ubicada en la parte inferior izquierda de la imagen (atraviesa el pozo 1) que corresponde al bloque 2, los contornos de los valores de resistividad definen bien ambos bloques. Con respecto a los otros dos bloques (3 y 4) de forma rectangular que se ubican en la parte superior e inferior derecha de la imagen (atraviesan el pozo 2), coinciden perfectamente con las zonas de alta resistividad, los contornos de los valores de resistividad resuelven bien ambos bloques rectangulares. Los cuatro bloques están bien separados, colocados correctamente en su posición espacial y sus dimensiones bien delimitadas. En esta imagen también se aprecia claramente que para este arreglo la resolución cuando existe un contraste de

resistividad bajo o alto los contornos de los valores de resistividad de los bloques se dibujan perfectamente.

En cuanto a la imagen configurada con el EarthImager 2D, Figura 3.15b, se observa que el bloque 1 situado al centro entre los dos pozos se resuelve bien, además se aproxima a la posición espacial original. En cuanto a sus dimensiones tiene una aproximación aceptable a las dimensiones reales. Para el segundo bloque ubicado en la parte inferior izquierda (atraviesa el pozo 1), la imagen muestra que no define bien los contornos de los valores de resistividad lo cual hace que no se resuelva bien, se observa un poco difuminado y dividido, lo cual nos indica que no define bien sus dimensiones, con respecto a su ubicación se localiza en la posición espacial exacta. Con respecto a los otros dos bloques de forma rectangular que se ubican en la parte superior (bloque 3) e inferior derecha (bloque 4) de la imagen (atraviesan el pozo 2), coinciden con las zonas de alta resistividad, los contornos de los valores de resistividad resuelven de manera regular ambos bloques. En cuanto a las dimensiones y la posición espacial, no se definen bien.

Los cuatro bloques están bien separados, colocados correctamente en su posición espacial.

En general, se observo que el algoritmo EarthImager 2D define de una manera regular los contornos de los valores de resistividad de los cuatro bloques, así como para las dimensiones y posición espacial.

Cabe comentar que la resolución de los cuerpos mejoró enormemente al considerar un mayor número de datos para generar la imagen.

Al igual que en la imagen de dos bloques la configuración utilizando el algoritmo de Loke para esta configuración define bien los contornos de los valores de resistividad de los cuerpos. También para este caso el algoritmo ajustó muy bien los valores de resistividad de los cuatro cuerpos.

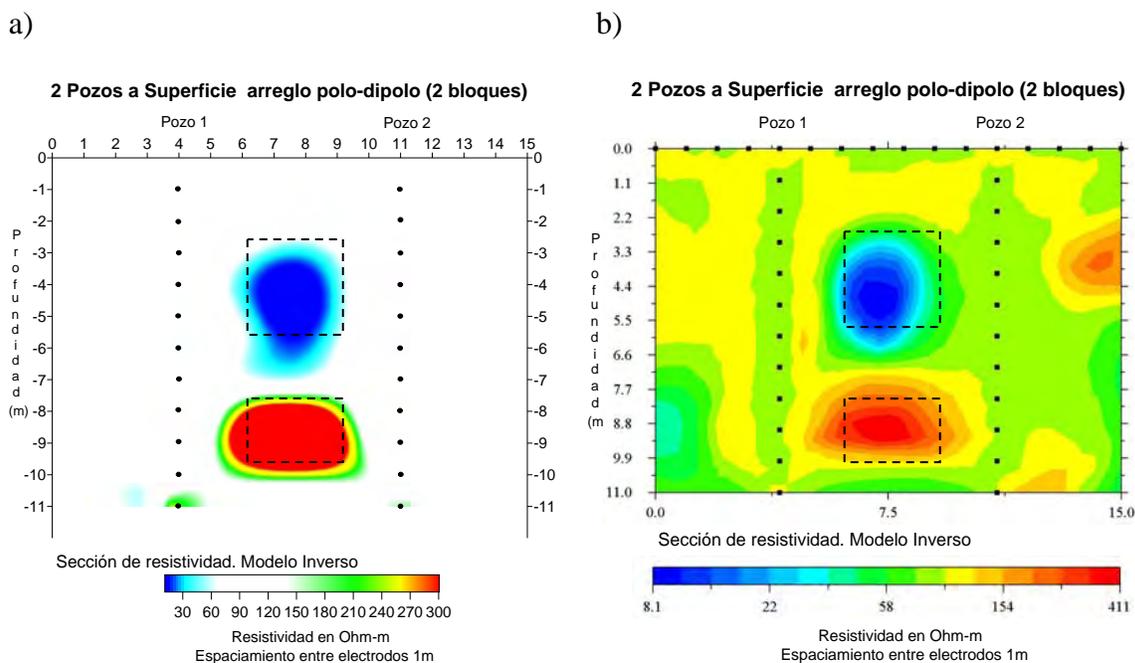


Figura 3.14. Imágenes eléctricas de TRE 2D en pozo de dos bloques rectangulares arreglo polo-dipolo, configuración de dos pozos a superficie. (a) Sección de resistividad con Res2dinv, 5 iteraciones, error RMS 0.6% y (b) Sección de resistividad con EarthImager 2D, 8 iteraciones, error RMS 4.04%.

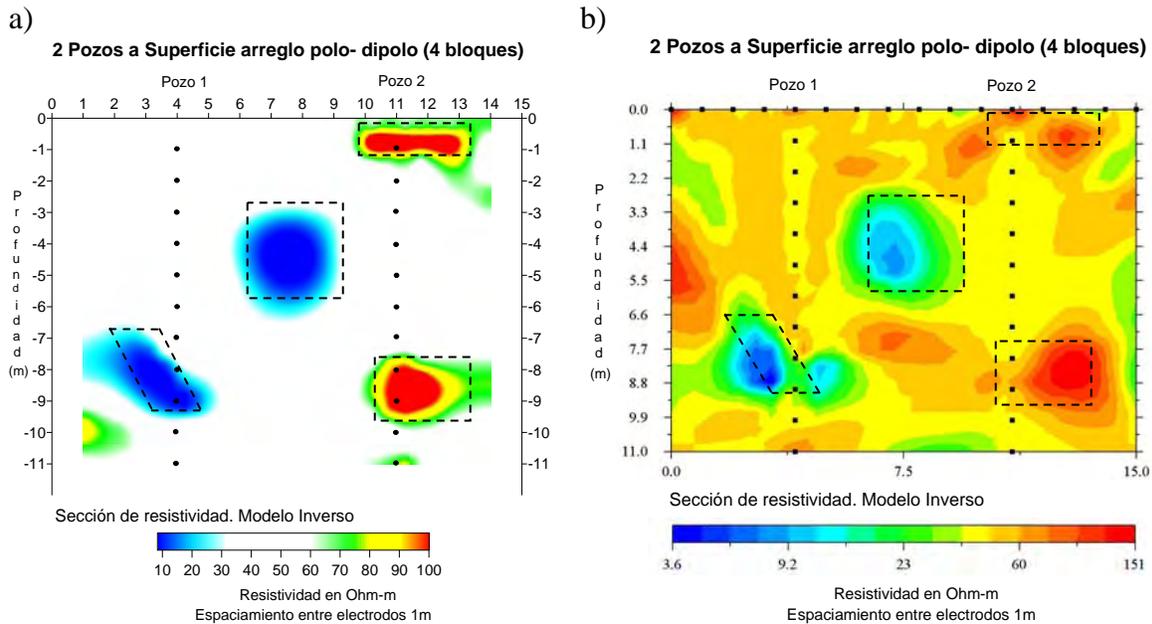


Figura 3.15. Imágenes eléctricas de TRE 2D en pozo de cuatro bloques arreglo polo-dipolo, configuración de dos pozos a superficie. (a) Sección de resistividad con Res2dinv, 5 iteraciones, error RMS 0.2% y (b) Sección de resistividad con EarthImager 2D, 5 iteraciones, error RMS 2.81%.

### 3.4.3 Configuración de un Pozo a superficie (1P-S).

#### 3.4.3.1 Modelo 1. Dos bloques verticales.

En la imagen de la Figura 3.16a se observa que la configuración de los datos sintéticos interpolados con el SURFER da buena resolución, la imagen define con claridad la separación de los dos cuerpos, una zona de baja resistividad que coincide con la ubicación del bloque 1 y la otra que coincide con una zona de alta resistividad que corresponde a la ubicación del bloque 2.

En cuanto a las dimensiones de los cuerpos en la imagen se puede apreciar que agranda muy poco las dimensiones reales para el bloque 1, mientras que para el segundo cuerpo se mapea bastante bien. Con respecto a la ubicación, el bloque 1 se localiza en la posición espacial exacta, pero en cuanto al bloque 2 su posición espacial se encuentra un poco desfasada, está más cerca del pozo 1, además en este caso subestima mucho el valor de resistividad. En esta imagen también se aprecia claramente una vez más que la resolución del bloque cuando existe un contraste de resistividad alto los contornos de los valores de resistividad se dibujan perfectamente.

La configuración para este arreglo utilizando el algoritmo de Loke define bien los contornos de los valores de resistividad de los bloques.

En cuanto a la imagen configurada con el EarthImager 2D, Figura 3.16b, se observa que el bloque 1 se resuelve muy bien, esto nos sugiere que presenta menos problemas en la resolución para contrastes bajos de resistividad, además de que se aproxima a la posición

original. En cuanto a sus dimensiones tiene una aproximación aceptable a las dimensiones reales.

Para el bloque 2, la imagen muestra que no define bien los contornos de los valores de resistividad lo cual hace que el cuerpo se resuelva de manera regular, aparece desfasado de su posición original y de dimensiones aceptables.

El algoritmo EarthImager 2D define de una manera muy aproximada los contornos de los valores de resistividad del bloque 1, así como para las dimensiones y posición espacial. El segundo bloque no logra resolverlo de manera eficiente.

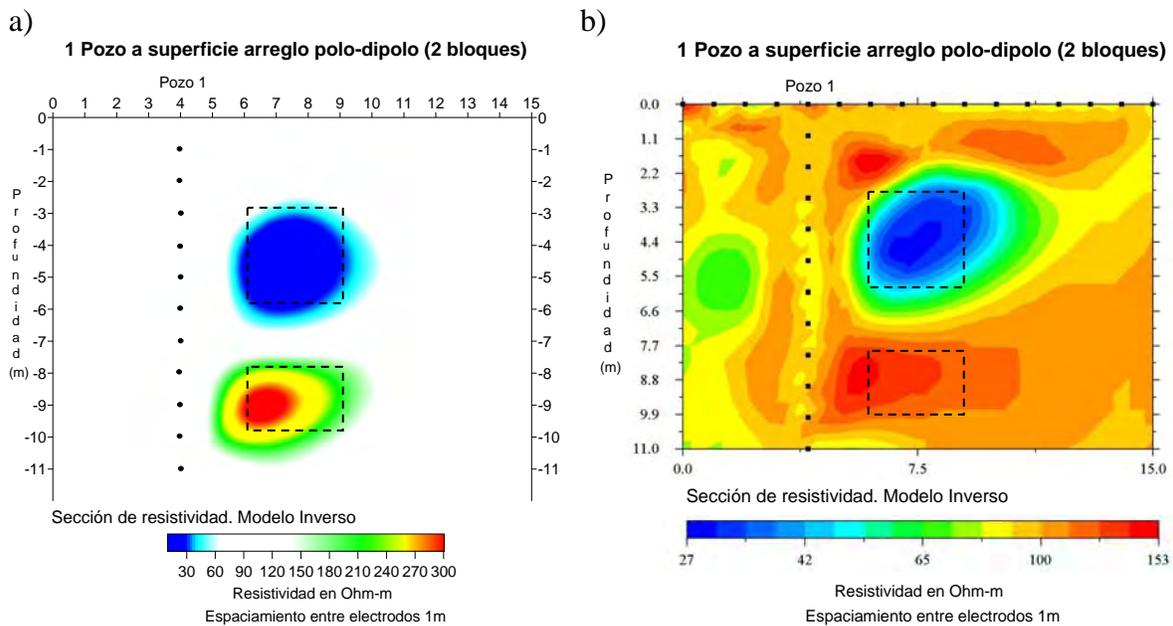


Figura 3.16. Imágenes eléctricas de TRE 2D en pozo de dos bloques rectangulares arreglo polo-dipolo, configuración de un pozo a superficie. (a) Sección de resistividad con Res2dinv, 5 iteraciones, error RMS 0.3% y (b) Sección de resistividad con EarthImager 2D, 3 iteraciones, error RMS 2.04%.

#### 3.4.3.2 Modelo 2. Cuatro bloques.

En la imagen de la Figura 3.17a se observa que la configuración de los datos sintéticos interpolados con el SURFER da una razonable resolución para los cuatro bloques, a diferencia de la configuración de un pozo a superficie con el arreglo polo-polo en este arreglo si se logra ver el bloque 4 ubicado en la parte inferior derecha el cual no se reflejaba en el arreglo polo-polo. Los bloques 1 y 2 presentan una configuración de los valores de resistividad buena, el bloque 1 que se ubicó al centro de la imagen se observa define bien su posición espacial y las dimensiones están fuera de las dimensiones reales, para el bloque 2 inclinado ubicado en la parte inferior izquierda (atraviesa pozo 1) de la imagen, los contornos de los valores de resistividad definen bien el bloque, lo cual nos indica que define bien sus dimensiones, con respecto a su ubicación se localiza en la posición espacial exacta.

En esta imagen también se aprecia claramente que para los otros dos bloques (3 y 4) aunque tienen un valor de resistividad mayor solo se definen bien los contornos de los valores de

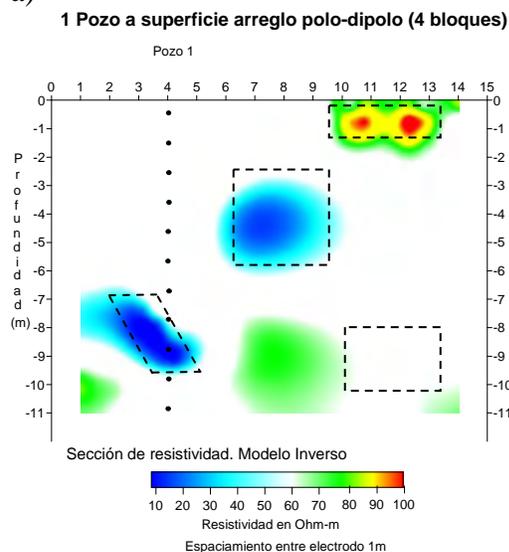
resistividad para el bloque 3 situado en la parte superior derecha el cual coincide con las dimensiones y la posición espacial, aunque al parecer el algoritmo no lo resolvió bien debido a que se aprecia como si fueran dos bloques, el bloque 4 ubicado en la parte inferior derecha aparece desvanecido con un valor más bajo de resistividad alrededor de 75 ohm-m, su posición espacial está muy lejos de empatar con la posición real y sus dimensiones son menores a las dimensiones reales. La configuración utilizando el algoritmo de Loke para este ejemplo define bien los contornos de los valores de resistividad para los bloques 1 y 2, mientras que para los bloques 3 y 4 de manera regular.

En cuanto a la imagen configurada con el EarthImager 2D, Figura 3.17b, se observa que el bloque 1 no lo resuelve de manera satisfactoria, esto nos sugiere que presenta problemas en la resolución cuando el cuerpo está alejado de las líneas de medición, además no aparece en la posición original. El bloque 2 ubicado en la parte inferior izquierda (atraviesa el pozo 1) tampoco lo resuelve bien, los contornos de los valores de resistividad genera el bloque en la posición espacial aproximada a la correcta, la forma muy aproximada a la propuesta, se aprecian dos bloques y con las dimensiones muy lejanas a las reales, y como se puede observar el cuerpo está extremadamente cerca de las líneas de medición.

Para los bloques 3 y 4, la imagen muestra que los contornos de los valores de resistividad del bloque 3 ubicado en la parte superior derecha muy cerca de la línea de electrodos colocados en superficie se definen bien, ubica al cuerpo en la posición espacial correcta, la forma muy aproximada y las dimensiones un poco más grandes a las reales. El bloque 4 situado en la parte inferior derecha no se resuelve en la imagen, es decir, no aparece en la zona donde debería estar colocado, por consiguiente no puede ser interpretado.

El algoritmo EarthImager 2D para esta configuración resultó menos eficiente que el algoritmo de Loke, definió de una manera muy aproximada los contornos de los valores de resistividad del bloque 2 y del bloque 3, así como sus dimensiones y posición espacial, lo cual no ocurrió para los otros dos bloques (1 y 4) en donde el algoritmo no logró resolverlos a diferencia del algoritmo de Loke que si presenta los cuatro bloques.

a)



b)

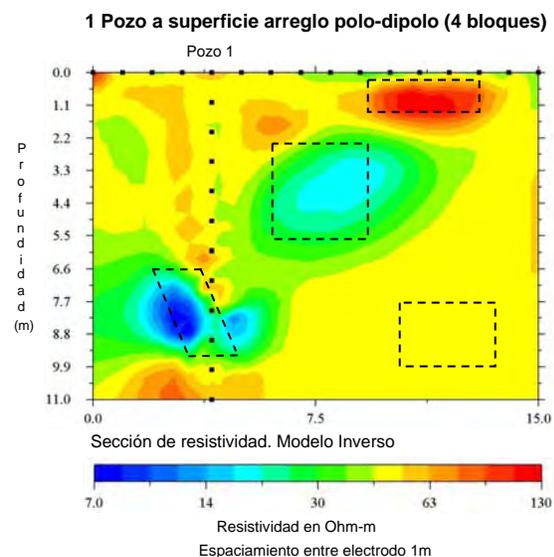


Figura 3.17. Imágenes eléctricas de TRE 2D en pozo de cuatro bloques arreglo polo-dipolo, configuración de un pozo a superficie. (a) Sección de resistividad con Res2dinv, 5 iteraciones, error RMS 0.2% y (b) Sección de resistividad con EarthImager 2D, 3 iteraciones, error RMS 2.04%.

### 3.5 Arreglo Dipolo-dipolo

Las Figuras (3.3a, b, c, d y e) y las Tablas 1, 2 y 3 muestran otro conjunto de experimentos con dos configuraciones para el arreglo dipolo-dipolo configuración 1 AM-BN y configuración 2 AB-MN.

#### 3.5.1 Configuración 1 AM-BN (dipolo-dipolo)

##### 3.5.1.1 Configuración Pozo a Pozo (P-P)

##### 3.5.1.2 Modelo 1. Dos bloques verticales.

En la imagen de la Figura 3.18a se observa que la configuración de los datos sintéticos interpolados con el SURFER da buena resolución, la imagen define con claridad la separación de los dos bloques, una zona de baja resistividad que coincide con la ubicación del bloque 1 y la otra que coincide con una zona de alta resistividad que corresponde a la ubicación del bloque 2. En cuanto a las dimensiones de los bloques en la imagen se puede apreciar que agranda las dimensiones reales para el bloque 1 y para el bloque 2 las formas de los contornos de valores de resistividad se deforman sin llegar a resolverse de manera correcta a la de un bloque, esto provoca que el tamaño del cuerpo se presente un poco más grande comparado con el tamaño real propuesto y además subestima demasiado el valor de resistividad real.

En esta imagen también se aprecia claramente una vez más que la resolución cuando existe un contraste de resistividad alto los contornos de los valores de resistividad del cuerpo se mapean bien utilizando solo electrodos de pozo con este arreglo.

En general, esta configuración define bien los contornos de los valores de resistividad de los bloques de acuerdo con el algoritmo de Loke.

En cuanto a la imagen configurada con el EarthImager 2D, Figura 3.18b, se observa que el bloque 1 se resuelve de una manera razonable, esto nos sugiere que presenta menos problemas en la resolución para contrastes bajos de resistividad, además de que aparece aproximadamente en la posición original. En cuanto a sus dimensiones los contornos de los valores de resistividad se extienden hacia la superficie provocando que el bloque tenga una aproximación aceptable a las dimensiones reales.

Para el bloque 2, la imagen muestra que no define los contornos de los valores de resistividad lo cual hace que no aparezca en la imagen y por tal motivo no se puede describir.

El algoritmo EarthImager 2D define de una manera muy aproximada los contornos de los valores de resistividad del bloque 1, así como para las dimensiones y posición espacial. El segundo bloque no logra resolverlo de manera eficiente, no se aprecia en la imagen a diferencia del algoritmo de Loke que si lo presenta.



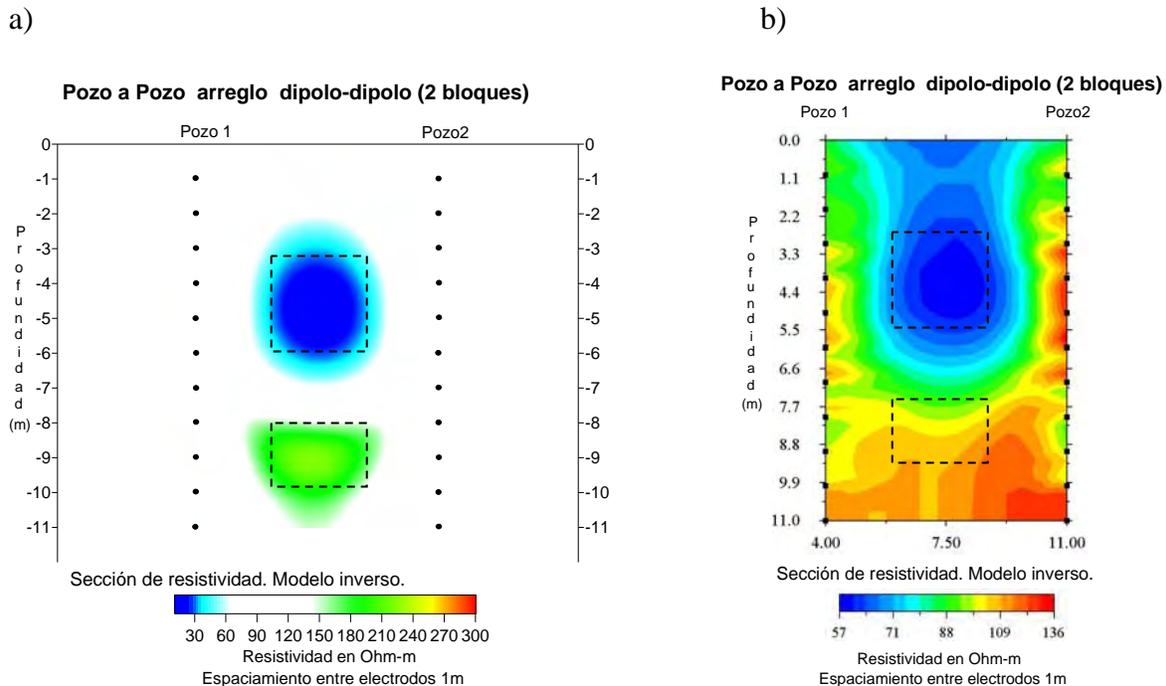


Figura 3.18. Imágenes eléctricas de TRE 2D en pozo de dos bloques rectangulares arreglo dipolo-dipolo, configuración de pozo a pozo. (a) Sección de resistividad con Res2dinv, 5 iteraciones, error RMS 0.2% y (b) Sección de resistividad con EarthImager 2D, 3 iteraciones, error RMS 2.10%.

### 3.5.1.3 Modelo 2. Cuatro bloques.

En la imagen eléctrica de la Figura 3.19a se observa que la configuración de los datos sintéticos interpolados con el SURFER da una resolución aceptable para los bloques 1, 2 y 4 que se encuentran a mayor profundidad, excepto para el bloque 3 que se encuentra en la parte superior derecha y más superficial, el cual su resolución no es muy buena, los contornos de los valores de resistividad de este bloque no se definen correctamente como la del bloque 4 situado por debajo de éste y que tiene el mismo valor de resistividad. El bloque 1 define bien los contornos de los valores de resistividad, así como su posición espacial y sus dimensiones, para el bloque 2 inclinado en la parte inferior izquierda de la imagen (atraviesa el pozo 1), los contornos de los valores de resistividad mapean bien el cuerpo, se observa bien marcado, lo cual nos indica que define bien sus dimensiones, con respecto a su ubicación se localiza en la posición espacial exacta.

En esta imagen también se aprecia claramente que solo los contornos de los valores de resistividad del bloque 4 situado en la parte inferior derecha se mapea bastante bien, coincide con las dimensiones y la posición espacial, el bloque 3 ubicado en la parte superior derecha muy cerca de la superficie coincide con una zona que se marca con un valor de resistividad aproximadamente de 80 ohm-m la cual puede ser inferida como un bloque más por lo cual se puede interpretar como otra anomalía, localizada en la posición espacial exacta y de dimensiones aproximadas a las reales.

La configuración para este arreglo utilizando el algoritmo de Loke para este ejemplo define muy bien los contornos de los valores de resistividad de los cuatro cuerpos.

En cuanto a la imagen configurada con el EarthImager 2D, Figura 3.19b, se observa que el bloque 1 se resuelve de manera satisfactoria, esto nos sugiere que presenta problemas en la resolución cuando el cuerpo está alejado de las líneas de medición, además de que no aparece en la posición original. El bloque 2 ubicado en la parte inferior izquierda (atraviesa el pozo 1) tampoco lo resuelve bien, los contornos de los valores de resistividad genera lo en la posición espacial aproximada a la correcta, la forma muy aproximada a la propuesta y las dimensiones muy lejanas a las reales, además se nota que el cuerpo está extremadamente cerca de las líneas de medición.

Para los bloques 3 y 4, la imagen muestra que los contornos de los valores de resistividad del bloque 3 ubicado en la parte superior derecha muy cerca de la línea de electrodos colocados en superficie se definen bien, lo ubica en la posición espacial correcta, su forma es aproximada y las dimensiones un poco más grandes a las reales. El bloque 4 situado en la parte inferior derecha no se resuelve en la imagen, es decir, no aparece en la zona donde debería estar colocado, por consiguiente no puede ser interpretado.

El algoritmo EarthImager 2D para esta configuración resultó menos eficiente que el algoritmo de Loke, definió de una manera muy alejada los contornos de los valores de resistividad de los cuatro bloques. Los bloques 1 y 3 no logró resolverlos, no aparecieron en la imagen a diferencia del algoritmo de Loke que si los resolvió.

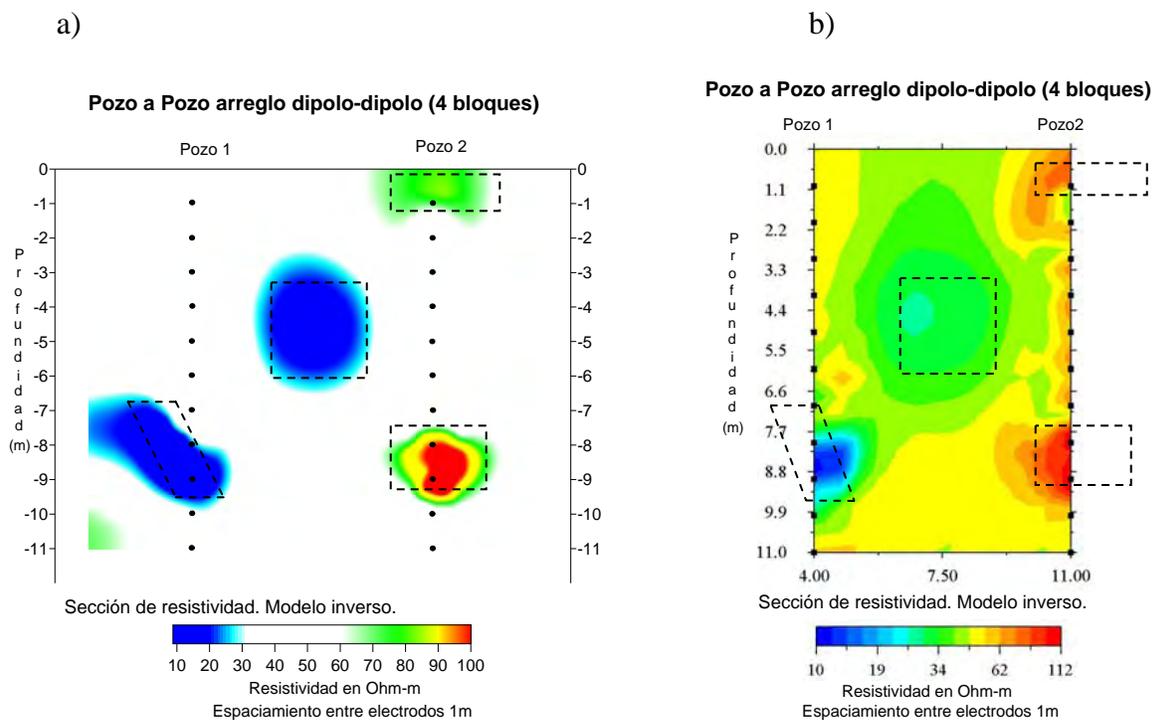


Figura 3.19. Imágenes eléctricas de TRE 2D en pozo cuatro bloques arreglo dipolo-dipolo, configuración de pozo a pozo. (a) Sección de resistividad con Res2dinv, 5 iteraciones, error RMS 0.1% y (b) Sección de resistividad con EarthImager 2D, 3 iteraciones, error RMS 1.20%.

### 3.5.2 Configuración 2 AB-MN

#### 3.5.2.1 Configuración Pozo a Pozo (P-P)

En esta sección se presentan las secciones de resistividad verdadera obtenida con la configuración 2 AB-MN del arreglo dipolo-dipolo.

##### 3.5.2.2 Modelo 1. Dos bloques verticales.

En la imagen de la Figura 3.20a se observa que la configuración de los datos sintéticos interpolados con el SURFER da buena resolución, la imagen define con claridad la separación de los dos bloques, una zona de baja resistividad que coincide con la ubicación del bloque 1 y la otra que coincide con una zona de alta resistividad que corresponde a la ubicación del bloque 2. En cuanto a las dimensiones de los bloques se puede apreciar que son más pequeñas que las dimensiones reales para ambos bloques, las formas de los contornos de valores de resistividad se deforman sin llegar a resolver de manera correcta, sobre todo para el bloque 1, esto provoca que el tamaño de los bloques se aprecie un poco más pequeño comparado con el tamaño real propuesto y además subestima demasiado el valor de resistividad real.

En esta imagen también se aprecia claramente una vez más que la resolución cuando existe un contraste de resistividad alto los contornos de los valores de resistividad del bloque se mapean bien utilizando solo electrodos de pozo con este arreglo.

Al igual que en la imagen de un bloque la configuración utilizando el algoritmo de Loke define los contornos de los valores de resistividad del cuerpo de una manera aceptable.

En cuanto a la imagen configurada con el EarthImager 2D, Figura 3.20b, se observa que el bloque 1 no se resuelve, esto nos sugiere que presenta problemas en la resolución para contrastes bajos de resistividad con este arreglo, por consiguiente el cuerpo no se puede describir para su interpretación. Para el bloque 2, la imagen muestra que define los contornos de los valores de resistividad no muy bien, lo cual hace que el bloque aparezca movido de su posición espacial y sus dimensiones aproximadas a las reales.

El algoritmo EarthImager 2D no logra resolver el bloque 1 de manera eficiente, no se aprecia en la imagen a diferencia del algoritmo de Loke que si logra resolverlo. El segundo bloque define de una manera muy aproximada los contornos de los valores de resistividad, sus dimensiones, pero no así para su posición espacial.

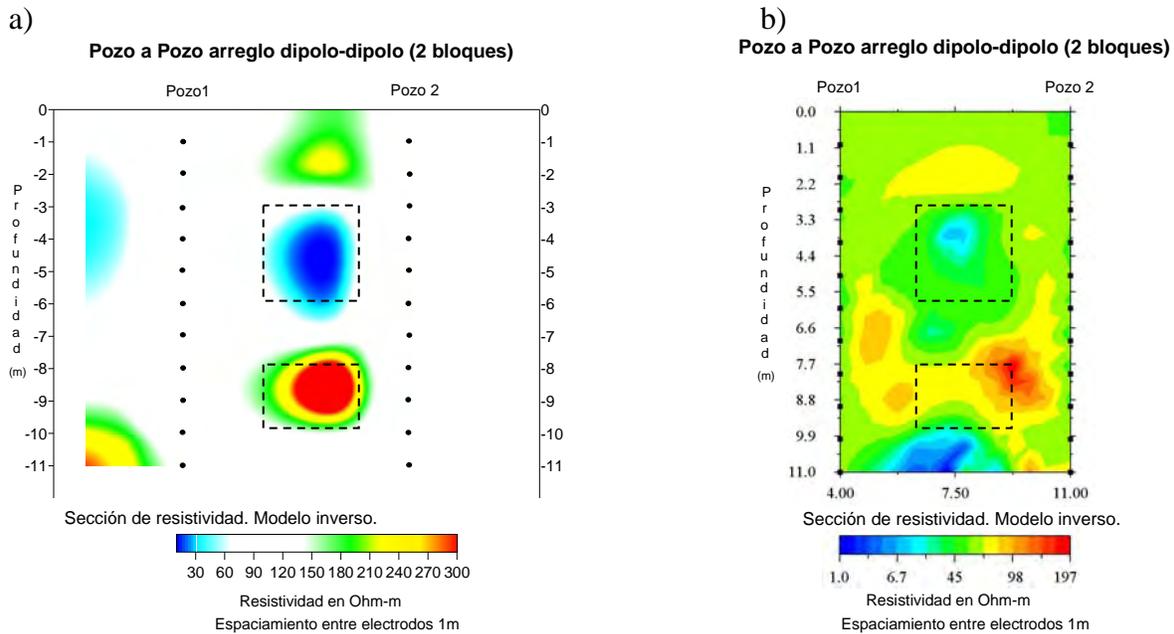


Figura 3.20. Imágenes eléctricas de TRE 2D en pozo de dos bloques rectangulares arreglo dipolo-dipolo, configuración de pozo a pozo. (a) Sección de resistividad con Res2dinv, 5 iteraciones, error RMS 0.5% y (b) Sección de resistividad con EarthImager 2D, 8 iteraciones, error RMS 5.94%.

### 3.5.2.3 Modelo 2. Cuatro bloques.

En la imagen de la Figura 3.21a se observa que la configuración de los datos sintéticos interpolados con el SURFER da una resolución aceptable para los bloques 1, 2 y 4 que se encuentran a mayor profundidad, excepto para el bloque 3 que se encuentra en la parte superior derecha y más superficial el cual no se resuelve, los contornos de los valores de resistividad no se definen, es decir, no se mapea en la imagen. El bloque 1 se define bien con los contornos de los valores de resistividad, así como su posición espacial y sus dimensiones, para el bloque 2 inclinado ubicado en la parte inferior izquierda de la imagen (atraviesa el pozo 1), los contornos de los valores de resistividad mapean bien el bloque, lo cual nos indica que define bien sus dimensiones, con respecto a su ubicación se localiza en la posición espacial exacta.

En esta imagen también se aprecia claramente los contornos de los valores de resistividad del bloque 4 situado en la parte inferior derecha se mapea bastante bien, coincide con las dimensiones y la posición espacial, el bloque 3 ubicado en la parte superior derecha muy cerca de la superficie no se resuelve, es decir, no aparece en la imagen por lo cual no puede ser interpretado.

La configuración para este arreglo de acuerdo con el algoritmo de Loke define muy bien los contornos de los valores de resistividad de los bloques 1,2 y 4, excepto para el bloque 3 el cual no se definió.

En cuanto a la imagen configurada con el EarthImager 2D, Figura 3.21b, se observa que el bloque 1 no lo resuelve de manera efectiva, esto sugiere que presenta problemas en la resolución, además de que no aparece en la posición original. El bloque 2 ubicado en la parte inferior izquierda (atraviesa el pozo 1) tampoco lo resuelve bien, los contornos de los

valores de resistividad genera el bloque en la posición espacial aproximada a la correcta, la forma muy aproximada y las dimensiones muy lejanas a las reales, además se puede observar que el bloque está extremadamente cerca de las líneas de medición.

Para los bloques 3 y 4, la imagen muestra que los contornos de los valores de resistividad del bloque 4 ubicado en la parte inferior derecha muy cerca de la línea de electrodos colocados en pozo se definen bien, lo ubica en la posición espacial correcta, su forma muy aproximada y las dimensiones un poco más pequeñas a las reales. El bloque 3 situado en la parte superior derecha no se resuelve en la imagen, es decir, no aparece en la zona donde debería estar colocado, por consiguiente no puede ser interpretado.

El algoritmo EarthImager 2D para esta configuración resultó menos eficiente que el algoritmo de Loke, definió muy mal los contornos de los valores de resistividad de los cuatro bloques, así como sus dimensiones y posición espacial.

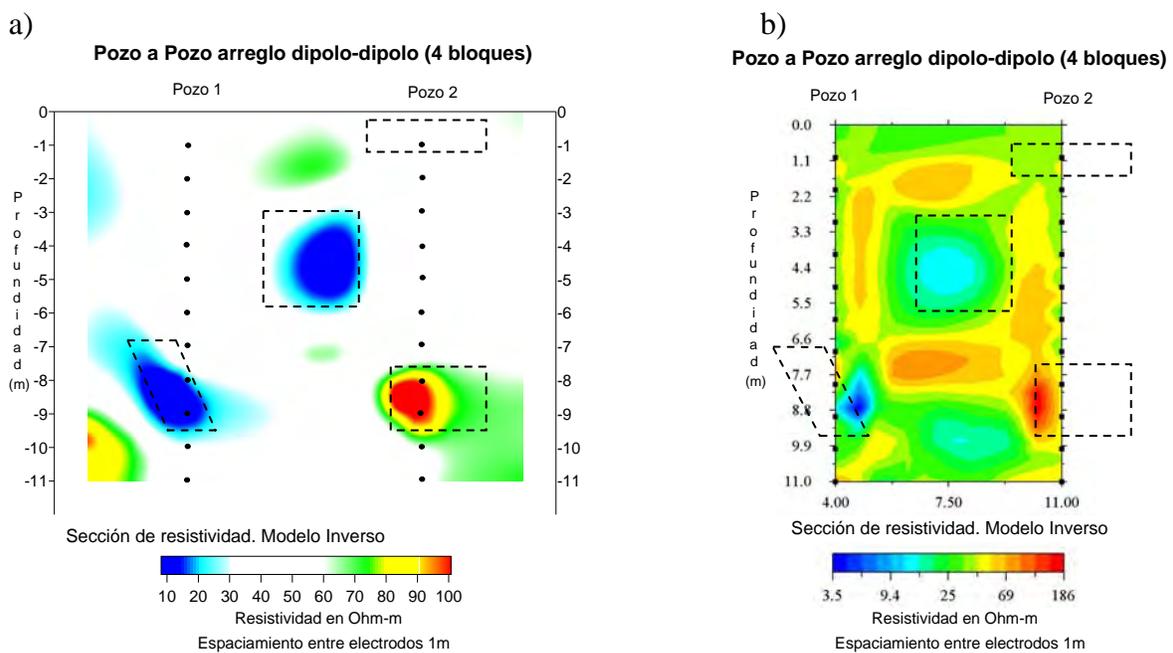


Figura 3.21. Imágenes eléctricas de TRE 2D en pozo de cuatro bloques arreglo dipolo-dipolo, configuración de pozo a pozo. (a) Sección de resistividad con Res2dinv, 5 iteraciones, error RMS 0.1% y (b) Sección de resistividad con EarthImager 2D, 5 iteraciones, error RMS 2.99%.

### 3.5.3 Configuración dos Pozos a Superficie (2P-S).

En esta sección se presentan las secciones de resistividad verdadera obtenida con la configuración 2 AB-MN del arreglo dipolo-dipolo.

#### 3.5.3.1 Modelo 1. Dos bloques verticales.

Las Figuras 3.22a y 3.22b muestran las imágenes eléctricas de dos bloques rectangulares en posición vertical construidas con los algoritmos RES2DINV y EarthImager 2D respectivamente.

En la imagen de la Figura 3.22a se observa que la configuración de los datos sintéticos interpolados con el SURFER da buena resolución, la imagen define con claridad la separación de los dos cuerpos, una zona de baja resistividad que coincide con la ubicación del bloque 1 y la otra que coincide con una zona de alta resistividad que corresponde a la ubicación del bloque 2. En cuanto a las dimensiones del bloque 1 se puede apreciar que casi empata con las dimensiones reales y para el bloque 2 las formas de los contornos de valores de resistividad llegan a resolver de manera correcta, pero en cuanto a las dimensiones, el tamaño del bloque se aprecia un poco más pequeño comparado con el tamaño real propuesto y además subestima el valor de resistividad real.

En esta imagen también se aprecia claramente una vez más que la resolución cuando existe un contraste de resistividad bajo o alto los contornos de los valores de resistividad de los bloques se mapean bien para este arreglo.

Esta configuración resuelve los contornos de los valores de resistividad del cuerpo de una manera aceptable de acuerdo al algoritmo de Loke.

En cuanto a la imagen configurada con el EarthImager 2D, Figura 3.22b, se observa que tanto el bloque 1 como el bloque 2 los contornos de los valores de resistividad no se definen muy bien lo cual hace que los bloques aparezcan en su posición espacial y sus dimensiones aproximadas a las reales.

El algoritmo EarthImager 2D logra resolver los bloques 1 y 2 de manera deficiente.

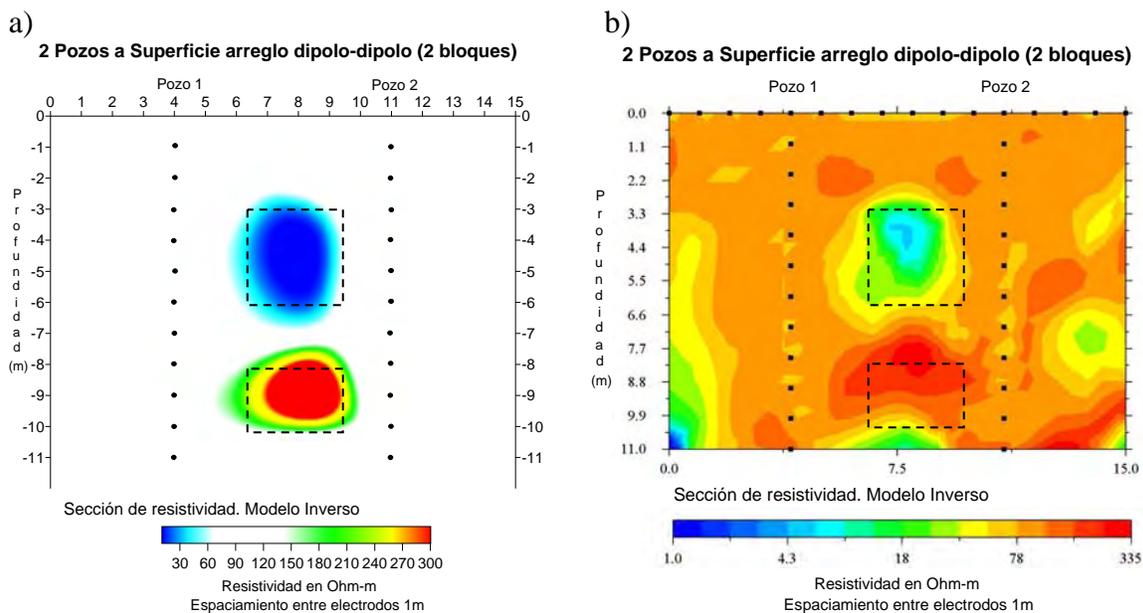


Figura 3.22. Imágenes eléctricas de TRE 2D en pozo de dos bloques rectangulares arreglo dipolo-dipolo, configuración de dos pozos a superficie. (a) Sección de resistividad con Res2dinv, 5 iteraciones, error RMS 0.8% y (b) Sección de resistividad con EarthImager 2D, 8 iteraciones, error RMS 2.68%.

### 3.5.3.2 Modelo 2. Cuatro bloques.

Las Figuras 3.32a y 3.32b muestran las imágenes eléctricas de cuatro bloques rectangulares construidas con los algoritmos RES2DINV y EarthImager 2D respectivamente.

En la imagen de la Figura 3.32a se observa que la configuración de los datos sintéticos interpolados con el SURFER da una resolución aceptable para los cuatros cuerpos. El bloque 1 que se ubicó al centro de la imagen en medio de los dos pozos se define bien con los contornos de los valores de resistividad, así como su posición espacial y sus dimensiones, para el bloque 2 inclinado ubicado en la parte inferior izquierda de la imagen (atraviesa el pozo 1), los contornos de los valores de resistividad mapean bien el cuerpo, lo cual nos indica que define bien sus dimensiones, con respecto a su ubicación se localiza en la posición espacial exacta.

En esta imagen también se aprecia claramente que los bloques 3 y 4, los contornos de los valores de resistividad de ambos bloques se resuelven con ciertos problemas de interpolación, a pesar de esta dificultad, se definen bien, coinciden con las dimensiones y la posición espacial. También se puede observar otra anomalía que esta ubicada en la parte inferior izquierda por debajo del bloque 2. Esto sugiere que el arreglo tiene problemas de resolución.

Esta configuración define bien los contornos de los valores de resistividad de los cuatro bloques de acuerdo al algoritmo de Loke.

En cuanto a la imagen configurada con el EarthImager 2D, Figura 3.32b, se observa que el bloque 1 lo resuelve bien, esto se aprecia al centro de la imagen. El bloque 2 ubicado en la parte inferior izquierda (atraviesa el pozo 1) lo resuelve de manera regular, los contornos de los valores de resistividad genera el bloque en la posición espacial aproximada a la correcta, su forma y las dimensiones muy lejanas a las reales, además se puede notar que está extremadamente cerca de las líneas de medición y lo divide sin llegar a resolverlo como un bloque completo.

Para los bloques 3 y 4, la imagen muestra que los contornos de los valores de resistividad del bloque 4 ubicado en la parte inferior derecha y del bloque 3 situado en la parte superior muy cerca de la línea de electrodos colocados en superficie no se definen bien, divide ambos bloques en dos como sucedió con el bloque 2 que también atravesaba la línea de electrodos en pozo, su posición espacial es correcta, su forma muy mala y las dimensiones un poco más pequeñas a las reales.

El algoritmo EarthImager 2D para esta configuración resultó menos eficiente que el algoritmo de Loke. Definió de una manera regular los contornos de los valores de resistividad de los cuatro bloques.

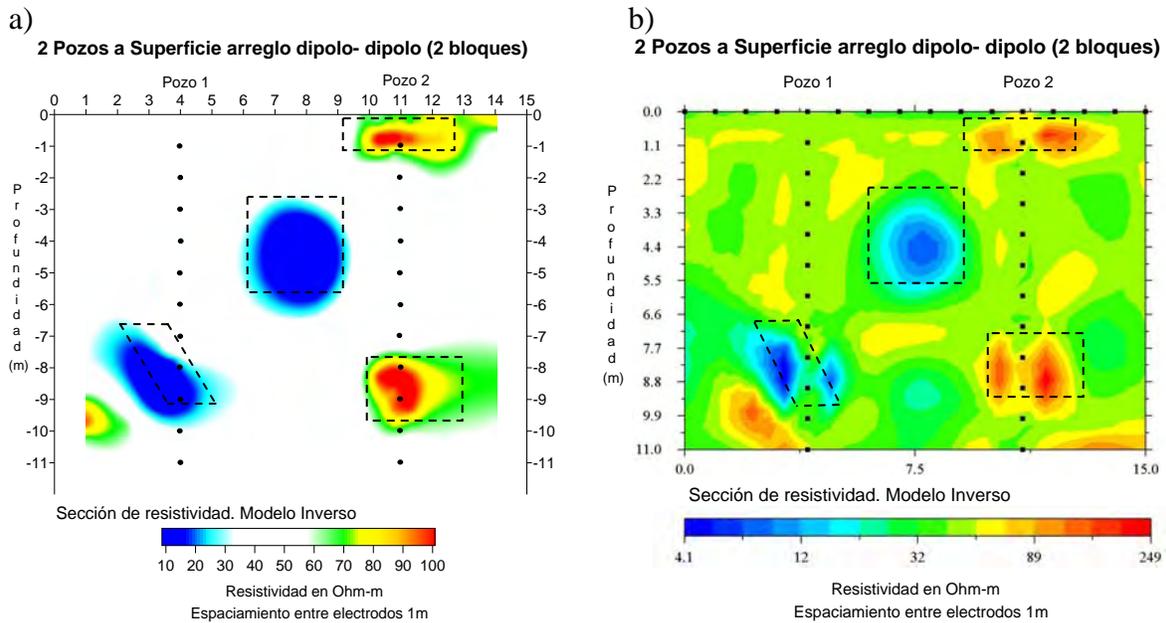


Figura 3.23. Imágenes eléctricas de TRE 2D en pozo de cuatro bloques arreglo dipolo-dipolo, configuración de dos pozos a superficie. (a) Sección de resistividad con Res2dinv, 5 iteraciones, error RMS 0.9% y (b) Sección de resistividad con EarthImager 2D, 5 iteraciones, error RMS 2.89%.

### 3.6 Arreglo Gradiente.

Las Figuras (3.4a, b y c) y las Tablas 1 y 2 muestran otro conjunto de experimentos para el arreglo gradiente.

#### 3.6.1 Configuración Pozo a Pozo (P-P)

##### 3.6.1.1 Modelo 1. Dos bloques verticales.

En la imagen de la Figura 3.24a se observa que la configuración de los datos sintéticos interpolados con el SURFER da buena resolución, la imagen define con claridad la separación de los dos cuerpos, una zona de baja resistividad que coincide con la ubicación del bloque 1 y la otra que coincide con una zona de alta resistividad que corresponde a la ubicación del bloque 2. En cuanto a las dimensiones del bloque 1 las formas de los contornos de valores de resistividad llegan a resolverse de manera correcta, pero en cuanto a las dimensiones, el tamaño del bloque se aprecia un poco más grande comparado con el tamaño real propuesto y para el bloque 2 se puede apreciar que casi empata con las dimensiones reales.

En esta imagen eléctrica también se aprecia claramente una vez más que la resolución cuando existe un contraste de resistividad alto los contornos de los valores de resistividad del cuerpo se mapean bien utilizando solo electrodos de pozo con este arreglo.

La configuración utilizando el algoritmo de Loke define bien los contornos de los valores de resistividad del cuerpo.

En cuanto a la imagen eléctrica configurada con el EarthImager 2D, Figura 3.24b, se observa que el bloque 1 se resuelve bien, además aparece aproximadamente en la posición original. En cuanto a sus dimensiones los contornos de los valores de resistividad el bloque tiene una aproximación aceptable comparada con las dimensiones reales.

Para el bloque 2, la imagen eléctrica define los contornos de los valores de resistividad muy semejante al del bloque ubicado arriba, aparece en la posición espacial correcta.

El algoritmo EarthImager 2D define de una manera muy aproximada los contornos de los valores de resistividad de ambos bloques, así como para las dimensiones y posición espacial. La imagen también generó otra anomalía que se ubica en la parte superior del bloque 1, esto indica que el algoritmo tiene problemas para resolver de manera eficiente con este arreglo.

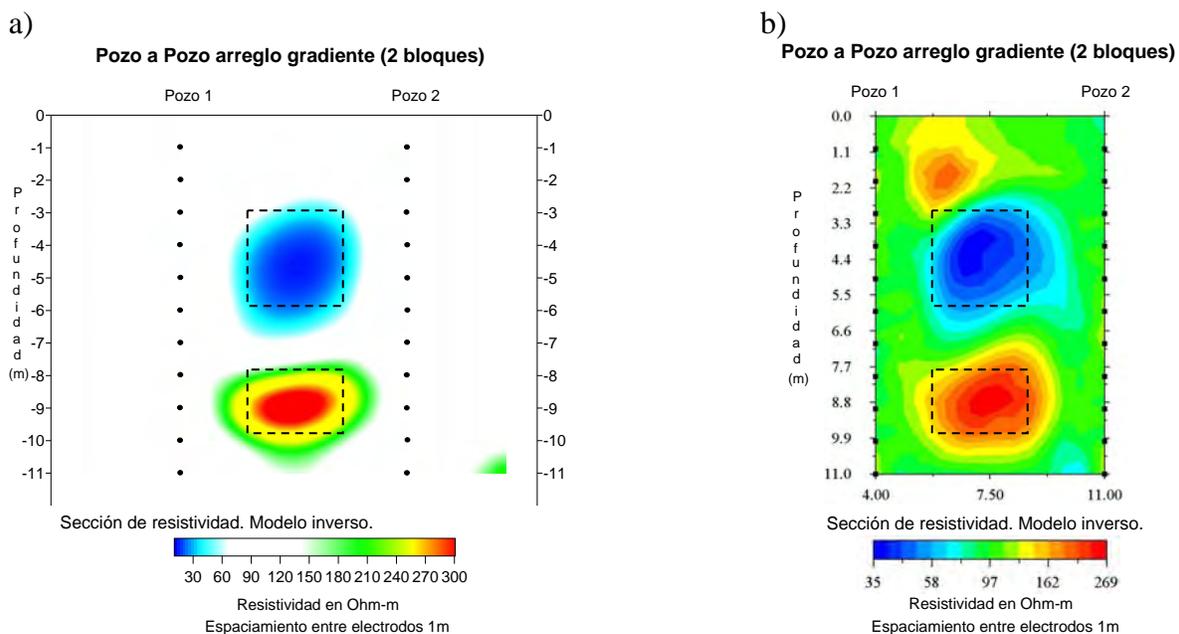


Figura 3.24. Imágenes eléctricas de TRE 2D en pozo de dos bloques rectangulares arreglo gradiente, configuración de pozo a pozo. (a) Sección de resistividad con Res2div, 5 iteraciones, error RMS 0.3% y (b) Sección de resistividad con EarthImager 2D, 3 iteraciones, error RMS 2.91%.

### 3.6.1.2 Modelo 2. Cuatro bloques.

En la imagen de la Figura 3.25a se observa que la configuración de los datos sintéticos interpolados con el SURFER da una resolución aceptable para los bloques 1, 2 y 4 que se encuentran a mayor profundidad, excepto para el bloque 3 que se encuentra en la parte superior derecha y más superficial el cual su resolución no es muy buena, los contornos de los valores de resistividad de este bloque no se definen correctamente como la del bloque 4 situado por debajo de este y que tiene el mismo valor de resistividad. El bloque 1 define bien los contornos de los valores de resistividad, así como su posición espacial y sus dimensiones, para el bloque 2 inclinado ubicado en la parte inferior izquierda de la imagen (atraviesa el pozo 1), los contornos de los valores de resistividad lo mapean bien, se observa bien marcado, lo cual indica que define bien sus dimensiones, con respecto a su ubicación se localiza en la posición espacial exacta.

En esta imagen también se aprecia claramente que los otros dos bloques (3 y 4), solo los contornos de los valores de resistividad del bloque 4 situado en la parte inferior derecha se mapea bastante bien, coincide con las dimensiones y la posición espacial, el bloque 3 ubicado en la parte superior derecha muy cerca de la superficie coincide con una zona que se marca con un valor de resistividad aproximadamente de 90 ohm-m la cual puede ser inferida como un cuerpo más, por lo cual se puede interpretar como otra anomalía, localizada en la posición espacial exacta y de dimensiones aproximadas a las reales.

La configuración utilizando el algoritmo de Loke para este ejemplo define muy bien los contornos de los valores de resistividad de los cuatro bloques.

En cuanto a la imagen configurada con el EarthImager 2D, Figura 3.25b, se observa que el bloque 1 no lo resuelve de manera satisfactoria, esto sugiere que presenta problemas en la resolución cuando el bloque esta alejado de las líneas de medición, aparece en la posición propuesta. El bloque 2 ubicado en la parte inferior izquierda (atraviesa el pozo 1) tampoco lo resuelve bien, los contornos de los valores de resistividad lo genera en la posición espacial y forma aproximada a la correcta, las dimensiones muy lejanas a las reales, además se nota que el bloque esta extremadamente cerca de las líneas de medición.

Para el bloque 3 ubicado en la parte superior derecha muy cerca de la línea de electrodos colocados en pozo, no se resuelve en la imagen, es decir, no aparece en la zona donde debería estar colocado, por consiguiente no puede ser interpretado.

El bloque 4 situado en la parte inferior derecha, la imagen muestra que los contornos de los valores de resistividad se definen de manera regular, lo ubica en la posición espacial correcta, su forma deficiente y las dimensiones muy lejanas a las reales. El algoritmo EarthImager 2D para esta configuración resultó menos eficiente que el algoritmo de Loke, definió de una manera muy alejada los contornos de los valores de resistividad de los cuatro bloques.

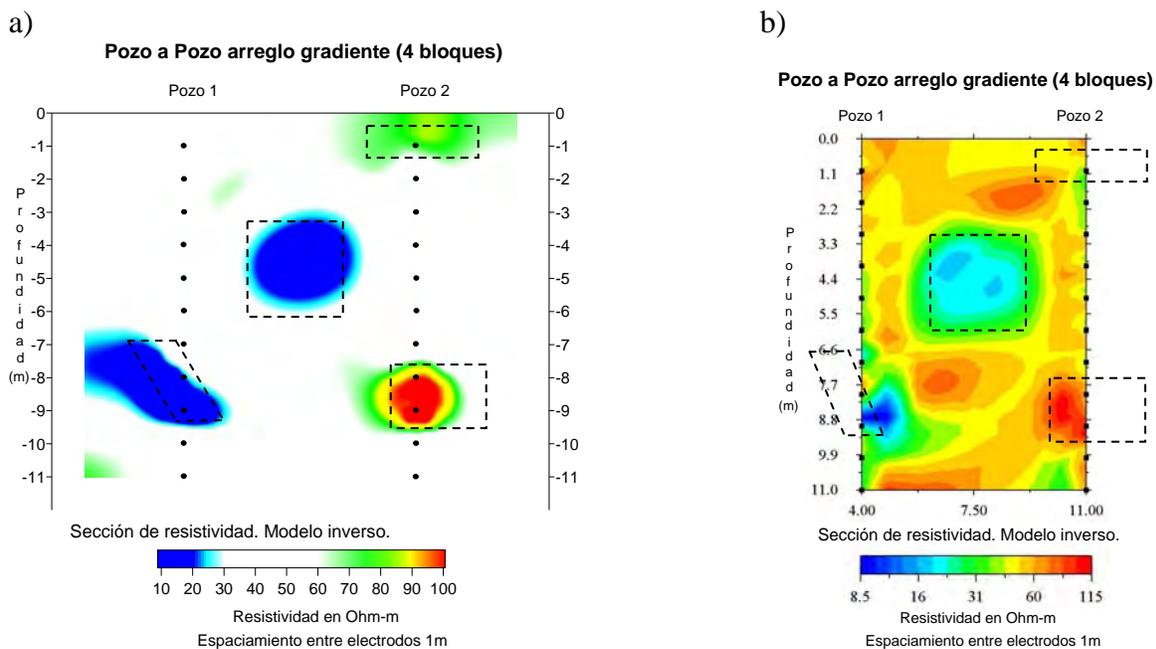


Figura 3.25. Imágenes eléctricas de TRE 2D en pozo de cuatro bloques arreglo gradiente, configuración de pozo a pozo. (a) Sección de resistividad con Res2dinv, 5 iteraciones, error RMS 0.2% y (b) Sección de resistividad con EarthImager 2D, 3 iteraciones, error RMS 2.50%.

Los resultados obtenidos de los ejemplos sintéticos desarrollados permiten establecer las siguientes conclusiones para el modelo 1 que consta de dos bloques verticales (Tabla 5) y para el modelo 2 de cuatro bloques rectangulares (Tabla 6).

Tipo de arreglo	Configuración	Algoritmo	Resolución	Dimensiones	Ubicación espacial
Polo-Polo	P-P	RES2DINV	Buena	Ajustan bien con las propuestas	Exacta.
	2P-S	RES2DINV	Excelente	Ajustan bien con las propuestas	Exacta.
	1P-S	RES2DINV	Deficiente	Es más grande (cuerpo1) No resuelve (cuerpo2)	Buena (cuerpo1) Movida (cuerpo2).
		EARTHIMAGER 2D	Deficiente	Es más grande (cuerpo1) No resuelve (cuerpo2)	Buena (cuerpo1) No resuelve (cuerpo2)
Polo-Dipolo	P-P	RES2DINV	Buena	Ajustan de manera regular	Exacta.
		EARTHIMAGER 2D	Regular	Un poco más grandes que las propuestas	Buena
	2P-S	RES2DINV	Buena	Un poco más grandes que las propuestas	Exacta
		EARTHIMAGER 2D	Excelente	Ajustan bien con las propuestas	Exacta
	1P-S	RES2DINV	Excelente	Ajustan bien con las propuestas.	Buena.
		EARTHIMAGER 2D	Regular	Es más grande (cuerpo1) No resuelve (cuerpo2)	Buena (cuerpo1) Movida (cuerpo2).
Dipolo-Dipolo 4 (AM-BN)	P-P	RES2DINV	Buena	Un poco más grandes que las propuestas	Exacta
		EARTHIMAGER 2D	Deficiente	Es más grande (cuerpo1) No resuelve (cuerpo2)	Regular (cuerpo1) Movida (cuerpo2)
Dipolo-Dipolo 4 (AB-MN)	P-P	RES2DINV	Regular	Son más pequeñas.	Buena
		EARTHIMAGER 2D	Deficiente	No se logran definir.	Deficiente (cuerpo1) No resuelve (cuerpo2).
	2P-S	RES2DINV	Regular	No ajustan bien con las propuestas.	Buena
		EARTHIMAGER 2D	Deficiente	Es más grande (cuerpo1) No resuelve (cuerpo2)	Buena
Gradiente	P-P	RES2DINV	Buena	Un poco más grandes que las propuestas	Exacta
		EARTHIMAGER 2D	Buena	Ajustan bien con las propuestas	Exacta

Tabla 5. Explicación de los modelos obtenidos con los ejemplos sintéticos para los diferentes arreglos con sus respectivas configuraciones de TRE 2D en pozo.

Tipo de arreglo	Configuración	Algoritmo	Resolución	Dimensiones	Ubicación espacial
Polo-Polo	P-P	RES2DINV	Excelente	Ajustan bien con las propuestas.	Exacta
	2P-S	RES2DINV	Excelente	Ajustan bien con las propuestas.	Exacta
	1P-S	RES2DINV	Buena	Ajustan bien (cuerpo1,2 y 3) No resuelve (cuerpo4)	Buena (cuerpo1, 2 y 3) No resuelve (cuerpo4)
		EARTHIMAGER 2D	Regular	Ajustan bien (cuerpo1,2 y 3) No resuelve (cuerpo4)	Regular (cuerpo1,2 y 3) No resuelve (cuerpo4)
Polo-Dipolo	P-P	RES2DINV	Excelente	Ajustan bien con las propuestas	Exacta
		EARTHIMAGER 2D	Regular	No se logran definir	Regular (cuerpo1,2 y 3) No resuelve (cuerpo4)
	2P-S	RES2DINV	Excelente	Ajustan bien con las propuestas	Exacta
		EARTHIMAGER 2D	Buena	Ajustan de manera regular	Buena
	1P-S	RES2DINV	Regular	Ajustan bien (cuerpo1,2 y 3) No resuelve (cuerpo4)	Buena (cuerpo1,2 y 3) No resuelve (cuerpo 4)
		EARTHIMAGER 2D	Regular	Ajustan bien No resuelve (cuerpo4)	Regular (cuerpo1,2 y 3) No resuelve (cuerpo4)
Dipolo-Dipolo 4 (AM-BN)	P-P	RES2DINV	Buena	Ajustan bien con las propuestas	Exacta
		EARTHIMAGER 2D	Deficiente	No se logran definir	Deficiente (cuerpo1,2 y 3) No resuelve (cuerpo4)
Dipolo-Dipolo 4 (AB-MN)	P-P	RES2DINV	Regular	Más pequeñas (cuerpo1,2 y 3) No resuelve (cuerpo4)	Buena (cuerpo1,2,3) No resuelve (cuerpo4)
		EARTHIMAGER 2D	Deficiente	Son más grandes (cuerpo1,2 y 3) No resuelve (cuerpo4)	Regular (cuerpo1,2 y 3) No resuelve (cuerpo4)
	2P-S	RES2DINV	Buena	Ajustan bien con las propuestas	Exacta
		EARTHIMAGER 2D	Regular	Ajustan de manera regular	Buena
Gradiente	P-P	RES2DINV	Buena	Ajustan de manera regular	Buena
		EARTHIMAGER 2D	Deficiente	Son más pequeñas (cuerpo1,2 y 3) No resuelve (cuerpo4)	Deficiente (cuerpo1,2 y 3) No resuelve (cuerpo4)

Tabla 6. Explicación de los modelos obtenidos con los ejemplos sintéticos para los diferentes arreglos con sus respectivas configuraciones de TRE 2D en pozo.

## Capítulo 4 Modelos sintéticos para estudios de TRE 3D en superficie y en pozo.

La finalidad de este capítulo es utilizar modelos sintéticos que asemejen anomalías de resistividad que se pueden encontrar en el subsuelo para comprobar la eficacia de la respuesta de estas anomalías con los estudios TRE 3D en superficie y en pozo con diferentes modalidades de electrodos.

Los experimentos numéricos para el análisis de los modelos con estudios de TRE 3D en superficie se implementaron individualmente con las configuraciones independientes: polo-polo (completo, diagonal e inline), polo-dipolo, dipolo-dipolo y Wenner-Schlumberger. Para el análisis de estudios de TRE 3D en pozo se implementaron individualmente con las configuraciones de pozo independientes: polo-polo, polo-dipolo y dipolo-dipolo. Para una fácil comparación de la efectividad de las imágenes con los diferentes arreglos de electrodos se utilizó el algoritmo de inversión RES3DINV y el programa Voxler para la construcción de los cubos de resistividad eléctrica.

### 4.1 Descripción de los modelos sintéticos utilizados en TRE 3D en superficie.

Los experimentos sintéticos que se presentan para el estudio en superficie son dos modelos que se componen de dos cuerpos rectangulares (Figuras 4.1a y 4.1b), los cuales se analizan sin agregar ruido aleatorio. Las características de cada uno de los modelos propuestos se resumen en la Tabla 7.

Modelo	Dimensiones (m)	Profundidad (m)	Resistividad de cuerpos (Ohm-m)	Resistividad del medio (Ohm-m)
Modelo 1 - 2 Cuerpos rectangulares	Cuerpo 1 = 4x1x0.40	0.30	100	30
	Cuerpo 2 = 3x3x2	1	10	
Modelo 2 - 2 Cuerpos rectangulares	Cuerpo 1 = 6x2x0.40	0.30	100	30
	Cuerpo 2 = 3x3x2	1	10	

Tabla 7 Características de los dos modelos empleados en los experimentos sintéticos en TRE 3D en superficie.

Los modelos fueron evaluados con dos rejillas de diferente tamaño para cada una de las modalidades. La primera se compone de 8 líneas con 8 electrodos cada una, un total de 64 electrodos y la segunda de 11 líneas con 11 electrodos cada una, un total de 121 electrodos, ambas rejillas con una abertura entre electrodos de 1 metro (Tabla 8).

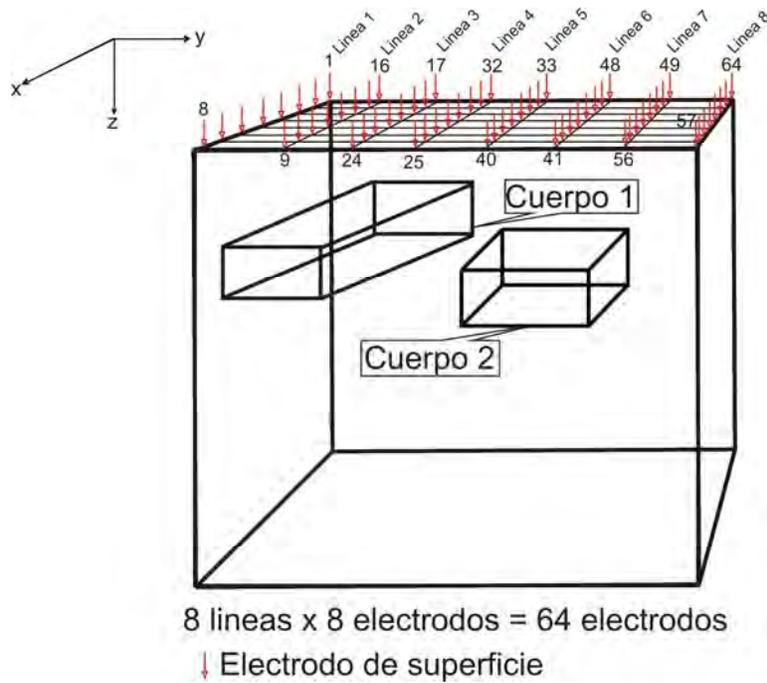
Al igual que en los modelos sintéticos de pozo 2D, el programa de modelado directo 3D requiere que se suministren los valores de resistividad de cada uno de los cuerpos rectangulares entre las líneas de la malla y el valor de resistividad del medio encajonante por medio de un archivo de datos de entrada. En general, se usa un modelo de resistividades “razonable”, es decir, que el modelo no este demasiado pequeño o demasiado grande. El programa genera las resistividades aparentes que son las que posteriormente utiliza el algoritmo de inversiones 3D horizontales y verticales (Planos XZ y YZ). Los datos de

resistividad se agrupan con sus respectivas secciones de resistividades horizontales y verticales para construir un cubo de resistividad con el programa de visualización 3D VOXLER el cual sirve como modelo de interpretación final.

Arreglo	No. de electrodos	Modelo	No. de electrodos rejilla
Polo-Polo Completo	2 (A-M)	Modelo 1.- 2 Cuerpos rectangulares	8 x 8 Total 64 Separación entre electrodos 1m
		Modelo 2.- 2 Cuerpos rectangulares	11 x 11 Total 121 Separación entre electrodos 1m
Polo-Polo Diagonal	2 (A-M)	Modelo 1.- 2 Cuerpos rectangulares	8 x 8 Total 64 Separación entre electrodos 1m
		Modelo 2.- 2 Cuerpos rectangulares	11 x 11 Total 121 Separación entre electrodos 1m
Polo-Polo In-Line	2 (A-M)	Modelo 1.- 2 Cuerpos rectangulares	8 x 8 Total 64 Separación entre electrodos 1m
		Modelo 2.- 2 Cuerpos rectangulares	11 x 11 Total 121 Separación entre electrodos 1m
Polo-Dipolo	3(A-MN)	Modelo 1.- 2 Cuerpos rectangulares	8 x 8 Total 64 Separación entre electrodos 1m
		Modelo 2.- 2 Cuerpos rectangulares	11 x 11 Total 121 Separación entre electrodos 1m
Dipolo-Dipolo	4(AB-MN)	Modelo 1.- 2 Cuerpos rectangulares	8 x 8 Total 64 Separación entre electrodos 1m
		Modelo 2.- 2 Cuerpos rectangulares	11 x 11 Total 121 Separación entre electrodos 1m
Wenner-Schlumberger	4(A-MN-B)	Modelo 1.- 2 Cuerpos rectangulares	8 x 8 Total 64 Separación entre electrodos 1m
		Modelo 2.- 2 Cuerpos rectangulares	11 x 11 Total 121 Separación entre electrodos 1m

Tabla 8 Arreglos con sus respectivas rejillas y modelos utilizados en los experimentos en TRE 3D en superficie.

a) Modelo de 2 cuerpos para una rejilla 8 x 8



b) Modelo de 2 cuerpos para una rejilla de 11 x 11

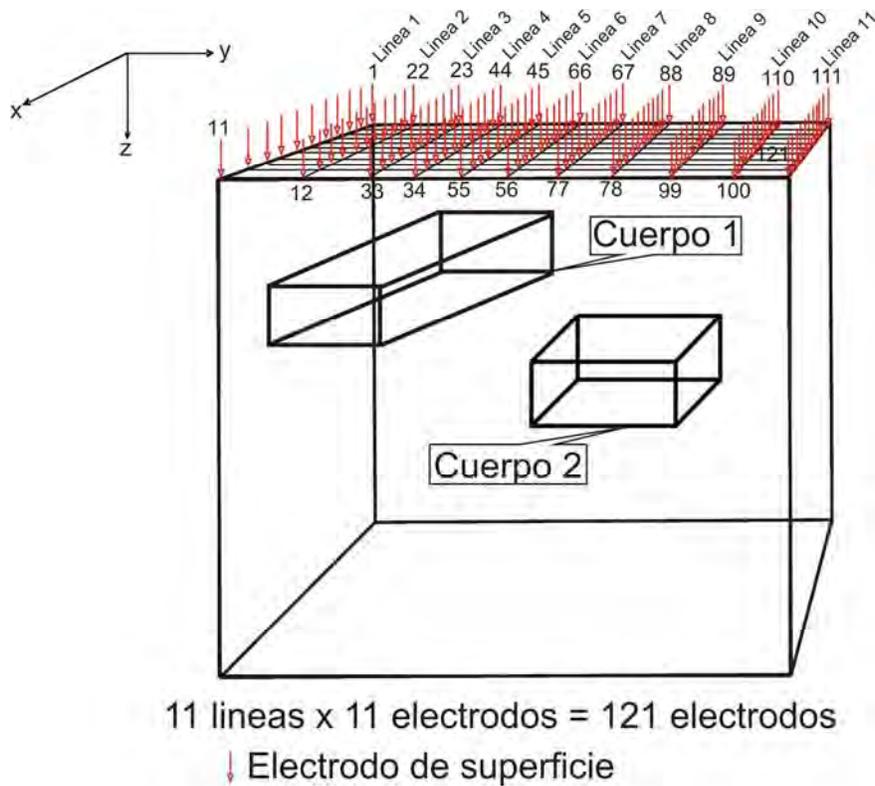


Figura 4.1 Modelos sintéticos de superficie 3D con 2 prismas rectangulares. (a) Rejilla para un estudio de 8 líneas compuestas por 8 electodos. (b) Rejilla de para un estudio de 11 líneas compuestas por 11 electodos.

En la inversión de datos para todos los arreglos se utilizó el algoritmo de inversión (método de mínimos cuadrados con condicionamiento suavizado). El modelo inicial fue un semiespacio homogéneo (medio uniforme para modelo de  $\rho=30$  ohm-m). Durante la inversión se utilizó un factor de amortiguamiento  $\lambda$  de 0.15 para todos los modelos el cual resultó ser un factor óptimo para todas las configuraciones.

#### 4.2 Arreglo polo-polo completo

En la Figura 4.2 se muestra el cubo de resistividades formado con los datos de resistividad de la rejilla de 8 por 8. Para la inversión de esta rejilla se utilizó una malla con dimensiones de 33x33x16, 539 bloques y 11 capas. Se realizaron 5 iteraciones con un error cuadrático medio (RMS) de 1.22%. Con este experimento sintético se alcanzó una profundidad de estudio aproximadamente de 9 metros. Se observa que el cuerpo 1 se define mejor a diferencia del segundo. Respecto a sus posiciones espaciales ambos están bien ubicados a diferencia de sus dimensiones.

En la Figura 4.3 se muestra el cubo formado con los datos de la rejilla de 11 por 11. Para la inversión de esta rejilla se utilizó una malla con dimensiones de 39x39x19, 1400 bloques y 14 capas. Se realizaron 5 iteraciones con un error cuadrático medio (RMS) de 1.55%. Las dos anomalías que corresponden a los dos cuerpos se definen correctamente en el cubo, alcanzando una profundidad de estudio de 13 metros. Respecto a sus posiciones espaciales ambos están bien ubicados y sus dimensiones se resuelven bien en el cubo de resistividades.

#### 4.3 Arreglo polo-polo diagonal

En las Figuras 4.4 y 4.5 se muestran los cubos de resistividades formados con los datos de las rejillas de 8 por 8 y de 11 por 11, respectivamente. Para la inversión de la rejilla de 8 por 8 se utilizó una malla con dimensiones de 33x33x16, 539 bloques y 11 capas. Se realizaron 5 iteraciones con un error cuadrático medio (RMS) de 1.22% y para la rejilla de 11 por 11 se utilizó una malla con dimensiones de 39x39x19, 1400 bloques y 14 capas. Se realizaron 5 iteraciones con un error cuadrático medio (RMS) de 0.93%. Al igual que en el arreglo polo-polo completo, se alcanzaron las mismas profundidades de estudio.

Respecto a la rejilla de 8 por 8 las posiciones espaciales de los dos cuerpos están bien ubicadas, las dimensiones para el cuerpo 1 se resuelven bien a diferencia del cuerpo 2.

Para la rejilla de 11 por 11, los dos cuerpos se visualizan claramente en el cubo. Sus posiciones espaciales se aprecian claramente y sus dimensiones se resuelven bien.

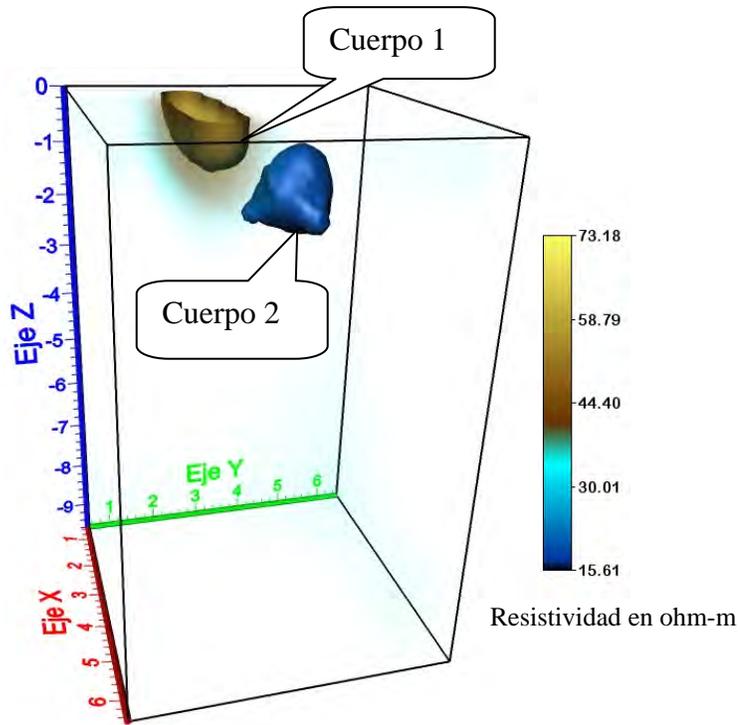


Figura 4.2 Cubo de resistividad de dos cuerpos construido con una rejilla de 8 por 8 y el arreglo polo-polo completo.

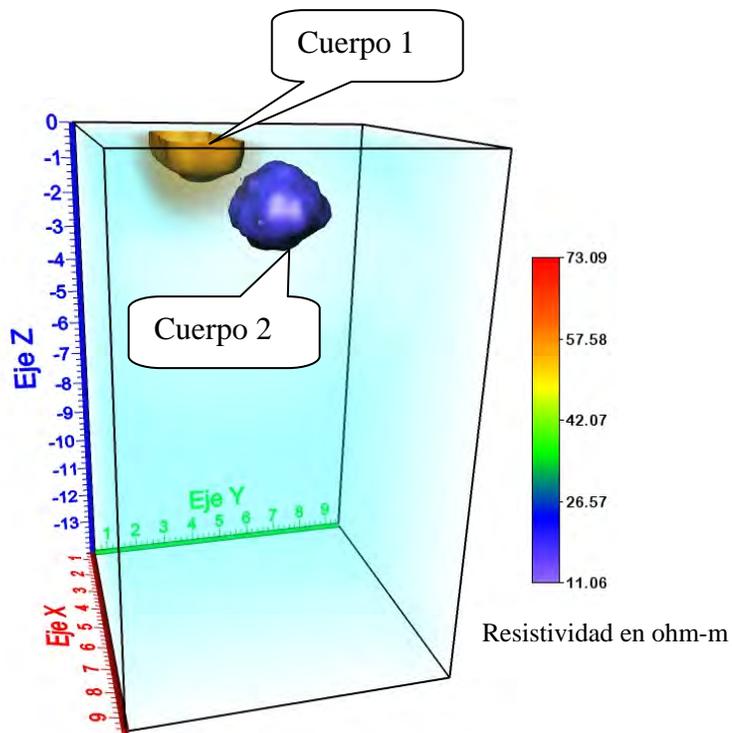


Figura 4.3 Cubo de resistividad de dos cuerpos construido con una rejilla de 11 por 11 y el arreglo polo-polo completo.

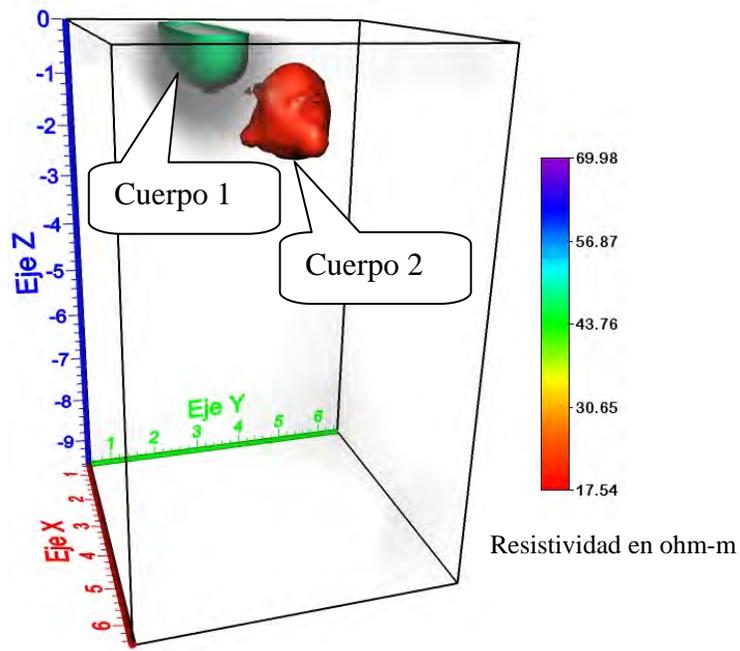


Figura 4.4 Cubo de resistividad de dos cuerpos construido con una rejilla de 8 por 8 y el arreglo polo-polo diagonal.

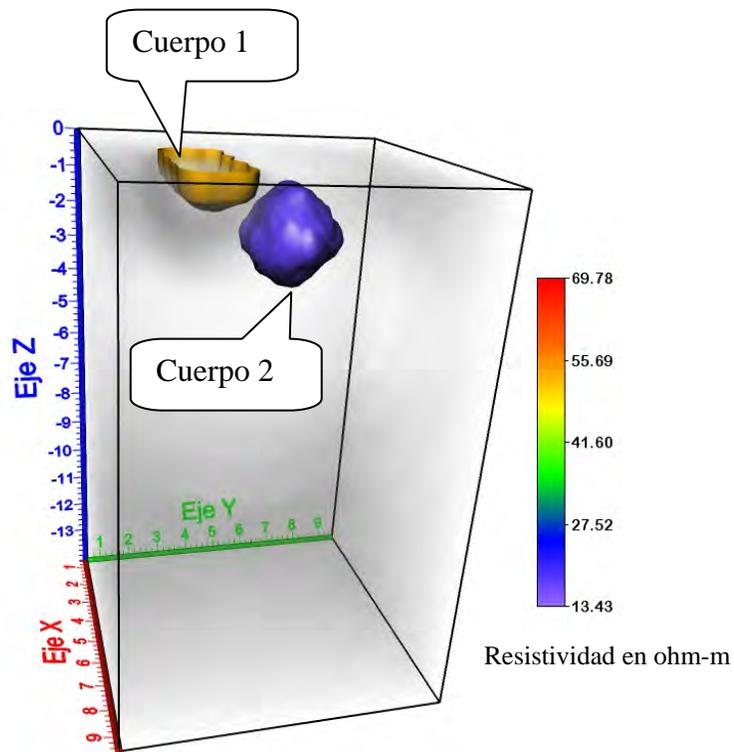


Figura 4.5 Cubo de resistividad de dos cuerpos construido con una rejilla de 11 por 11 y el arreglo polo-polo diagonal.

#### 4.4 Arreglo polo-polo inline

En la Figura 4.6 se muestra el cubo de resistividades formado con los datos de la rejilla de 8 por 8. Para este arreglo se utilizó una malla con dimensiones de 33x33x13, 392 bloques y 8 capas. Se realizaron 5 iteraciones con un error cuadrático medio (RMS) de 1.98%. A diferencia de los arreglos polo-polo completo y diagonal con este experimento se alcanzó una profundidad de estudio aproximadamente de 7 metros. Se observa que el cuerpo 1 resuelve bien, mientras que el segundo resuelve de manera regular. Respecto a sus posiciones espaciales los dos cuerpos están bien ubicados y en cuanto a sus dimensiones el cuerpo 1 se define mejor a diferencia del cuerpo 2.

En la Figura 4.7 se muestra el cubo de resistividades formado con los datos de la rejilla de 11 por 11. Para este arreglo se utilizó una malla con dimensiones de 39x39x16, 800 bloques y 8 capas. Se realizaron 5 iteraciones con un error cuadrático medio (RMS) de 1.91%. Las dos anomalías que corresponden a los dos cuerpos se visualizan bien en el cubo. Se alcanzó una profundidad de estudio aproximadamente de 9 metros.

Se observa que ambos cuerpos se definen bien al igual que en las configuraciones polo-polo completo y diagonal. Respecto a sus posiciones espaciales los dos cuerpos se encuentran bien ubicados y sus dimensiones se resuelven satisfactoriamente.

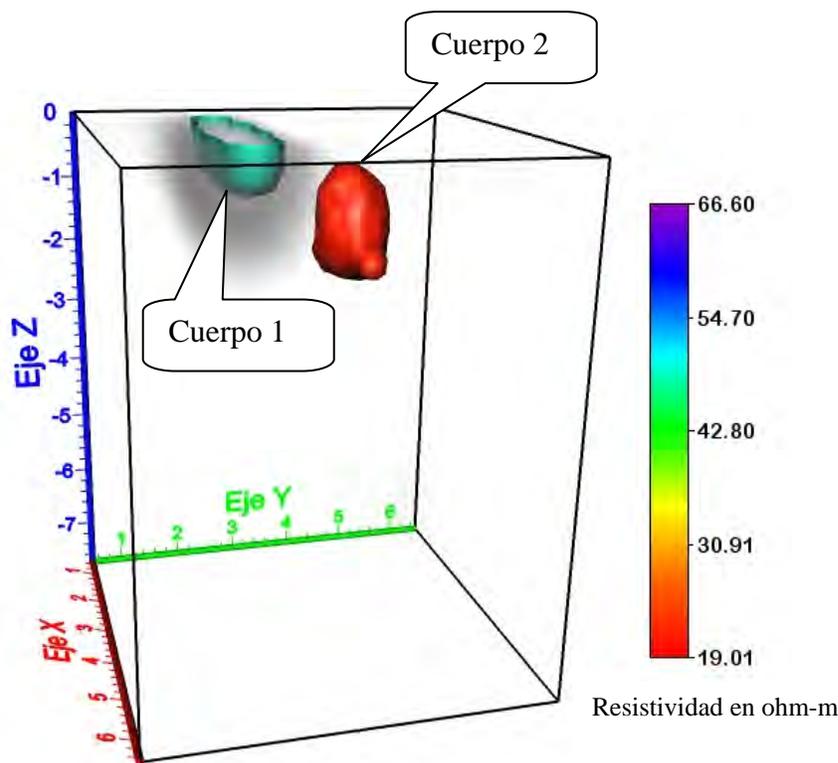


Figura 4.6 Cubo de resistividad de dos cuerpos construido con una rejilla de 8 por 8 y el arreglo polo-polo inline.

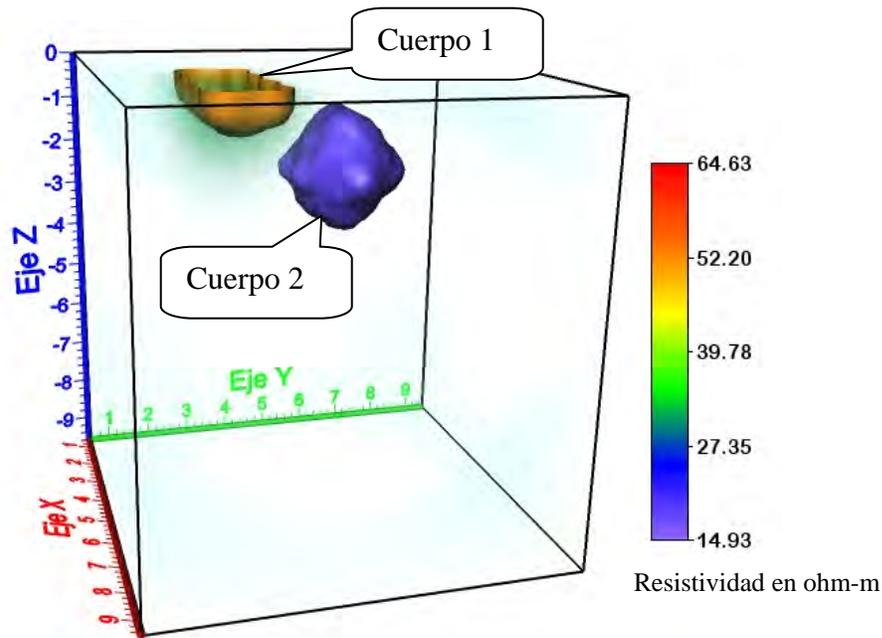


Figura 4.7 Cubo de resistividad de dos cuerpos construido con una rejilla de 11 por 11 y el arreglo polo-polo inline.

En general la respuesta eléctrica de estos modelos permite tener presentes las grandes ventajas del arreglo polo-polo.

#### 4.5 Arreglo Polo-dipolo

En la Figura 4.8 se muestra el cubo de resistividades formado con los datos de la rejilla de 8 por 8. Para este arreglo se utilizó una malla con dimensiones de 33x33x10, 245 bloques y 5 capas. Se realizaron 5 iteraciones con un error cuadrático medio (RMS) de 1.59%. Alcanzando una profundidad de estudio de aproximadamente 3 metros. Los dos cuerpos se visualizan bien en el cubo con una buena definición por consiguiente la posición espacial es correcta en su ubicación y sus dimensiones se resuelven bien.

En la Figura 4.9 se muestra el cubo formado con los datos de la rejilla de 11 por 11. Para este arreglo se utilizó una malla con dimensiones de 39x39x12, 700 bloques y 7 capas. Se realizaron 5 iteraciones con un error cuadrático medio (RMS) de 0.97%. Una profundidad de estudio de aproximadamente 5 metros. Las dos anomalías que corresponden a los dos cuerpos se visualizan de manera detallada en el cubo.

Ambos resuelven bien al igual que en el arreglo polo-polo completo, diagonal e inline. Respecto a sus posiciones espaciales los dos cuerpos están bien ubicados y sus dimensiones se resuelven satisfactoriamente.

La respuesta eléctrica de ambos modelos permite tener presentes las grandes ventajas que presenta este arreglo.

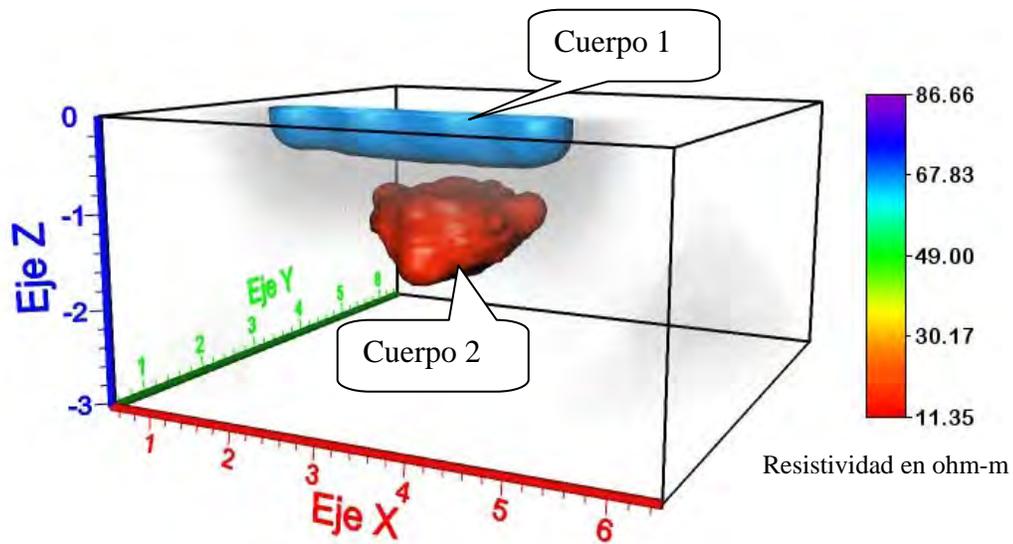


Figura 4.8 Cubo de resistividad de dos cuerpos construido con el arreglo polo-dipolo y una rejilla de 8 por 8.

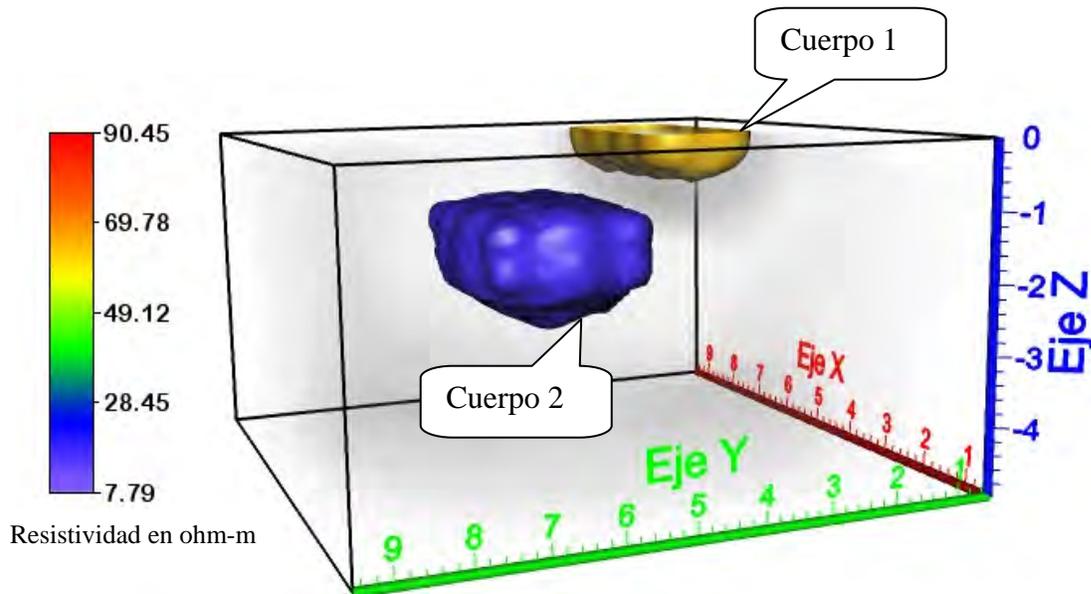


Figura 4.9 Cubo de resistividad de dos cuerpos construido con el arreglo polo-dipolo y una rejilla de 11 por 11.

#### 4.6 Arreglo dipolo-dipolo

La Figura 4.10 muestra el cubo de resistividades formado con los datos de esta rejilla de 8 por 8. Para este arreglo se utilizó una malla con dimensiones de 33x33x10, 245 bloques y 5 capas. Se realizaron 5 iteraciones con un error cuadrático medio (RMS) de 2.73%. Alcanzó una profundidad de estudio aproximadamente de 2 metros. Los dos cuerpos se observan en el cubo. El Cuerpo 1 se define bien a diferencia del segundo el cual se define de forma regular. Las posiciones espaciales de ambos están bien ubicadas, las dimensiones para el cuerpo 1 se resuelve bien a diferencia del cuerpo 2.

La Figura 4.11 muestra el cubo de resistividades formado con los datos de rejilla de 11 por 11. Para este arreglo se utilizó una malla con dimensiones de 39x39x11, 600 bloques y 6 capas. Se realizaron 5 iteraciones con un error cuadrático medio (RMS) de 1.35%. Llegando a una profundidad de estudio aproximada de 3 metros. Los dos cuerpos se observan en claramente dentro del cubo. Ambos se definen bien al igual que en los arreglos polo-polo (completo, diagonal e inline) y polo-dipolo. También las posiciones espaciales de los dos cuerpos se aprecian que están bien ubicados y sus dimensiones se resuelven bien.

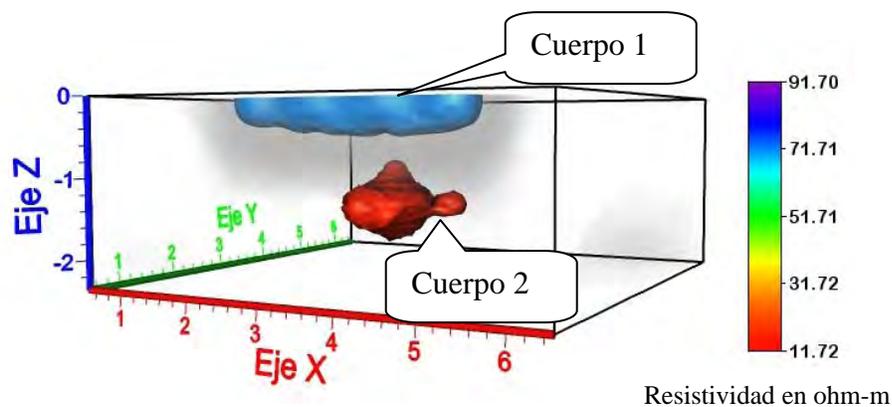


Figura 4.10 Cubo de resistividad de dos cuerpos construido con una rejilla de 8 por 8 y el arreglo dipolo-dipolo.

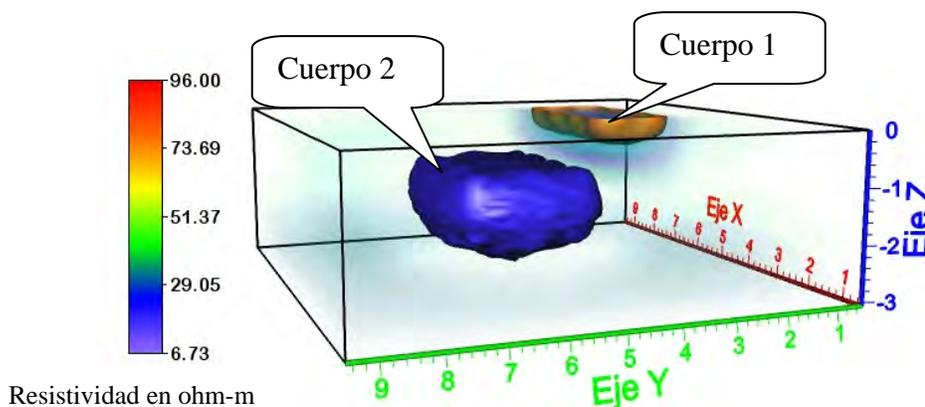


Figura 4.11 Cubo de resistividad de dos cuerpos construido con una rejilla de 11 por 11 y el arreglo dipolo-dipolo.

#### 4.7 Arreglo Wenner- Schlumberger.

La Figura 4.12 muestra el cubo de resistividades formado con los datos de rejilla de 8 por 8. Para este arreglo se utilizó una malla con dimensiones de 33x33x9, 196 bloques y 4 capas. Se realizaron 5 iteraciones con un error cuadrático medio (RMS) de 2.50%. Con una profundidad de estudio aproximada de 2 metros. El cuerpo 1 se define de manera regular a diferencia del segundo, el cual no se alcanza a definir. Respecto a sus posiciones espaciales solo el primer cuerpo está bien ubicado y sus dimensiones correctas a diferencia del cuerpo 2 el cual no define sus dimensiones.

La Figura 4.13 muestra el cubo de resistividades formado con los datos de rejilla de 11 por 11. Para este arreglo se utilizó una malla con dimensiones de 39x39x10, 500 bloques y 5 capas. Se realizaron 5 iteraciones con un error cuadrático medio (RMS) de 1.84%. La profundidad aproximada es de 3 metros. Se aprecian dos cuerpos que se pueden visualizar claramente dentro del cubo. Como en la rejilla de 8 por 8 el cuerpo 1 se define bien, pero el cuerpo 2 no se logra definir. Sus posiciones espaciales son correctas, aunque las dimensiones únicamente se pueden apreciar para el cuerpo 1.

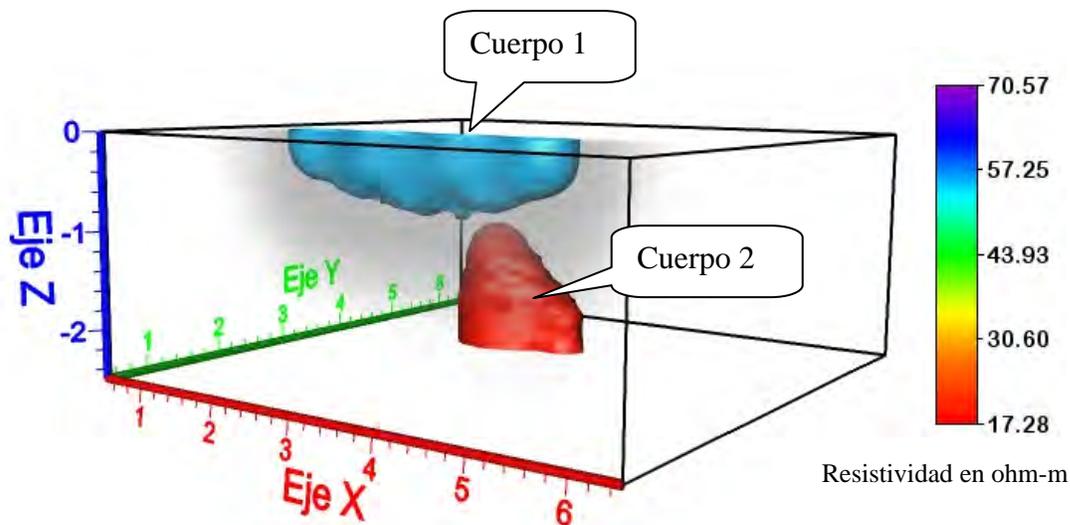


Figura 4.12 Cubo de resistividad de dos cuerpos construido con el arreglo Wenner-Schlumberger y una rejilla de 8 por 8.

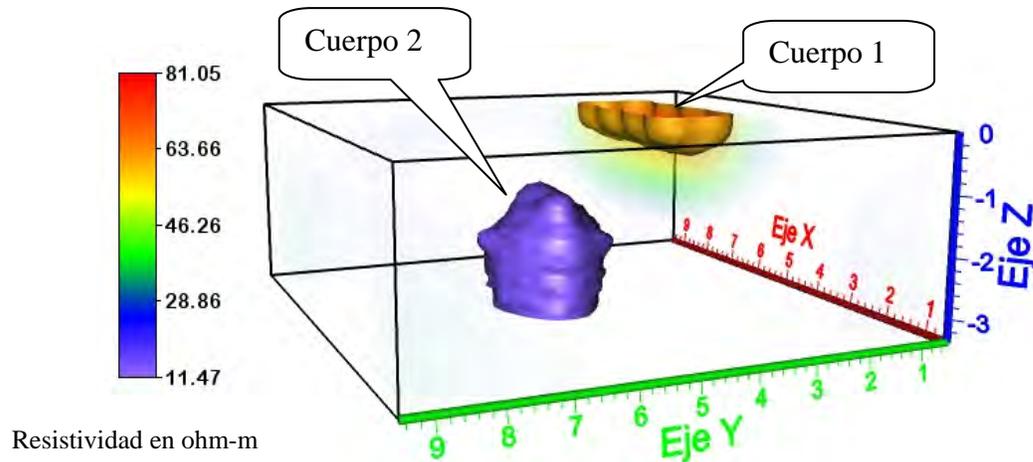


Figura 4.13 Cubo de resistividad de dos cuerpos construido con el arreglo Wenner-Schlumberger y una rejilla de 11 por 11.

La simulación de la respuesta eléctrica de estos modelos permite tener presentes las limitaciones que presenta este arreglo.

Otra característica a destacar del cubo de resistividad eléctrica es que se puede observar de una manera clara la separación de ambos cuerpos y la profundidad de mapeo para las dos rejillas.

Los resultados obtenidos de los ejemplos sintéticos desarrollados para la TRE 3D en superficie permiten establecer las siguientes conclusiones reunidas en la Tabla 9.

Arreglo	No. de electrodos rejilla	Modelos	Observaciones
Polo-Polo Completo	8 líneas x 8 electrodos	Modelo 1	Resolución regular, el cuerpo 2 no se define bien en forma y dimensiones. Mayor profundidad comparada con todos los arreglos excepto polo-polo diagonal.
	11 líneas x 11 electrodos	Modelo 2	Resolución buena, la imagen es muy clara ambos cuerpos se definen bastante bien. Mayor profundidad comparada con todos los arreglos excepto polo-polo diagonal.
Polo-Polo Diagonal	8 líneas x 8 electrodos	Modelo 1	Resolución regular, el cuerpo 2 no se define bien en forma y dimensiones. Mayor profundidad comparada con todos los arreglos excepto polo-polo completo.
	11 líneas x 11 electrodos	Modelo 2	Resolución buena, la imagen es muy clara, ambos cuerpos se definen bastante bien. Mayor profundidad comparada con todos los arreglos excepto polo-polo completo.
Polo-Polo In-Line	8 líneas x 8 electrodos	Modelo 1	Resolución regular el cuerpo 2 no se define bien en forma y dimensiones. Menor profundidad comparada con polo-polo (completo y diagonal) pero mayor que los otros arreglos.
	11 líneas x 11 electrodos	Modelo 2	Resolución buena, la imagen es muy clara, ambos cuerpos se definen bastante bien. Menor profundidad comparada con polo-polo (completo y diagonal) pero mayor que los otros arreglos.
Polo-Dipolo	8 líneas x 8 electrodos	Modelo 1	Resolución buena ambos cuerpos se visualizan excelentemente dentro del cubo. Mayor profundidad que los arreglos dipolo-dipolo y wenner-schlumberger pero menor al arreglo polo-polo.
	11 líneas x 11 electrodos	Modelo 2	Resolución buena ambos cuerpos se visualizan excelentemente dentro del cubo. Mayor profundidad que los arreglos dipolo-dipolo y wenner-schlumberger pero menor al arreglo polo-polo.
Dipolo-Dipolo	8 líneas x 8 electrodos	Modelo 1	Resolución regular el cuerpo 2 no se define bien en forma, dimensiones y profundidad. Menor profundidad comparada a los arreglos polo-polo y polo-dipolo
	11 líneas x 11 electrodos	Modelo 2	Resolución buena ambos cuerpos se visualizan excelentemente dentro del cubo. Menor profundidad comparada a los arreglos polo-polo y polo-dipolo
Wenner- Schlumberger	8 líneas x 8 electrodos	Modelo 1	Resolución deficiente el cuerpo 2 no se define bien en forma, dimensiones y profundidad. Menor profundidad comparada con todos los arreglos excepto dipolo-dipolo
	11 líneas x 11 electrodos	Modelo 2	Resolución deficiente el cuerpo 2 no se define bien en forma, dimensiones y profundidad. Menor profundidad comparada con todos los arreglos excepto dipolo-dipolo

Tabla 9 Conclusiones finales obtenidas para cada uno de los ejemplos sintéticos realizados con TRE 3D en superficie.

#### 4.8 Descripción de los modelos sintéticos para TRE 3D en pozo.

Los ejemplos sintéticos que se presentan para el estudio de TRE 3D en pozo son tres: el primero se compone de un cuerpo cuadrado (Figura 4.14a), el segundo de cuatro cuerpos rectangulares (Figura 4.14b) y el tercero de dos cuerpos rectangulares (Figura 4.14c), los cuales se analizan sin agregar ruido aleatorio. Las características de cada uno de estos modelos se presentan en la Tabla 10.

Modelo	Dimensiones (m)	Profundidad (m)	Resistividad de cuerpos (Ohm.-m)	Resistividad del medio (Ohm.-m)
Modelo 1 - Un Cuerpo rectangular	2x2x4	1	10	100
Modelo 2 - Cuatro Cuerpos rectangulares	Cuerpo 1 = 8x2x1	0.50	100	50
	Cuerpo 2 = 5x2x1	0.50	200	
	Cuerpo 3 = 2x3x1	0.50	100	
	Cuerpo 4 = 6x4x2	1	10	
Modelo 3 - Dos Cuerpos rectangulares	Cuerpo 1 = 14x4x1	0.60	200	100
	Cuerpo 2 = 6x6x4	3	10	

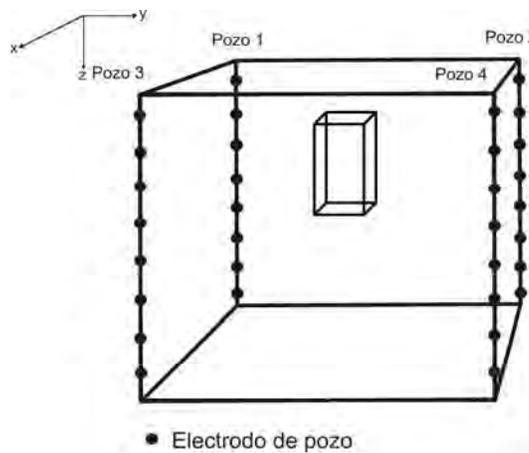
Tabla 10 Características de los dos modelos empleados en los experimentos sintéticos en TRE 3D de pozo.

En el estudio de TRE 3D en pozo se consideraron electrodos en cuatro pozos paralelos los cuales se presentan en la Tabla 11.

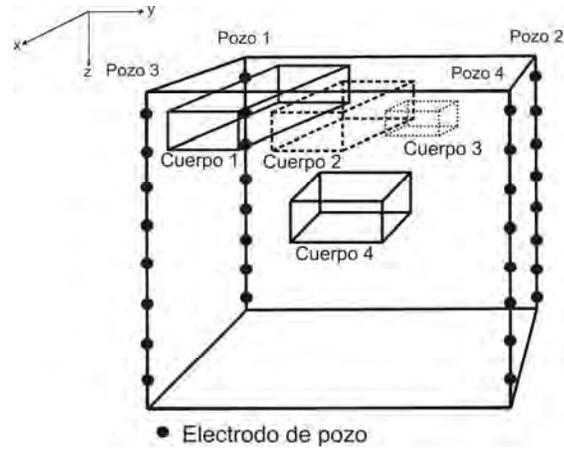
Tipo de arreglo	No. de electrodos	Modelos	No. de electrodos en pozo	Coordenadas de los pozos
Polo-Polo Polo-Dipolo	2 (A-M) 3 (A-MN)	Modelo 1	4 pozos paralelos separados 4 m con 8 electrodos cada uno. Total 32 electrodos con separación de 1m	Pozo1 $X_1=2$ $Y_1=2$ $Z_1=0$ Pozo2 $X_2=2$ $Y_2=6$ $Z_2=0$ Pozo3 $X_3=6$ $Y_3=2$ $Z_3=0$ Pozo4 $X_4=6$ $Y_4=6$ $Z_4=0$
Polo-Dipolo	3 (A-MN)	Modelo 2	4 pozos paralelos separados 10 m con 8 electrodos cada uno. Total 32 electrodos con separación de 1m	Pozo1 $X_1=2$ $Y_1=2$ $Z_1=0$ $Z_1=0$ Pozo2 $X_2=2$ $Y_2=12$ $Z_2=0$ $Z_2=0$ Pozo3 $X_3=12$ $Y_3=2$ $Z_3=0$ $Z_3=0$ Pozo4 $X_4=12$ $Y_4=12$ $Z_4=0$ $Z_4=0$
Dipolo-Dipolo	4 (AB-MN)	Modelo 3	4 pozos paralelos separados 16 m con 8 electrodos cada uno. Total 32 electrodos con separación de 2m	Pozo1 $X_1=2$ $Y_1=2$ $Z_1=0$ Pozo2 $X_2=2$ $Y_2=18$ $Z_2=0$ Pozo3 $X_3=18$ $Y_3=2$ $Z_3=0$ Pozo4 $X_4=18$ $Y_4=18$ $Z_4=0$

Tabla 11 Arreglos con sus respectivos pozos y modelos utilizados en los experimentos sintéticos en TRE 3D en pozo.

a) Modelo de un cuerpo



b) Modelo de 4 cuerpos



c) Modelo de 2 cuerpos

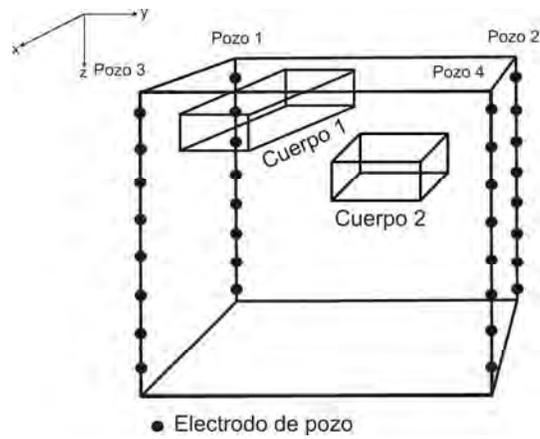


Figura 4.14 Modelos sintéticos de TRE 3D en pozo. (a) Modelo de un cuerpo rectangular; (b) Modelo de cuatro cuerpos rectangulares; (c) Modelo de dos cuerpos rectangulares para estudio de TRE de pozo.

Para la inversión de datos de todos los arreglos se utilizó el algoritmo de inversión (método de mínimos cuadrados con condicionamiento suavizado). El modelo inicial fue un semiespacio homogéneo. Durante la inversión se utilizó un factor de amortiguamiento  $\lambda$  de 0.15 para todos los modelos el cual resultó ser un factor óptimo para todas las configuraciones.

Todos los modelos sintéticos fueron desarrollados con 32 electrodos en pozo parecido a la manera como se usa comúnmente para estudios de pozo 2D. Las imágenes eléctricas se presentan en secciones de resistividades horizontales, secciones de resistividades verticales para el plano xz y secciones de resistividades verticales para el plano yz. Estas secciones (horizontales y verticales) se pueden agrupar de una manera más detallada en una imagen de resistividad 3D al igual que en los estudios 3D en superficie, cuando se juntan todos los datos de resistividad con sus respectivas secciones de resistividades horizontales y verticales se forma un cubo de resistividad 3D con ayuda del programa VOXLER.

#### 4.9 Arreglo polo-polo para pozo 3D (Modelo de un cuerpo rectangular).

Para este arreglo se utilizó una malla con dimensiones de 35x35x27, 512 bloques del modelo y 8 capas. Se realizaron 3 iteraciones con un error cuadrático medio (RMS) de 0.81%.

La Figura 4.15 muestra que el cuerpo se define bien en el cubo. Con respecto a su posición espacial el cuerpo está correctamente ubicado y sus dimensiones se resuelven satisfactoriamente. También, en el cubo se puede observar de manera clara la profundidad de mapeo.

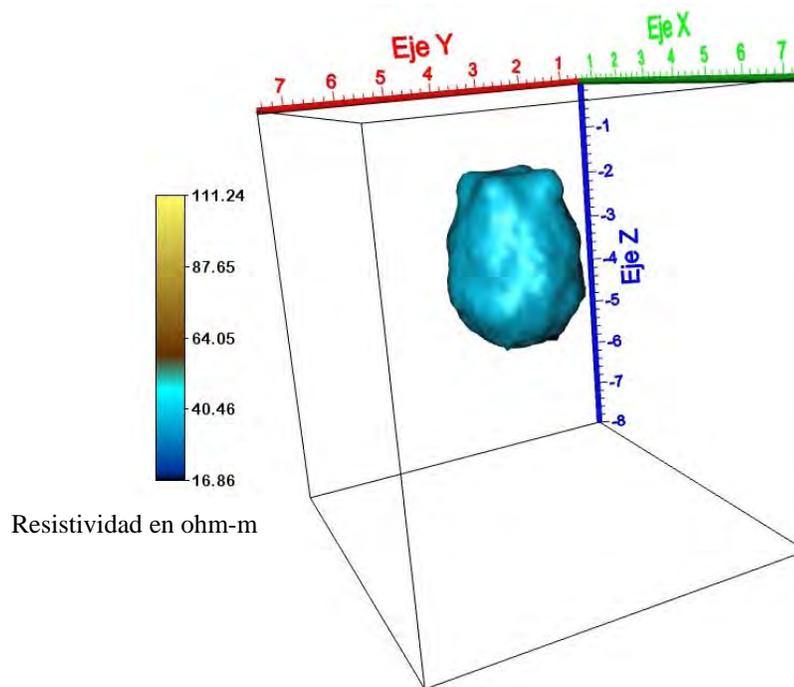


Figura 4.15 Cubo de resistividad de un cuerpo para un estudio TRE 3D en pozo construido con el arreglo polo-polo y cuatro pozos paralelos separados cuatro metros.

#### 4.10 Arreglo polo-dipolo para pozo 3D (Modelo de un cuerpo rectangular).

Para este arreglo se utilizó una malla con dimensiones de 35x35x27, 512 bloques del modelo y 8 capas. Se realizaron 3 iteraciones con un error cuadrático medio (RMS) de 0.81%.

La Figura 4.16 muestra el cubo formado con los datos de los cuatro pozos separados cuatro metros. Se observa que el cuerpo se define bien. Con respecto a su posición espacial el cuerpo se aprecia en buena ubicación y sus dimensiones se resuelven adecuadamente. Al igual que en el arreglo polo-polo se observa de manera clara la profundidad de mapeo.

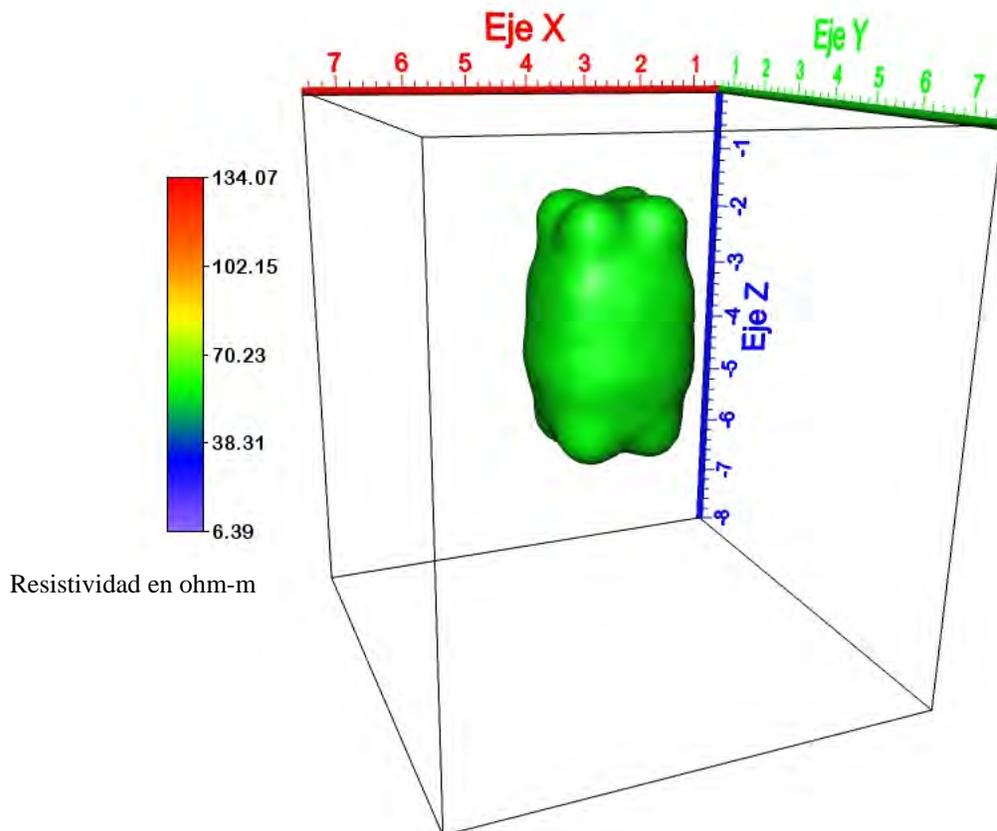


Figura 4.16 Cubo de resistividad de un cuerpo para un estudio TRE 3D en pozo construido con el arreglo polo-dipolo y cuatro pozos paralelos separados 4 metros.

#### 4.11 Arreglo polo-dipolo para pozo 3D (Modelo de cuatro cuerpos).

En este arreglo se utilizó una malla con dimensiones de 47x47x15, 1960 bloques del modelo y 10 capas. Se realizaron 4 iteraciones con un error cuadrático medio (RMS) de 0.91%.

En la Figura 4.17 se muestra el cubo formado con los datos de los cuatro pozos separados diez metros. Los cuatro cuerpos se aprecian bien definidos. Respecto a sus posiciones espaciales bien ubicadas y sus dimensiones se resuelven adecuadamente. Cabe destacar que se observa de una manera clara la separación de los cuatro cuerpos y la profundidad de mapeo en el cubo eléctrico.

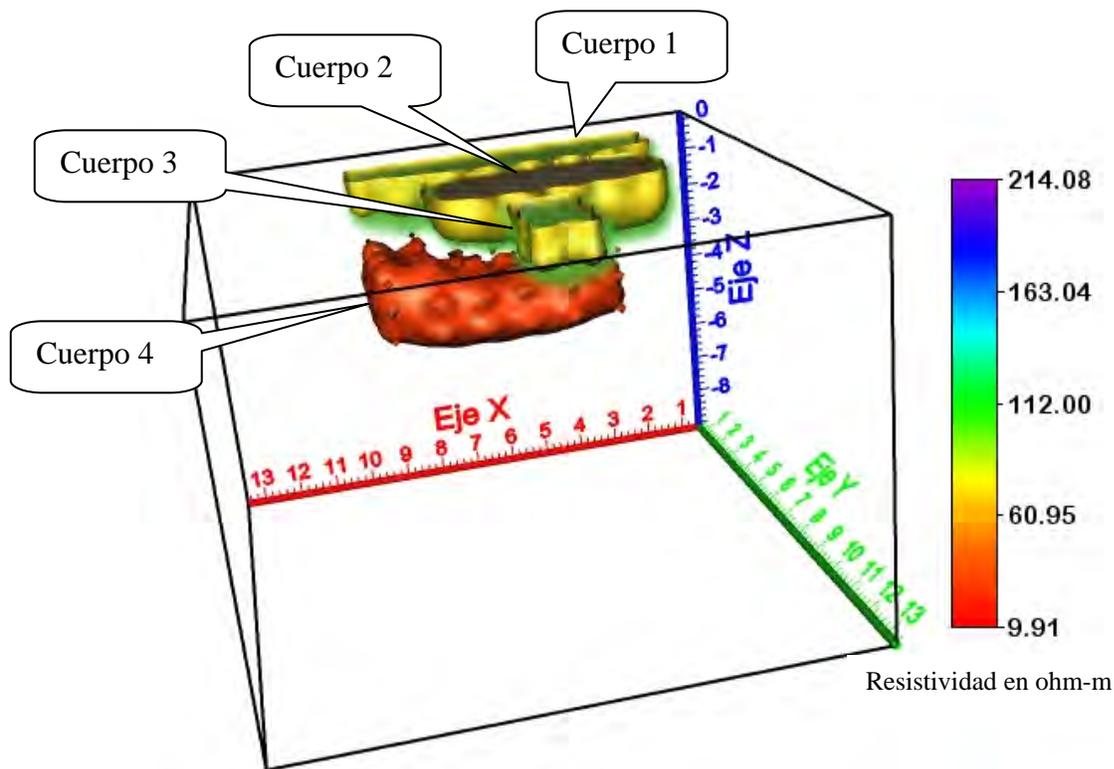


Figura 4.17 Cubo de resistividad de cuatro cuerpos para un estudio TRE 3D en pozo construido con el arreglo polo-dipolo y cuatro pozos paralelos separados 10 metros.

#### 4.12 Arreglo dipolo-dipolo para pozo 3D (Modelo de dos cuerpos rectangulares)

Para este arreglo se utilizó una malla con dimensiones de 41x41x12, 847 bloques del modelo y 7 capas. Se realizaron 6 iteraciones con un error cuadrático medio (RMS) de 0.31%.

La Figura 4.18 muestra el cubo formado con los datos de cuatro pozos separados dieciséis metros. Se observa que los dos cuerpos se definen bien. Respecto a sus posiciones espaciales se aprecia que están bien ubicados y sus dimensiones se resuelven correctamente. Nuevamente, cabe señalar que se puede observar de manera clara la separación de ambos cuerpos y la profundidad de mapeo en el cubo eléctrico.

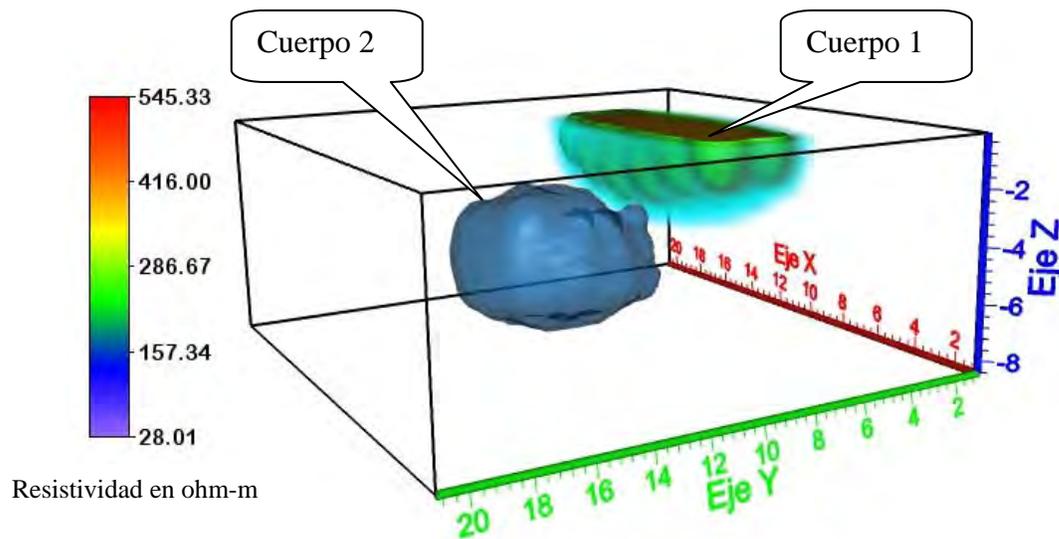


Figura 4.18 Cubo de resistividad de dos cuerpos para un estudio TRE 3D en pozo construido con el arreglo dipolo-dipolo y cuatro pozos paralelos separados 16 metros.

Los resultados obtenidos de los ejemplos sintéticos desarrollados para la TRE 3D en pozo nos permiten establecer las siguientes conclusiones reunidas en la Tabla 12.

Tipo de arreglo	No. de electrodos	Modelos	Observaciones
Polo-Polo	2 (A-M)	Modelo 1	Resolución buena el cuerpo se define bien dentro del cubo.
Polo-Dipolo	3 (A-MN)	Modelo 1	Resolución excelente el cuerpo se visualiza perfectamente dentro del cubo.
		Modelo 2	Resolución excelente, los cuatro cuerpos se visualizan perfectamente dentro del cubo. Las posiciones y dimensiones espaciales se definen bien.
Dipolo-Dipolo	4 (AB-MN)	Modelo 3	Resolución excelente, los dos cuerpos se visualizan perfectamente dentro del cubo. Las posiciones y dimensiones espaciales se definen bien.

Tabla 12 Conclusiones finales obtenidas para cada uno de los ejemplos sintéticos realizados con TRE 3D en pozo.

---

## Capítulo 5 Ejemplos de Aplicación.

Actualmente, uno de los campos más importantes en los cuales se aplica la prospección eléctrica es el estudio de problemas ambientales, aunque también se utiliza para la caracterización y localización de estructuras anómalas como pueden ser cavidades o antiguos túneles y delineación de sistemas de acuíferos. En este capítulo de la tesis se aplicará la técnica de TRE en dos casos reales: el primer caso es en el delta Llobregat, Barcelona, España y el segundo al poniente de la ciudad de México, Distrito Federal.

### 5.1 DELTA LLOBREGAT, BARCELONA, ESPAÑA.

El delta del río Llobregat, al sur de la ciudad de Barcelona, es un ejemplo de delta mediterráneo iniciado en la época postglacial, que prograda sobre una plataforma marina estrecha, y que está encajado entre relieves montañosos. El delta moderno es parte de un complejo de deltas sumergidos de edad pleistocena, que hoy en día tiene sus frentes deltaicos situados a profundidades de más de 80 m y a una distancia de la línea de costa actual de al menos 12 km. El delta holoceno prograda sobre las facies más someras de los deltas sumergidos.

El delta del río Llobregat, al igual que otros deltas mediterráneos, presenta una compleja estructura interna de cuerpos sedimentarios que se acuñan en diferentes direcciones. Esta complejidad es consecuencia principalmente de las variaciones del nivel del mar (periodos glacio-eustáticos) durante el Cuaternario, al aporte de sedimentos que alimentan el delta y a la actividad tectónica de la cuenca. La interacción de estos factores controló de forma decisiva la sedimentación deltaica y, por tanto, la distribución de los cuerpos geológicos en el espacio y en el tiempo. Esta distribución irregular de los cuerpos tiene implicaciones hidrogeológicas; las diferentes unidades pueden tener parámetros hidráulicos muy distintos. La definición de su correcta geometría y distribución espacial es de gran importancia en el desarrollo de estudios hidrogeológicos.

#### 5.1.1 Geología general del Delta del Llobregat

El delta del Llobregat se desarrolla al pie de la vertiente mediterránea de la Cordillera Litoral Catalana donde forma una llanura litoral encajada en depósitos heterogéneos. El delta del Llobregat es un ejemplo clásico en que los procesos fluviales dominan a lo largo del cauce y en la desembocadura, pero los procesos costeros como tormentas y deriva litoral son los más importantes a lo largo de la costa. La geología del delta se conoce bien desde mediados del siglo XX.

El delta del río Llobregat es parte de un complejo de deltas sumergidos, de edad pleistocena, sobre el que prograda un delta holoceno (Marqués, 1984). El sistema más antiguo corresponde a sedimentos fluviales, de pie de monte, de marisma y lagunares, caracterizados por litologías muy variadas de conglomerados (con o sin matriz arcillosa) a arenas y limos, así como antiguos suelos. El delta holoceno corresponde a un conjunto de arcilla roja, arenas y gravas progradantes sobre limos y arcillas gris-oscuras.

Los detalles de las transiciones entre estos cuerpos sedimentarios y cambios litológicos dentro de estos paquetes son poco conocidos a pesar que afectan en gran medida a la compactación de los sedimentos y el flujo de agua subterránea.

Para entender la geología del delta hay que comprender su evolución temporal (Marqués, 1984). El complejo deltaico está formado por materiales de edad Pleistocena a Holocena que descansa discordantemente por materiales que varían desde el Paleozoico al Plioceno. Se definieron cuatro deltas, los tres deltas más antiguos se encuentran en la actualidad debajo del mar y se enlazan con el Complejo Detrítico Inferior. El delta actual, también llamado Complejo Deltaico, es el resultado de la transgresión Holocena y consta de arenas, gravas y limos que han avanzado hacia mar desde hace aproximadamente 6000 años. La unidad superior de arenas y gravas prograda sobre los limos y arcillas de la unidad intermedia. En su conjunto, estas dos unidades están genéticamente relacionadas y fueron depositadas cuando el nivel del mar empezó a estabilizarse y los sedimentos transportados por el río Llobregat empezaron a acumularse en su desembocadura. De esta forma, el delta consigue formarse y migrar hacia el mar sobre los depósitos de la unidad inferior. En el techo de estos materiales se dispone un nivel, de potencia variable, de arcillas rojas a grises. Según Marqués, el Cuaternario Antiguo consta de tres complejos deltaicos en que la línea de costa habría estado unos 30 km mar adentro desde la presente línea de costa, cuando el nivel del mar estaba a unos 124 m por debajo del nivel actual. Por debajo del delta emergido actual, los sedimentos Cuaternarios Antiguos son fluviales, de pie de monte, de marisma y lagunares caracterizados por litologías muy variadas como conglomerados con matriz arcillosa, arenas y limos, así como antiguos suelos. A partir de los datos del antiguo Ministerio de Obras Públicas (MOP), 1966, se han identificado tres unidades litoestratigráficas. Son granodecrecientes, con bases erosivas rellenas de conglomerados y gravas que hacia techo pasan a arcillas. Estos sedimentos se alternan verticalmente y lateralmente de tal forma que su conectividad es poco conocida.

La Cordillera Litoral Catalana forma parte de conjunto de orientación NE – SW conocido por el nombre de Catalánides. Este conjunto está constituido por grandes unidades morfoestructurales: la Cordillera Prelitoral y la Cordillera Litoral.

La Cordillera Litoral está atravesada por el río Llobregat (Figura 5.1) y se distinguen en ella dos sectores muy diferentes, separados por la falla de desplazamiento horizontal que coincide con el valle del río Llobregat. La unidad más septentrional corresponde a la Sierra de Collserola, que en parte más meridional comprende los materiales paleozoicos de Santa Creu d' Olordà. La unidad al SW del valle del Llobregat está formada por el macizo de Garraf, donde el Paleozoico desaparece suavemente bajo los materiales mesozoicos. El valle del río Llobregat, que atraviesa la Cordillera Prelitoral y la Cordillera Litoral, forma un largo y estrecho pasillo de origen tectónico relleno por sedimentos pliocenos y cuaternarios.

Paralelamente a la alineación montañosa de la Sierra de Collserola y separado de ella por una depresión, se sitúa el montículo llamado Montjuic, que está formado por sedimentos miocénicos. Este montículo constituye el límite NE del delta del Llobregat y lo separa del delta del Besòs.

La depresión intermedia entre Montjuic y la Sierra de Collserola es llamada el Llano de Barcelona, y está cubierta de materiales cuaternarios, que en la zona de la Sierra de Collserola se apoyan directamente sobre el granito y las pizarras paleozoicas, y en el resto del Llano sobre materiales terciarios.

El delta del río Llobregat está limitado por numerosas fallas (Figura 5.1). La falla del Llobregat condicionó la dirección del río para cruzar la Cordillera Litoral Catalana. El río, una vez cruzada la falla del Tibidabo, da lugar al delta del Llobregat, con una amplia

llanura litoral encajada en terrazas de edad pleistocena, que están limitadas en parte hacia el NE por un sistema de fallas que ponen en contacto el Holoceno y Pleistoceno con el Mioceno (Montjuic) y Plioceno. Otras fallas sin expresión geomorfológica afectan al Holoceno y Pleistoceno en profundidad así como al margen de la plataforma (Figura 5.1). El río Llobregat, cuya cabecera se sitúa en el Pirineo, tiene una longitud de 156,5 km y una cuenca de drenaje de 4948.4 km<sup>2</sup>. Es de tipo mediterráneo con poco caudal (las aportaciones anuales entre 1912-1971 oscilan entre 1347,5 hm<sup>3</sup> y 270 hm<sup>3</sup>), un marcado estiaje, fuertes crecidas y elevada irregularidad (Márques, 1984). Numerosas rieras provenientes de Garraf y de Collserola desembocan en la llanura deltaica y están reflejadas por zonas inundadas y marismas. El delta del Llobregat está altamente modificado por procesos costeros como la deriva litoral hacia el SW, con corrientes de unos 30 cm/s (Font *et al.*, 1987; Chiocci *et al.*, 1997), que redistribuyen estos sedimentos hacia el SW y traen sedimentos procedentes de la costa del norte de Barcelona. En menor medida el oleaje (de baja energía) y la marea (de pocos centímetros) contribuyen a la redistribución del sedimento. En el prodelta y talud hay numerosas fallas sedimentarias y cañones que redistribuyen el sedimento gravitacionalmente (Maldonado *et al.*, 1986). Probablemente, los mismos procesos fueron activos durante el Pleistoceno. Sobreimpuestos a los procesos sedimentarios deltaicos, costeros y del margen de la plataforma continental se han de añadir la variación temporal del aporte de sedimento y los cambios eustáticos cuaternarios que afectaron a la distribución vertical y lateral de facies. El resultado de los cambios eustáticos es una amalgamación de deltas, ahora sumergidos, separados por múltiples superficies de erosión.

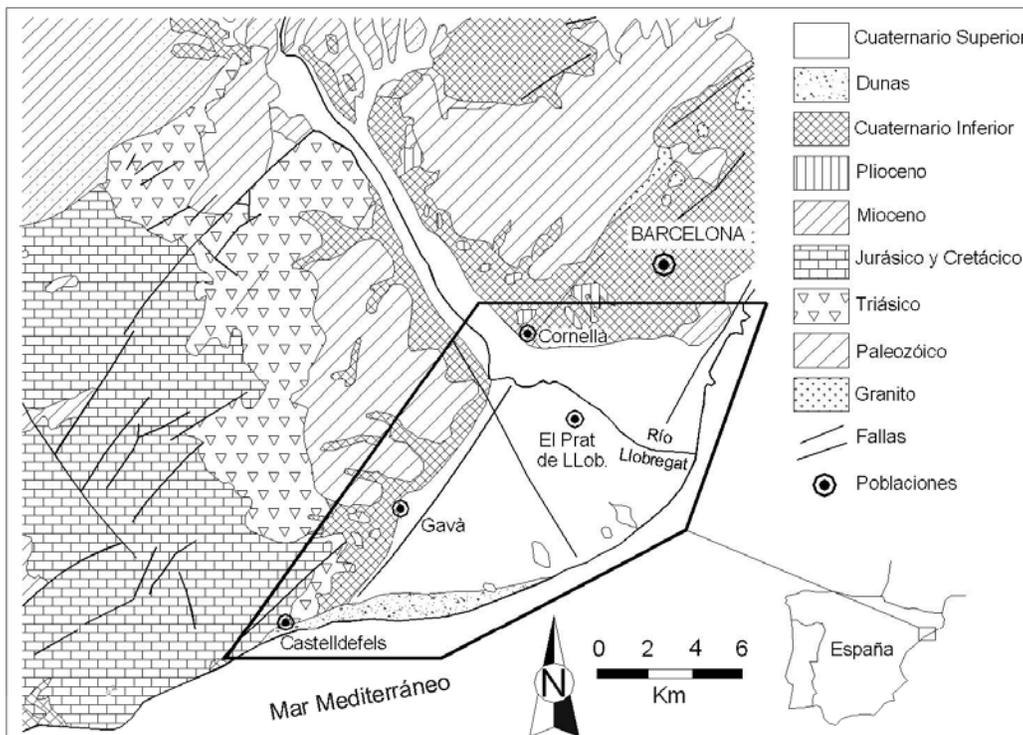


Figura 5.1.- Localización geográfica del Delta del Llobregat y contexto geológico regional (modificado de Almera, 1891).

## 5.2 Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D en pozo.

En este trabajo, se analizarán los datos eléctricos adquiridos por el Dr. Alejandro Marcuello y su equipo pertenecientes al departamento de Geodinámica y Geofísica de la Universidad de Barcelona, España en una zona próxima al aeropuerto dentro del delta mediterráneo Llobregat (Figura 5.3).

El equipo que se utilizó para la TRE, fue: un resistivímetro automatizado SYSCAL Pro de la marca IRIS Instruments que cuenta con una potencia de 250 watt cuando funciona solo con baterías internas y de 1200 watt cuando se conecta a una batería externa, su corriente máxima es de 2.5 Ampere. Además se utilizaron dos carretes, cada uno con cables de 24 electrodos para pozo y una computadora de campo para almacenar las mediciones de resistividad.



5.2 Fotografía del equipo utilizado para realizar la TRE 2D en pozo.

Se llevó a cabo una Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D en pozo con la configuración dipolo-dipolo (AM-BN). La selección de esta configuración se debió principalmente a que el área de estudio está rodeada de diferentes construcciones lo cual limita el uso de los arreglos que necesitan uno o dos electrodos remotos (polo-polo y polo-dipolo) y de un ambiente de bajo contraste de resistividad. En cuanto al arreglo dipolo-dipolo (AB-MN) y gradiente necesitan un mayor tiempo de adquisición de datos. La ubicación de las bocas de los pozos en superficie tienen por coordenadas pozo 1:  $X_1=3$ ,  $Z_1=0$  y pozo 2:  $X_2=18$ ;  $Z_2=0$ . La separación fue de 15 metros, con una profundidad de 30 m. En cada uno de los pozos se colocaron 24 electrodos con un espaciamiento de un metro. El primer electrodo se colocó a una profundidad de 5m (el más superficial) y el último a 28m (el más profundo). No se utilizaron electrodos de superficie. Se adquirieron un total de 546 mediciones de resistividad. En la inversión de datos se utilizó el algoritmo de método de mínimos cuadrados con condicionamiento suavizado debido a que los cambios de la resistividad del subsuelo fueron de forma paulatina y gradual. El modelo inicial fue un semiespacio homogéneo, con 456 bloques y 24 capas. Durante la inversión se utilizó un factor de amortiguamiento  $\lambda$  de 0.15. Se utilizaron dos iteraciones para la convergencia y el error RMS fue de 0.9%.



### 5.2.1.1 Descripción del perfil de TRE 2D en pozo.

La sección eléctrica de pozo de la Figura 5.4 obtenida con la inversión de los datos de resistividad aparente de la TRE de pozo muestra claramente tres unidades geoeléctricas.

La primera unidad litoestratigráfica (llanura deltaica) termina aproximadamente a los 6 metros y no es detectable por la configuración de pozo utilizado, ya que el primer electrodo se encuentra a 5 metros de profundidad.

Los sedimentos deltaicos de esta primera unidad litoestratigráfica están constituidos mayormente por arcillas marrones-grises con intercalaciones de arena de tamaño fino a muy fino. Esta unidad normalmente tiene de 2 a 3 metros de espesor el cual varía según el espesor de la capa suprayacente, la correspondiente al relleno antrópico. En la zona de estudio se encuentra de 3-5 m de profundidad a 6-6.5 m de profundidad desde el nivel del suelo (Figura 5.4). Se interpreta que estos sedimentos son de la llanura deltaica.

La primera unidad geoeléctrica R1 se encuentra por debajo del frente deltaico. Esta unidad se sitúa entre los 5 y 15 metros con valores de resistividad de 18 y 22 ohm-m. Se caracteriza por estar constituida por un conjunto de litofacies de arenas finas limosas a arenas gruesas con algunas pasadas de gravas, alternándose con arenas finas con una matriz más limosa. Esta unidad se encuentra directamente después de la unidad descrita anteriormente y está separada de ella por una discontinuidad estratigráfica. En su conjunto estos materiales se corresponden con sedimentos del frente deltaico en la que se distinguen ambientes de playa y canales fluviales. La potencia de esta unidad varía entre 9 y 11 metros aproximadamente. Desde la superficie alcanzaría una profundidad de aproximadamente 17 metros (Figura 5.4). Desde el punto de vista hidrogeológico esta unidad conformaría el acuífero superficial. En esta unidad se han encontrado diversos horizontes con abundante materia orgánica y restos vegetales lo que indicaría diferentes episodios de avenidas.

La segunda unidad geoeléctrica (R2) corresponde muy probablemente al prodelta ya que su valor de resistividad es inferior a las otras unidades geoeléctricas lo cual concuerda con un alto contenido de arcillas como se ha encontrado en esta unidad litoestratigráfica. Esta unidad geoeléctrica intermedia se localiza entre los 16 y 25 metros de profundidad con valores de resistividad entre 4 y 7 ohm-m. Está formada por sedimentos deltaicos de grano fino, principalmente limos arcillosos y arenas finas. Esta unidad se caracteriza por presentar alternancias de limos arcillosos que pasan a ser más arenosos en la parte superior de la unidad. Las alternancias más someras de dicha unidad presentan un tamaño de arena mayor que las inferiores. En la parte inferior de la profundidad alcanzada (no de la unidad) el sedimento aumenta su proporción de arena fina considerablemente. El conjunto de todas estas alternancias se interpreta como perteneciente al prodelta que es la parte más distante del sistema deltaico. Desde el punto de vista hidrogeológico esta unidad representaría un acuitardo. En esta zona se encuentra en medio de la imagen siendo la potencia de esta unidad varia entre 17 y 25 metros (Figura 5.4).

Por último, la tercera unidad geoeléctrica (R3) es la más profunda y se puede observar a partir de los 27 metros con un valor de resistividad superior a los 22 ohm-m, que desde el punto de vista hidrogeológico, podría asociarse con un acuífero inferior (Figura 5.4).

Estas unidades geoelectricas pueden correlacionarse con las tres unidades litoestratigráficas (Figura5.5) que han sido previamente descritos por Noguera (2003).

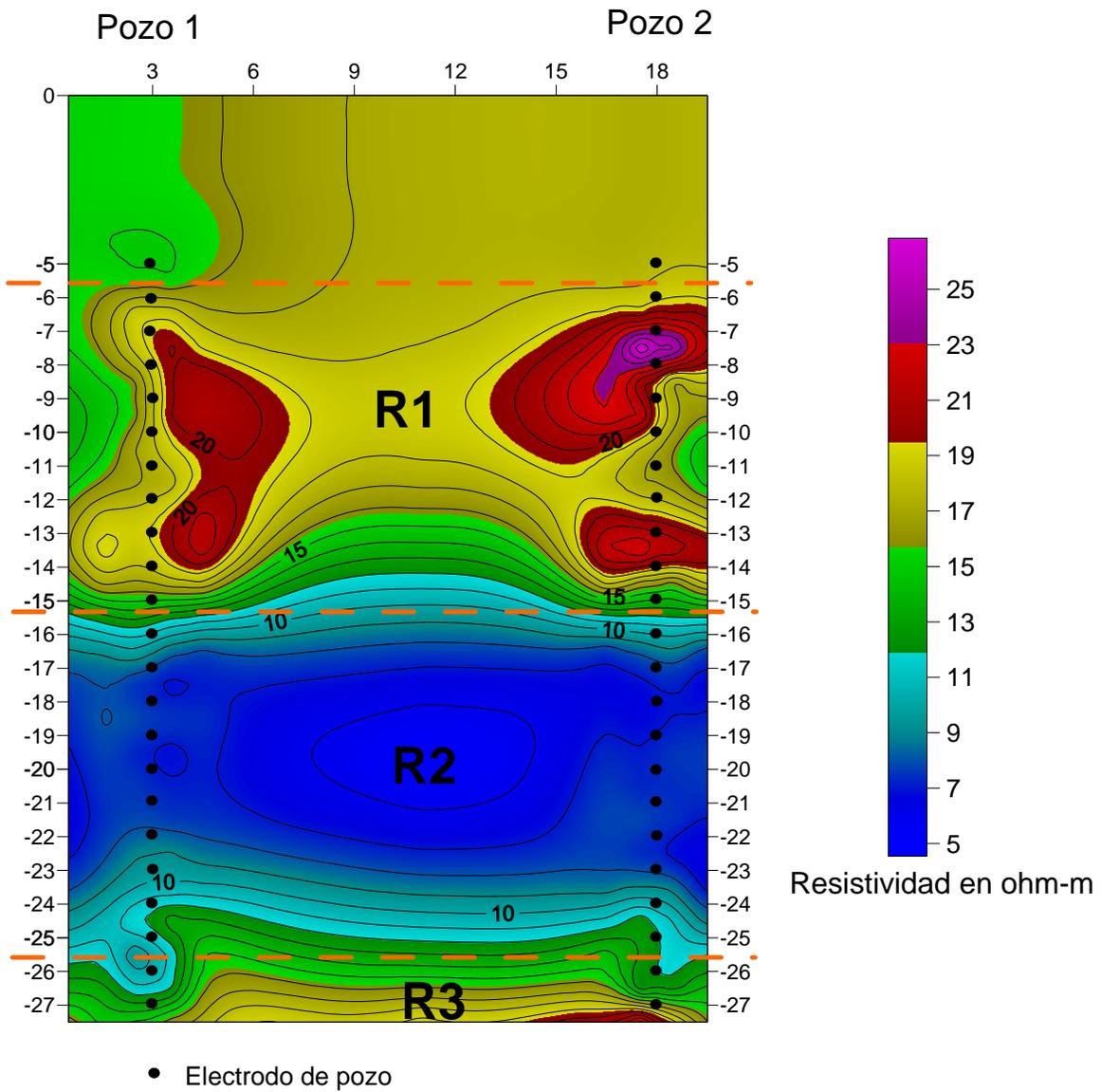


Figura 5.4 Sección o imagen eléctrica realizada con la TRE 2D en pozo, en el delta de Llobregat.

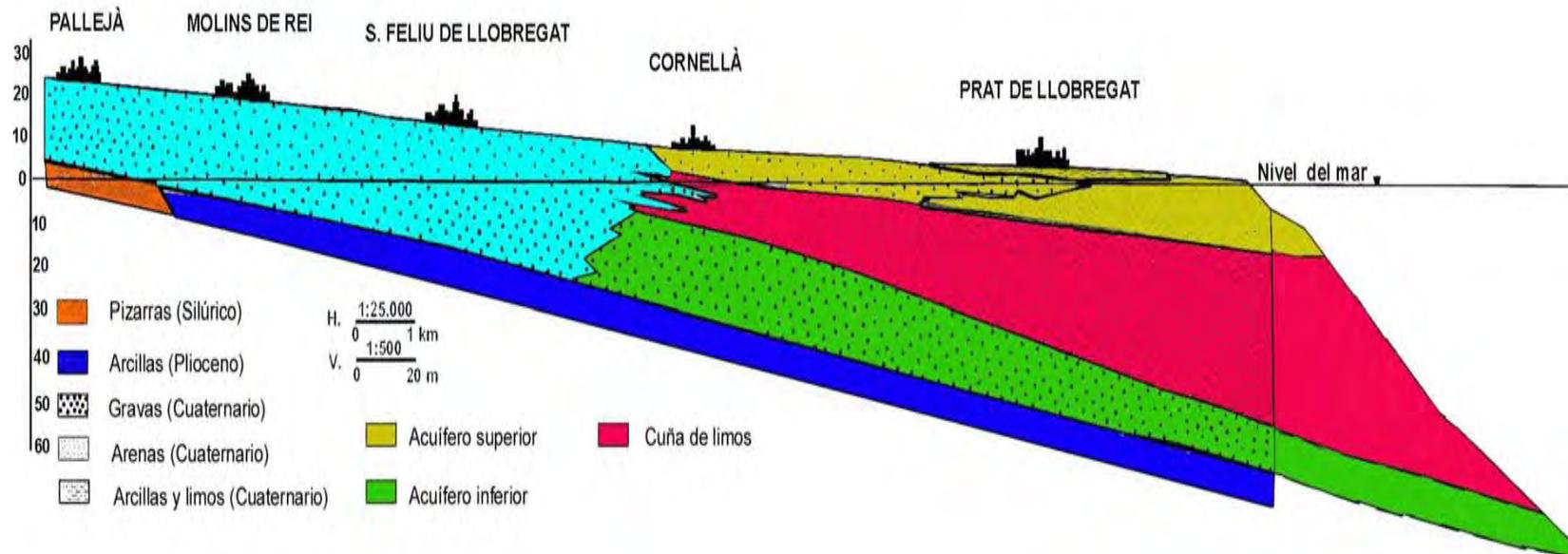


Figura 5.5 Disposición en profundidad de los dos niveles que se han identificado como acuíferos y que corresponden a los niveles de gravas datados como cuaternarios y separados por una cuña de arcillas y limos (Modificado de MOP, 1996). Imagen tomada de Noguera Tesis Doctoral (2003)

### **5.3 Delegación Álvaro Obregón.**

La ciudad de México está localizada en el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), en el centro de México. El CVTM es una provincia Plio-Cauternaria calco-alcalina que atraviesa México de oeste a este. La región comprende la mayoría del vulcanismo histórico y actual de México e incluye estratovolcanes andesíticos-dasíticos, de vulcanismo riolítico y mayores centros riolíticos. La ciudad de México se localiza en una cuenca a una altura de 2200 msnm., aproximadamente a 300 km. al este de la Trinchera de América Central. Las sierras volcánicas que rodean la cuenca son: la Sierra Nevada al este, la Sierra de Chichinautzin al sur, la Sierra de las Cruces al oeste, y la Sierra de Guadalupe al norte. La naturaleza de este valle intramontañas afecta directamente la calidad del aire, el suministro de agua y el desarrollo urbano.

A finales de los años cuarenta y cincuenta, y a causa del crecimiento anárquico de las áreas urbanas, la mayoría del material utilizado con propósitos de construcción se obtuvo de minas excavadas en las sierras del oeste, estos materiales fueron empleados para la construcción de casas, departamentos y edificios del gobierno en el centro de la ciudad de México; cuando esta industria decayó a principios de los años sesenta, la mayoría de estas minas terminaron como cavidades o túneles abandonados o rellenos con desperdicios. Posteriormente, debido a su tamaño, estas cavidades fueron utilizadas por familias enteras como refugios, bodegas, sótanos, etc. por la gente del vecindario. Las colonias de esta delegación se han asentado sobre zonas de minas en los últimos 20 años. Actualmente, la localización de la mayoría de estas estructuras es desconocida, debido a esto muchos accidentes han ocurrido desde entonces, las cavernas se han colapsado y hogares completos literalmente han desaparecido.

La Universidad Nacional Autónoma de México a través del departamento de Geofísica de la Facultad de Ingeniería junto con la delegación Álvaro Obregón firmó en 2004 un programa de investigación para localizar zonas de alto riesgo, en particular zonas de minas sobre las cuales existen asentamientos urbanos. En este trabajo se presenta los resultados obtenidos en un sitio de minas con mediciones de resistividad.

#### **5.3.1 Ubicación Geográfica.**

La delegación Álvaro Obregón se localiza al poniente del Distrito Federal (Figura 5.6), extendiéndose de noreste a sureste. Limita al norte con la delegación Miguel Hidalgo, al oriente con Benito Juárez y Coyoacán, al sur con Magdalena Contreras, Tlalpan y con el municipio de Jalatlaco en el Estado de México y al poniente con Cuajimalpa. En esta delegación se encuentra el acceso poniente de la ciudad, sus vialidades regionales carretera federal y autopista, constituyen la entrada de mercancía y población de los Estados de México y Michoacán.

## Coordenadas

Geográficamente la delegación Álvaro Obregón está situada entre los paralelos  $19^{\circ}; 14' \text{ N}$  y  $19^{\circ}; 25' \text{ S}$  y los meridianos  $99^{\circ}; 10' \text{ E W}$  y  $99^{\circ}; 20' \text{ O W}$ .

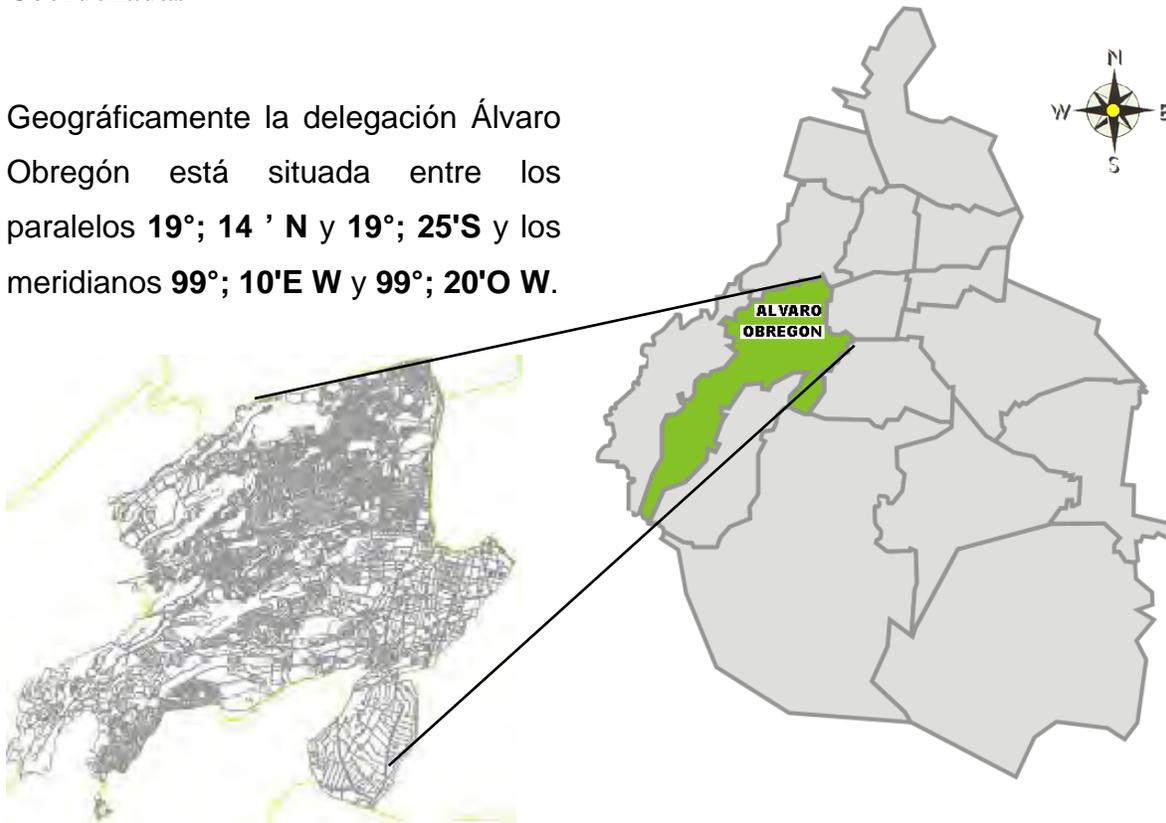


Figura 5.6 Mapa de ubicación de la delegación Álvaro Obregón, Ciudad de México.

### 5.3.2 Geología.

La ciudad de México fue fundada originalmente sobre una pequeña isla en un lago rodeado por sierras volcánicas. Esta se localizó en la porción central del CVTM (Pasquare *et al.*, 1987). El área estudiada se encuentra al suroeste del valle de México (Figura 5.6). El relieve es abrupto y compuesto de una serie de colinas y barrancas profundas. Las rocas superficiales son depósitos de materiales ígneos arrojados por los volcanes dentro de la Sierra de las Cruces. Estos eventos geológicos produjeron avalanchas de material piroclástico, tufas y brechas que se depositaron en las faldas de las sierras. Las rocas volcánicas que conforman el relieve del área de estudio son de la era Cenozoica, y es conocida como la formación Tarango. Este horizonte geológico es una secuencia compuesta de losas de arena, piedras pómez interestratificadas con arcillas y calizas. La piedra pómez fue el producto de violentas explosiones volcánicas, algunos fragmentos fueron arrastrados por el viento a grandes distancias del cráter e igualmente depositados en las zonas bajas. La columna estratigráfica de la formación Tarango se divide en dos unidades. La Unidad A es la más joven y es encontrada en las pendientes de las barrancas y consiste de fragmentos de rocas arrastrados por corrientes de agua. Estos deslizamientos fueron producidos por la saturación del agua de lluvia, moviéndolos hacia abajo a grandes velocidades por efectos de gravedad. Estos tipos de rocas están bien compactadas y hospedadas en una matriz de arena con esquinas angulosas. La Unidad B es una secuencia

piroclástica, un producto de erupciones volcánicas. La piedra pómez, travertino, arena y material aluvial son los tipos de rocas que forman esta unidad. Dichas rocas fueron empleadas para elaborar ladrillos ligeros. Esta unidad forma la ‘corona’ o partes más altas de las colinas de esta área. La mayoría de la industria minera explotó las secciones más bajas en las arenas pumiciticas. Las minas principales están localizadas aquí, y la posición estratigráfica define calidad y dureza de los materiales. Las cavidades encontradas en esta unidad tienen un rango de profundidad de 5, 10 y 25 metros. El tamaño de las cámaras principales es variable, del orden de 2 a 3 metros y hasta 30 metros. Las longitudes de los túneles tienen cientos de metros.

#### 5.4 Perfiles de Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D y 3D en superficie.

La finalidad del trabajo fue mapear un posible túnel que atraviesa casi perpendicularmente las calles de Grullas, Guacamaya, Lerdo de Tejada y Pedro Cavilha, en la colonia Golondrinas. El estudio se llevó a cabo en dos etapas: en la primera se realizaron de manera independiente cuatro perfiles casi paralelos sobre cada una de las calles antes mencionadas (Figura 5.7). En la segunda etapa se llevó a cabo el mapeo del túnel por medio de la construcción de un cubo tridimensional con una rejilla compuesta de 4 líneas de 28 electrodos cada una. La longitud de cada línea fue de 135 metros y la separación entre electrodos de 5 metros.

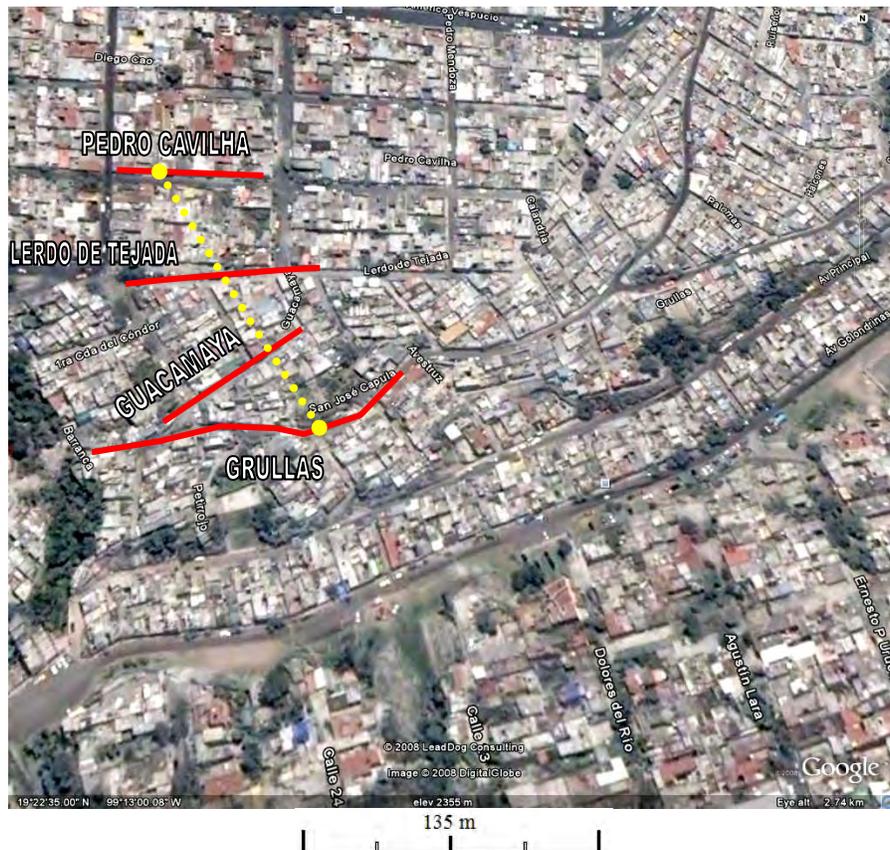


Figura 5.7 Mapa de localización de los cuatro perfiles en las calles Grullas, Guacamaya, Lerdo de Tejada, Pedro Cavilha y el túnel en la Delegación Álvaro Obregón.

### 5.4.1 Equipo de campo utilizado.

A continuación se presentan las herramientas necesarias para la realización del estudio.

- 56 barras metálicas como electrodos
- 5 marros.
- Computadora portátil con software, EARTHIMAGER2D y RES3DINV.
- Cable multi-electrodos
- Resistivímetro automatizado Sting R1-IP

El Sting R1-IP (Figura 5.8) es un equipo automatizado para mediciones de resistividad. La adquisición de datos es relativamente rápida utilizando un cable multi-electrodo (Figura 5.9), con lo cual se ahorra tiempo al realizar la exploración, los datos son grabados en la memoria interna del equipo y posteriormente se descargan a una computadora portátil para su procesado. El Sting R1-IP está diseñado para trabajar TRE 2D y 3D con los siguientes arreglos: dipolo-dipolo, polo-dipolo, polo-polo, Wenner y Wenner-Schlumberger incluyendo estudios completamente automáticos de roll-along. Es un equipo de baja potencia (25 Watts) lo cual se traduce en que puede ser utilizado para exploración del subsuelo en la parte somera.



Figura 5.8 Fotografía del equipo utilizado para realizar las TRE 2D y 3D en superficie.



Figura 5.9 Fotografía del cable multielectrodo.

### 5.4.2 Descripción de los resultados.

El uso de programas de inversión y la integración de datos es una parte importante de las interpretaciones geofísicas. Los siguientes pasos representan el método encargado para esta interpretación:

- 1.- Inversión bidimensional
- 2.- Integración geológica y geotécnica
- 3.- Inversión Tridimensional
- 4.- Identificación de la estructura y perforación

Las inversiones 2D de los datos de resistividad fueron realizadas con el programa EarthImager 2D. La inversión 3D con el programa RES3DINV y la construcción del cubo de resistividad para llevar a cabo la interpretación final se realizó con el programa de visualización 3D VOXLER. La adquisición de los datos bidimensionales y tridimensionales se realizó con el arreglo dipolo-dipolo (AB-MN).

### 5.4.3 Primera Etapa, descripción de los perfiles 2D.

Se construyeron independientemente cuatro perfiles bidimensionales aproximadamente paralelos (Figura 5.14), con el propósito de mapear el túnel que se encuentra por debajo de las calles mencionadas anteriormente y darle seguimiento con la finalidad de obtener su trazo sobre las calles y casas.

El método de modelado directo 2D utilizado fue el método de diferencias finitas, el número de divisiones de la rejilla entre fue de 4. En la discretización de cada modelo se utilizó una malla de dimensiones diferentes. Para el perfil 1 calle Grullas las dimensiones fueron de 236 por 14 lo que equivale a un total de 3304 parámetros del modelo, para el perfil 2 calle Guacamayas fueron de 116 por 14 lo que equivale a un total de 1624 parámetros del modelo, para el perfil 3 calle Lerdo de Tejada fueron de 140 por 14 un total de 1960 parámetros del modelo y por último para el perfil 4 calle Pedro Cavihla fueron de 108 por 14 un total de 1512 parámetros del modelo. Debido a que la zona de estudio presenta un alto índice de ruido, la geología no presenta cambios drásticos y el contraste entre las posibles cavidades y el medio es bastante contrastante se utilizó el mismo algoritmo de inversión para todos los perfiles (modelo de inversión con suavizado dado que es estable y robusto), también el mismo modelo inicial el cual fue un semiespacio homogéneo (medio uniforme para  $\rho=10$  ohm-m). Durante la inversión se utilizó un factor de amortiguamiento  $\lambda$  de 1 para todos los modelos el cual resultó ser un factor óptimo para todos los perfiles. Para la convergencia se utilizaron 8 iteraciones.

### 5.4.4 Perfil 1 Calle Grullas.

Para este primer perfil se utilizaron 60 electrodos con una separación de 5 metros cubriendo una distancia horizontal de 300 metros, brindando una profundidad de investigación de 25 metros. La adquisición se realizó de la siguiente manera: primero se colocaron 28 electrodos a cada 5 metros de distancia entre ellos para cubrir 135 metros, posteriormente

se realizaron ocho corrimientos (roll-along) de cuatro electrodos cada uno, separados 5 metros para cubrir 20 metros totales para cada corrimiento hasta llegar a cubrir los 300 metros de todo el perfil.

En la Figura 5.10 se muestra la imagen eléctrica obtenida y como se puede observar, el posible túnel o caverna se encuentra al centro del perfil,  $x = 150$  metros aproximadamente y a una profundidad del orden de 16 metros. En el extremo inferior derecho del centro del perfil se detecta otra cavidad de menor dimensión. Esta cavidad se encuentra situada a  $x = 210$  metros y a una profundidad del orden de 23 metros.

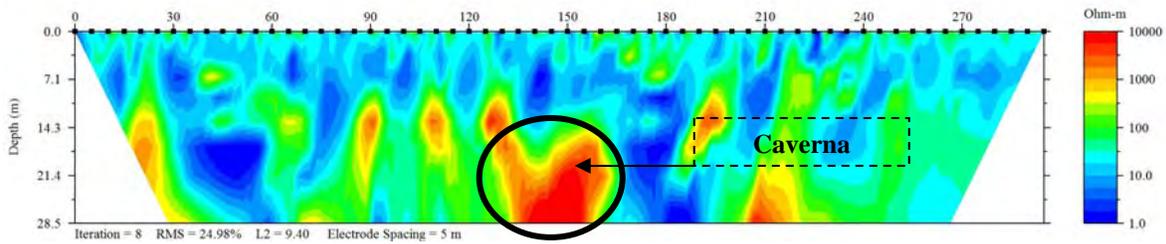


Figura 5.10 Imagen o sección eléctrica bidimensional de la calle Grullas.

#### 5.4.5 Perfil 2 Calle Guacamaya.

Este segundo perfil ubicado en forma casi paralela a 40 metros de distancia del primer perfil, se utilizaron 30 electrodos con una separación de 5 metros cubriendo una distancia horizontal de 145 metros. Para la construcción de este perfil se utilizaron 28 electrodos separados 5 metros para cubrir 135 metros iniciales y después se realizó un solo corrimiento de dos electrodos separados 5 metros para cubrir 10 metros más y así obtener un perfil de 145 metros.

En la Figura 5.11 se muestra la imagen eléctrica obtenida y como se puede observar, el posible túnel o caverna se encuentra hacia el extremo izquierdo del perfil,  $x = 55$  metros aproximadamente y a una profundidad del orden de 16 metros igual que para el perfil 1, con un medio encajonante de 50 a 100 ohm-m y con pocas zonas que reflejan humedad con un valor de resistividad de 5 ohm-m.

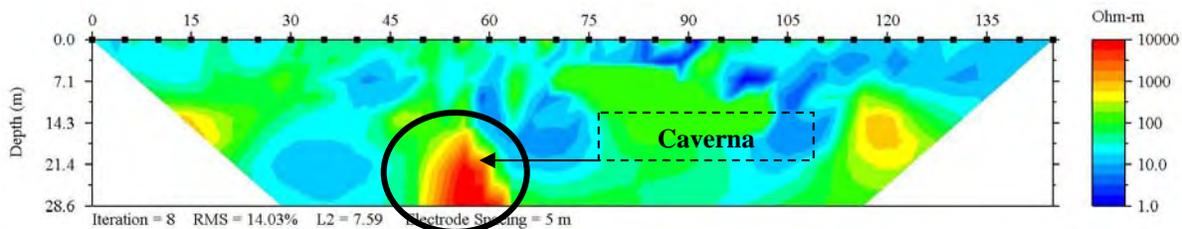


Figura 5.11 Imagen o sección eléctrica bidimensional de la calle Guacamaya.

### 5.4.6 Perfil 3 Calle Lerdo de Tejada.

Este perfil ubicado en forma casi paralela a 80 metros de distancia del primer perfil, se utilizaron 36 electrodos con una separación de 5 metros cubriendo una distancia horizontal de 175 metros. Para la construcción de este perfil se utilizaron 28 electrodos separados 5 metros para cubrir 135 metros iniciales y posteriormente se realizaron dos corrimientos de cuatro electrodos cada uno, separados 5 metros para cubrir 40 metros más y así obtener un perfil de 175 metros.

En la Figura 5.12 se muestra la imagen eléctrica obtenida y como se puede observar, el posible túnel o caverna se encuentra aproximadamente al centro del perfil,  $x = 80$  metros aproximadamente y a una profundidad del orden de 16 metros. En el extremo superior izquierdo del perfil se detecta una zona de baja resistividad que coincide con una zona saturada con agua. Esta anomalía se encuentra situada a  $x = 40$  metros y a una profundidad del orden de 10 metros.

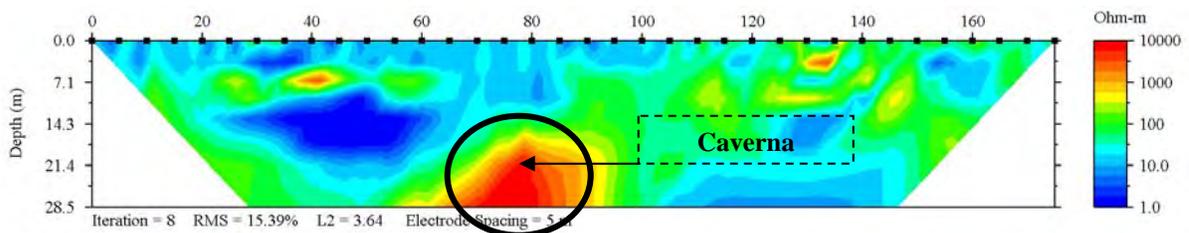


Figura 5.12 Imagen o sección eléctrica bidimensional de la calle Lerdo de Tejada.

### 5.4.7 Perfil 4 Calle Pedro Cavilha.

Este perfil ubicado en forma casi paralela a 120 metros de distancia aproximadamente del primer perfil, se utilizaron 28 electrodos con una separación de 5 metros cubriendo una distancia horizontal de 135 metros.

En la Figura 5.13 se muestra la imagen eléctrica obtenida y como se puede observar, el posible túnel o caverna no aparece lo cual indica posiblemente que el túnel ya no atraviesa esta calle. Se observan valores de resistividad del medio de 50 y 100 ohm-m y dos posibles anomalías aproximadamente al centro del perfil,  $x = 75$  metros y otra de dimensiones menores ubicada en  $x = 35$  metros y a una profundidad del orden de 10 metros. Estas posiblemente se puedan asociar a pequeñas cavidades.

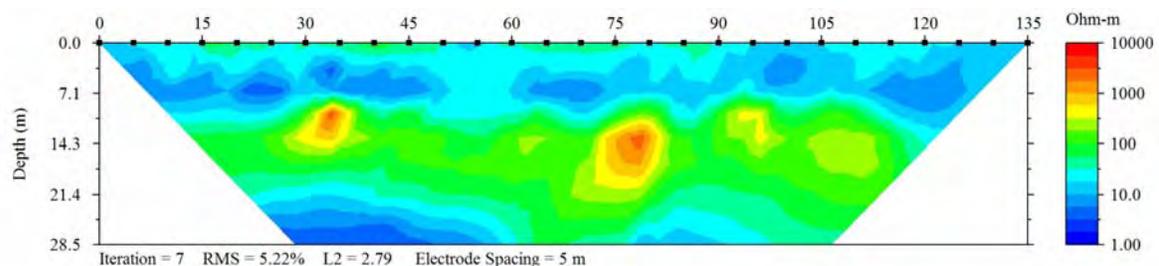


Figura 5.13 Imagen o sección eléctrica bidimensional de la calle Pedro Cavilha.

En la Figura 5.14 se representan agrupadas las imágenes eléctricas de los cuatro perfiles 2D, indicando la posible trayectoria del túnel que al parecer produce una anomalía que puede seguirse con cada uno de los perfiles descritos anteriormente. En base a esta anomalía se sugirió realizar un estudio de TRE 3D en superficie con el propósito de darle seguimiento al túnel y ver si tiene continuidad o son cavidades locales.

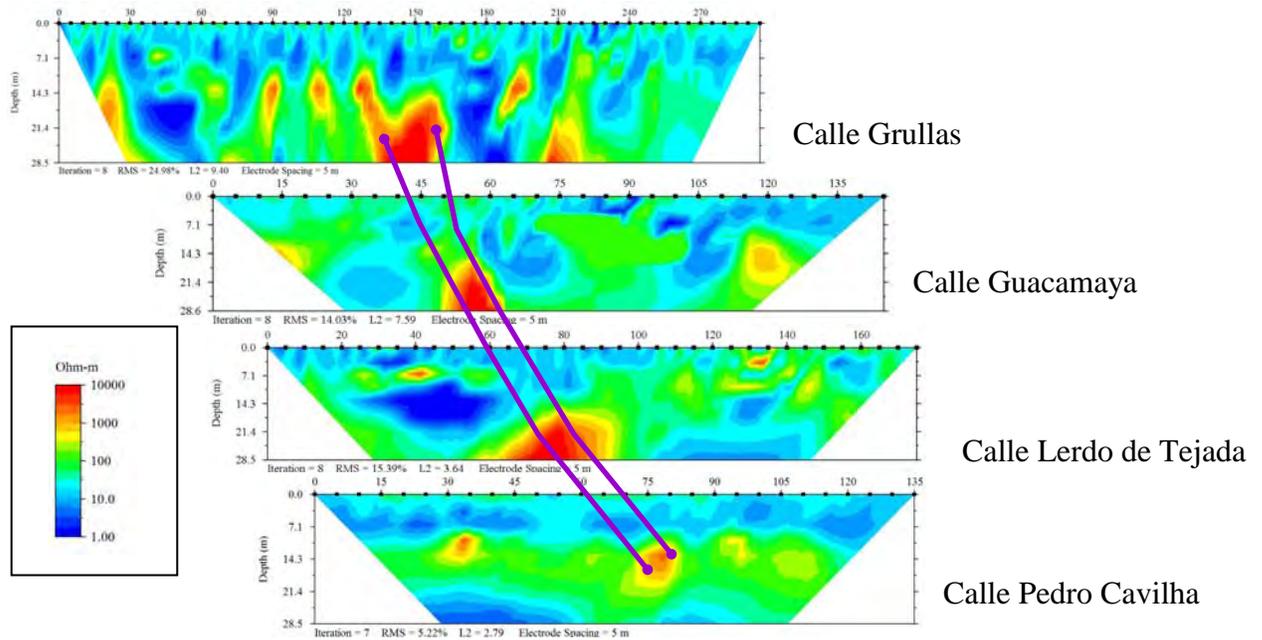


Figura 5.14 Imágenes o secciones eléctricas bidimensionales casi paralelas de cuatro calles de la colonia Golondrinas en la Delegación Álvaro Obregón, indicando la posible trayectoria del túnel.

### 5.5 Segunda Etapa, descripción de la TRE 3D de superficie.

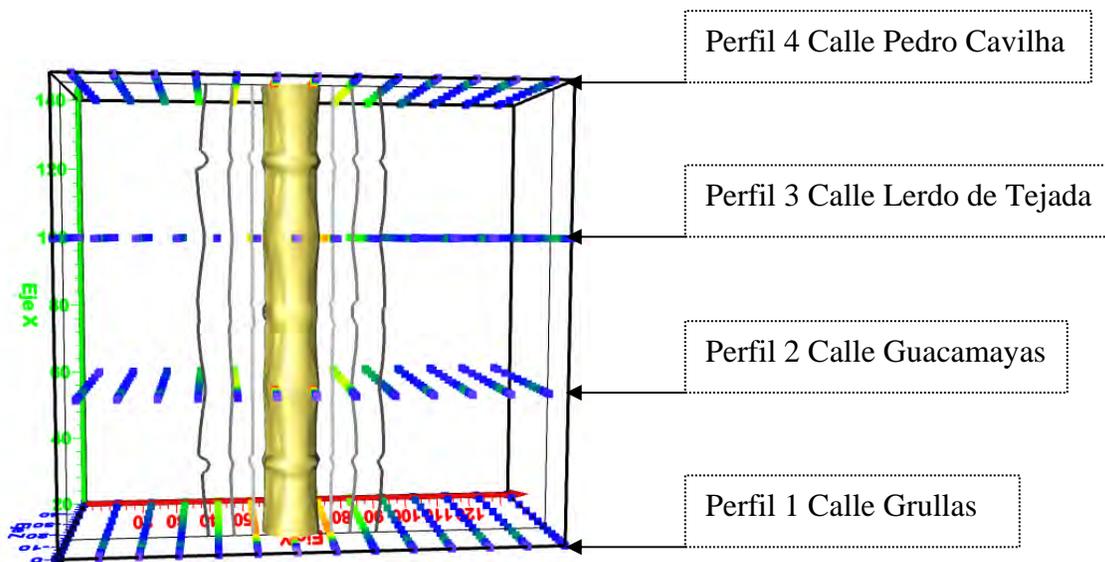
Como se describió en el Capítulo 4 sección 4.1 TRE 3D en superficie los datos de esta etapa fueron procesados con el programa RES3DINV y posteriormente visualizados con el programa VOXLER.

En la construcción de la TRE 3D superficial se utilizó una rejilla de cuatro líneas separadas 40 metros, cada línea estuvo compuesta con 28 electrodos y separados 5 metros. El arreglo utilizado fue dipolo-dipolo. Esta TRE 3D se llevó a cabo con la finalidad de mapear la continuidad y longitud del túnel por debajo de las construcciones.

La disposición de los cuatro perfiles se observa en la figura 5.15. El conjunto de los cuatro perfiles de TRE 3D permiten construir con el método de roll-along una malla de 28 por 4 con líneas orientadas en la dirección x y un sistema multi-electrodo con el cual se obtuvieron un total de 2714 datos.

Se puede observar que los perfiles no son paralelos y además el espaciamiento es mucho más grande que el espaciamiento entre electrodos, para que las mediciones fueran afectadas lo menos posible se utilizó un estudio 3D ideal el cual se construye con los electrodos dispuestos en forma de malla rectangular, y con mediciones en todas las direcciones posibles, es decir, a lo largo de las líneas de cuadrícula así como en diferentes ángulos a la líneas de la rejilla.

En la inversión el modelo 3D fue dividido en  $73 \times 27 \times 16$  bloques lo cual equivale a un total de 1188 bloques del modelo y de 11 capas. Las dimensiones horizontales de los bloques en el área de estudio fueron de 135 x 120 m, la profundidad a la última capa fue de 35.53 a 42.61 metros. El algoritmo de inversión utilizado fue el de mínimos cuadrados el cual produce un suavizado uniforme en las tres direcciones espaciales. Un modelo inicial de semiespacio homogéneo. Un factor de amortiguamiento  $\lambda$  de 0.15. La integración de toda la información aporta una imagen tridimensional como la que se muestra en las Figuras 5.15 y 5.16.



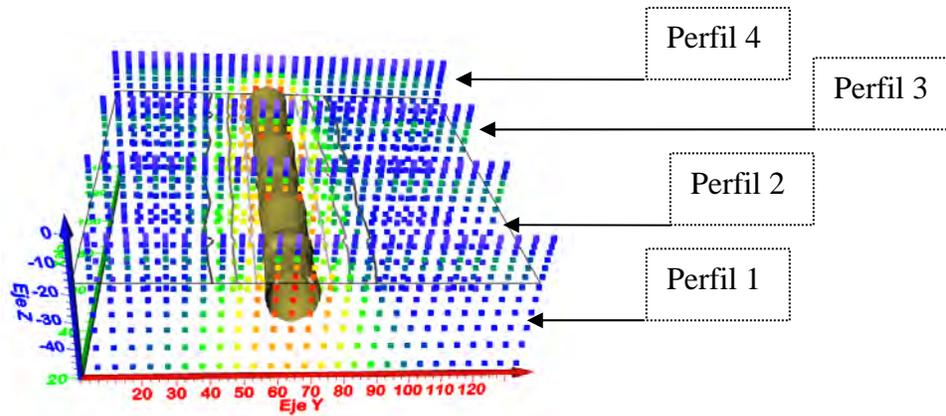


Figura 5.15 Representación de la malla construida con cuatro perfiles utilizando la técnica de roll-along.

La imagen eléctrica 3D que se obtuvo del túnel es una interpretación razonable del subsuelo (figura 5.16).

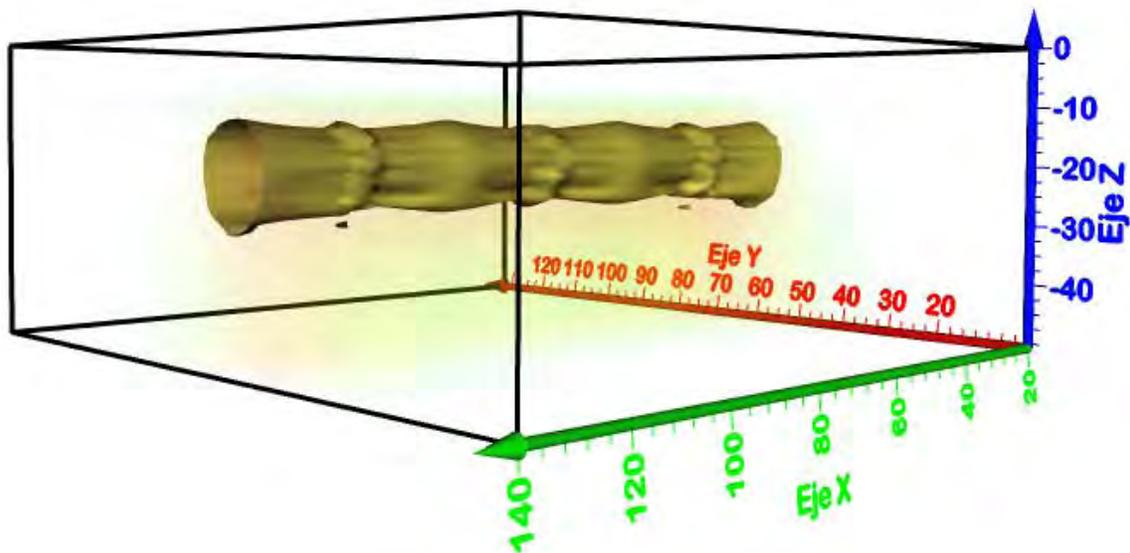


Figura 5.16 Cubo de resistividad del túnel localizado con la TRE 3D en superficie.

### 5.5.1 Resultados

Una vez interpretados los datos geofísicos se procedió a indicar la ubicación del lugar de perforación para demostrar la existencia del probable túnel con una profundidad de  $\pm 16$  metros mediante la excavación de una lumbrera. La excavación de esta lumbrera se realizó con herramientas manuales ligeras, tales como picos y palas, de sección rectangular 1.50 x 2.50 metros con 17 metros de profundidad. Con la excavación se localizó el túnel a 16.50 metros de profundidad, respecto al nivel de la calle (Figura 5.17)



Figura 5.17 Fotografías del aspecto exterior de la lumbrera de sección rectangular la cual se utilizó para tener acceso al túnel.

La perforación directa señaló las características de la sección estratigráfica del sitio las cuales se encontraron como sigue:

***Relleno heterogéneo*** (cascajo, principalmente basura)

### ***Lahar***

Material de color gris rojizo, formado por fragmentos de líticos (rocas) embebidos en una matriz areno-limosa, los primeros son grises, de forma equigranular y angulosos, de composición andesítica, duros, compactos y bien cementados a la matriz areno-limosa. Esta matriz es de color gris-rojizo de fragmentos equigranulares de angulosos a semiredondeados, de composición andesítica-dacítica, consolidada y masiva, la proporción de líticos y la matriz areno limosa es de 40 % por 60%. Es aparentemente estable, de origen vulcanosedimentario, con densidad media, porosa y permeable.

### ***Toba limo arenosa***

Esta capa subyace a la arena pumítica, es de color pardo oscuro con textura piroclástica, estructura granular constituido por fragmentos del tamaño de limo y de la arena, ambos de composición andesítica a dacítica, la forma de la arena es subangulosa, se encuentra húmeda, compacta, consolidada, con densidad baja a media, porosa y de permeabilidad media a baja. El origen del material es vulcanosedimentario. Esta roca se encuentra sobre y subyacente de la arena pumítica.

### ***Arena pumítica.***

La capa u horizonte más importante, que da origen a la problemática de riesgo, es precisamente la arena pumítica, la cual presenta un color pardo claro, beige o blanquecino, de textura piroclástica, estructura granular, densidad baja a muy baja, su composición es de pómez (vidrio volcánico ácido) y fragmentos líticos de composición andesítica, embebidos en una matriz discreta limosa de igual composición, el tamaño de la arena es mediana, la forma de las partículas arenosas son equidimensionales de subangulosas a angulosas. Su origen es vulcanosedimentario, pues presenta una estructura de depósito denominada estratificación cruzada, demostrando con ello, el ambiente de depósito aluvial (sedimentario). Esta estructura es visible gracias al contraste entre los estratos delgados e incluso laminaciones de diversas tonalidades claras y oscuras que se cortan y cruzan con diferentes orientaciones. Esta capa se encuentra sobre y subyacida por capas de tobas limoarenosas. La arena es porosa y de permeabilidad alta a muy alta, poco consolidada y poco compactada, de fácil desintegración, ya que se desmorona rápidamente con una presión o fuerza de baja intensidad. La proporción entre la arena y la matriz limosa es de 85% a 15%. Obviamente, este horizonte como otros fueron explotados como mantos erráticos de arena pumítica dejando los túneles de las minas.

Las dimensiones del túnel fueron de 80 metros de largo por 5 metros de ancho y una profundidad al techo de 16 metros. El “piso” del túnel es el relleno arenoso, mientras que el techo esta constituido por la toba limoarenosa. Dentro de este se detectaron varios bloques desprendidos de pared y techo con dimensiones importantes de 0.30 a 0.40 metros de longitud. Tampoco se encontraron indicios de zonas con contenido de agua.

Las siguientes fotografías (Figura 5.18) muestran la existencia del túnel a diferentes posiciones en el interior de este.

a)



b)



c)



d)



Figura 5.18 Fotografías que muestran diferentes ubicaciones a lo largo del túnel, a) inicio del túnel, b) aproximadamente a los 15 metros, c) aproximadamente a los 40 metros y d) cerca del final.

### 5.5.2 Comparación.

Los resultados de inversión de los perfiles 2D y el cubo 3D se comparan favorablemente en la localización del túnel. El proceso de inversión bidimensional es relativamente sencillo, requiriendo de un mínimo de datos en la adquisición y el procesado, muchas veces la información a través de las imágenes se obtiene rápidamente. Las imágenes revelaron la existencia del posible túnel pero no aseguraban su continuidad.

Las inversiones tridimensionales muestran excepcional reconstrucción de las anomalías en el subsuelo y la asociación a las estructuras geológicas. El cubo de resistividad ayudo a revelar la continuidad del túnel. La desventaja de la aplicación de la técnica se da en la complicada adquisición de un gran número de datos en campo, lo cual se traduce en un mayor tiempo y esfuerzo, así como en el tratamiento para la inversión de estos.

---

## CONCLUSIONES.

El avance tecnológico de los equipos de adquisición de datos y de cómputo ha propiciado que los métodos geofísicos hagan uso de las técnicas de Tomografía en particular aquellas utilizadas en pozos. Como se indico a lo largo de esta Tesis dependiendo de los arreglos utilizados en la adquisición de datos, las tomografías pueden ser en secciones bidimensionales o tridimensionales.

### a) Para el caso de secciones 2D:

Se utilizaron cinco arreglos de electrodos con tres tipos de configuraciones de pozos para determinar su efectividad en las imágenes eléctricas generadas.

1) Las imágenes obtenidas con los arreglos polo-polo, polo-dipolo, dipolo-dipolo (AM-BN) y Gradiente con las configuraciones de pozo a pozo resultaron de resolución aceptable. Las mejores imágenes fueron obtenidas con los arreglos polo-polo, polo-dipolo y dipolo-dipolo (AB-MN) cuando se utilizaron dos pozos a superficie. Estos arreglos proporcionan un mayor número de datos de resistividad lo que indica que a mayor número de datos corresponde una mejor resolución en las imágenes eléctricas. Como se puede apreciar en particular en el arreglo dipolo-dipolo (AB-MN) las imágenes se resolvieron mucho mejor cuando se incorporaron los electrodos de superficie a la configuración pozo a pozo. No se recomienda utilizar la configuración de un pozo a superficie para cualquier tipo de arreglo debido a que las imágenes son muy deficientes, las anomalías aparecen movidas, deformadas o sencillamente no aparecen.

2) Los arreglos de dos y tres electrodos, indistintamente de la configuración de pozo, presentan el gran inconveniente de necesitar uno o dos electrodos remotos, lo cual implica un problema práctico, sobre todo en el caso de estudios urbanos. También es complicado colocar electrodos en superficie por lo que es recomendable recurrir a los arreglos de pozo a pozo que contengan lo cuatro electrodos para la adquisición de datos. Debido a esto se experimentaron con arreglos como el dipolo-dipolo (AM-BN) y Gradiente los cuales demostraron buenas resoluciones en las imágenes lo que los hacen dos arreglos atractivos para realizar estudios de pozo a pozo.

3) Las configuraciones de pozo a pozo dipolo-dipolo AM-BN, AB-MN y gradiente tienen como ventajas que: (i) no hay necesidad de colocar electrodos remotos, (ii) la reciprocidad es completamente satisfactoria, (iii) la sensibilidad se ajusta con los diferentes espaciamentos, (iv) no se colocan electrodos en superficie y (v) fácil adquisición de datos de campo en zonas urbanas.

4) También se concluye que cualquier tipo de arreglo con su respectiva configuración de pozo mejora la resolución cuando:

- a) se incrementan el número de electrodos, como en los ejemplos de dos pozos a superficie.
- b) los cuerpos o anomalías a ser mapeadas están ubicados dentro de las trayectorias de los rayos, al centro entre los dos pozos o cerca del arreglo de electrodos.
- c) el contraste de resistividad entre el cuerpo o los cuerpos y el medio es alto.

---

5) En particular la resolución de las imágenes eléctricas obtenidas con el algoritmo EarthImager 2D depende directamente del número de electrodos que tenga el arreglo, lo que directamente determina el número de datos.

**b) Para el caso de TRE 3D en superficie:**

- 1) Es particularmente útil para resolver heterogeneidades volumétricas complejas en el subsuelo.
- 2) Es necesario disponer los electrodos en forma de malla rectangular con un espaciamiento constante entre ellos.
- 3) Todos los arreglos analizados son igualmente recomendables, debido a que tienen una pérdida mínima de datos en los extremos de la rejilla lo cual proporciona una mayor cobertura horizontal.
- 4) Los cubos eléctricos construidos con rejillas de 8x8 (64 electrodos) y de 11 x 11 (122 electrodos) para cualquier arreglo, presentan una resolución de buena calidad, tanto en ubicación espacial como en sus dimensiones.

No se recomienda utilizar el arreglo wenner-schlumberger para este tipo de estudios debido a que los cubos generados con las rejillas de 8x8 y 11x11 son muy deficientes.

**c) Para el caso de TRE 3D con pozos:**

Para el caso de análisis de TRE 3D en pozo se propusieron los arreglos polo-polo, polo-dipolo y dipolo-dipolo (AB-MN) cada uno con la configuración de cuatro pozos.

- 1) En base a las observaciones hechas en los cubos 3D sintéticos se concluye que cualquiera de los tres arreglos propuestos, con una configuración de cuatro pozos, mejora la resolución cuando:
  - a) se incrementan el número de electrodos en todos los pozos.
  - b) cuando los cuerpos o anomalías a ser mapeadas estén ubicados dentro de las trayectorias de los rayos al centro entre los cuatro pozos.
  - c) cuando se conjuntan los estudios 3D de superficie con TRE de pozo 3D
- 2) Para los arreglos de dos y tres electrodos al igual que para la TRE de pozo 2D existe el gran inconveniente de necesitar uno o dos electrodos remotos, en la práctica implica un problema sobre todo en el caso de estudios urbanos.
- 3) De acuerdo con nuestras observaciones los arreglos de dos, tres y cuatro electrodos definen de manera excelente las estructuras del subsuelo.

**d) Para los ejemplos prácticos:**

1) En el caso del delta de Llobregat a pesar que los datos no presentan mucho contraste se logró definir de manera clara, utilizando TRE 2D en pozo, las diferentes unidades geológicas de las que esta compuesto el delta: sedimentos detríticos del frente deltaico, Prodelta y un acuífero inferior con profundidades de interfase de 5, 15 y 27 metros, respectivamente.

2) En el caso de Álvaro Obregón el haber hecho extensivo el trabajo de las secciones bidimensionales a la TRE 3D en superficie definió de manera más precisa la localización y extensión del túnel, encontrándose su techo a una profundidad de 16 metros, un diámetro de alrededor de 5 metros y con una longitud total de 80 metros aproximadamente.

3) Las dos técnicas de Prospección Eléctrica muestran resultados muy satisfactorios para los dos estudios, con ambas técnicas se pudo comprobar que sirven para identificar y localizar bien las estructuras.

Anexo a los procesamientos de inversión de datos, se puede decir que en cuanto a despliegue gráfico se refiere, el programa SURFER resultó ser una herramienta de gran utilidad para configurar las imágenes eléctricas de los datos de resistividad 2D invertidos y que el programa VOXLER resultó igualmente útil para configurar los datos de resistividad 3D invertidos.

- 
- Alfano, L., 1962. Geoelectrical prospecting with underground electrodes. *Geophysical Prospecting*, **10**, 290-303.
- Auken, E., and Christiansen, AV., 2004. Layered and laterally constrained 2D inversion of resistivity data. *Geophysics*, **69**, 752-761.
- Beard, L. B., Hohmann, G. W., and Tripp, A. C., 1996. Fast resistivity/ip inversion using a low contrast approximation. *Geophysics*, **61**, 169–179.
- Claerbout, J.F. and Muir, F., 1973. Robust modeling with erratic data. *Geophysics*, **38**, 826-844.
- Coggon, H. J., 1971. Electromagnetic and Electrical Modeling by the Finite Element Method. *Geophysics*, **36**, 132-155.
- Constable, S.C., Parker, R.L. and Constable, C.G., 1987. Occam's inversion : A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, **52**, 289-300.
- Chiocci F.L., Ercilla G. y Torres J., 1997. *Sedimentary Geology*, **112**, 195-217.
- Dahlin, T. and Loke, M.H., 1997. Quasi-3D resistivity imaging-mapping of three dimensional structures using two dimensional DC resistivity techniques. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Meeting of the Environmental and Engineering Geophysical Society. 143-146.
- Daily, W. and Owen, E, 1991. Cross-borehole resistivity tomography. *Geophysics*, **56**, 1228-1235.
- Daily, W., A. Ramirez, D. LaBrecque and J. Nitao, 1992. Electrical Resistivity Tomography of Vadose Water Movement, *Water Resources Research*, v. **28**, no. 5, 1429-1442.
- Daniels, F. and Alberty, R.A., 1966. *Physical Chemistry*. John Wiley and Sons, Inc.
- deGroot-Hedlin, C. and Constable, S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, twodimensional models form magnetotelluric data. *Geophysics*, **55**, 1613-1624.
- deGroot-Hedlin C., 2000. Smooth inversion of induction logs for conductivity models with mud filtrate invasion, *Geophysics*, **65**, 1468-1475.
- Dey, A. and Morrison, H.F. 1979a. Resistivity modeling for arbitrary shaped two-dimensional structures. *Geophysical Prospecting* **27**, 1020-1036.
- Dey, A. and Morrison, H.F., 1979b. Resistivity modeling for arbitrarily shaped three-dimensional shaped structures. *Geophysics* **44**, 753-780.

- 
- Edwards, L. S., 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced polarization. *Geophysics*, **42**, 1020-1036.
- Ellis, R.G. and Oldenburg, D.W., 1994a. Applied geophysical inversion: *Geophysical Journal International*, **116**, 5-11.
- Ellis, R.G. and Oldenburg, D.W., 1994b. The pole-pole 3-D DC-resistivity inverse problem: a conjugate gradient approach. *Geophys. J. Int.*, **119**, 187-194.
- Font, J., Julia, A.; Rovira, J.; Salat, J. y Sanchez-Pardo, J., 1987. *Acta Geologica Hispanica*, 21-22, 483-489.
- Inman, J.R., 1975. Resistivity inversion with ridge regression. *Geophysics*, **40**, 798-817.
- Kufman, A.A., 1992. *Geophysical field theory and method, part A*. Academic Press.
- Keller G.V. and Frischknecht F.C. 1966. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press Inc., Oxford.
- Kemna, A., Binley, A., Ramirez, A., and Daily, W., 2000. Complex resistivity tomography for environmental applications. *Chemical Engineering Journal*, **77**, 11–18.
- Kemna, A., Binley, A., and Slater, L., 2004. Crosshole ip imaging for engineering and environmental applications. *Geophysics*, **69**(1), 97–107.
- Koefoed O., 1979. *Geosounding Principles 1: Resistivity sounding measurements*. Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam.
- LaBreque, D. J. and Ward, S. H., 1990. Two-dimensional cross-borehole resistivity model fitting. In S.Ward, editor, *Geotechnical and environmental geophysics, volume III*, pages 51–74. *Soc. Expl. Geophys.*
- Li Y. and Oldenburg D.W. 1992. Approximate inverse mappings in DC resistivity problems. *Geophysical Journal International* **109**, 343-362.
- Li, Y. and Oldenburg, D. W., 1999. 3-D inversion of dc resistivity data using an l-curve criterion. In 69th Annual Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 251–254.
- Lines L.R. and Treitel S. 1984. Tutorial: A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophysical Prospecting*, **32**, 159-186.
- Loke, M.H., 1994. *The inversion of two-dimensional resistivity data*. Unpubl. PhD thesis, Un. Of Birmingham.
- Locke, M. H., 1995. RES2DMOD version 2.20: A 2D resistivity forward modeling.

- Loke M.H. and Barker R.D., 1996a. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, **44**, 131-152.
- Loke M.H. and Barker R.D., 1996b. Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion. *Geophysical Prospecting*, **44**, 499-523.
- Lowry, T., Allen, M. B., and Shive, P. N., 1989. Singularity removal: A refinement of resistivity modeling techniques. *Geophysics*, **54**, 766-774.
- Maldonado, A., Alonso, B., Diaz, J.I., Ferran, M., Vazquez, A, Saonz-Amor, E., 1986. *Memoria y hoja 41-42 (Tortosa-Tarragona) del Mapa geológico de la Plataforma Continental española y zonas adyacentes*. Madrid.
- Marqués, M.A., 1984. *Les formacions quaternàries del delta del Llobregat*. Institut d'Estudis Catalans, Barcelona. 208 p.
- McGillivray, P.R. and Oldenburg, D.W., 1990. Methods for calculating Frechet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem: A comparative study. *Geophysical Prospecting*, **38**, 499-524.
- Merkel, R.H., 1971. Resistivity analysis for plane-layer halfspace models with buried current sources. *Geophysical Prospecting*, **19**, 626-639.
- Merkel, R.H. and Alexander, S.S., 1971. Resistivity analysis for models of a sphere in a halfspace with buried current sources. *Geophysical Prospecting*, **19**, 640-651.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP, 1966). *Estudio de los recursos hidráulicos totales de las cuencas de los ríos Besós y Bajo Llobregat*. CAPOSGOP. 4 vol., Barcelona.
- Mufti, I. R., 1976. Finite Difference resistivity modeling for arbitrarily shaped two dimensional structures, *Geophysics*, **41**, 62-78.
- Newmark, R.L., S. Boyd, W. Daily, R. Goldman, R. Hunter, D. Kayes, K. Kenneally, A. Ramirez, K. Udell, and M. Wilt, 1994. Using geophysical techniques to control in situ thermal remediation, Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP) '94, Boston, Ma. March 27-31, 195-211.
- Newmark, R.L., Daily, W.D., Kyle, K.R., and Ramirez, A. L., 1998. Monitoring DNAPL pumping using integrated geophysical techniques: *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, **3**, 7-14.
- Noguera Cáceres José Felipe, 2003. Tesis Doctoral Caracterización de zonas contaminadas por métodos geoquímicos: Área de Gáva – Viladecans (Delta del Llobregat), Universitat Autònoma de Barcelona.

- 
- Olayinka, A.I. and Yaramanci, U., 2000. Use of block inversion in the 2-D interpretation of apparent resistivity data and its comparison with smooth inversion: *Journal of Applied Geophysics*, **45**, 63-82.
- Oldenburg, D. W. and Li, Y., 1994. Inversion of induced polarization data. *Geophysics*, **59**, 1327–1341.
- Oldenburg, D.W. and Li., Y., 1999. Estimating depth of investigation in dc resistivity and IP surveys. *Geophysics*, **64**, 403-416.
- Olivar, A., de Lime, L. and Sharma, M.M., 1990. A grain conductivity approach to shaly sandstones. *Geophysics*, **55**, 1347-1356.
- Park, S.K. and Van, G.P. 1991. Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structures beneath arrays of electrodes. *Geophysics*, **56**, 951-960.
- Pasquare, G., Vezzoli, L. and Zanchi, A., 1987. Morphological and structural model of Mexican Volcanic Belt, *Geofísica Internacional*, **26**, 159-176.
- Pelton W. H., Rijo L., Swift Jr C. M., 1978. Inversion of two dimensional resistivity and induced-polarization data. *Geophysics*, **43**, 788-803.
- Press W. H., Flannery B. P., Teukolsky S. A., Vetterling W. T. Numerical Recipes. Sixth edition. Brooks/Cole Publishing Company. USA.
- Ramirez, A., Daily, W., LaBrecque, D., Owen, E., and Chesnut, D., 1993. Monitoring underground steam injection process using electrical resistance tomography: *Water Resources Research*, **29**, 73–87.
- Ramirez, A., Daily W. and R. L. Newmark, 1995. Electrical resistance tomography for steam injection monitoring and process control, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, v. 0, no. 1, p. 39-51.
- Sasaki, Y., 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, **40**, 453-464.
- Sasaki, Y., 1994. 3-D resistivity inversion using the finite-element method. *Geophysics*, **59**(12), 1839–1848.
- Shima, H., 1992. 2-D and 3-D resistivity imaging reconstruction using crosshole data. *Geophysics*, **55**, 682-694.
- Silvester P.P. and Ferrari R.L., 1990. Finite elements for electrical engineers (2nd. ed.). Cambridge University Press.
- Smith, T., Hoversten, M., Gasperikova, E. and Morrison, F., 1999. Sharp boundary inversion of 2D magnetotelluric data. *Geophysical Prospecting*, **47**, 469-486.

- 
- Snyder, D.D. and Merkel, R. H., 1973. Analytic models for the interpretation of electrical surveys using buried current electrodes. *Geophysics*, **38**, 513-529.
- Spitzer, K., 1995. A 3-d finite-difference algorithm for dc resistivity modeling using conjugate gradient methods. *Geophysical Journal International*, **123**, 903–914.
- Spitzer, K. and Wurmstich, B., 1995. Speed and accuracy in 3d resistivity modeling. In 3D EM Symposium, Ridgefield, Connecticut.
- Sugimoto, Y., 1999. Shallow high-resolution 2-D and 3-D electrical crosshole imaging. *The Leading Edge*, **18**, 1425-1428.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990. *Applied Geophysics* (second edition). Cambridge University Press.
- Tijonov, A.N. and Samarsky, A.A., 1980. *Ecuaciones de la física matemática, segunda edición*, editorial MIR, Moscu.
- Tong, L. and Yang, C., 1990, Incorporation of topography into two-dimensional resistivity inversion. *Geophysics*, **55**, 354-361.
- Tripp, A. C., Hohmann, G. W., and Swift, C. M., 1984. Two-dimensional resistivity inversion. *Geophysics*, **49**(10), 1708–1717.
- Wolke, R. and Schwetlick, H., 1988, Iteratively reweighted least squares algorithms, convergence analysis, and numerical comparisons: *SIAM Journal of Scientific and Statistical Computations*, **9**, 907-921.
- Zhang, J., Mackie, R. L., and Madden, T. R., 1995. 3-D resistivity forward modeling and inversion using conjugate gradients. *Geophysics*, **60**, 1313–1325.
- Zhou, B. and Greenhalgh, S.A., 1997. A synthetic study on cross-hole resistivity imaging with different electrode arrays. *Exploration Geophysics*, **28**, 1-5.
- Zhou, B. and Greenhalgh, S.A., 2000. Cross-hole resistivity tomography using different electrode configurations. *Geophysical Prospecting*, **48**, 887-912.
- Zhou, B. and Greenhalgh, S. A., 2001. Finite element three-dimensional direct current resistivity modelling: Accuracy and efficiency considerations. *Geophys. J. Int.*, **145**, 679–688.