

***PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA MEDIANTE TOMOGRAFIAS EN 3D.***

**EDWIN ALEXANDER CORTÉS ESTUPIÑÁN**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL  
BUCARAMANGA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
FLORIDABLANCA  
2014**

***PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA MEDIANTE TOMOGRAFÍAS EN 3D.***

**EDWIN ALEXANDER CORTÉS ESTUPIÑÁN.**

**Práctica Empresarial como requisito para optar  
al título de Ingeniera Civil**

**Director:  
DIEGO MARTIN OVIEDO SALCEDO  
PhD. Ingeniera Civil**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL  
BUCARAMANGA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
FLORIDABLANCA  
2014**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Bucaramanga, Diciembre de 2014.

*A ti Papa Dios por todas tus bendiciones y ese gran gesto de amor que me Demuestras a diario tomándome de la mano cada vez que pienso que no soy capaz. Impulsándome a lograr con éxito esta fascinante experiencia.*

*A mis padres por ese amor tan grande, paciencia, enseñanzas y apoyo incondicional a lo largo de todos estos años de vida... "Mami, papi lo logramos".*

*A mi hermana por su apoyo, comprensión y consejos; cada vez que necesito de ti siempre estás ahí para mi... "Zoe se nos vienen cosas grandes".*

*A mis profesores, quienes fueron primordiales en el desarrollo de esta etapa en mi vida profesional y personal... "Infinitas gracias, les debo mucho".*

*A mis amigos, que con su cariño, paciencia, apoyo y experiencias me enseñaron a bailar bajo la lluvia y vivir feliz... "los quiero".*

**Alexander Cortés Estupiñán.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Es difícil resumir en una hoja la gratitud que se siente al mirar atrás y ver todos los pasos que se han dado con la ayuda de papa DIOS, me premiaste con los mejores amigos que jamás habría podido merecer, los mejores profesores y con el apoyo incansable de mi familia. Amigos y compañeros de estudio, gracias, ustedes han estado hay siempre que los he necesitado y me han ayudado a crecer como persona. Profesores, su pasión y entrega por enseñar es admirable, sin sus enseñanzas tanto académicas como personales no podría ser quien soy hoy en día. Familia, son ustedes mi ejemplo a seguir, han sido ese pedazo de cielo que DIOS me permitió tener aquí en la tierra, todos y cada uno de ustedes con su ejemplo me han hecho soñar con querer ser algún día como ustedes, los admiro.

Agradezco al Ingeniero Camilo Galvis y la empresa HYDROINGENIERIAS S.A.S. por sus concejos, el voto de confianza y la oportunidad de realizar las prácticas empresariales en las que crecí profesionalmente y conocí personas maravillosas, dando mis primeros pasos en mi vida profesional, al ingeniero Diego Oviedo, por ser mi mentor en este proyecto.

A Aldemar Remolina, quien ha sido mi segundo padre, que a lo largo de mi desarrollo como profesional creyó en mis capacidades y me enseñó que para lograr el éxito se necesita trabajar con compromiso y entrega.

A todas las personas que de una u otra forma contribuyeron en el logro de este reto.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	6
1. OBJETIVOS.....	7
1.1. Objetivo General.....	7
1.2. Objetivos Específicos.....	7
2. ALCANCE.....	8
3. EMPRESA.....	9
3.1. GENERALIDADES.....	9
3.2. PLANEACION ESTRATEGICA DE LA EMPRESA.....	9
3.2.1. MISIÓN.....	9
3.2.2. VISIÓN.....	9
3.2.3. ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL HYDROINGENIERA S.A.S.10	
4. PLAN DE TRABAJO.....	11
4.1. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	11
5. MARCO TEÓRICO.....	12
5.1. INTRODUCCIÓN A LA TEORIA DE PROSPECCIÓN ELÉCTRICA.....	12
5.1.1. PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LAS ROCAS.....	12
5.1.1.1 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	12
5.1.1.2 RESISTIVIDAD APARENTE.....	12
5.1.1.3 CARACTERISTICAS RESISTIVAS DE LOS MATERIALES. ..	13
5.2. MÉTODOS GEOFISICOS.....	15
5.3. PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA.....	16
5.4. TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS DE RESISTIVIDAD.....	18
5.5. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 3D.....	19
5.5.1. INTRODUCCION A TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA EN 3D.....	19
5.5.1.1. MODELO DE RESISTIVIDAD 1D.....	20
5.5.1.2. MODELO DE RESISTIVIDAD 2D.....	21
5.5.1.3. MODELO DE RESISTIVIDAD 3D.....	22
5.5.2. DISPOSITIVOS GEOELÉCTRICOS.....	22
6. METODOLOGÍA.....	25
6.5. INSTRUMENTACIÓN.....	25
6.6. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN.....	28
6.6.1. TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS EN 2D.....	28
6.6.2. PROSPECCIONES ELÉCTRICAS EN 3D.....	32
7. PROCESAMIENTO DE DATOS.....	42
7.5. TEORÍA BÁSICA DE INVERSIÓN.....	42
7.6. PROCESAMIENTO DE DATOS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.....	45
8. APLICACIÓN DEL MÉTODO.....	56
9. CONCLUSIONES.....	68
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

Anexo A. FORMATO DE DATOS .dat.....	72
Anexo B. FORMATO DE DATOS VOXLER.....	75

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Actividades realizadas durante la práctica empresarial. Fuente: Autor. ....	11
Tabla 2. a) Valores de resistividad de los principales minerales constituyentes de las rocas y menas. Tomado de Lakubovskii & Liajov, 1980; b) Rangos de resistividad eléctrica de rocas y sedimentos. Fuente: Palacky, 1987. ....	14
Tabla 3. Características del conjunto de datos. ....	56

## LISTA DE FIGURAS

Figura No 1. Esquema de la estructura organizacional de HYDROINGENIERA S.A.S. Fuente: Autor. ....	10
Figura No 2. Diagrama esquemático del principio básico del circuito de medición de la resistividad eléctrica del subsuelo. Fuente: Yaccup, 2012.....	17
Figura No 3. Los tres diferentes modelos utilizados en la interpretación de las mediciones de resistividad a) Modelo 1D; b) Modelo 2D; c) Modelo 3D. Fuente: Loke, 2000.....	19
Figura No 4. Configuración de la serie polo-polo. Fuente: Loke, 2000. ..	23
Figura No 5. Configuración de la serie polo-dipolo; a) polo-dipolo directo, b) polo-dipolo inverso. Fuente: Loke, 2000.....	23
Figura No 6. Configuración de la serie dipolo-dipolo. Fuente: Loke, 2000.	24
Figura No 7. Equipo utilizado para la medición de los datos de resistividad. Fuente: Manual ABEM (en línea).....	26
Figura No 8. Panel de conexiones del Terrameter LS. Fuente: Manual ABEM (en línea).....	26
Figura No 9. Panel de energía del Terrameter LS. Fuente: Manual ABEM (en línea).....	27
Figura No 10. Arreglo de cables durante la primera estación de mediciones para un levantamiento Roll Along, donde el Cable 1 es excluido. Fuente: Manual ABEM (en línea).....	29
Figura No 11. Conector de cables con conexiones para set de cables 4x21. Fuente: Manual ABEM (en línea).....	30
Figura No 12. Arreglo de cables durante la segunda estación de mediciones para un levantamiento Roll Along. Fuente: Manual ABEM (en línea).....	31
Figura No 13. Arreglo de cables durante la tercera estación de mediciones para un levantamiento Roll Along, donde el Cable 4 es excluido. Fuente: Manual ABEM (en línea).....	32
Figura No 14. Distribución de los electrodos para una adquisición de prospección eléctrica 3D. Fuente: Loke, 2000.....	33
Figura No 15. Empleo del sistema “Roll-Along” para una malla de 8x5 en la dirección Y. Fuente: Loke, 2000. ....	34
Figura No 16. Empleo del sistema “Roll-Along” para una malla de 8x5 en la dirección y. Fuente: Loke, 2000.....	35
Figura No 17. Prospección eléctrica 3D a través de perfiles paralelos. Fuente: Loke, 2000.....	36
Figura No 18. Método “Roll-Along” malla de 8x8 a) Primera estación, b) segunda estación. Fuente: Autor. ....	39
Figura No 19. Método “Roll-Along” malla de 8x8 c) tercera estación, d) cuarta estación. Fuente: Autor.....	41

Figura No 20. Los modelos usados en la inversión. (a) Modelo convencional donde los anchos de los bloques rectangulares son iguales a los espaciamiento de electrodo unitario en las direcciones x e y. (b) Un modelo donde el techo de pocas capas se divide por la mitad, ambos verticalmente y horizontalmente, para proporcionar la mejor resolución. (c) Un modelo donde los bloques se dividen en direcciones de la horizontal pero no en la dirección vertical. Fuente: Loke 2000. ....	43
Figura No 21. Opción del RES3DINV para leer archivos .dat. Fuente: Autor. ....	46
Figura No 22. Opción de cambios de la configuración. Fuente: Autor. ....	48
Figura No 23. Listado de sub-opciones de ajustes del modelo de la cuadrícula. Fuente: Autor. ....	48
Figura No 24. Listado de profundidad de las capas RES3DINV. Fuente: Autor. ....	49
Figura No 25. Ajustes de filtros y amortiguamiento RES3DINV. Fuente: Autor. ....	50
Figura No 26. Optimización del factor de amortiguamiento. Fuente: Autor.	51
Figura No 27. Cuadro de diálogo de una inversión robusta. Fuente: Autor.	51
Figura No 28. Cuadro de dialogo del tipo de método de optimización. Fuente: Autor. ....	52
Figura No 29. Cuadro de diálogos para modelo de referencias. Fuente: Autor. ....	53
Figura No 30. Cuadro de los rangos límites. Fuente: Autor. ....	53
Figura No 31. Cuadro de dialogo para escoger el logaritmo de resistividad aparente. Fuente: Autor. ....	54
Figura No 32. Listado de opciones para los ajustes del modelamiento directo. Fuente: Autor. ....	54
Figura No 33. Listado de las características de datos a procesar. Fuente: Autor. ....	56
Figura No 34. Resultado de los Layers de la inversión del conjunto de datos, para una malla de 8x8. Fuente: Autor. ....	57
Figura No 35. Cuadro de textos de inversión a) listado de características de inversión con datos de iteraciones, b) características de los parámetros de inversión. Fuente: Autor. ....	57
Figura No 36. Conjunto de sub-opciones de la opción "Display". Fuente: Autor. ....	58
Figura No 37. Opción de la visual del modelo. Fuente: Autor. ....	58
Figura No 38. Display de la inversión de los modelos vista horizontal plano XZ. Fuente: Autor. ....	59
Figura No 39. Display de la inversión de los modelos vista vertical plano XZ. Fuente: Autor. ....	60

Figura No 40. Display de la inversión de los modelos vista horizontal plano ZY. Fuente: Autor. ....	60
Figura No 41. Display de la inversión de los modelos vista vertical plano YZ. Fuente: Autor. ....	61
Figura No 42. Listado del menú de la opción de Display, para exportar los archivos de inversión. Fuente: Autor. ....	62
Figura No 43. Lectura de los datos de la inversión en formato Voxler. Fuente: Autor. ....	63
Figura No 44. Procesamiento grafico en Voxler, con las opciones activadas de cuadro delimitador, mostrar los ejes X, Y y Z y Gridder y Begin Gridder. Fuente: Autor. ....	64
Figura No 45. Opción de VolRender. Fuente: Autor. ....	65
Figura No 46 opción Isosurface con un isovalores de a) 16,57 Ohm.m, b) 23, 36 Ohm.m, c) 27,35 Ohm.m, d) 32,53 Ohm.m, e) 36, 12 Ohm.m y f) 65,24 Ohm.m. Fuente: Autor. ....	66
Figura No 47. Opción de Orthoimage con intersecciones en los planos a) XZ y XY, b) XZ y YZ. Fuente: Autor. ....	67
Figura No 48. Opción de Orthoimage con intersecciones en varios planos. Fuente: Autor. ....	67



## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TÍTULO:** PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA MEDIANTE TOMOGRAFÍAS EN 3D.

**AUTOR(ES):** Edwin Alexander Cortés Estupiñán.

**FACULTAD:** Facultad de Ingeniería Civil.

**DIRECTOR(A):** Diego Martin Oviedo Salcedo.

## RESUMEN

El presente trabajo de grado describe el procedimiento de medición de los valores de resistividad eléctrica del subsuelo, estableciendo una metodología para el levantamiento de tomografías eléctricas de resistividad tanto en 2D como en 3D. Además de esto la conversión de valores de resistividad aparente a valores de resistividad real usando el software de inversión RES3DINVx64 (versión 4.00).

Enunciando el procedimiento utilizado para el procesamiento de los datos, señalando la inversión robusta como método de inversión, y el método de elementos finitos para el cálculo del modelo directo, como parámetros de inversión ofreciendo resultados óptimos para la interpretación. El proceso de inversión de los datos se basa en la teoría explicada por Loke & Barker (1996), la cual implementa una versión iterativa basada en un método Newtoniano que tarda más tiempo en el cálculo por medio de una técnica de optimización no lineal de mínimos cuadrados.

**PALABRAS CLAVES:** Resistividad aparente, Tomografías eléctricas, método de Mínimos cuadrados, Elementos finitos.



## GENERAL ABSTRACT OF DEGREE WORK

**TITLE:** GEOELECTRICAL PROSPECTING USING 3D TOMOGRAPHY.

**AUTHOR(S):** Edwin Alexander Cortés Estupiñán.

**FACULTY:** Civil Engineering Faculty.

**DIRECTOR:** Diego Martin Oviedo Salcedo.

### ABSTRACT

The main aim of this work of end of degree is to describe the electrical resistivity subsurface values measuring procedure, setting up a methodology for electrical resistivity scan surveying in 2D and 3D. Besides the conversion of values from apparent resistivity to real resistivity by using investment software RES3DINVx64 (Version 4.0).

Formulating the procedure used for data processing, pointing the robust investment like an investment method, and the finite elements method for direct model calculating, like investment parameters, providing optimal results for interpretation. The data processing process is based on the theory explained by Loke & Barker (1996), Which implements a version iterative based on a Newtonian method that it takes more time in the calculation by means of an optimization technique of nonlinear least squares.

**KEY WORDS:** Apparent resistivity, electrical tomography, the method of least squares, finite element.

## INTRODUCCIÓN.

HRYDROINGENIERIA S.A.S. es una empresa Colombiana de servicios multi-disciplinarios, en ingeniería de obras civiles, consultoría y estudios Geofísicos, Hidrológicos, Hidráulicos, Hidrogeológicos, Geotécnicos y Gestión y Prevención de Inundaciones. La cual tiene como principio el atender las necesidades del cliente y transformarlas en productos ejecutables y confiables a través de un desempeño planificado, organizado y con innovación en tecnologías para entidades tanto privadas como públicas.

La Práctica Empresarial desarrollada en HRYDROINGENIERIA S.A.S. tuvo como propósito fundamental el desarrollo de una metodología y procesamiento de prospecciones geoeléctricas en 3D

El incluir herramientas computacionales que mejoren la comprensión de los conceptos y de esta manera tener aplicaciones prácticas, permite emplear las competencias como método de evaluación dentro de los procesos de aprendizaje en la ingeniería civil.

En la práctica de la ingeniería civil es común la exploración del terreno mediante técnicas directas, como los sondeos, ya sea por percusión y lavado o por rotación, procedimientos que son normalmente costosos; en muy pocos proyectos se emplean las técnicas de prospección geofísica, en particular la geoeléctrica, debido, en gran medida, al desconocimiento de esta valiosa herramienta. Las obras de ingeniería demandan de técnicas que generen información del subsuelo eficiente en términos de la calidad, y de tiempo y costo de obtención de la misma. La posibilidad de alcanzar este objetivo se encuentra en gran medida en la aplicación de métodos geofísicos; ya que las técnicas de geofísica aplicada están orientadas a distinguir formaciones geológicas que se encuentran en una profundidad determinada mediante la medición de un parámetro físico asociado a ellas. Los métodos geofísicos son particularmente útiles cuando existen contrastes bien definidos entre las propiedades de materiales del subsuelo.

En cualquier caracterización de suelo que emplea los métodos de exploración geofísica deben acompañarse con la observación directa en campo y los sondeos mecánicos; los primeros pueden ser muy útiles como guía para determinar la localización de los sondeos mecánicos

En el presente informe se observa la descripción de la metodología desarrollada por el practicante para cumplir con los objetivos propuestos, fundamentos teóricos y prácticos; adicionalmente la aprehensión de software que sirven de apoyo para la ejecución del mismo.

## **1. OBJETIVOS.**

### **1.1. Objetivo General.**

Determinar una metodología y procesamiento de datos de una prospección geoelectrica de tomografía de resistividad eléctrica en 3D

### **1.2. Objetivos Específicos.**

Comprender los principios básicos, metodologías y soluciones que la prospección geoelectrica ofrece al campo de la ingeniería civil

Obtener imágenes en 3D de la variación espacial de la resistividad eléctrica en el subsuelo a partir del procesamiento de datos obtenidos en campo mediante el uso de herramientas computacionales (software RES3DINV).

Determinar el dispositivo electrodico y el espaciado interelectrodico adecuado para la prospección geoelectrica en 3D.

## **2. ALCANCE.**

La práctica empresarial se realizó en la empresa HYDROINGENIERIA SAS por un periodo de cuatro meses, dando inicio el día 14 de Julio del 2014 y finalizando el día 14 de Noviembre del 2014. El alcance principal de este proyecto es la obtención de imágenes en tercera dimensión de la variación espacial de la resistividad eléctrica en el subsuelo a partir del procesamiento de datos haciendo uso de herramientas computacionales.

### **3. EMPRESA.**

#### **3.1. GENERALIDADES.**

**Nombre:** HYDROINGENIERIA S.A.S.

**Website:** <http://www.hydroingenieria.com/>

**Representante legal:** M.Sc. IVÁN CAMILO GALVIS TARAZONA.

**Teléfono:** (7) 6 909587.

**Dirección:** Calle 33 # 8-62; Cañaveral- Florida.

**Ciudad:** Bucaramanga.

**HYDROINGENIERIA S.A.S.** Es una empresa Colombiana de servicios multidisciplinarios, en ingeniería de obras civiles, de consultoría y estudios Geofísicos, Hidrológicos, Hidráulicos, Hidrogeológicos, Geotécnicos y Gestión y Prevención de Inundaciones. La cual tiene como principio el atender las necesidades del cliente y transformarlas en productos ejecutables y confiables a través de un desempeño planificado, organizado y con innovación en tecnologías para entidades tanto privadas como públicas<sup>1</sup>.

#### **3.2. PLANEACION ESTRATEGICA DE LA EMPRESA.**

##### **3.2.1. MISIÓN.**

Brindar servicios de consultoría y asesoría en ingeniería de recursos hídricos, priorizando la excelencia del servicio a través de la organización, motivación y capacidad técnica de nuestro personal, con el fin de lograr la satisfacción del cliente contribuyendo así al desarrollo y progreso del país.

##### **3.2.2. VISIÓN.**

Ser la empresa líder en consultoría de ingeniería de recursos hídricos y ser reconocida por sus valores de rectitud, honradez y profesionalismo en la prestación de nuestros servicios y su compromiso de transformar el país y de preservar el medio ambiente.

---

<sup>1</sup> HYDROINGENIERIA S.A.S. Presentación webside 2014. [en línea]

### 3.2.3. ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL HYDROINGENIERA S.A.S.

**HYDROINGENIERA S.A.S.** Es una empresa en crecimiento, y ha establecido unos rangos y lineamientos para optimizar la transición de la información dependiendo del área que la requiera, por eso cuenta con departamentos especializados en ciertas áreas de conocimientos de la ingeniería civil y geología; cubriendo así la consultoría y estudios que se realizan por parte de la empresa. La *Figura 1* ilustra el esquema organizacional de la empresa.



**Figura No 1. Esquema de la estructura organizacional de HYDROINGENIERA S.A.S.**

Fuente: Autor.

## 4. PLAN DE TRABAJO.

### 4.1. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.

Para el desarrollo de la práctica se planificó una serie de actividades que contribuyen al cumplimiento del alcance y los objetivos generales y específicos trazados. En la *Tabla 1* se mencionan las actividades realizadas.

**Tabla 1.** Actividades realizadas durante la práctica empresarial. Fuente: Autor.

ACTIVIDADES	MES 1.				MES 2.				MES 3.				MES 4.			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
REVISIÓN BIBLIOGRAFICA.	■	■	■	■												
INDUCCIÓN A LAS PROSPECCIONES GEOELECTRICAS EN 2D.			■	■	■											
DETERMINACION DE METODOLOGIA DE PROSPECCIONES GEOELECTRICAS EN 3D.					■	■	■	■	■	■						
APOYO EN LAS LABORES DE LA EMPRESA.					■	■	■			■	■	■				
PROCESAMIENTO Y MODELACION EN 3D DE DATOS.												■	■	■	■	
ELABORACION DE INFORME.			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

## 5. MARCO TEÓRICO

### 5.1. INTRODUCCIÓN A LA TEORIA DE PROSPECCIÓN ELÉCTRICA.

#### 5.1.1. PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LAS ROCAS

##### 5.1.1.1 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.

La resistividad eléctrica,  $\rho$ , de cualquier material se determina numéricamente por la resistencia que se obtiene en un centímetro cubico de ese material, tomado en forma de cubo, a la corriente eléctrica dirigida perpendicularmente a una de las aristas de ese cubo.

La resistividad se mide en Ohm\*centímetro u Ohm\*metro. En la exploración eléctrica se utiliza el Ohm\*metro, por ser una unidad mayor (1 Ohm\*m = 100 Ohm\*cm).

La magnitud inversa de la resistividad,  $\gamma = 1/\rho$ , se denomina conductividad eléctrica y su unidad es el siemens por metro (S/m).

##### 5.1.1.2 RESISTIVIDAD APARENTE.

Mediante la Ley de Ohm es posible calcular la resistividad para un medio homogéneo, cuyo potencial dependerá de la distancia al punto de interés, es necesario un factor geométrico, el cual será la distancia radial a la fuente, dicho factor dependerá de la forma en que se coloquen los electrodos, es decir, el arreglo.

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

Donde R [ $\Omega$ ] y el factor geométrico será  $2\pi R$ , al modificar el arreglo, el factor geométrico será diferente, por lo que se puede expresar como:

$$\rho = k \frac{\Delta U}{I} \quad (1.1)$$

Sin embargo, en la realidad, el medio se comporta de forma heterogénea, por lo que los valores de resistividad serán aparentes ( $\rho_a$ ), es decir, cada medio tendrá diferentes resistividades y espesores los cuales influirán de maneras diferentes en las lecturas obtenidas.

### 5.1.1.3 CARACTERISTICAS RESISTIVAS DE LOS MATERIALES.

A una roca, como conductor de la corriente eléctrica, se le puede considerar como un agregado que consta de tres fases: sólido (minerales), líquido y gas. La resistividad entonces de tal agregado depende de los siguientes factores:

- La resistividad de los minerales que forman la fase solida de la roca.
- La resistividad de los líquidos y gases que rellenan los poros de la roca.
- La temperatura, humedad y porosidad de la roca.
- La textura de la roca, y la forma y distribución de sus poros.
- Los procesos que ocurren en el contacto entre los líquidos de los poros y el mineral.

En la *Tabla 2a* se observa los valores de resistividad de los principales minerales que constituyen las rocas y menas. Como se ve en la misma, la resistividad de los minerales constituyentes de las rocas, entre ellos los minerales del grupo silicatado, es grande oscilando entre  $10^6$  y  $10^{15}$  Ohm\*m. Adicionalmente a esto, en la *Tabla 2b* se indica los rangos de resistividad característicos de las rocas y sedimentos, donde se puede apreciar las notorias diferencias entre los materiales de grano fino (margas, limos, arcillas), los de grano grueso (gravas) y mediano (arenas).

La resistividad de los metales nativos, los cuales poseen enlaces metálicos con gran movilidad de electrones, oscilando entre  $10^{-6}$  y  $10^{-4}$  Ohm\*m.

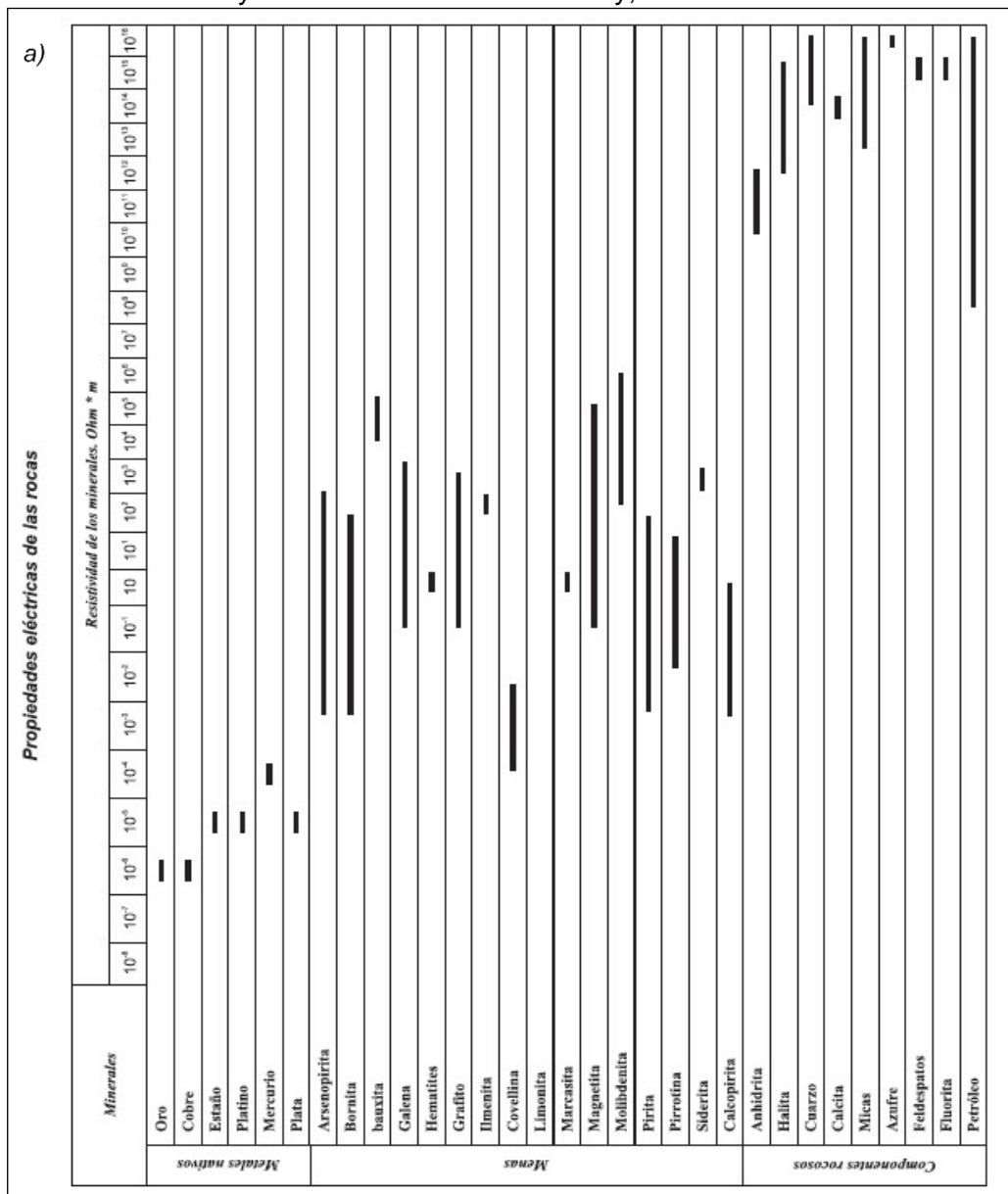
La mayoría de las menas, por el carácter de la conductividad, se clasifican como semiconductores, los cuales necesitan de la presencia de campos eléctricos fuertes para producir el movimiento de los electrones necesarios para la debida conducción de la corriente eléctrica. Entre estos se pueden encontrar minerales muy buenos conductores con valores entre  $10^{-5}$  a  $10^{-1}$  Ohm\*m y minerales relativamente malos conductores con valores que oscilan entre los  $10^0$  a  $15^5$  Ohm\*m.

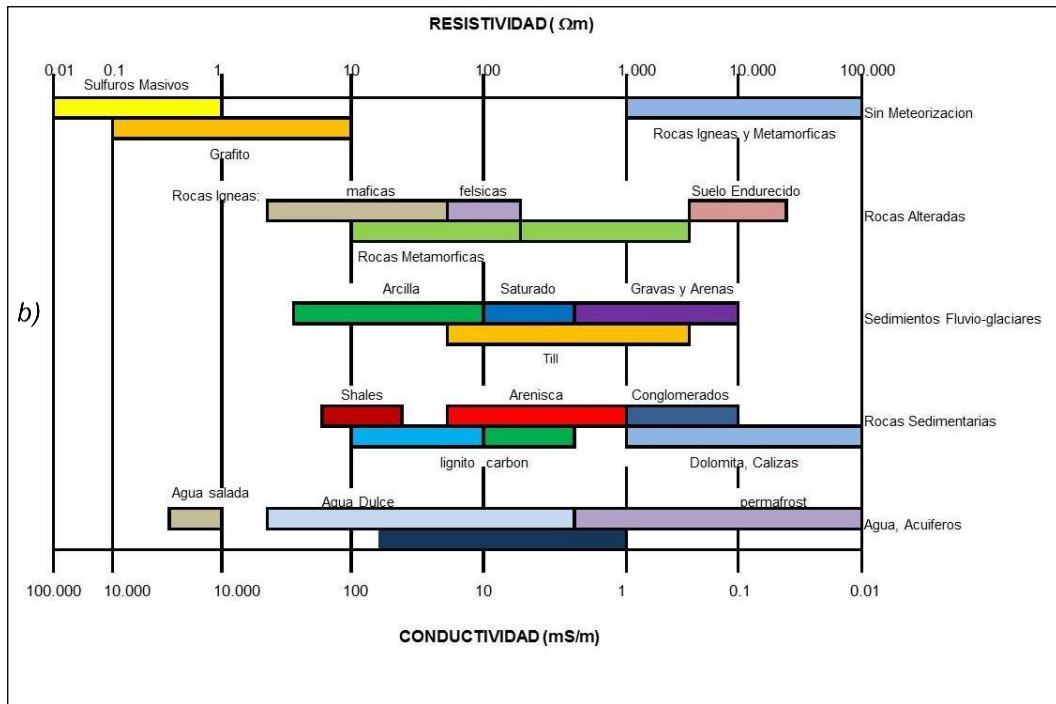
En la parte de los fluidos que saturan las rocas, su resistividad puede variar entre límites amplios. En la mayoría de los casos los líquidos son soluciones acuosas de diversas sales minerales, los cuales juega un papel importante el cloruro de sodio (NaCl). La resistencia del agua que rellena los poros de las rocas es inversamente proporcional a la concentración de la sal en disolución.

En condiciones naturales la resistividad mínima (1 Ohm\*m y menos) la poseen las aguas profundas fuertemente mineralizadas y también las

marinas. La resistividad de las aguas subterráneas oscila, en función de su mineralización, entre valores de  $10^{-2}$  y  $10^2$  Ohm\*m. Los valores de resistividad muy altos (del orden de decenas y centenas de Ohm\*m) corresponden a aguas fluviales débilmente mineralizadas; tienen aún mayores valores de resistividad del orden hasta 1500 Ohm\*m, a causa de su escasa mineralización, las aguas meteóricas.

**Tabla 2. a)** Valores de resistividad de los principales minerales constituyentes de las rocas y menas. Tomado de Lakubovskii & Liajov, 1980; **b)** Rangos de resistividad eléctrica de rocas y sedimentos. Fuente: Palacky, 1987.





## 5.2. MÉTODOS GEOFÍSICOS.

La geofísica involucra el estudio de la Tierra por medio de la medición de los contrastes de las propiedades físicas del subsuelo e intenta deducir la naturaleza y distribución de los materiales responsables de estas observaciones.

Los métodos geofísicos son utilizados para evaluar las propiedades físicas de los suelos, rocas y aguas subterráneas basados en las propiedades elásticas de las rocas, los cambios locales en la gravedad, el magnetismo, la variación en la conductividad eléctrica y las corrientes naturales en la tierra, y los tiempos de decaimiento de diferentes potenciales artificiales introducidos en el subsuelo.

Los métodos geofísicos pueden ser divididos en dos categorías:

- Métodos geofísicos pasivos: donde los datos geofísicos se obtienen de las mediciones de campos naturales de la Tierra. Dentro de éstos se incluyen la gravedad, los campos magnéticos, el autopotencial eléctrico, y la información sísmológica y magneto telúrica de los terremotos.
- Métodos geofísicos activos: donde la investigación de las propiedades físicas de los materiales necesitan una fuente de energía que genere

señales que puedan ser medidas y analizadas en su paso a través del subsuelo. Las técnicas incluidas en esta categoría son la sísmica (refracción, reflexión), la resistividad (sondeos eléctricos verticales, calicatas eléctricas, tomografías eléctricas), y el estudio de la polarización inducida, radares de penetración del suelo y la conductividad eléctrica.

Las técnicas geofísicas ofrecen múltiples aplicaciones en la exploración minera y de hidrocarburos, en el mapeo de contaminantes ambientales de suelos y aguas subterráneas, en la detección de cavidades, prospección de aguas subterráneas, investigaciones arqueológicas y forenses, entre otras. Los mayores beneficios de los métodos geofísicos se relacionan a que son técnicas no-destructivas las cuales implican escaso riesgo, cubren más área espacial y volumétrica, y demandan menos tiempo y costo con respecto a los métodos de exploración directa. Sin embargo, se requiere de una habilidad y experiencia para la interpretación de los resultados generados por estos métodos y su naturaleza indirecta crea incertidumbres que sólo pueden ser resueltas por medio del uso de múltiples técnicas geofísicas y métodos directos de investigación. Consecuentemente, la caracterización preliminar de un sitio por métodos geofísicos generalmente viene seguida por la exploración geológica directa a través de sondeos mecánicos.

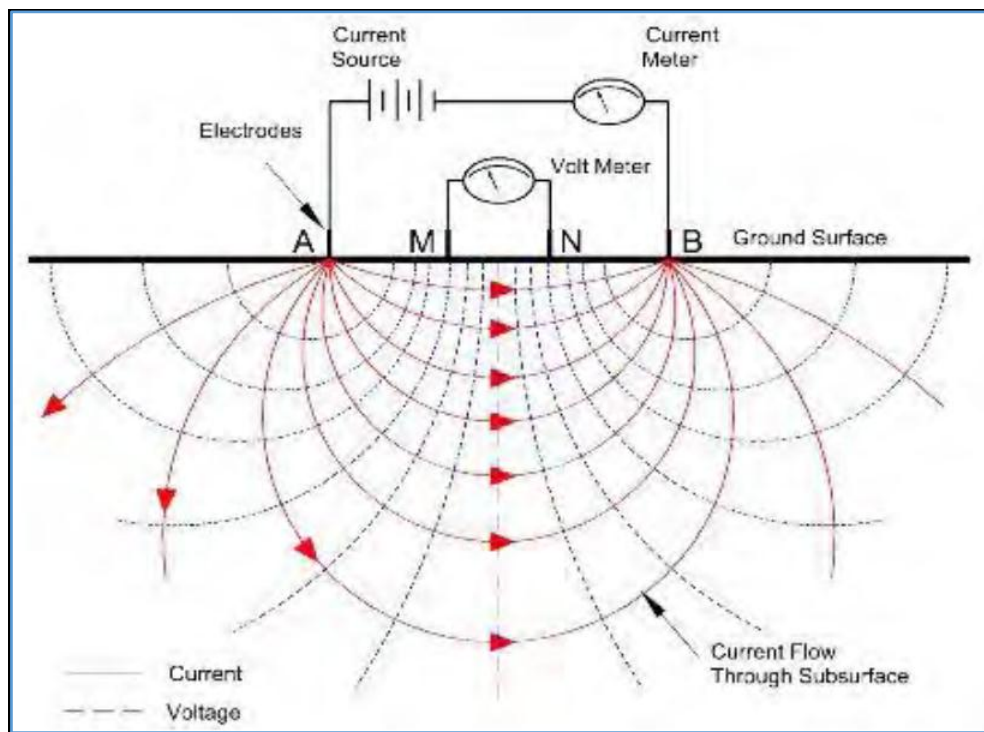
### **5.3. PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA.**

Dentro de la generalidad de la prospección geofísica hay numerosos métodos de investigación del subsuelo, cada uno basado en un fundamento específico (Parasnis, D.S., 1997). Pueden diferenciarse dos modalidades distintas: **la prospección desde la superficie**, aquella en la que los dispositivos se extienden en superficie y, por lo tanto adquieren parámetros del terreno desde el exterior, y **la prospección en sondeos**, aquella en la que la medición de los parámetros del subsuelo se realiza de forma directa mediante la introducción de sondas en pozos (Rider, M. 2002).

El objetivo de las prospecciones geofísicas es detectar y localizar cuerpos o estructuras geológicas del subsuelo. Generalmente, una prospección geofísica consiste en realizar una serie de medidas sobre la superficie del terreno.

Estas mediciones son determinaciones en el espacio o en el tiempo de uno o varios campos de fuerzas, cuyo valor viene determinado, entre otros factores, por la naturaleza de las estructuras del subsuelo o por la gran variación espacial de alguna o varias de las propiedades físicas de las rocas.

Los métodos geoelectricos se basan en la inyección de corriente continua o de baja frecuencia ( $\approx 10$  Hz) en el terreno mediante un par de electrodos (electrodos de corriente) y la determinación, mediante otro par de electrodos (electrodos de potencial), de la diferencia de potencial. El principio de medición de datos geoelectricos se ilustra en la *Figura 2*. El principal método utilizado en los estudios geoelectricos es el método de **resistividad eléctrica**; otros métodos que también hacen parte de este tipo de prospección geofísica son el método de **polarización inducida** y **autopotencial eléctrico**.



**Figura No 2. Diagrama esquemático del principio básico del circuito de medición de la resistividad eléctrica del subsuelo.** Fuente: Yaccup, 2012.

La propiedad eléctrica que se tiene en cuenta en este método es la resistividad eléctrica la cual es la resistencia media entre dos superficies equipotenciales separadas a una distancia determinada, y se aborda su investigación mediante Sondeos Eléctricos Verticales (**SEV**), Calicatas Eléctricas (**CE**) y Tomografía Eléctrica (**TE**). La cargabilidad es la capacidad de ciertos minerales de cargarse y descargarse eléctricamente.

La Tomografía Eléctrica no es más que una adquisición automática de resistividad combinando diversos electrodos, generando finalmente una malla de mediciones a distintas profundidades como si se hicieran a partir de un gran número de **SEV** realizados sobre una misma alineación.

Mediante la prospección geoelectrica lo que se obtiene es una cartografía de resistividades aparentes del subsuelo que, con un correcto procesamiento de las mismas, permitirá dar información sobre las estructuras que subyacen en él. Para interpretar los datos obtenidos durante el trabajo de campo se debe adoptar un modelo de distribución de las resistividades en el subsuelo.

Los modelos en tercera dimensión ya se están desarrollando ampliamente hoy en día gracias, por un lado, al desarrollo de instrumentos multieléctricos para realizar los estudios resistivos de campo y, por otro lado, al uso de ordenadores potentes que soporten los programas de inversión para interpretar las mediciones de resistividad aparente (Loke, M.H., 2000).

#### **5.4. TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS DE RESISTIVIDAD.**

La Tomografía Eléctrica es un método de prospección geoelectrica que analiza los materiales del subsuelo en función de su comportamiento eléctrico, es decir, que es un diferenciador de los mismos en función de su valor de resistividad.

La tomografía eléctrica de resistividad en dos dimensiones tiene por objetivo específico determinar el valor de la resistividad real del subsuelo en el ámbito comprendido entre dos sondeos o bien hasta un cierto rango de profundidad a lo largo de un perfil de medida, a partir de los valores de resistividad aparente obtenidos mediante mediciones realizadas por los métodos convencionales de corriente continua. El proceso de toma de datos consiste en la implantación de numerosos electrodos a lo largo del perfil de medida, con una separación determinada que vendrá condicionada por el grado de resolución que se necesite y la profundidad de investigación que se precise. Los electrodos se conectan a la unidad básica central, la cual se compone de la fuente de alimentación, el receptor, el transmisor y el programa que ordena cuáles deben ser los conjuntos de electrodos que funcionan en cada momento y con qué disposición.

La técnica de la tomografía eléctrica emplea los valores de resistividad aparente medidos con los dispositivos geoelectricos sobre la superficie del terreno, para generar imágenes donde se representan los valores de resistividad real de las diferentes zonas del subsuelo. Para determinar la

resistividad real del subsuelo a partir de los valores de resistividad aparente, se aplica la técnica de la inversión desarrollada por Loke & Barker (1996).

## 5.5. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 3D.

### 5.5.1. INTRODUCCION A TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA EN 3D.

Todas las estructuras geológicas son en 3D en la naturaleza, un estudio de resistividad totalmente 3-D utilizando un modelo de interpretación 3-D (Figura 3c) debería, en teoría, dar los resultados más precisos. En la actualidad estudios en 3-D es un tema de investigación activa. Sin embargo, no ha alcanzado el nivel de utilización común como en 2D. La razón principal es que el costo de estos estudios es comparativamente mayor para un estudio en 3-D de un área que es suficientemente grande.

En la actualidad existen dos hechos que hacen de las encuestas en 3-D una opción más rentable en un futuro próximo. Una de ellas es el desarrollo de medidores de resistividad multicanal que permite más de una medición en un mismo lapso de tiempo. Esto es importante para reducir el tiempo de estudio. El segundo desarrollo es microordenadores más rápidos para permitir la inversión de los conjuntos de datos muy grandes (con más de 8.000 puntos de datos y las redes de la encuesta de más de 30 por 30) para ser completado en un plazo razonable.

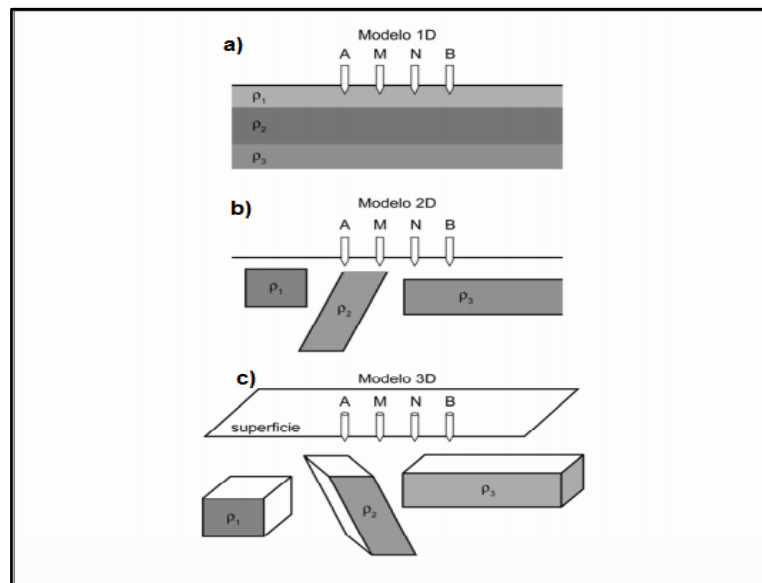


Figura No 3. Los tres diferentes modelos utilizados en la interpretación de las mediciones de resistividad a) Modelo 1D; b) Modelo 2D; c) Modelo 3D. Fuente: Loke, 2000.

### 5.5.1.1. MODELO DE RESISTIVIDAD 1D

Los métodos de resistividad se empezaron a trabajar seriamente con los hermanos Schlumberger y Wenner, en 1915. Por aproximadamente 60 años fue usada la interpretación cuantitativa para los sondeos convencionales. En estos métodos, el punto central del arreglo permanece fijo, y se varía el espacio entre los electrodos, incrementándose para obtener información sobre secciones más profundas del subsuelo (Loke, 2012)

Para realizar la interpretación de los perfiles 1D, se presume normalmente que el subsuelo consiste de capas horizontales homogéneas e isótropas. Para estos casos, la resistividad del subsuelo cambia únicamente con la profundidad, pero no cambia en la dirección horizontal.

En los métodos de prospección eléctrica, los sondeos 1D reciben el nombre de *Sondeos Eléctricos Verticales* (SEV), cuando se investiga el terreno en dirección vertical, o *Calicatas Eléctricas*, cuando se alinean sucesivos SEV cortos para generar perfiles. En este tipo de reconocimientos se suelen emplear dispositivos Schlumberger para los SEV y Wenner para el levantamiento de Calicatas (Arlandi, 2005)

La principal limitación del método de Sondeo Eléctrico Vertical es que normalmente en el subsuelo se presentan cambios de resistividad en direcciones horizontales (laterales). Los cambios laterales en la resistividad del subsuelo causan los cambios en los valores de resistividad aparente que pueden ser y son frecuentemente mal interpretados (López *et al.*, 2003).

El procedimiento de ejecución de un SEV consiste en mantener fija la posición de los electrodos de potencial (M y N), e ir incrementando progresivamente la distancia que separa a los electrodos de potencial (A y B), con lo que se consigue progresivamente mayor profundidad de investigación (Arlandi, 2005).

La profundidad de penetración de la corriente eléctrica depende de la separación de los electrodos inyectoros AB. Si la distancia entre los electrodos AB aumenta, la corriente circula a mayor profundidad pero su densidad disminuye. Para un medio isótropo y homogéneo, el 50% de la corriente circula por encima de la profundidad  $AB/2$  y el 70.6% por encima de una profundidad AB (Orellana, 1982, citado en Arias, 2011). Definiendo L como la distancia entre los dos electrodos extremos, Roy y Apparao (1971), citado en Arias (2011), determinan la profundidad de investigación de diversos dispositivos electródicos en un suelo homogéneo. Las

profundidades de investigación efectiva para los dispositivos Wenner, Schlumberger y Dipolo-Dipolo son respectivamente de 0,17L, 0,19L y 0,25L. Para el caso de una calicata eléctrica, se suelen realizar dos mediciones en cada punto, la primera de ellas con los electrodos equiespaciados (configuración Wenner), y la segunda separando más los electrodos de corriente AB, para conseguir una lectura correspondiente a una mayor profundidad (Arlandi, 2005). Esto lo hace adecuado para la detección de contactos verticales, cuerpos y estructuras que se presentan como heterogeneidades laterales de resistividad.

#### **5.5.1.2. MODELO DE RESISTIVIDAD 2D.**

Para este tipo de estudios es especialmente efectiva la técnica geofísica denominada *Tomografía Eléctrica*, que puede considerarse como fruto de la evolución de los métodos geoelectricos clásicos, como el SEV y la calicata eléctrica. Para realizar el sondeo, se clavan en el subsuelo a la vez un gran número de electrodos de acero, con un espaciado constante, conectados mediante un cable multiconector. Esta alineación de electrodos sigue el perfil geoelectrico 2D que se quiere realizar. El amperímetro y voltímetro van montados en un mismo aparato, al que a su vez se conectan a los electrodos y un computador portátil. El computador es programado para que realice una secuencia de medidas, y es unido a una caja de conmutación electrónica, que selecciona automáticamente los electrodos utilizados para la inyección de corriente y medida de potencial (Arlandi, 2005).

La técnica de la *Tomografía Eléctrica* emplea los valores de resistividad aparente medidos, para generar imágenes del subsuelo donde se representan los valores de la resistividad verdadera de las diferentes zonas del subsuelo. Para calcular la distribución de la resistividad verdadera del subsuelo a partir de los valores de resistividad aparente, se aplica la técnica de inversión desarrollada por Loke & Barker (1996).

El resultado final de este tipo de estudio es una sección distancia-profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo, fácilmente comprensible en términos geológicos o geotécnicos. En este sentido conviene aclarar que la tomografía eléctrica no es en modo alguno comparable a las calicatas eléctricas convencionales ya que estas últimas únicamente proporcionan información de tipo cualitativo, aunque las medidas de campo se efectúen de forma similar en ciertos aspectos (Arias, 2011).

La *Tomografía Eléctrica* es, sin duda, una de las herramientas de carácter no destructivo más eficiente para el estudio y caracterización de posibles discontinuidades del subsuelo en el rango desde algunos metros hasta decenas de metros de profundidad, ya que acopla adecuadamente resolución lateral y vertical de la variación de los valores de resistividad. Entre los objetivos más usuales a determinar mediante la técnica de la tomografía eléctrica, se encuentra la detección de contactos entre unidades litológicas de diferente naturaleza, para así determinar la morfología, distribución y localización de tales discontinuidades.

### **5.5.1.3. MODELO DE RESISTIVIDAD 3D**

Puesto que en la naturaleza todas las estructuras geológicas son tridimensionales, un relevamiento tridimensional de resistividad generaría un modelo de interpretación tridimensional 3D, lo que debería, en teoría, dar resultados más precisos. Hasta el presente, las investigaciones 3D están en pleno desarrollo. La desventaja principal de este tipo de relevamiento es el costo, el cual es comparativamente más alto que 2D, donde las áreas a investigar son suficientemente grandes (López *et al.*, 2003).

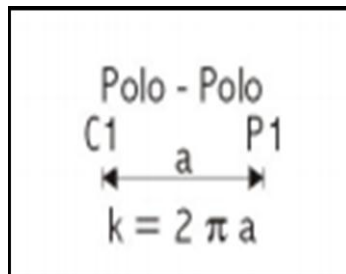
### **5.5.2. DISPOSITIVOS GEOELÉCTRICOS.**

La técnica de la prospección eléctrica emplea los valores de resistividad aparente medidos con los dispositivos geoelectrónicos sobre la superficie del terreno, para generar imágenes donde se representan los valores de resistividad real de las diferentes zonas del subsuelo. Para determinar la resistividad real del subsuelo a partir de los valores de resistividad aparente, se aplica la técnica de la inversión desarrollada por Loke & Barker (1996).

Los arreglos de polo-polo, polo-dipolo y dipolo-dipolo se utilizan con frecuencia para las encuestas en 3-D. Esto se debe a otros arreglos tienen cobertura de datos más pobre cerca de los bordes de la cuadrícula del estudio; adicionalmente a esto existen otros arreglos el Wenner y Schlumberger empleados comúnmente para tomografías en 2D.

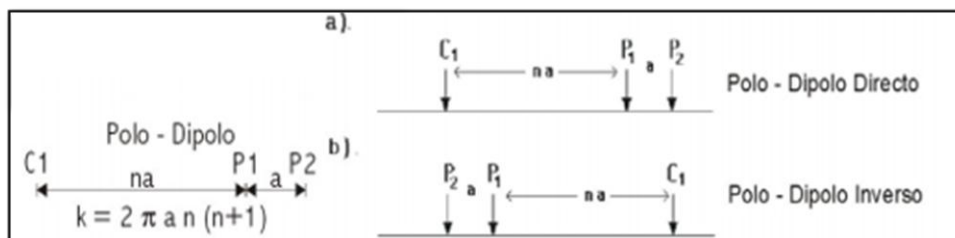
La serie Polo-Polo es la que está compuesta por solo un electrodo de corriente y un potencial, los electrodos C2 y P2 deben colocarse a más de 20 veces de la máxima separación entre C1 y P1; su configuración esta descrita por la *Figura 4*. Una de las desventajas de este conjunto se encuentra relacionada a estudios de pocos metros de área ya que se dificulta el buscar la ubicación apropiada para los electrodos remotos C2 y P2; para cumplir el requisito de separación, otra está relacionada a la gran distancia existente

por parte de los electrodos potenciales P1 y P2 ya que se puede recoger gran cantidad de ruido telúrico en las mediciones lo cual está directamente relacionado con la degradación gravemente de la calidad de los datos medidos.



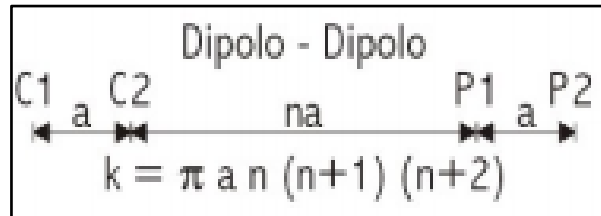
**Figura No 4. Configuración de la serie polo-polo.** Fuente: Loke, 2000.

La serie Polo- Dipolo está compuesta por la existencia de un electrodo potencial remoto (P2), su configuración se ilustra en la *Figura 5*. Para eliminar el efecto de la asimetría que compone esta serie el método a emplear en la medición es denominado hacia delante y hacia atrás o bien polo-dipolo directo e inverso, respectivamente; la sección de sensibilidad de esta serie enuncia que el área con mayor sensibilidad se encuentra debajo del par dipolo P1-P2.



**Figura No 5. Configuración de la serie polo-dipolo; a) polo-dipolo directo, b) polo-dipolo inverso.** Fuente: Loke, 2000.

Finamente la serie Dipolo-Dipolo, los electrodos de este arreglo se muestran en la *Figura 6*. El espaciamiento entre los electrodos, C1-C2 es denominado como "a" al igual que la distancia entre los electrodos potenciales P1-P2. Esta serie es muy sensible a cambios de resistividad horizontal, pero relativamente insensible a cambios verticales; de modo que es útil en estructuras verticales tales como muros enterrados o cavidades.



**Figura No 6. Configuración de la serie dipolo-dipolo.** Fuente: Loke, 2000.

En resumen para cuadrículas relativamente pequeñas compuesta por menos de 12 por 12 electrodos, la configuración Polo-Polo tiene un número considerablemente más grande de medidas independientes posibles comparado a otros conjuntos. La pérdida de los puntos de datos cerca de los extremos de la rejilla se reduce al mínimo, y provee una mejor cobertura horizontal comparada con otros conjuntos. Esta es una configuración atractiva para las prospecciones 3D con cuadrículas pequeñas y espaciamientos relativamente pequeños entre electrodos (menos de 5 metros). Sin embargo, tiene la desventaja de requerir dos electrodos "remotos" que deben ser ubicados a una distancia suficientemente grande a partir de la malla del estudio, debido a la distancia grande entre los electrodos potenciales; este conjunto es además más sensible al ruido telúrico. El conjunto Polo-Dipolo es una opción atractiva para un grillado de estaciones regular. Tiene una resolución más alta que el conjunto Polo-Polo, ya que requiere un único electrodo remoto y es mucho menos sensible al ruido telúrico. Para relevamientos con cuadrículas grandes, particularmente cuando no hay ubicación conveniente para un electrodo remoto, es conveniente utilizar la configuración Dipolo-Dipolo. Para ambos casos (Polo-Dipolo y Dipolo-Dipolo) las medidas con niveles de superposición de datos que usan diferentes combinaciones de "a" y "n" deberían usarse para mejorar la calidad de los resultados. Muchas prospecciones de Tomografías Eléctricas tridimensionales involucrarán mallas probablemente de al menos 16 por 16 electrodos para cubrir áreas razonablemente extensas.

Una malla de 16 por 16 requerirá un total de 256 electrodos, los cuales son mucho más que los disponibles por varios equipos multicanal. Es por esto que surge una metodología para trabajar en mallas más grandes con un número limitado de electrodos es extender la técnica de ROLL-ALONG usada en levantamientos 2D a 3D (Dahlin and Bernstone 1997).

## 6. METODOLOGÍA.

El propósito fundamental de la presente práctica es definir una metodología para prospecciones eléctricas en 3D incluyendo el procesamiento de datos. Por lo tanto el método nos permite evidenciar cambios en la resistividad del subsuelo, muy útil para asociar ciertos valores de resistividad reales con tipos de rocas a través de tablas que describen propiedades de las rocas y sedimentos.

A continuación se presenta la instrumentación, y el procedimiento de medición típico para prospecciones en 3D y enunciando también el procedimiento para 2D; ya que fueron parte de los trabajos de campo desarrollados durante el periodo de la práctica.

### 6.5. INSTRUMENTACIÓN.

El equipo utilizado para la medición de prospecciones eléctricas 2D y 3D de resistividad fue el Terrameter ABEM LS, este equipo consta de 72 electrodos, un set de cables LUND (4 cables, con 21 salidas a un intervalo de 10 metros), dos (2) conectores de cables y 75 Jumper cable-electrodo, como se observa en la *Figura 7*.

El Terrameter ABEM LS es un avanzado sistema de adquisición de datos para mediciones de auto potencial (Self Potential SP), Resistividad (RES) y Polarización Inducida en dominio del tiempo (IP). El equipo cuenta con dos paneles laterales.

- ✓ El panel de conexiones: Todos los conectores excepto los de las fuentes externas de poder están situados en el panel de la parte derecha del Terrameter LS. En la *Figura 8* se muestra el panel de conexiones del Terrameter ABEM LS.



Figura No 7. Equipo utilizado para la medición de los datos de resistividad. Fuente: Manual ABEM (en línea).



Figura No 8. Panel de conexiones del Terrameter LS. Fuente: Manual ABEM (en línea)

Los conectores:

<b>Etiqueta</b>	<b>Función</b>
USB	Conexión para USB, teclados, GPS externos, etc.
Electrodo 1-32	Conector de 32-pines para los cables de electrodos (1/2)
Electrodo 33-64	Conector de 32-pines para los cables de electrodos (2/2)
C1, C2	Conexiones para los electrodos de corriente
P1, P2	Conexiones para los electrodos de potencial

- ✓ El panel de energía: El panel de energía del Terrameter LS se muestra en la *Figura 9*.



**Figura No 9. Panel de energía del Terrameter LS. Fuente: Manual ABEM (en línea).**

El botón de emergencia tiene dos posiciones posibles. La posición interior corresponde al alto de emergencia mientras que la posición exterior corresponde a la posición de operación del equipo.

La corriente sólo puede ser transmitida si el botón de emergencia está en la posición exterior. Si el botón de emergencia es oprimido durante la emisión de corriente la medición se detendrá sin cerrar la sesión de mediciones; las mediciones podrán continuar de nuevo a medida que el botón sea devuelto a su posición exterior. El botón de emergencia retorna a su posición exterior al rotarlo en dirección de las manecillas del reloj.

Frecuentemente se requiere equipo adicional; la siguiente lista es un sumario de equipo adicional utilizado en la campaña de adquisición de datos:

- ✓ Batería externa.
- ✓ Un set de Walkie Talkies.
- ✓ Martillos de Poliuretano.
- ✓ Cinta métrica no metálica.

## **6.6. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN.**

### **6.6.1. TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS EN 2D.**

Las tomografías eléctricas en 2D, es uno de los métodos más utilizados para determinar a partir de pseudosecciones de la distribución espacial de la resistividad del subsuelo su composición y características asociando dichos valores de resistividad con los materiales presentes y la geología del sector.

Los electrodos deben ser clavados en el suelo con el martillo de Poliuretano. Seguidamente, se desenrollan los cables de electrodo y se conectan los electrodos al cable. Debe asegurarse que exista un buen contacto entre el suelo y los electrodos y que los cables conectores de electrodos están en buenas condiciones y propiamente conectados.

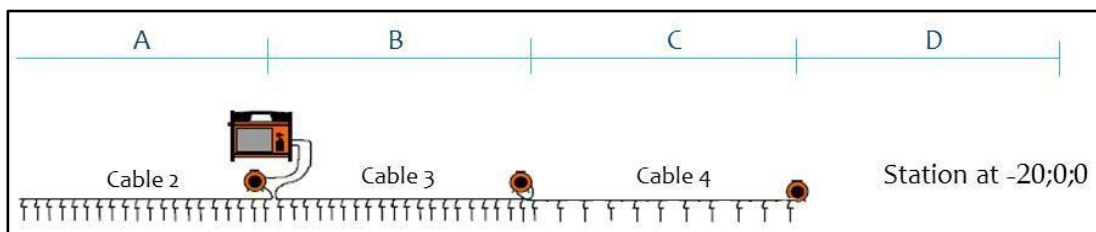
Todos los Cables multieléctrodos deben de ser desenrollados en la dirección del perfil, esto significa que la numeración de las tomas de los electrodos se incrementaran en la misma dirección en que se incrementan los números de las coordenadas.

El procedimiento descrito a continuación utiliza un Sistema Estándar de Imágenes Lund de cuatro cables con 21 tomas de electrodos cada uno.

Al usar este procedimiento, denominado Roll Along, se logra conseguir una alta resolución hacia los extremos de los perfiles. Esto es importante no sólo

para la resolución en profundidades someras, sino que también afecta la resolución en profundidad.

En la primera estación de medición se empieza desenrollando y tendiendo tres cables solamente. Se conecta el instrumento entre los primeros dos cables. En el programa informático de adquisición de datos están designados como Cable 2, Cable 3 y Cable 4 (*Figura 10*), donde el instrumento es conectado entre Cable 2 y Cable 3, mientras que el Cable 1 es excluido en la primera estación.

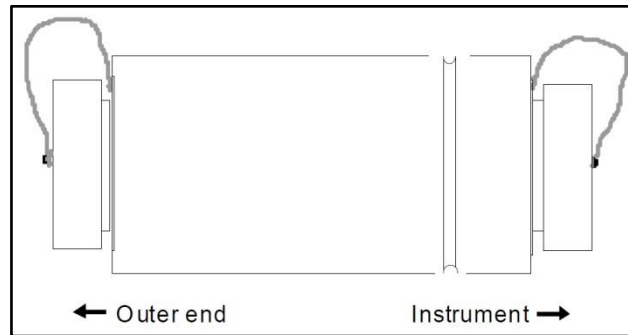


**Figura No 10. Arreglo de cables durante la primera estación de mediciones para un levantamiento Roll Along, donde el Cable 1 es excluido.** Fuente: Manual ABEM (en línea).

La toma de electrodo #21 del Cable 1 debe traslaparse con la toma de electrodo #1 del siguiente cable en la unión de los cables y en el tendido del centro. Las tomas de electrodos que se traslapan deben de conectarse al mismo electrodo.

Conectar los cables interiores y exteriores (Cable 3 y Cable 4, solamente en esta etapa) con un conector de cables (aparato de conexión cilíndrico). Los conectores de cables tienen una ranura para los set de cables 4x21. Debe asegurarse de conectarlos siempre en la dirección correcta: la ranura en los conectores de cable apuntan siempre en dirección al instrumento en el centro del tendido (*Figura 11*).

Conectar los electrodos en todas las tomas de electrodos del Cable 2 y Cable 3. En el Cable 4 deben conectarse solamente las tomas con los números impares, las tomas con los números pares deben permanecer desconectadas en esta estación de medición. Debe verificarse las superficies de contacto entre las tomas del cable de electrodos, los conectores de electrodos y los electrodos por suciedad y óxido, que pueden arruinar la calidad de los datos medidos. Conectar el Terrameter LS al centro del tendido de los cables, esto es entre Cable 2 y Cable 3.



**Figura No 11. Conector de cables con conexiones para set de cables 4x21.** Fuente: Manual ABEM (en línea).

Una vez listo el equipo y el debido tendido de cables para las mediciones en la primera estación, se debe crear dicha estación en el Terrameter LS. Ciertos conceptos son utilizados para manejar y administrar los datos de medición. Ellos son *Proyecto (Project)* y *Tarea (Task)*.

- ✓ *Project:* Un *Proyecto* es un contenedor de *Tareas (Tasks)* de medición. Por lo general las tareas de un proyecto son del mismo sitio de estudio.
- ✓ *Task:* Una *Tarea* es un set de mediciones definidas por un protocolo de mediciones, dentro de las que se puede escoger entre los diferentes dispositivos geoelectrónicos; Wenner, Polo-Polo, Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo, Wenner-Schlumberger.

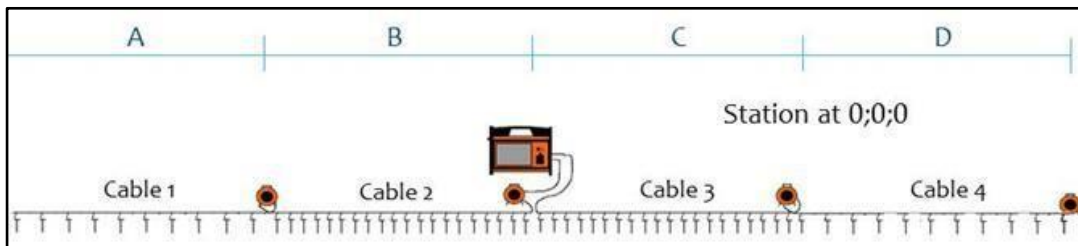
Cuando se crea una nueva *Tarea* el tipo de tendido (Spread) de electrodos debe de ser definido, frecuentemente se utiliza un set de cables 4x21 (cuatro cables de electrodos con 21 tomas de electrodos cada uno). Además un archivo de protocolo es seleccionado (Wenner, es el comúnmente el empleado) y se fija la separación entre electrodos. Para realizar las mediciones de la primera estación, es necesario crear una estación de medición.

Las coordenadas de estación de la nueva estación deben ser definidas. La coordenada de estación se refiere a la posición del primer electrodo en el tendido. El valor introducido debe ser el número de espacios de electrodos desde el primer electrodo a la posición del Terrameter LS. Para la primera estación con el Cable 1 excluido el valor debe de ser entonces -20 para obtener la posición de inicio de la pseudosección de manera correcta. El

valor para la segunda estación deberá ser 0, y para la tercera estación será 20. Las coordenadas de estación son actualizadas automáticamente con el incremento correcto cuando se realiza el procedimiento Roll Along. Así que si en la primera estación se establece correctamente el resto continuará automáticamente.

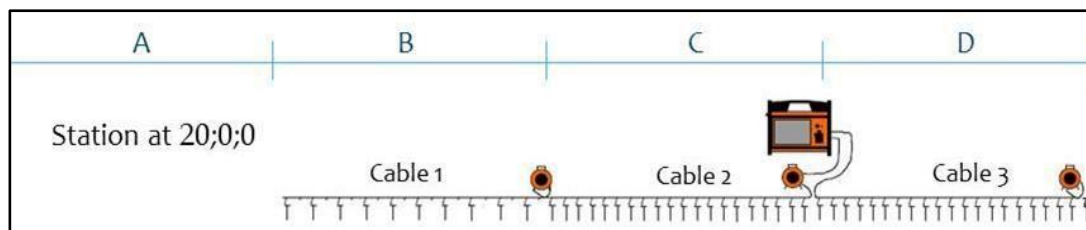
Para un sistema de cables 4x21, el Cable 1 deberá ser excluido en la primera estación y de manera similar el Cable 4 deberá ser excluido en la tercera (o última) estación.

En la segunda estación de mediciones, todos los cuatro cables están conectados (ver *Figura 12*). El Cable 1 está conectado al Cable 2; así como el Cable 3 y el Cable 4 a través de conectores de cables, y las ranuras de los conectores deben estar dirigidas hacia el instrumento. En el Cable 1 y Cable 4, las tomas de electrodos que deben permanecer conectadas son sólo las tomas con números impares, las tomas con los números pares deben mantenerse desconectadas durante esta estación de mediciones. Conectar los electrodos en todas las tomas de electrodos del Cable 2 y Cable 3.



**Figura No 12. Arreglo de cables durante la segunda estación de mediciones para un levantamiento Roll Along.** Fuente: Manual ABEM (en línea).

Para la tercera estación de mediciones se realizará un movimiento más. Los cables de electrodos activos serán entonces Cable 1, Cable 2 y Cable 3 (ver *Figura 13*). Análogamente al Cable 4 en la primera estación, en el Cable 1 deben conectarse solamente las tomas con los números impares, las tomas con los números pares deben mantenerse desconectadas.



**Figura No 13. Arreglo de cables durante la tercera estación de mediciones para un levantamiento Roll Along, donde el Cable 4 es excluido.** Fuente: Manual ABEM (en línea)

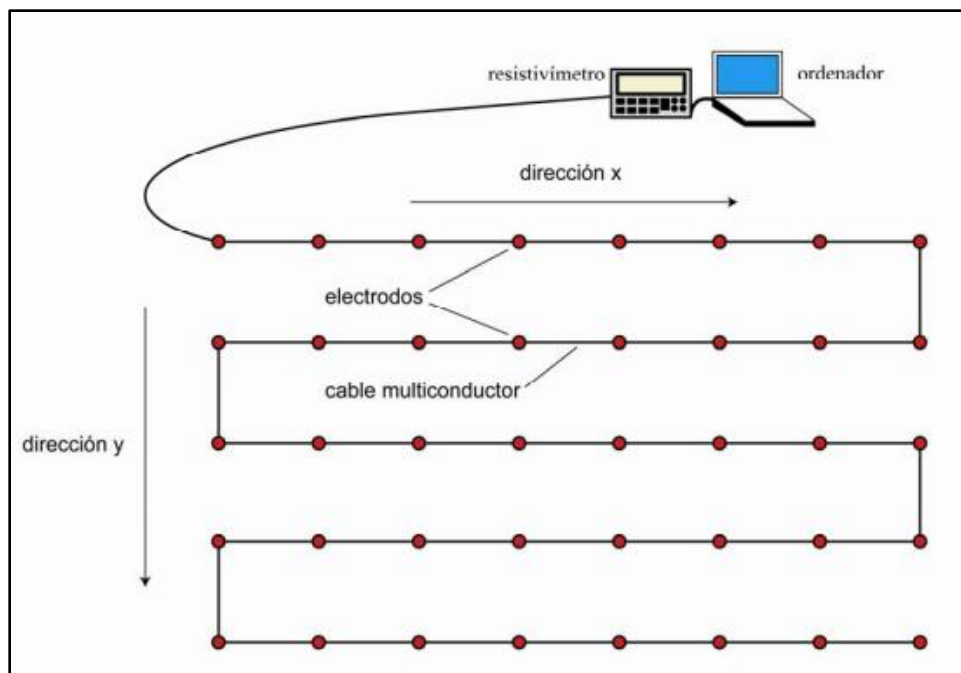
### 6.6.2. PROSPECCIONES ELÉCTRICAS EN 3D.

Para determinar la metodología a seguir para una prospección eléctrica en 3D se soporta en la información suministrada por parte del manual del equipo **ABEM Terrameter LS**, estudios previos relacionados a la temática; entre los más relevantes se encuentran la Tesis doctoral: “APLICACIÓN DE DIFERENTES TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA A PROBLEMAS RELACIONADOS CON CONTAMINACIÓN AMBIENTAL PRODUCIDA POR DIFERENTES ACTIVIDADES ANTRÓPICAS EN LA REGIÓN DE MURCIA” de la UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA del departamento de ingeniería minera, geológica y cartográfica, Tesis de grado: “CARACTERIZACIÓN DE UN SITIO CONTAMINADO POR HIDROCARBUROS USANDO TOMOGRAFÍA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA” de la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO de la facultad de ingeniería y “PROSPECCIÓN GEOFÍSICA CON TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 2D Y 3D PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO EN ZONAS KÁRSTICAS DE YESOS (PROVINCIA DE CUENCA, ESPAÑA) Y CALIZAS (PROVINCIA DE CASTILLA Y LEÓN, ESPAÑA)” de la UNIVERSIDAD SIMÓN BOLÍVAR coordinación de Ingeniería Geofísica.

Si bien los métodos geofísicos se basan en la medición de algunas propiedades físicas de los materiales de la corteza terrestre, es en la interpretación de dichas mediciones con base en los contrastes entre ellas y las anomalías observadas, la que permite preparar modelos de las características del subsuelo y de su distribución espacial. La interpretación de los datos geofísicos tiene dos niveles: uno, el modelamiento matemático en el que se definen las combinaciones de valores de la propiedad que se mide y de la geometría de las masas de suelo o de roca, coherentes con las mediciones hechas en el terreno, y dos, la interpretación de los modelos en términos geológicos, hidrogeológicos o geotécnicos.

El procedimiento descrito para las adquisiciones de prospección eléctrica 2D se mantiene válido para la prospección eléctrica 3D, los electrodos deben ser clavados en el suelo con el martillo de Poliuretano. Seguidamente, se desenrollan los cables de electrodo y se conectan los electrodos al cable. Debe asegurarse que exista un buen contacto entre el suelo y los electrodos y que los cables conectores de electrodos están en buenas condiciones y propiamente conectados. No obstante, en esta ocasión los electrodos se disponen siguiendo una malla cuadrada o rectangular (aunque esto no es totalmente una obligación). La forma y dimensiones de la malla pueden variar en función del objeto a estudiar. El espaciamiento interelectródico es idéntico según los ejes x e y del dispositivo (ver Figura 14).

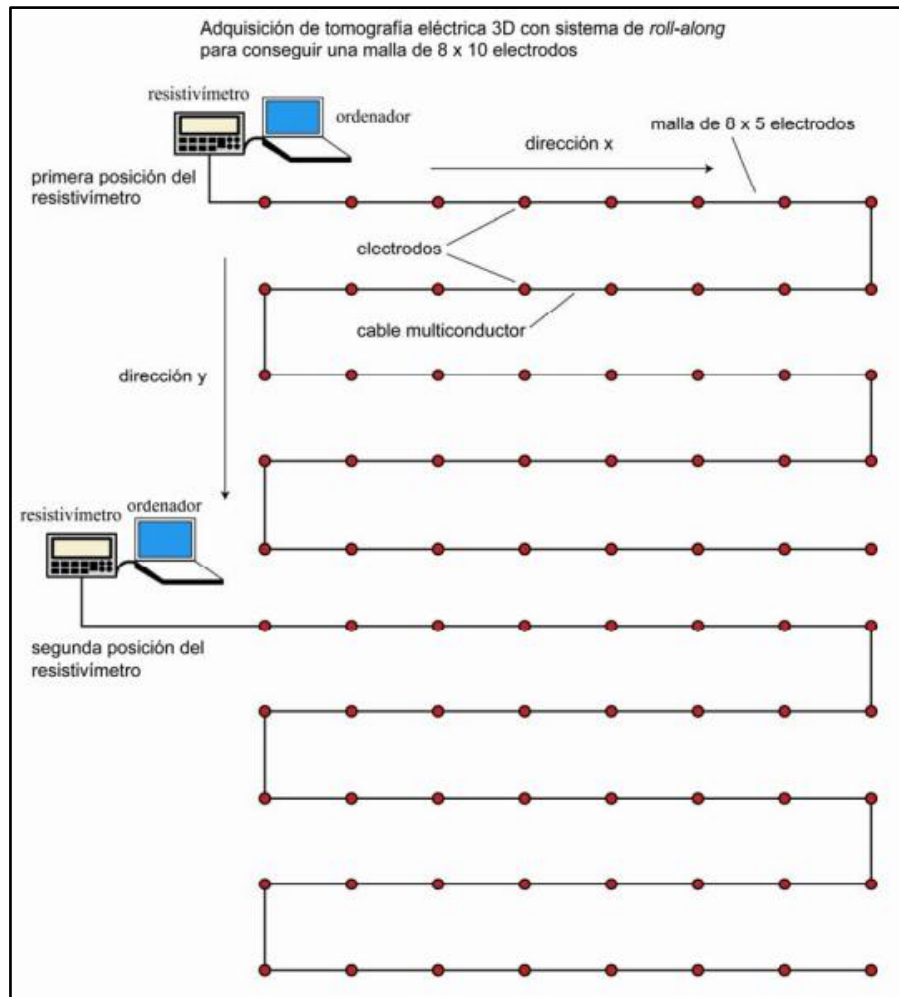
Los arreglos más empleados para realizar estudios con prospecciones eléctricas en 3D son el polo-polo, polo-dipolo, ya que otros arreglos no proveen suficiente información para realizar la inversión 3D completa, es decir presentan una cobertura inferior de los datos hacia los bordes del mallado.



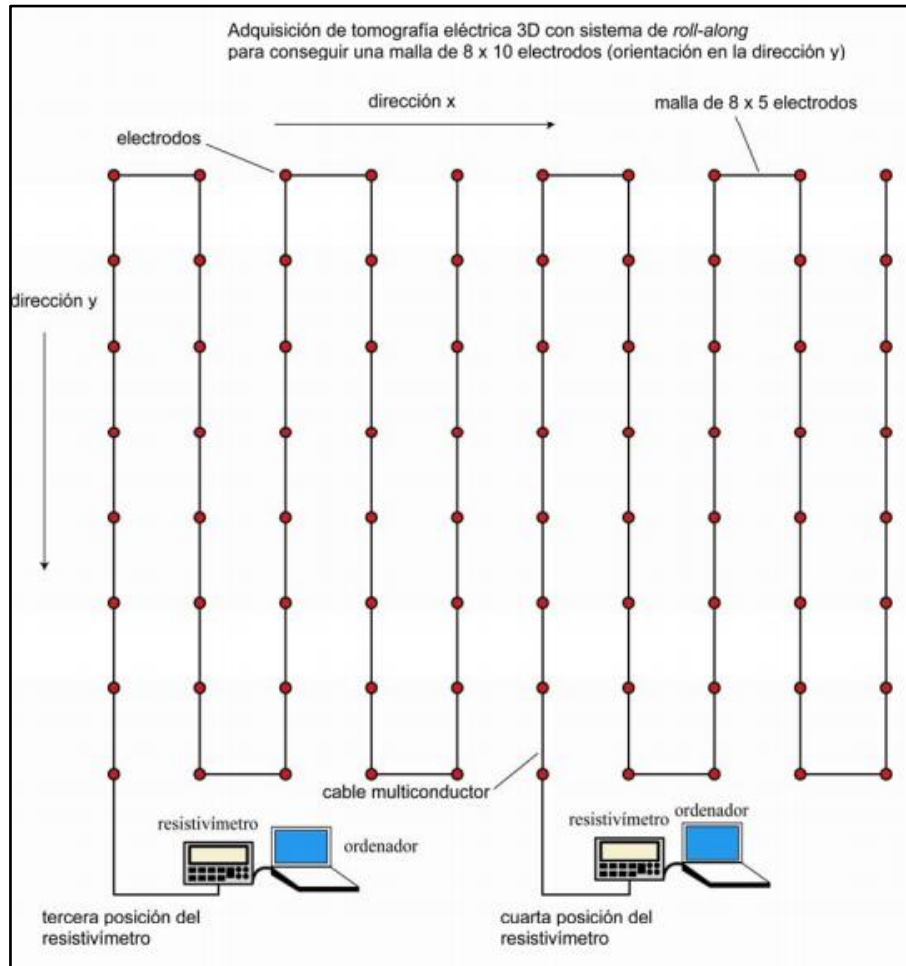
**Figura No 14. Distribución de los electrodos para una adquisición de prospección eléctrica 3D.** Fuente: Loke, 2000.

Para estudios de prospección eléctrica 3D se aplica el sistema "Roll-Along", para extenderse con el dispositivo sobre una zona amplia. Es decir, cuando se cuenta con un número limitado de electrodos y se quiere abarcar un área extensa, permitiendo un solapamiento entre mallados contiguos. En la Figura 15 se muestra que se puede realizar una primera adquisición generando una

malla de 8 por 5 donde las medidas se realizan principalmente siguiendo la dirección "x", con posibilidad de realizar medidas en direcciones diagonales. Seguido a esto el montaje es desplazado a continuación en la dirección "y" de forma que cubra la segunda mitad del área y así poder crear una malla de 8 por 10. Luego se inicia de nuevo la secuencia de medidas. La malla de 8 x 5 es, a continuación, orientada según la dirección "y" (Figura 16). Siguiendo el método "Roll-Along" la profundidad de investigación es menor a la que se obtendría con una malla 8x10 real. Sin embargo de esta forma se pueden estudiar grandes áreas sin necesidad de disponer de cables capaces de realizar simultáneamente una gran cantidad de medidas e implantar inicialmente una gran cantidad de electrodos (Martínez, P. 2006).

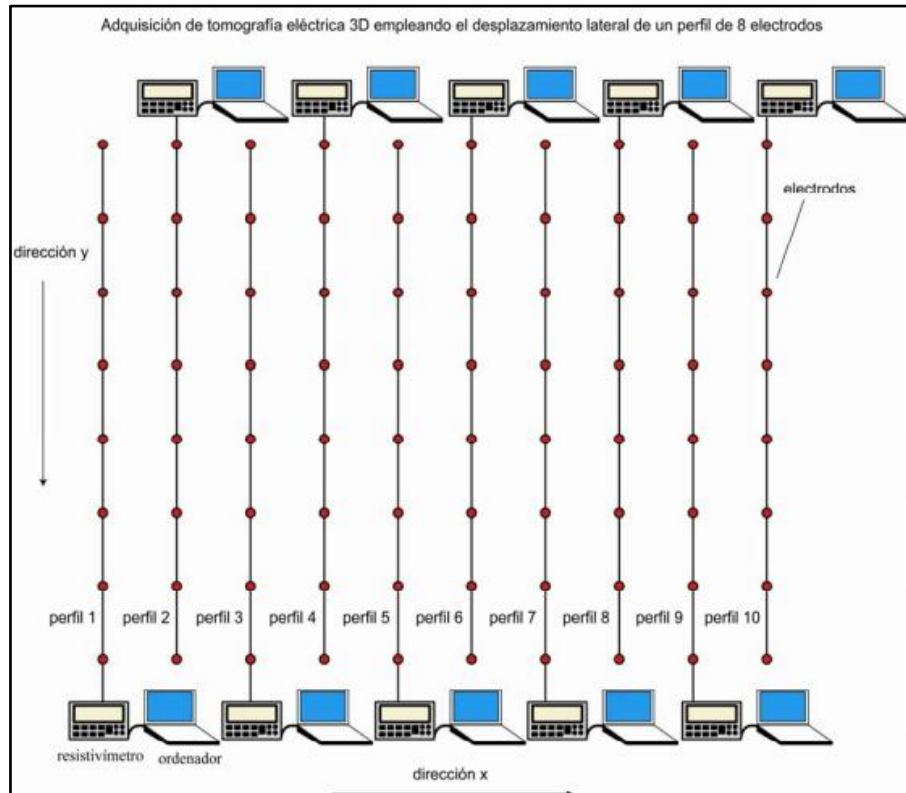


**Figura No 15. Empleo del sistema "Roll-Along" para una malla de 8x5 en la dirección Y.** Fuente: Loke, 2000.



**Figura No 16. Empleo del sistema “Roll-Along” para una malla de 8x5 en la dirección y.**  
Fuente: Loke, 2000.

Existe otra alternativa para obtener modelos 3D a partir de una combinación de perfiles paralelos de prospección eléctrica 2D. Estos perfiles paralelos se adquieren separados a una distancia “x” entre sí, que debe ser igual a la distancia entre electrodos de cada perfil en particular, también puede ser tres veces la distancia entre electrodos dicha separación. Con esta opción, el inconveniente es que se produce una pérdida de resolución puesto que no hay posibilidad de efectuar medidas en diagonal; lo anterior se muestra en la *Figura 17*.



En los bloques tridimensionales resultantes por ambas técnicas es donde se pueden ver mejor las anomalías, su continuidad, dirección, extensión, profundidad, etc. Es importante destacar que la segunda alternativa tiene menor resolución que el sistema “Roll-Along”, ya que no existe la posibilidad de utilizar mediciones combinando electrodos de diferentes perfiles singulares, mientras que en el sistema “Roll-Along” si se pueden combinar diferentes electrodos de todo el mallado, dependiendo del arreglo electródico que se utilice.

Para el desarrollo de tomografías eléctricas en 3d, se determinó que se debe emplear la alternativa del método “Roll-Along” debido a su superior resolución de resultados de resistividad en comparación con la segunda opción de combinación de perfiles paralelos.

Ya que se cuenta con el equipo Terrameter ABEM LS, con 72 electrodos, un set de cables LUND (4 cables, con 21 salidas a un intervalo de 10 metros), dos (2) conectores de cables y 75 Jumper cable-electrodo, tal como se ilustró en la *Figura 7*, la cuadrícula lograda con esta combinación será de una grilla

de 8x8 distribuida electrónicamente tal como se ilustra en la *Figura 18* y *Figura 19*. Ya que el equipo tiene conexiones para 64 electrodos con dos entradas una del número 1-32 electrodo y otra del 33-64 electrodo. Tras evaluar las ventajas y desventajas que ofrecen cada uno de los dispositivos se determina que el arreglo Dipolo-Dipolo ofrece una mejor cobertura en el bloque de distribución espacial de resistividades que se obtiene tras la inversión de los datos del modelo 3D.

En la primera estación de medición se empieza desenrollando y tendiendo dos cables solamente, Conectando el instrumento al primer cable el cual solo irán conectados los electrodos impares, las tomas con los números pares deben permanecer desconectadas. En el programa informático de adquisición de datos están designados como Cable 1 y Cable 2 (*Figura 18 a*).

El Cable 1 y Cable 2 se conectan mediante un conector de 32 pines. Los conectores de cables tienen una ranura para los set de cables 4x21; debe asegurarse de conectarlos siempre en la dirección correcta: la ranura en los conectores de cable apuntan siempre en dirección al instrumento en el tendido (*Ver Figura 11*).

Debe verificarse las superficies de contacto entre las tomas del cable de electrodos, los conectores de electrodos y los electrodos por suciedad y oxido, que pueden arruinar la calidad de los datos medidos.

Una vez listo el equipo y el debido tendido de cables conectados al número correspondiente de electrodos para las mediciones en la primera estación se debe crear dicha estación en el equipo Terrameter LS. Al igual que en una prospección 2D; se emplea ciertos conceptos básicos para operar y administrar los datos de medición; tales como: Proyecto (Project) y Tarea (Task).

✓ *Project*: Un *Proyecto* es un contenedor de *Tareas (Tasks)* de medición. Por lo general las tareas de un proyecto son del mismo sitio de estudio.

✓ *Task*: Una *Tarea* es un set de mediciones definidas por un protocolo de mediciones, dentro de las que se puede escoger entre los diferentes dispositivos geoelectrónicos; Polo-Polo, Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo, propios para las prospecciones en 3D.

Cuando se crea una nueva *Tarea* el tipo de tendido (Spread) de electrodos debe de ser definido, frecuentemente se utiliza un set de cables 4x21 (cuatro cables de electrodos con 21 tomas de electrodos cada uno). Además un archivo de protocolo es seleccionado (Dipolo-Dipolo, es el comúnmente el empleado) y se fija la separación entre electrodos. Para realizar las mediciones de la primera estación, es necesario crear una estación de medición.

Las coordenadas de estación de la nueva estación deben ser definidas. La coordenada de estación se refiere a la posición del primer electrodo en el tendido. El valor introducido debe ser el número de espacios de electrodos desde el primer electrodo a la posición del Terrameter LS. Para la primera estación con el Cable 1 el valor debe de ser entonces (0,0) para obtener la posición de inicio de la pseudosección de manera correcta. El valor para la segunda estación deberá ser (0,4), y para la tercera estación será (0,8) y para la cuarta estación es (4,8). Las coordenadas de estación son actualizadas automáticamente con el incremento correcto cuando se realiza el procedimiento Roll Along. Así que si en la primera estación se establece correctamente el resto continuará automáticamente.

En la segunda estación de medición, están conectados los cables 3 y 4. El Cable 3 está conectado directamente al equipo mientras que el Cable 4 está conectado al Cable 3 mediante el conector, En el Cable 3, las tomas de electrodos que deben permanecer conectadas son sólo las tomas con números impares, las tomas con los números pares deben mantenerse desconectadas durante esta estación de mediciones. Es recomendable mientras se esté desarrollando las mediciones en la primera estación ir haciendo el montaje de colocar los electrodos en el terreno y el tendido del cable, con el fin de disminuir el tiempo del estudio.

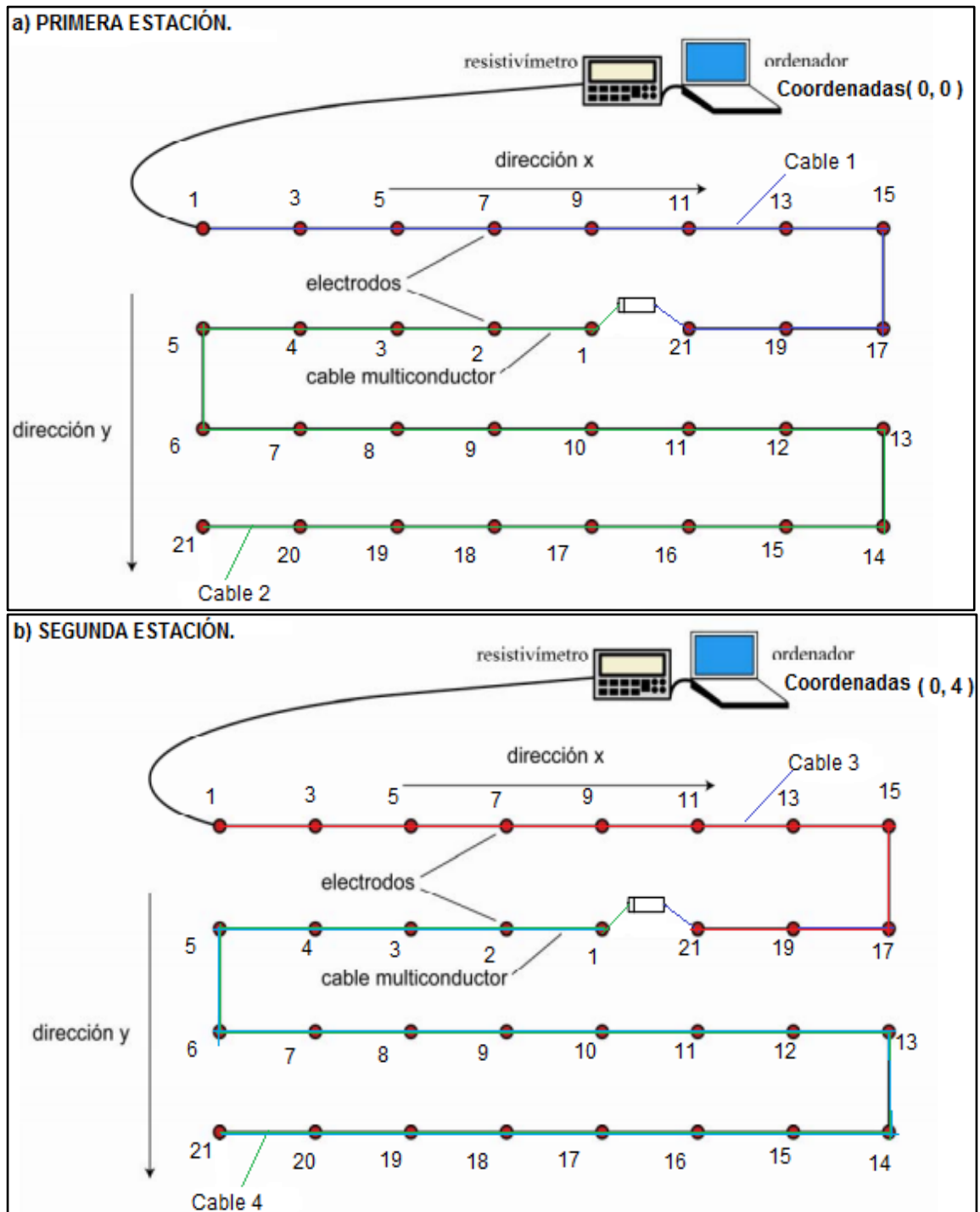


Figura No 18. Método "Roll-Along" malla de 8x8 a) Primera estación, b) segunda estación. Fuente: Autor.

En la tercera estación de medición, está ubicada de manera vertical, de modo que complete la cuadrilla de medición para obtener el bloque tridimensional de la distribución espacial de resistividades. Se utilizan los cables 1 y 2; El Cable 1 está conectado directamente al equipo mientras que el Cable 2 está conectado al Cable 1 mediante el conector, En el Cable 1, las tomas de electrodos que deben permanecer conectadas son sólo las tomas con números impares, las tomas con los números pares deben mantenerse desconectadas durante esta estación de mediciones; tal como se muestra en la *Figura 19*. Es recomendable mientras se esté desarrollando las mediciones en esta estación ir realizando el montaje de colocar los electrodos en el terreno y el tendido del cable de la estación número 4, con el fin de disminuir el tiempo del estudio.

Finalmente en la cuarta estación de medición para una malla de 8x8, están conectados los cables 3 y 4. El Cable 3 está conectado directamente al equipo mientras que el Cable 4 está conectado al Cable 3 mediante el conector, En el Cable 3, las tomas de electrodos que deben permanecer conectadas son sólo las tomas con números impares, las tomas con los números pares deben mantenerse desconectadas durante esta estación de mediciones.

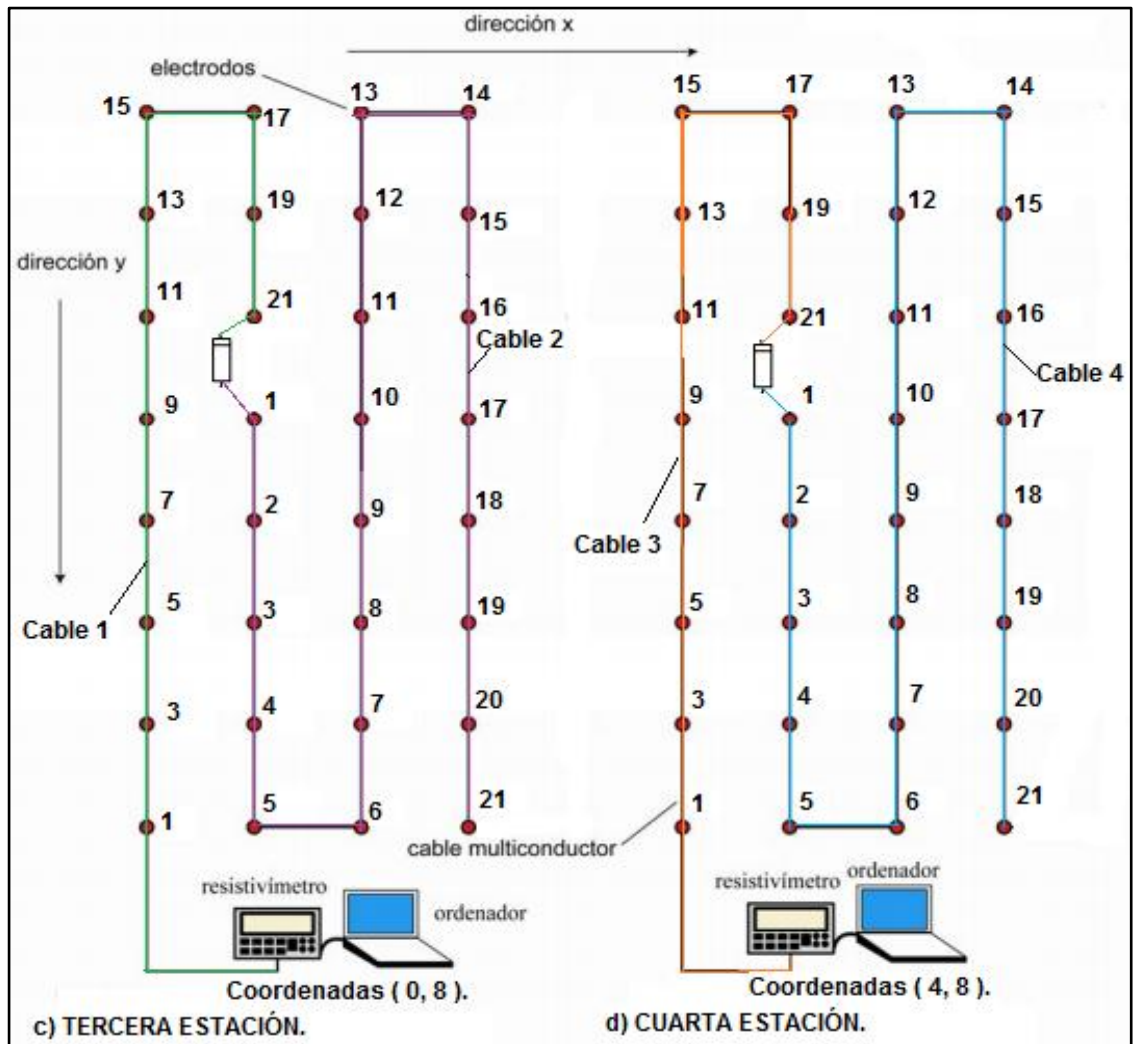


Figura No 19. Método "Roll-Along" malla de 8x8 c) tercera estación, d) cuarta estación.  
Fuente: Autor.

## 7. PROCESAMIENTO DE DATOS.

### 7.5. TEORÍA BÁSICA DE INVERSIÓN.

Para obtener un modelo 3D de resistividades reales se sigue la rutina de inversión usada por el programa RES3DINV la cual se basa en el método mínimos cuadrados con suavizado forzado (de Groot-Hedlin and Constable 1990, Sasaki 1992). Una nueva implementación del método de mínimos cuadrados basada sobre la técnica de optimización cuasi-Newton (Loke and Barker 1996) puede ser también usada. Esta técnica puede ser hasta 10 veces más rápida que el método de mínimos cuadrados para un gran conjunto de datos y requiere menos memoria. El método de mínimos cuadrados con suavizado forzado se basa en la siguiente ecuación:

$$(J'J + uF) d = J'g \quad (2)$$

Donde  $F = f_x f_x' + f_z f_z'$ .

$F_x$  = filtro de achatamiento horizontal.

$F_z$  = filtro de achatamiento vertical.

$J$  = matriz de derivadas parciales.

$J'$  = transpuesta de  $J$ .

$u$  = factor de amortiguamiento.

$d$  = vector del modelo de perturbación.

$g$  = vector de discrepancia.

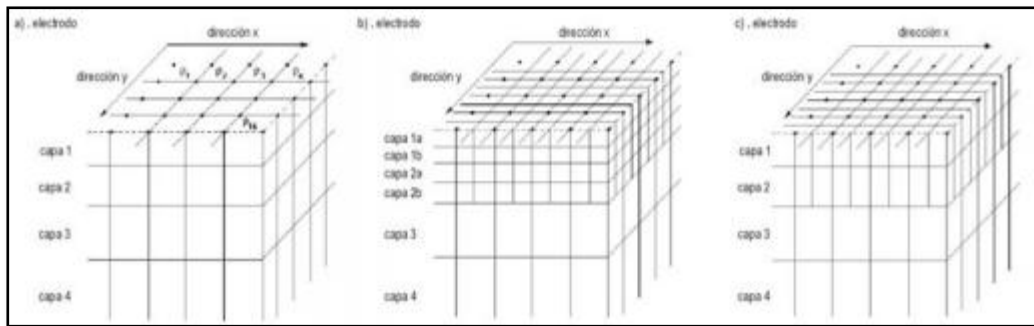
Una de las principales ventajas que posee este método es que el factor de amortiguamiento y los filtros de achatamiento pueden ser ajustados para satisfacer diferentes tipos de datos; de modo que su inversión se optimiza ya que se ajusta a las necesidades presente por la zona de estudio.

Adicional a esto, es posible usarse también el convencional método de Gauss-Newton el cual se basa en recalcularse el Jacobiano de la matriz de derivadas parciales después de cada iteración. Dicho proceso lleva más tiempo de ejecución que el método incompleto cuasi-Newton, pero en áreas con gran contraste de resistividad más grandes que 10:1, brinda resultados ligeramente mejores (Loke and Dahlin, 2002).

Como tercera opción de inversión está el utilizar el método Gauss-Newton para las primeras dos o tres iteraciones, después que se use el método cuasi-Newton.

El modelo de inversión divide el subsuelo en un pequeño número de prismas rectangulares e intenta determinar los valores de resistividad de los prismas tanto para minimizar la diferencia entre los valores de resistividad aparente observados y calculados. Uno de los posibles arreglos usados por Loke and Barker (1996), se muestra en la *Figura 20 a*.

En este caso, cada bloque en la capa superior tiene un electrodo en cada esquina. Además de este arreglo básico, otros dos arreglos pueden ser utilizados. Una alternativa es dividir los bloques en el techo de pocas capas por la mitad, en direcciones horizontales solamente (*Figura 20 c*). La tercera alternativa es dividir las capas por la mitad en la dirección vertical también (*Figura 20 b*). Puesto que la resolución del método de resistividad decrece rápidamente con la profundidad ha sido encontrado que subdividir los bloques es solamente provechoso para la parte superior de las dos primeras capas únicamente. En muchos casos, subdividir la primera capa únicamente es suficiente. Por subdivisión de los 33 bloques, el número de parámetros del modelo y así el tiempo de computadora requerido para invertir los datos, puede incrementar.



**Figura No 20. Los modelos usados en la inversión. (a) Modelo convencional donde los anchos de los bloques rectangulares son iguales a los espaciados de electrodo unitario en las direcciones x e y. (b) Un modelo donde el techo de pocas capas se divide por la mitad, ambos verticalmente y horizontalmente, para proporcionar la mejor resolución. (c) Un modelo donde los bloques se dividen en direcciones de la horizontal pero no en la dirección vertical.** Fuente: Loke 2000.

El vínculo entre la matemática de los parámetros del modelo y la respuesta del modelo 2D y 3D es resuelto por el método de diferencias finitas (Dey & Morrison, 1979, citado en Nely, 2010) o el método de elementos finitos (Silvester & Ferrari, 1990, citado en Nely, 2010). En los métodos de optimización, un modelo inicial se modifica de manera iterativa, a manera que la diferencia entre el modelo respuesta y los datos observados se reduce.

Durante el proceso de inversión se adopta como criterio de convergencia el valor del error cuadrático medio (RMS) entre los datos experimentales y la respuesta del modelo actualizado en cada iteración. Si el valor del RMS o su disminución relativa se sitúan por debajo de un valor predefinido se dice que la inversión ha convergido y el proceso se considera finalizado.

El método ha sido utilizado con éxito en la inversión de los datos de resistividad para número pequeño de capas. Sin embargo, cuando el número de parámetros del modelo es grande, como en 2D y 3D, el modelo de inversión consiste en un gran número de celdas pequeñas, el modelo elaborado para este método puede tener una distribución irregular de resistividades en zonas falsas (Constable *et al.*, 1987, citado en Nely, 2010). Para superar este problema, la ecuación de GaussNewton es menos modificada con el fin de minimizar las variaciones espaciales en los parámetros del modelo (el modelo de valores de resistividad cambia de manera gradual). Este suavizamiento restringido del método de mínimos cuadrados (Ellis & Oldenburg, 1994a, citado en Nely, 2010) incluye la siguiente forma matemática.

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T g - \lambda F q_k \quad (3).$$

Donde,  $F = \alpha_x C_x^T C_x + \alpha_y C_y^T C_y + \alpha_z C_z^T C_z$

$F$ : Matriz de suavizamiento,

$J$ : Matriz Jacobiana en derivadas parciales,

$q_k$ : Vector que contiene el logaritmo de los valores del modelo de resistividad,

$\lambda$ : Factor de amortiguamiento,

$\Delta q_k$ : Vector del modelo perturbación

$g$ : Vector de diferencia (discrepancia).

$C_x, C_y, C_z$ : Matrices de suavizamiento en las direcciones (x, y, z).

$\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ : Filtros de suavizamiento en las direcciones (x, y, z).

## 7.6. PROCESAMIENTO DE DATOS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.

Para obtener un modelo 3D de resistividades reales a partir de capas de resistividades aparentes obtenidas por la metodología de medición, se precisa de un programa de inversión.

Como se ha mencionado anteriormente, estas técnicas de inversión se basan en realizar un proceso iterativo con el fin de obtener un modelo de resistividades reales, tal que el modelo de resistividades aparentes que generaría, sea lo más similar posible a la distribución de resistividades aparentes medida en campo.

El programa utilizado para el procesamiento de los datos de campo es el software RES3DINVx64 (versión 4.00), desarrollado por Geotomo Software, el cual se basa en la teoría de inversión descrita anteriormente.

El programa utiliza un modelo que consiste en la división del subsuelo en un pequeño número de prismas rectangulares, con el fin de simular un modelo en tercera dimensión de un bloque rectangular delimitado por las dimensiones de la malla escogida para el estudio y una subdivisión por capas para determinar los valores de resistividad de los prismas tanto para minimizar la diferencia entre los valores de resistividad aparente observados y calculados de resistividad real. (Figura 20).

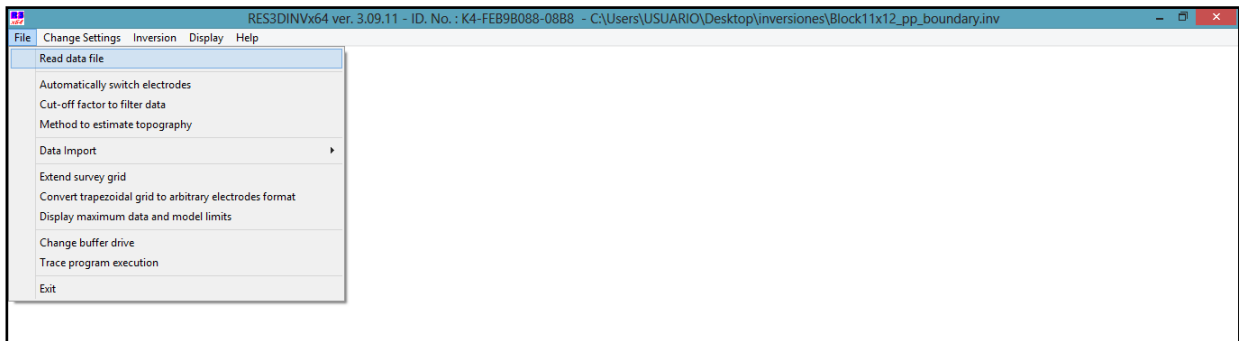
Para la inversión los datos deben estar contenidos en un archivo con extensión *.dat* para que sea posible la lectura de los mismos en el programa RES3DINV y deben ser presentados con la siguiente estructura:

Línea 1	<i>Nombre de la línea de estudio.</i>
Línea 2	<i>Numero de electrodos en la dirección X.</i>
Línea 3	<i>Numero de electrodos en la dirección Y.</i>
Línea 4	<i>Espaciamiento entre electrodos en el eje X [m].</i>
Línea 5	<i>Espaciamiento entre electrodos en el eje Y [m].</i>
Línea 6	<i>Tipo de arreglo.</i>
Línea 7	<i>Número de puntos de datos</i>
Línea 8	<i>0, para indicar que no incluye datos de polarización inducida</i>
Línea 9	<i>Formato para cada punto de dato: Electrodo de corriente C1, Electrodo potencial P1, Electrodo de corriente C2, Electrodo de potencial P2 y valor de resistividad aparente.</i>

Línea 10            *El archivo finaliza con unos pocos ceros, si no posee datos de topografía.*

En el *Anexo A* se encuentra el ejemplo del formato de datos usados para la inversión del modelo en 3D, con el dispositivo polo-polo sin topografía.

Una vez ordenado los datos de resistividad aparente en el formato requerido se procede a la inversión de los mismos. El proceso inicia con la lectura de los datos (*Figura 21*).



**Figura No 21. Opción del RES3DINV para leer archivos .dat.** Fuente: Autor.

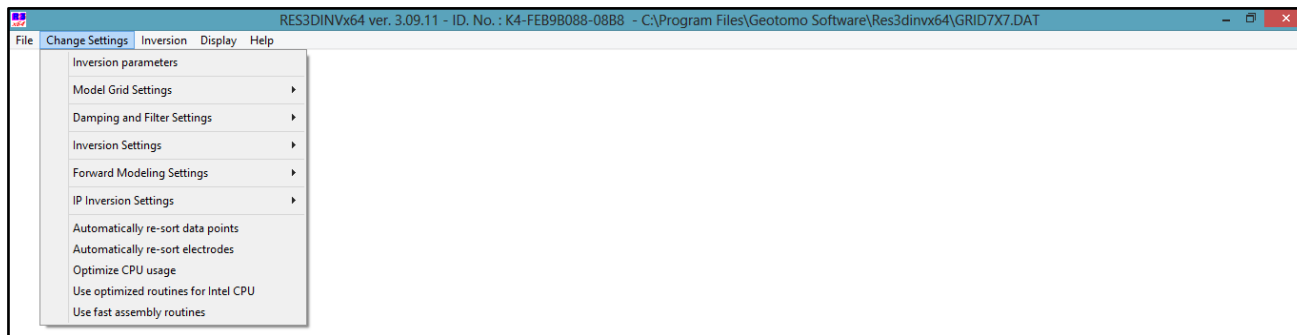
Una de las ventajas que brinda este software es la posibilidad de realizar un filtrado de los datos de campo, el cual permite excluir los datos negativos, erróneos o ruidosos, generados por algún problema en el contacto del electrodo con el suelo, problemas con el cable debido a un corto circuito, a la presencia de un objeto extraño en el subsuelo o al existir una señal/ruido pobre. Es así que utilizando la opción de excluir datos negativos en el listado del formato de datos .dat se realiza una mejor inversión; reduciendo así el número de datos a leer por parte del programa, esto es lo primero que se realizó con el archivo.

Una vez presionado el botón de abrir, el software se encarga de leer todos los datos que conforman el archivo, arrojando en la pantalla del programa un listado con todas las características que componen el bloque de datos, entre las cuales se encuentran tamaño de la cuadrícula los ejes X e Y, el tipo de cuadrícula, también el espaciamiento entre electrodos, el tipo de serie que se utilizó en la medición y el número total de mediciones. También se encuentra el valor de resistividad media, así como también el valor máximo y mínimo de resistividad, entre otros.

El proceso de inversión continúa con la definición de los parámetros de inversión, como el método de inversión, el cual busca siempre una mejoría entre cada uno de los resultados, es decir, que los modelos presentaran valores de resistividad eléctrica que se mantuvieran en un rango de valor razonable; y controlando el error entre los valores de resistividad medidos y calculados, tratando de mantener morfologías en general constantes y adecuadas en términos geológicos, en aras de una coherente interpretación de los resultados de resistividad presentes en el subsuelo.

Dependiendo de las características que lo conformen el conjunto de datos en la opción de cambios de la configuración se encuentran una serie de sub-opciones las cuales permiten modificar dichos ajustes. (*Figura 22*).

- ✓ Inversión de parámetros.
- ✓ Configuración de la cuadrícula del modelo.
- ✓ Configuraciones de filtros y amortiguación.
- ✓ Configuración de inversión.
- ✓ Ajustes del modelado directo.
- ✓ Ajustes IP de inversión.
- ✓ Reordenar automáticamente los datos.
- ✓ Reordenar automáticamente los electrodos.
- ✓ Optimizar el uso de la CPU.
- ✓ Utilizar rutinas optimizadas para el inter CPU.
- ✓ Utilizar rutinas de montajes rápidos

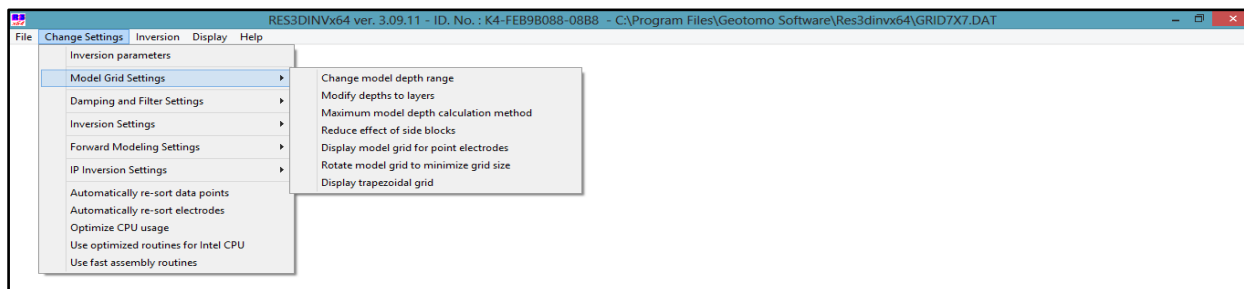


**Figura No 22. Opción de cambios de la configuración.** Fuente: Autor.

Los ajustes existentes en los parámetros de inversión están predeterminados, los cuales incluyen opciones de factores de amortiguamiento inicial y mínimo, el porcentaje del cambio del %RMS para las líneas de búsqueda, el espesor de la primera capa con su respectivo factor de aumento, la profundidad del modelo ajuste de rango; esto da la relación de la profundidad de la capa del modelo más profundo a la pseudoprofundidad máxima de las series de electrodos utilizada en el conjunto de datos por lo general 1 a 1,5 y su número de iteraciones.

La opción de configuración del modelo de la cuadrícula, en este grupo de opciones que controlan la sub-superficie en capas y bloques utilizados como el modelo de inversión. La siguiente lista de sub-opción aparece cuando se selecciona esta opción de menú.

- Cambio del modelo de rango de profundidad: seleccionando esta opción se abre un cuadro de texto; por defecto, el programa creará un modelo tal que la profundidad a la capa profunda es ligeramente mayor que la más grande pseudoprofundidad de las configuraciones de electrodos utilizados. Un valor de 1.0 dará el modelo por defecto. También se puede ajustar el rango de profundidad por medio del establecimiento de un límite máximo de números de capas.



**Figura No 23. Listado de sub-opciones de ajustes del modelo de la cuadrícula.** Fuente: Autor.

En la opción de modificar las profundidades de capas, permite cambiar directamente la profundidad de las capas del modelo esto puede ser útil para ajustar directamente la profundidad de una capa para coincidir con el límite conocido. En la siguiente figura se muestra un ejemplo de esta opción.

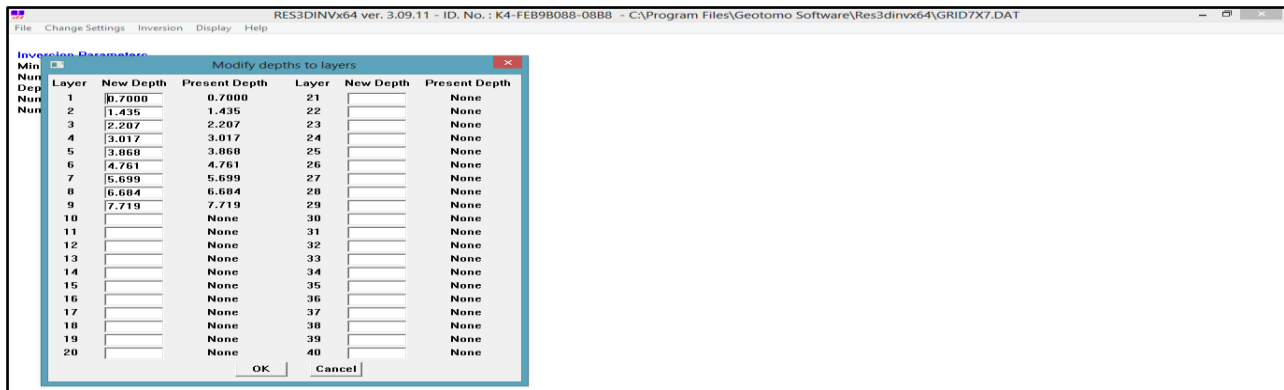


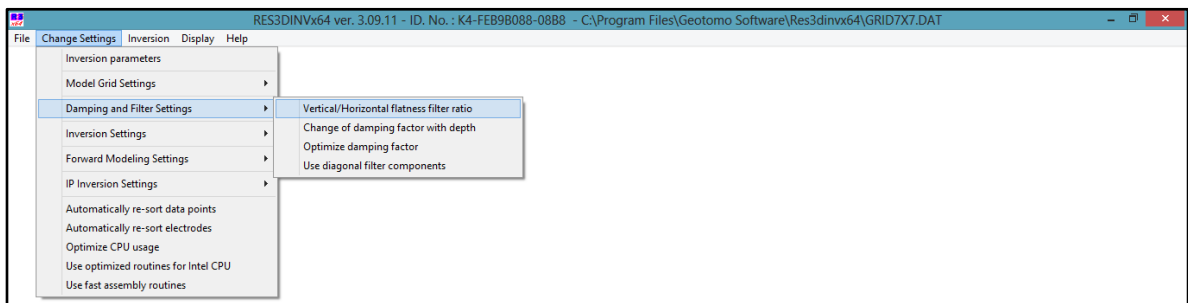
Figura No 24. Listado de profundidad de las capas RES3DINV. Fuente: Autor.

En las otras sub-opciones tales como el máximo modelo de método de cálculo de la profundidad, el programa utiliza la profundidad mediana del método de investigación para estimar el rango de profundidad máxima para el modelo, en cuanto a la opción de reducir el efecto del bloque lateral, se encuentran dos alternativas una de diferencia finita o la de elementos finitos utilizados para el cálculo de los valores de resistividad aparente, la resistividad de los bloques del modelo a los lados y parte inferior se extienden hasta los bordes de la malla. La distancia a los bordes de la malla puede ser 10 veces la longitud máxima de la serie, por lo que los bloques usados tienen un tamaño mucho mayor que los bloques inferiores. Esto hace que los valores de sensibilidad asociados con los bloques laterales a ser mucho más grandes que los bloques interiores vecinos. En algunos casos esto puede causar que los valores de resistividad de los bloques laterales calculados por el método de inversión para tener valores inusualmente altos o bajos. Esta opción permite ajustar los valores de sensibilidad de los bloques laterales de diferentes cantidades. Las otras opciones tales como el display del modelo de la cuadrícula de los puntos de electrodos es para arreglos de mallas no uniformes y el display trapezoidal de la cuadrícula es para arreglos trapezoidales.

Pasando a otra opción del menú diferente a ajustes de filtros y amortiguación, en este grupo se controla los factores de amortiguaciones y los filtros de rugosidad utilizados en el método de mínimos cuadrados suavidad limitado.

En la *Figura 25* se muestra como se despliegan el rango de sub-opciones existentes. Entre los que se encuentra, relación de filtro de planitud vertical y horizontal: se puede seleccionar la relación de los pesos relativos dados a el factor de amortiguamiento para el filtro de planitud vertical (Cz) y filtros de planitud horizontal (Cx y Cy) por defecto, el mismo factor de amortiguamiento se utiliza para todos ellos. Sin embargo, si las anomalías en las pseudosección son alargadas verticalmente, puede forzar el programa para producir modelos que también son alargados verticalmente seleccionando un valor más alto para la relación entre el filtro de planitud vertical.

En el caso del factor de amortiguamiento, dado que la resolución del método de resistividad disminuye exponencialmente con la profundidad, este factor usa el método de mínimos cuadrados aumentándolo con cada capa. Esto se hace con el fin de estabilizar la inversión. Normalmente dicho este factor aumenta en un 1.05 veces con cada capa, aunque es modificable. Si se utiliza un valor grande el modelo mostrara unas oscilaciones innaturales en los valores de resistividad es por esto que el programa permite automáticamente definir el valor del factor de amortiguamiento. Esto es una buena alternativa si el espaciamiento entre electrodos se ha reducido por medio del archivo de datos con el fin de producir un modelo con bloques más pequeños.



**Figura No 25. Ajustes de filtros y amortiguamiento RES3DINV.** Fuente: Autor.

En el caso de optimizar el factor de amortiguamiento, el programa intentará encontrar el factor de amortiguamiento óptimo. Al optimizar el factor, el número de iteraciones para converger puede reducirse considerablemente. Sin embargo el tiempo que tarda dichas iteraciones aumenta por iteración a mayor número de iteraciones mayor el tiempo necesario en la inversión; esto se ilustra en la *Figura 26*, para usar los componentes de filtros en diagonal; el filtro de rugosidad 3D normalmente utilizado en el método de mínimos cuadrados tiene componentes en los ejes X, Y y Z. por lo tanto, tiene una tendencia a producir estructuras con límites ya alineados a lo largo de las direcciones horizontales y vertical, en particular si se utiliza el método de

inversion norma L1 un metodo para reducir este efecto es incluir componentes en las direcciones en diagonal también.

En la primera opción de “filtro de rugosidad horizontal”, se puede optar por aplicar las componentes diagonales solo en el plano xy. En la segunda opción, “filtro de rugosidad vertical”. Se aplicaran las componentes diagonales normalmente se les da el mismo peso como a los componentes verticales y los horizontales.

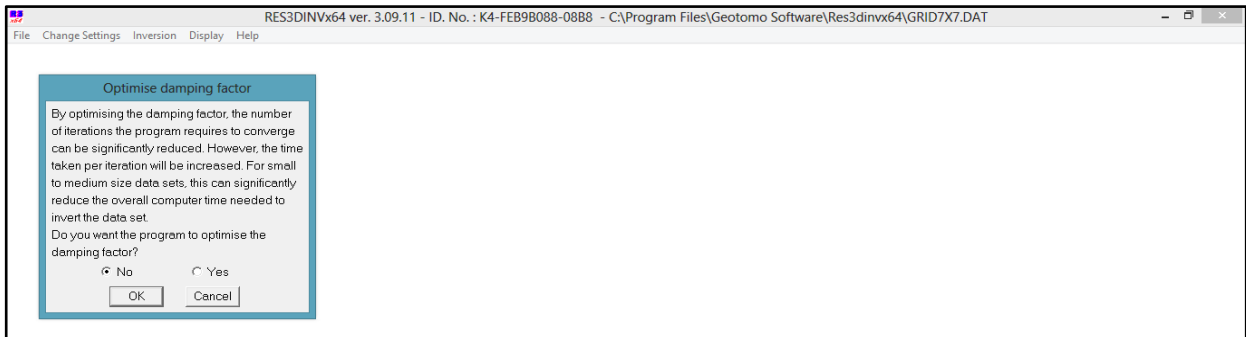


Figura No 26. Optimización del factor de amortiguamiento. Fuente: Autor.

Se puede seleccionar la inversión robusta, la cual discrimina los datos que no se encuentran dentro de un rango razonable de acuerdo al resto de los valores, por lo que es menos sensible a los datos ruidosos que pudieran persistir después de haber sido editados (Ver Figura 27).

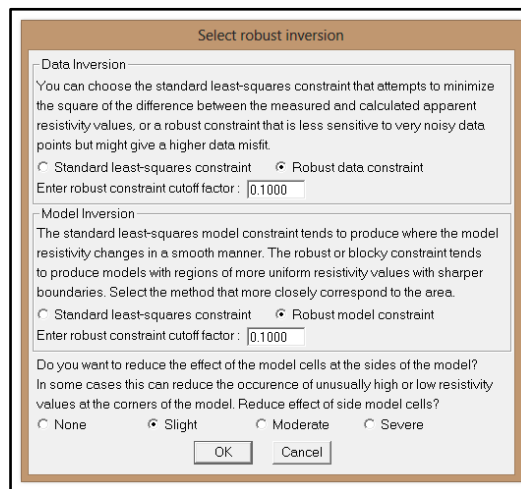


Figura No 27. Cuadro de dialogo de una inversión robusta. Fuente: Autor.

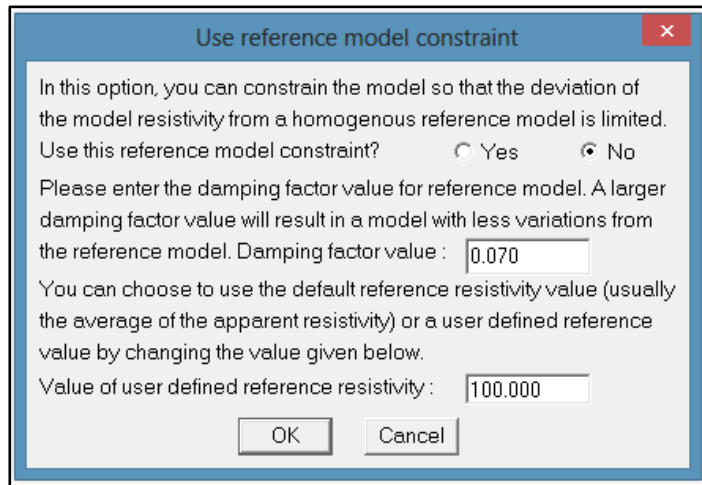
Como se mencionó anteriormente es recomendable usar una inversión con el método de mínimos cuadrados “estándar Gauss-Newton” ya que utiliza un método directo para resolver la ecuación de mínimos cuadrados, donde se obtiene una solución exacta. En teoría, esto produce los resultados más exactos, pero el tiempo de procesamiento aumenta a razón del cubo del número de bloques de modelo. Si el número de puntos de datos y/o células modelo es grande (más de 5000), el tiempo necesario para resolver la ecuación de mínimos cuadrados podría ser la parte que consume más tiempo del proceso de inversión. Con el fin de reducir dicho tiempo está un método alternativo que calcula una solución aproximada a la ecuación least-squares. (“el método incompleto de Gauss-Newton”) mediante un método iterativo; pero en cuestión de calidad de resultados se utiliza la opción “estándar Gauss-Newton”. (Ver Figura 28).

The dialog box is titled "Type of optimization method". It contains the following text and controls:

- Text: "Please select one of the following optimization methods."
  - Radio buttons:  Standard Gauss-Newton,  Incomplete Gauss-Newton
- Text: "Enter convergence limit for the Incomplete Gauss-Newton method. A value of between 0.005 and 0.02 (i.e. 0.5 to 2% accuracy) is normally used."
  - Text input field: [0.01]
- Text: "Use data compression method with the Incomplete Gauss-Newton method? This is required if there is insufficient memory for the entire Jacobian matrix. Do you want to use data compression?"
  - Radio buttons:  No, do not use.,  Yes, use data compression.
- Text: "Select type of data compression. The simple data compression method is probably sufficient for medium size problems. The aggressive method will give greater compression ratios and is probably required for very large data sets and models but take more computer time."
  - Radio buttons:  Use simple method.,  Use aggressive compression.
- Text: "Select the cut-off value for the data compression method. A value of between 0.001 and 0.010 is normally used."
  - Text input field: Value of data compression cut-off factor : [0.0025]
- Text: "Scale Incomplete Gauss-Newton method? Scaling could reduce the computer time for some very large data sets."
  - Radio buttons:  No, do not use.,  Yes, use scaling.
- Text: "Select type of scaling to use."
  - Radio buttons:  First order,  Second order,  Third order
- Buttons: [OK] [Cancel]

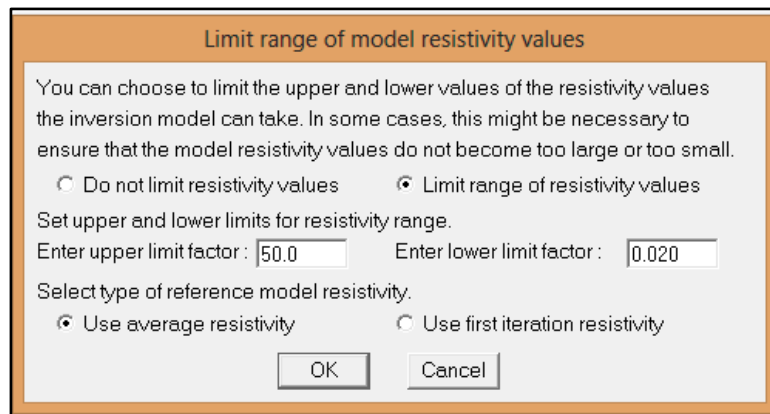
**Figura No 28. Cuadro de dialogo del tipo de método de optimización.** Fuente: Autor.

En el uso del modelo de referencia en la inversión, la ecuación de mínimos cuadrados minimiza una combinación de la suavidad del modelo y del desajuste de los datos. A veces una restricción adicional se utiliza cuando el modelo debe ser cerrado. El modelo de referencia es por lo general un modelo de medio espacio homogéneo. El siguiente cuadro de dialogo muestra los parámetros que pueden ser seleccionados.



**Figura No 29. Cuadro de diálogos para modelo de referencias.** Fuente: Autor.

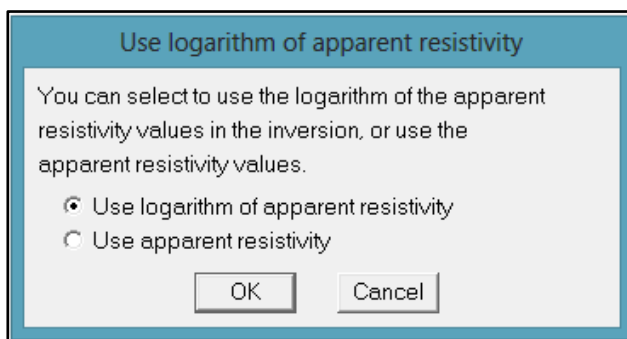
Cuando se decida usar la opción de Rango límite del modelo de resistividad se muestra el siguiente cuadro.



**Figura No 30. Cuadro de los rangos límites.** Fuente: Autor.

Esta opción permite limitar el rango de valores de resistividad que la subrutina de inversión dará. En el ejemplo anterior, el límite superior es de 50 veces el valor medio del modelo de resistividad, mientras que el límite inferior es de 0.02. El programa utiliza los límites “blandos” a un cierto grado. Sin embargo, esta opción evitara valores de modelo de resistividad extremadamente pequeños o grandes que son físicamente poco realistas. También se puede optar por utilizar el modelo de inversión entendido en la primera iteración como el modelo de referencia.

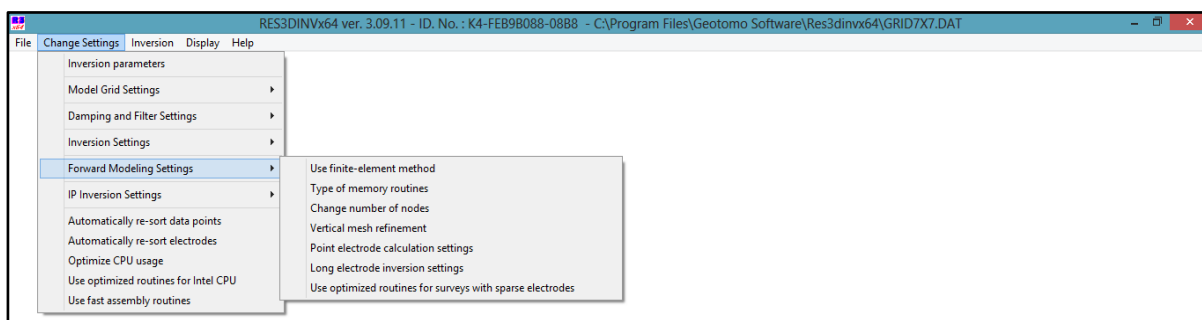
Al Escoger el logaritmo de resistividad aparente, por defecto, el programa utilizará el logaritmo de los casos, esto da los mejores resultados. En algunos casos, por ejemplo, con negativo o cero de resistividad aparente esto no es posible, a continuación se muestra el cuadro de dialogo que aparece cuando se selecciona esta opción.



**Figura No 31. Cuadro de dialogo para escoger el logaritmo de resistividad aparente.**

Fuente: Autor.

Siguiendo con la serie de ajustes se encuentra con la opción de ajustes de modelado directo: este conjunto de rutinas cubre varios aspectos de las rutinas de diferencias finitas y elementos finitos utilizados para calcular la resistividad aparente. Tiene la siguiente lista de opciones secundarias.



**Figura No 32. Listado de opciones para los ajustes del modelamiento directo.** Fuente:

Autor.

Este programa permite que se utilice, ya sea el de elementos finitos o método de diferencias finitas para calcular los valores de resistividad aparente. Por defecto, el programa utilizará el método de diferencias finitas, que es más rápido, si el conjunto de datos no contiene la topografía. Si el conjunto de datos contiene la topografía, la opción por defecto es el método de elementos finitos. El método de elementos finitos es significativamente

más lento que el método de diferencias finitas si el conjunto de datos no tiene la topografía, en este caso se utilizara la opción de diferencias finitas ya que el conjunto de datos no contiene topografía.

Por defecto, el programa utiliza una diferencia finita o rejilla de elementos finitos con 2 nodos (en las direcciones x e y) entre electrodos adyacentes. La opción de cambiar el número de nodos permite usar 3 o 4 nodos entre electrodos adyacentes para una mayor precisión. Usando más nodos aumentará la precisión de la subrutina modelado directo, pero el tiempo de computación y memoria requerida también aumentará. Para conjuntos de datos con electrodos de punto arbitrario. El programa siempre usará la opción 4 nodos.

La modificación de los parámetros de inversión depende de cómo el procesador percibe los datos y del conocimiento acerca de la función de los parámetros, así como la presentación que se quiere dar a los modelos, la morfología no cambia al modificar los valores de los parámetros, sin embargo es posible la disminución del error entre la resistividad medida y la calculada y la obtención de valores de resistividad más coherentes (De la Torre, 2010).

Después de concluido el proceso de inversión de datos de resistividad aparente a valores de resistividad real, se despliega el resultado del mismo: la imagen del modelo de resistividades reales por "Layers" o capas con dimensiones establecidas en x e y, a una profundidad determinada. También se puede observar la diferencia entre los datos medidos y los calculados (RMS-error).

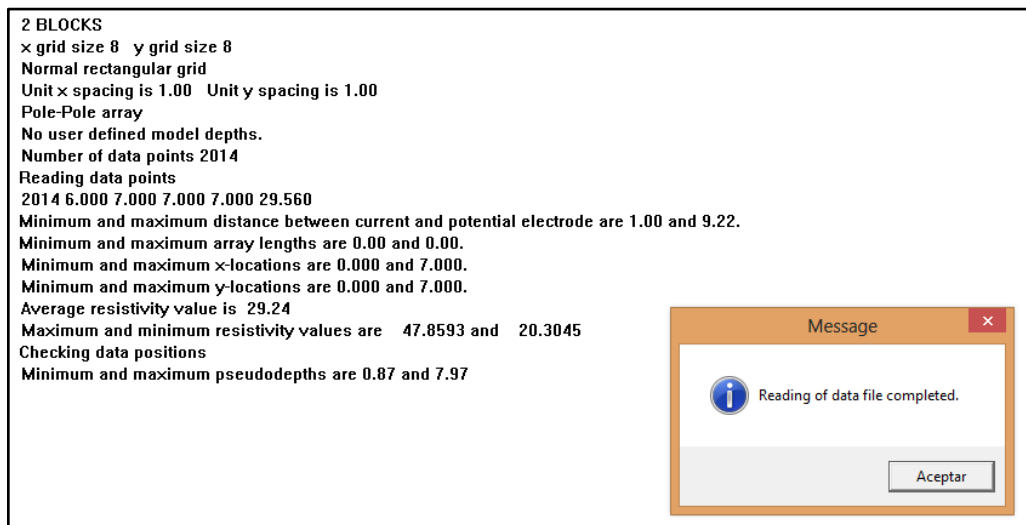
## 8. APLICACIÓN DEL MÉTODO.

Los resultados de la aplicabilidad de la metodología de procesamiento de las tomografías eléctricas de resistividad 3D para un conjunto de datos formados por un mallado de 8x8 son mostrados como la imagen de un bloque rectangular de la variación de resistividad real en profundidad y extensión. Para el desarrollo de este libro se ilustrará un caso que ejemplifica un bloque de resistividad del subsuelo con características diferentes, como se puede observar en la *Tabla 3*. En la *Figura 33* y *34* se exhiben los resultados obtenidos del proceso de inversión de los datos de resistividad aparente. En el *Anexo A* se encuentran los archivos de datos en el debido formato de lectura del RES3DINV del conjunto de datos mencionados.

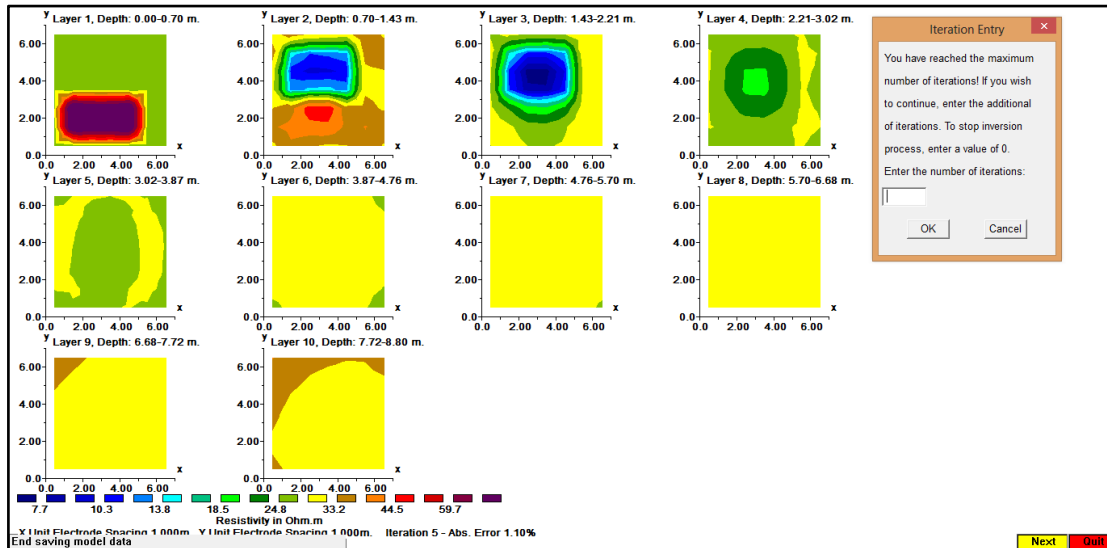
**Tabla 3.** Características del conjunto de datos.

NOMBRE	TIPO DE ARREGLO	ESPACIAMIENTO INTERELECTRODOS (m)		NUMERO DE ELECTRODOS		NUMERO DE MEDIDAS	PROFUNDIDAD MAX (m)	RMS-ERROR (%)
		Eje X	Eje Y	Eje X	Eje Y			
MALLA 8X8	POLO-POLO	1	1	8	8	2014	8,8	1,1

Con los resultados de la inversión de los datos de resistividad aparente procesados se puede dar paso al empleo de Voxler el cual es un software de gráficos 3D.

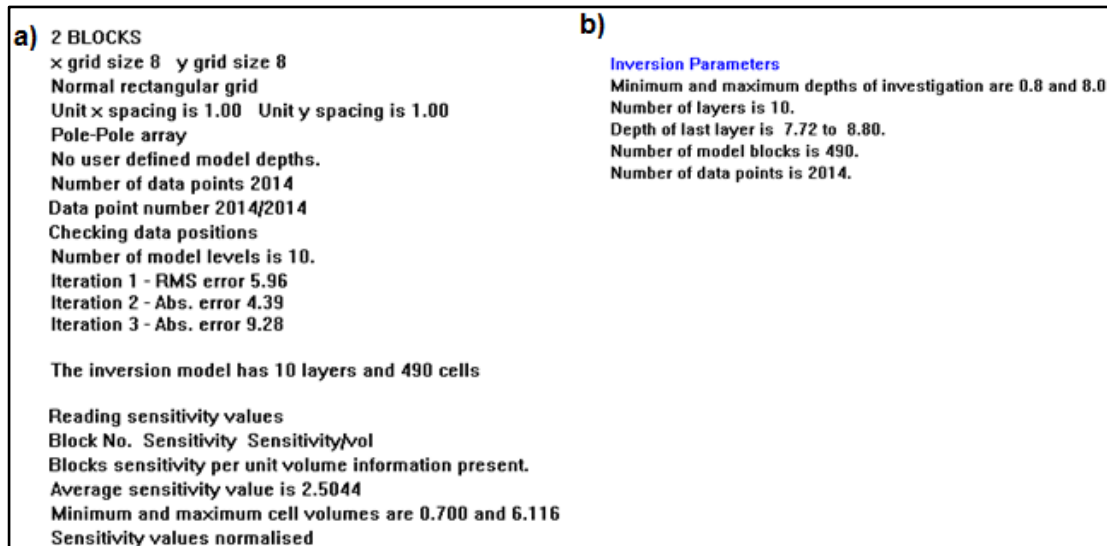


**Figura No 33.** Listado de las características de datos a procesar. Fuente: Autor.



**Figura No 34. Resultado de los Layers de la inversión del conjunto de datos, para una malla de 8x8.** Fuente: Autor.

Dando una opción de seguir iterando el proceso de inversión en aras de disminuir el valor del error obtenido tras la inversión; seguido a esto se selecciona la opción del menú relacionada con el “display”, para visualizar de una mejor manera los resultados de la inversión, dicho listado de las características de inversión se evidencia en la *Figura 35*.



**Figura No 35. Cuadro de textos de inversión a) listado de características de inversión con datos de iteraciones, b) características de los parámetros de inversión.** Fuente: Autor.

El software ofrece la posibilidad de visualización vertical y horizontalmente respectivamente, el conjunto de opciones relacionadas con la visualización de los modelos como las secciones de la pantalla (Ver Figura 36).

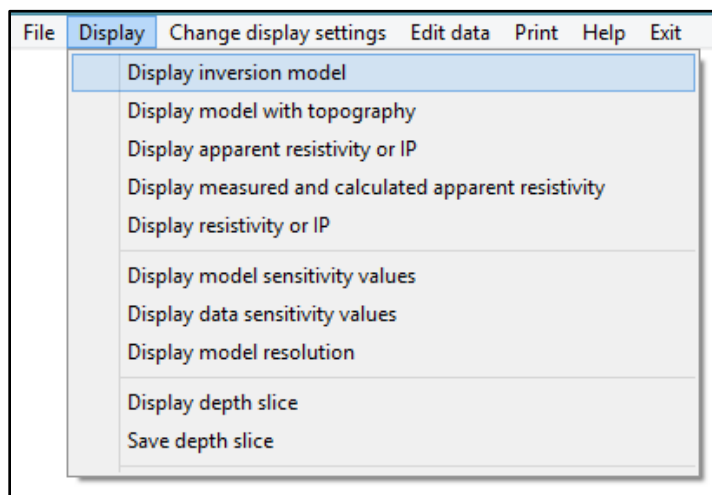


Figura No 36. Conjunto de sub-opciones de la opción “Display”. Fuente: Autor.

Para mostrar la inversión de modelos se selecciona con el fin de trazar el modelo. Se puede trazar el modelo en forma de rodajas horizontales o verticales a través de la tierra, para los planos XZ y ZY respectivamente; al seleccionar esta opción se puede visualizar desde dos vistas arrojando el siguiente cuadro de dialogo.

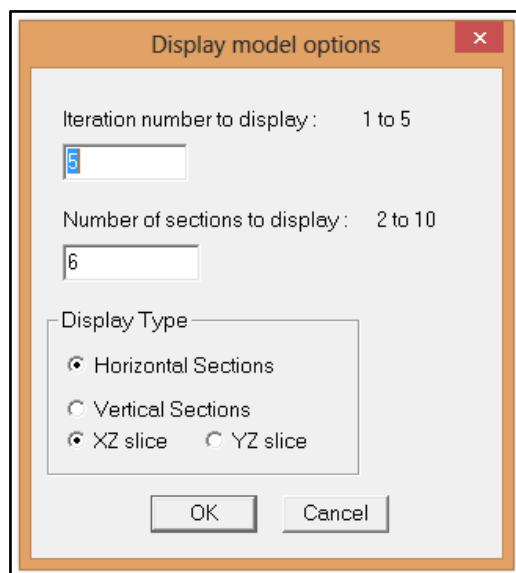


Figura No 37. Opción de la visual del modelo. Fuente: Autor.

Seguido a esto se escoge la opción de visualizar los resultados en escala de intervalos de contorno logarítmicos. Una es la vista horizontal y la otra vertical en los planos XZ e YZ; respectivamente, en las siguientes figuras se muestran la inversión de los modelos en la vista horizontal y vertical; Algunos estudiosos de esta técnica, hacen uso solamente de los resultados obtenidos por el software RES3DINV, para la debida interpretación de la asociación de los valores de resistividad real calculados y las características físicas presentes en el subsuelo. Pero actualmente existe software de apoyo para ilustrar la distribución espacial de resistividades en un rectángulo 3D, el cual se asemeja mucho a las características del subsuelo presente.

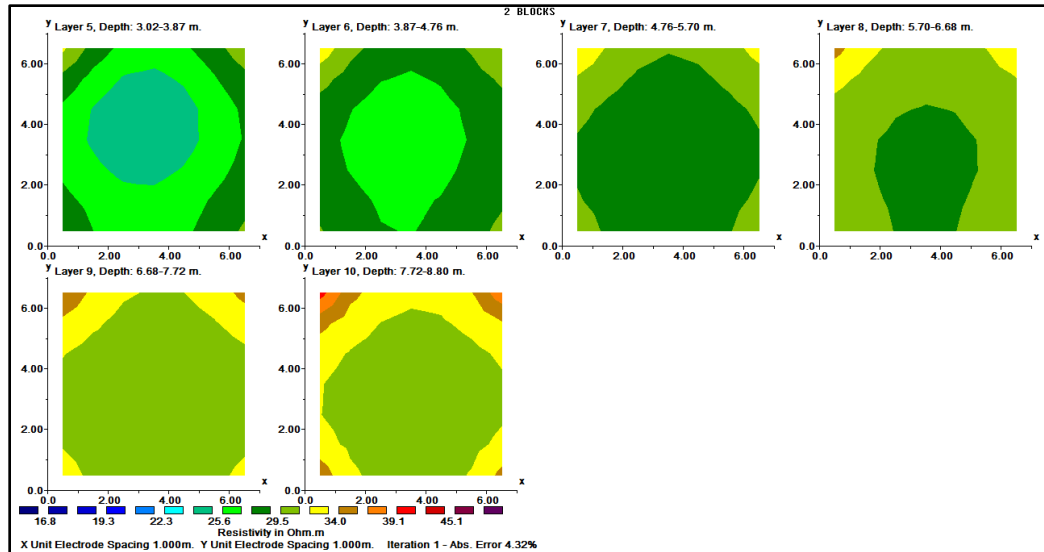


Figura No 38. Display de la inversión de los modelos vista horizontal plano XZ. Fuente: Autor.

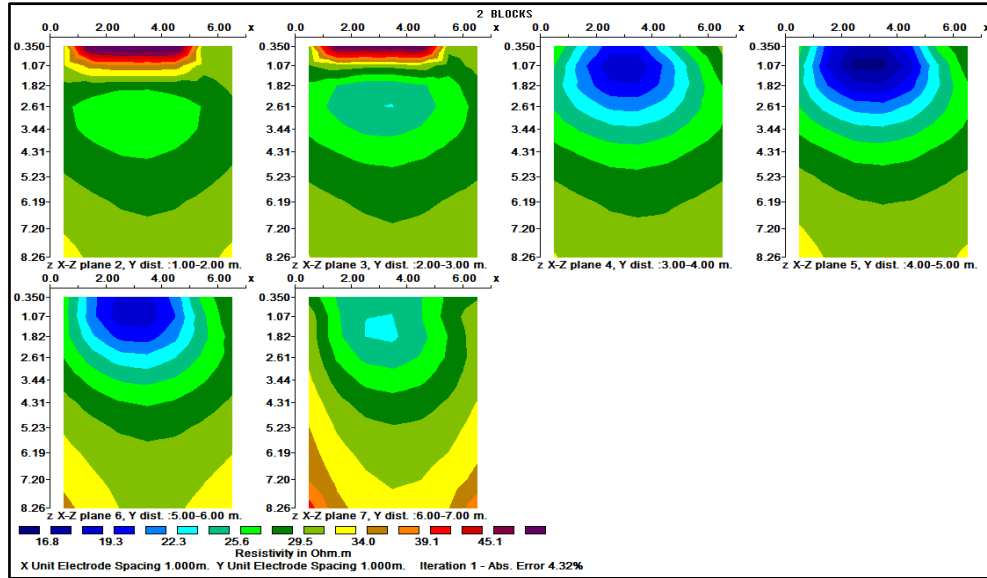


Figura No 39. Display de la inversión de los modelos vista vertical plano XZ. Fuente: Autor.

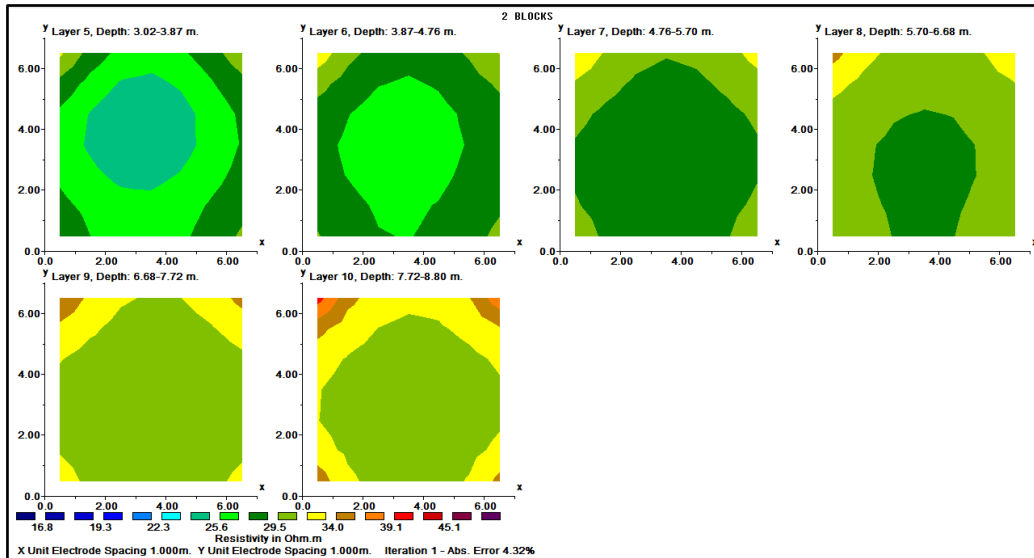
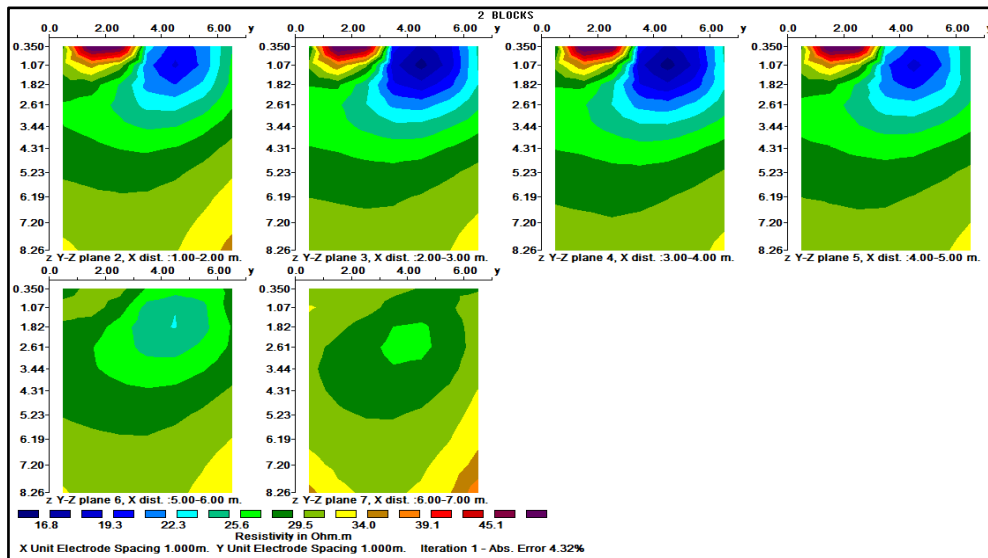
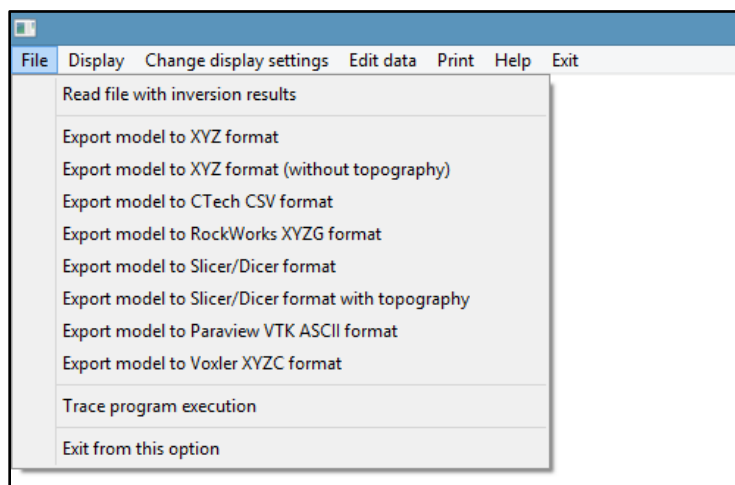


Figura No 40. Display de la inversión de los modelos vista horizontal plano ZY. Fuente: Autor.



**Figura No 41. Display de la inversión de los modelos vista vertical plano YZ.** Fuente: Autor.

Al finalizar la visualización de los resultados obtenidos por la inversión se pasa a exportar el modelo, el software ofrece una lista de exportación con diferentes opciones secundarias, donde los valores de modelo almacenados en el archivo INV se pueden exportar a una variedad de pantalla 3D y software de contorno. XYZ es un formato basado en texto genérico usado por el Geosoft Inc. Software. VOXLER es un programa de contorno 3D Software de Oro, que es similar al programa Surfer por la misma empresa que se utiliza ampliamente para visualizaciones en 2D. VTK es un formato que se puede leer por la vista del programa gratis en 3D de visualización de gráficos Ampliamente utilizado en los círculos académicos y los organismos gubernamentales y por último el tradicional cerrar esta opción (Ver Figura 42).

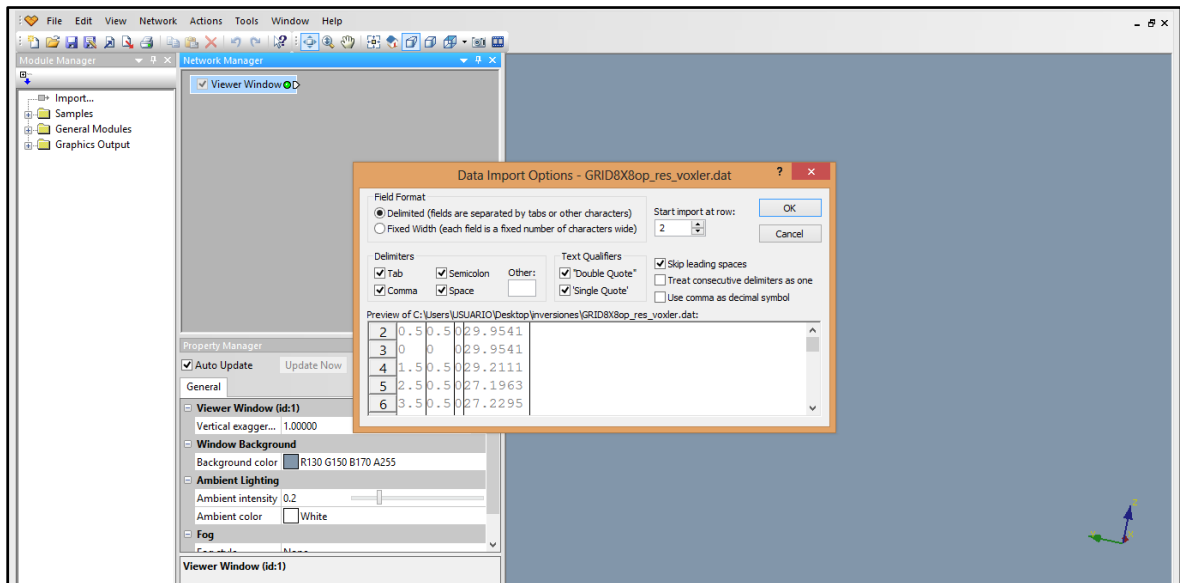


**Figura No 42. Listado del menú de la opción de Display, para exportar los archivos de inversión.** Fuente: Autor.

Es así como se selecciona la opción de exportar el modelo a formato VOXLER XYZC, en el anexo B, se encuentra el formato de datos los cuales son los utilizados para realizar el modelamiento de manera gráfica de los resultados de la inversión.

Voxler es un software de gráficos 3D que se puede utilizar para mostrar el modelo de inversión en diferentes formas. El primer paso es exportar los valores de modelos de inversión almacenados en un archivo "inv" desarrollado en RES3DINV en el formato utilizado por Voxler para hacer eso, primero se debe leer el archivo "inv" de la ventana "Display" del programa, este paso se mencionó anteriormente donde se especificaba la manera de exportar archivos de inversión en el formato apto para Voxler.

Se desarrolla entonces primero el trazado del modelo sin la topografía ya en esta inversión se los datos no contemplaban este aspecto, archivo que se exportó a formato voxler como se describe anteriormente (ahorro como logaritmo de resistividad), para iniciar el trazado del modelo, y utilizar la opción de "datos de carga" en Voxler (o "importar" en voxler 3) se procede a leer en un archivo de datos, como se muestra a continuación.



**Figura No 43. Lectura de los datos de la inversión en formato Voxler.** Fuente: Autor.

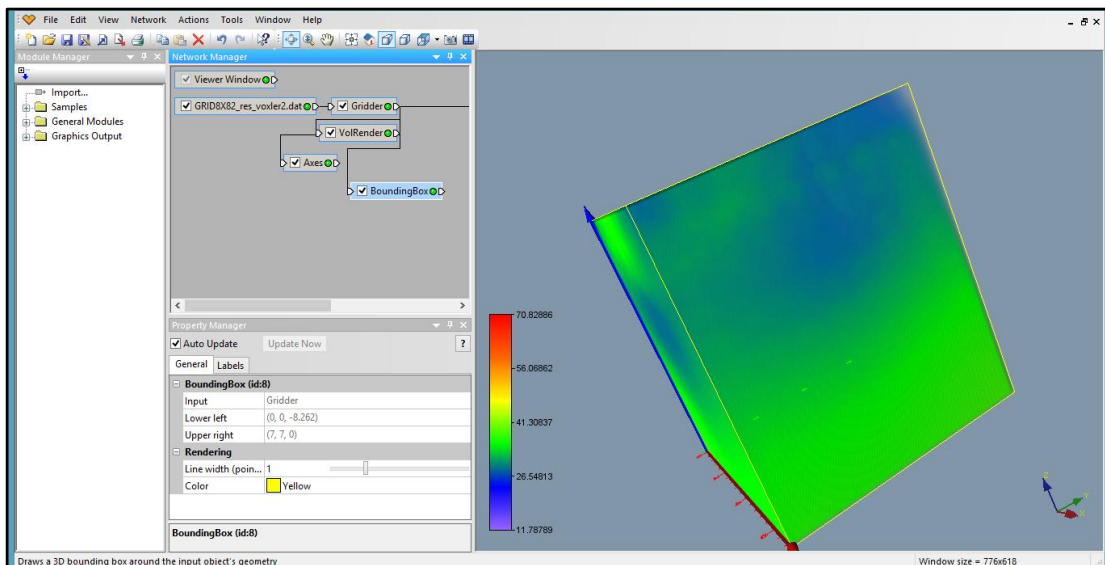
Una vez leído los datos en el formato indicado para el programa se procede a llevar a cabo las tres operaciones que normalmente se realizan para los conjuntos de datos.

El primer paso es abrir un cuadro de límite que muestra los límites espaciales del conjunto de datos, seleccionando la opción " Gráficos Output- Bounding box " en la ventana de "biblioteca de módulos". Asegurándose que el conjunto de datos se resalta en azul la luz en la ventana del programa (como se muestra en el diagrama anterior) cuando se selecciona esta opción.

El siguiente paso es mostrar el eje x, y y z seleccionando los "gráficos de salida-Ejes/Axes" opción en la ventana de "biblioteca de módulos". Asegurándose de que el conjunto de datos se resalta en azul la luz en la ventana del programa, así cuando se selecciona esta. A continuación, debería ver los ejes dibujados como Red (x), verde (y) y azul (z), tal como se muestra en la siguiente figura. En este punto, girar la caja en la ventana de "espectador/viewer" de modo que el eje z apunta hacia arriba. Es posible que desee cambiar la configuración en la ventana de "Propiedades" para el módulo de "ejes".

La tercera operación es común a la cuadrícula de los datos. Para hacer eso, primero se hace clic en el nombre del archivo de datos en la ventana de "red" de modo que quede resaltada en azul claro de nuevo. Luego de esto se hace doble clic en la opción "Gridder" en la ventana de "biblioteca de módulos". Esto debería mostrar la ventana "propiedades" para el módulo "Gridder".

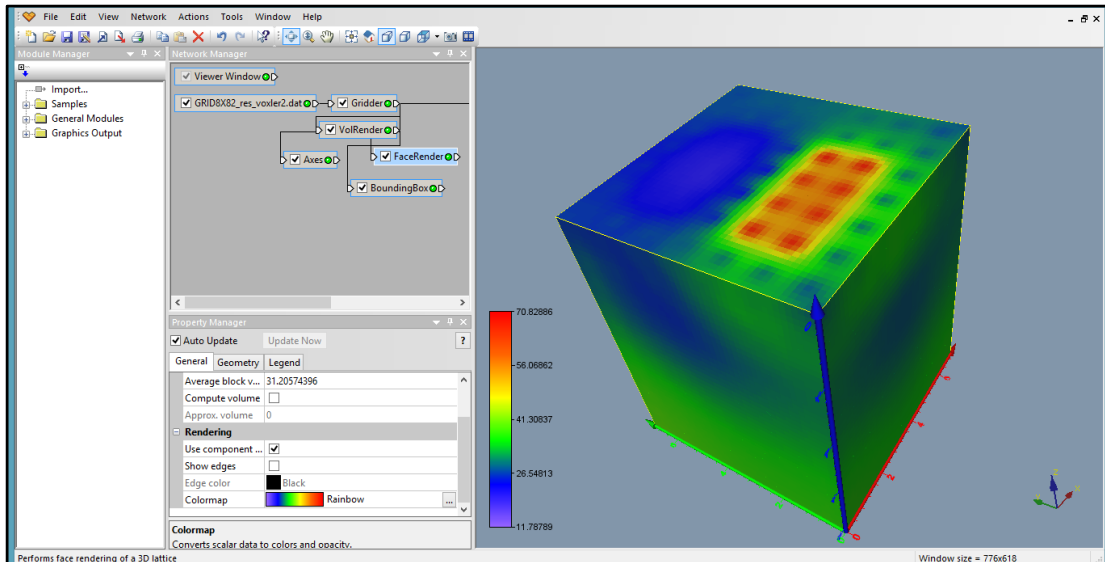
Haga clic en la opción "Begin Gridding" en la parte inferior de la ventana "Propiedades" para protagonizar el cálculo grillado que tarda normalmente unos segundos tal como se muestra en la siguiente figura. Una vez que el grillado es completa, puede mostrar los datos en diversas formas



**Figura No 44. Procesamiento grafico en Voxler, con las opciones activadas de cuadro delimitador, mostrar los ejes X, Y y Z y Gridded y Begin Gridded.** Fuente: Autor.

Siguiente a esto, el software ofrece toda una gama de alternativas para representar de manera gráfica el conjunto de datos de la inversión, a continuación se muestra algunas de maneras más comunes para mostrar los datos:

**VolRender:** Esto muestra el modelo 3D de imaginar, Para usarlo, primero hay que seleccionar el módulo "Gridded" haciendo clic en él para que se resalte, a continuación a esto, se selecciona la opción "graphics Output- VolRender". Ajuste la configuración en "propiedades" hasta obtener el color de la imagen que se desea tiene valor y "opacidad". Si se establece en 1.0, sólo se muestran los valores de modelo a los lados y la superficie. La reducción permite a las partes interiores que se mostrarán. Por ejemplo, la *Figura 45* utiliza un ajuste de 1.0.



**Figura No 45. Opción de VolRender.** Fuente: Autor.

Isosuperficie: Esta traza el contorno de la superficie para el valor seleccionado. Para trazar la isosuperficie correspondiente a un valor en específico, primero se debe asegurar de que está seleccionado el módulo "Gridder" y la opción isosuperficie. Esto mostrará un cuadro de "propiedades" para la isosuperficie (correspondiente al valor de la resistividad del medio) en la ventana de "viewer" y. En el cuadro de "propiedades", se puede ajustar los parámetros de representación isosuperficie. Esto muestra el material de baja resistividad en el vertedero como isosuperficie; en las siguientes figuras se ilustra cómo se visualiza esta opción para diferentes isovalores del rectángulo 3D de resistividades.

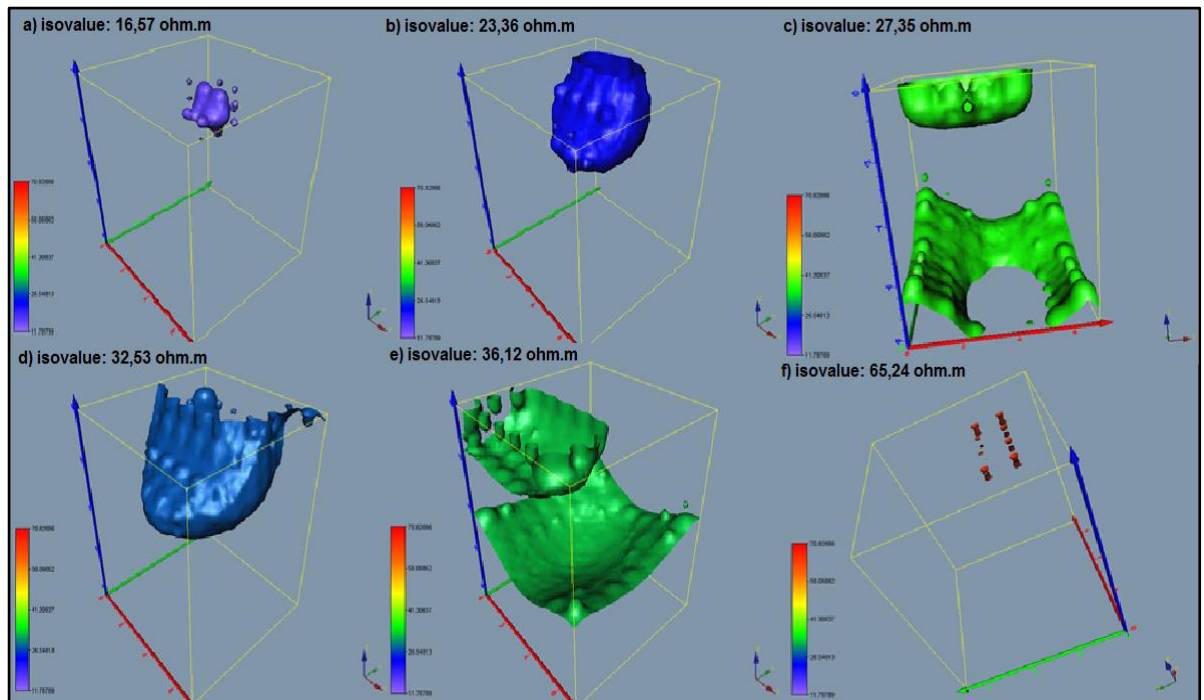


Figura No 46 opción Isosurface con un isovalores de a) 16,57 Ohm.m, b) 23, 36 Ohm.m, c) 27,35 Ohm.m, d) 32,53 Ohm.m, e) 36, 12 Ohm.m y f) 65,24 Ohm.m. Fuente: Autor.

Orthoimage: Este Muestra una división seleccionada a través del modelo. Primero, se selecciona el módulo "Gridder" haciendo clic en él, luego de esto se escoge la opción "Orthoimagen". La figura 61 muestra un ejemplo de corte vertical en el plano XZ. En esta opción de gráfico se puede mostrar varias rebanadas seleccionando la opción "Orthoimage" de nuevo, por ejemplo, para mostrar un corte en el plano XY horizontal en la misma pantalla.

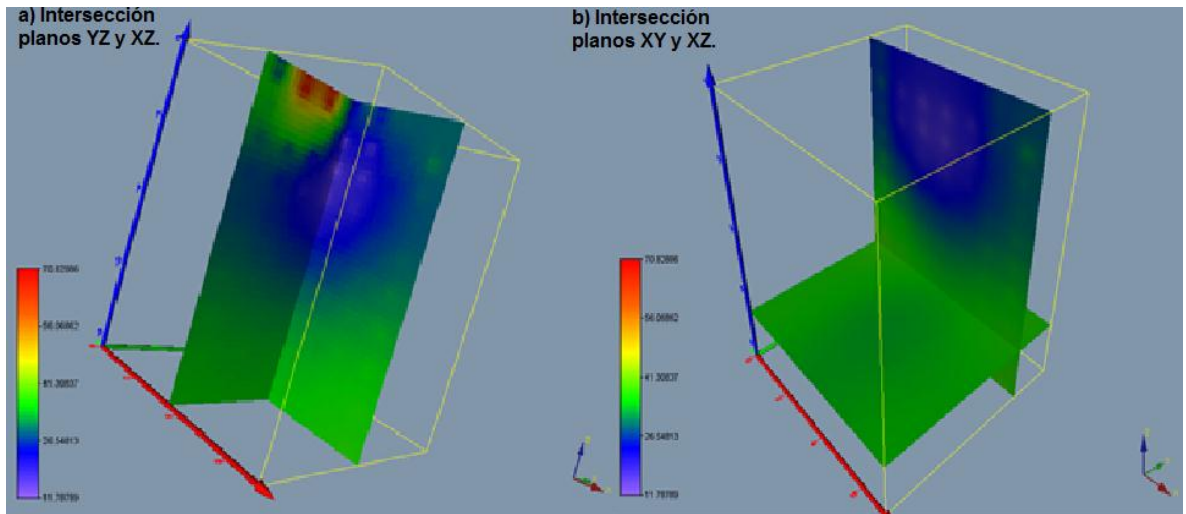


Figura No 47. Opción de Orthoimage con intersecciones en los planos a) XZ y XY, b) XZ y YZ. Fuente: Autor.

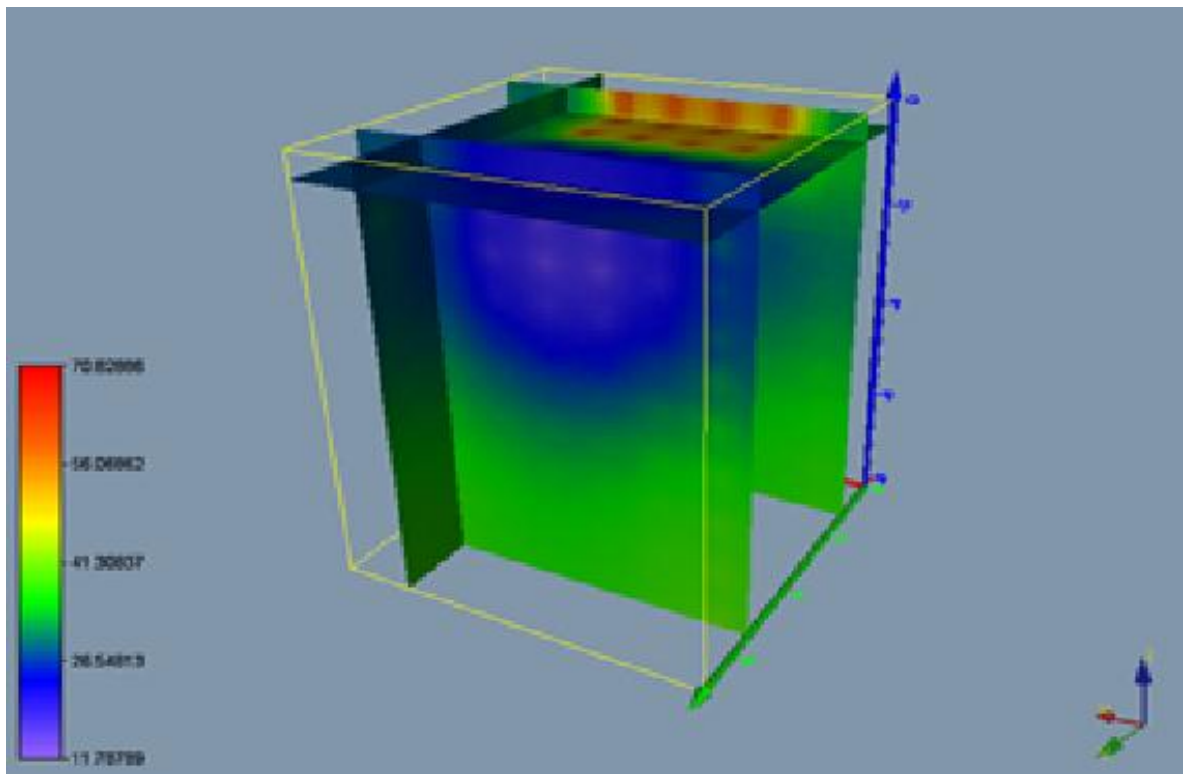


Figura No 48. Opción de Orthoimage con intersecciones en varios planos. Fuente: Autor.

## 9. CONCLUSIONES.

- ✓ La tomografía eléctrica es una herramienta muy valiosa para observar la distribución de los valores de resistividad en un terreno. No obstante, su aplicación siempre debe estar acompañada de un control de campo que permita relacionar las resistividades con los materiales presentes en cada sitio.
- ✓ Como resultado de la investigación bibliográfica realizada, se expusieron las bases teóricas del método de resistividad para prospección geoelectrica en 3D, enunciando unos valores de resistividad asociados a diferentes materiales encontrados en la naturaleza, De igual manera se describieron unas generalidades por parte del método de resistividad, presentando una introducción al concepto de resistividad aparente, los dispositivos geoelectricos empleados en el método y los tipos de prospecciones geoelectricas. La investigación también permitió definir la teoría de la técnica de la tomografía eléctrica 3D, exponiendo los fundamentos y la metodología para la construcción de bloques rectangulares 3D de la distribución espacial de la resistividad presente en un subsuelo.
- ✓ Se describió el procedimiento de medición de los valores de resistividad eléctrica del subsuelo, estableciendo así una metodología para el levantamiento de tomografías eléctricas de resistividad tanto en 2D como en 3D. Los valores de resistividad aparente se transformaron a valores de resistividad real usando el software de inversión RES3DINVx64 (versión 4.00). Además, se describió el procedimiento utilizado para el procesamiento de los datos, señalando la inversión robusta como método de inversión, y el método de elementos finitos para el cálculo del modelo directo, como parámetros de inversión ofreciendo resultados óptimos para la interpretación. El proceso de inversión de los datos se basa en la teoría explicada por Loke & Barker (1996), la cual implementa una versión iterativa basada en un método Newtoniano que tarda más tiempo en el cálculo por medio de una técnica de optimización no lineal de mínimos cuadrados.
- ✓ Se obtuvieron imágenes de tomografías eléctricas de resistividad 3D, en las cuales se evidenció unos valores máximos y mínimos e resistividad aparente de 47,86 y 20,30 Ohm.m Respectivamente, con un valor de resistividad media de 29, 24 Ohm.m.

- ✓ El arreglo polo - polo es una opción apropiada ya que, en condiciones de buen contacto electrodos-suelo, resuelve muy bien la presencia de estructuras verticales y horizontales.
- ✓ A la vista de los datos que se van obteniendo con la tomografía eléctrica, se puede afirmar que es una herramienta muy adecuada, desde el punto de vista de fiabilidad, de la rapidez de ejecución, del consumo de tiempo de procesado y de la no invasión del subsuelo, para apoyar a estudios ya sean geotécnicos, hidrogeológicos, hidráulicos, geoquímicos, etc.
- ✓ Los modelos 3D son ideales para lograr una buena delimitación de las propiedades y características que conforman el subsuelo, sin despreciar la utilidad de los modelos 2D.
- ✓ El involucrar herramientas computacionales como los software Res3Dinv y Voxler, los cuales mejoran la comprensión de los conceptos y de esta manera proveen aplicaciones prácticas, permitiendo utilizar las competencias como método de evaluación dentro de los procesos de aprendizaje en la ingeniería civil.
- ✓ Voxler Es un programa de gran alcance, rápido, con imágenes personalizadas en 3D de datos. Importa fácilmente datos en una multitud de formatos de archivo para crear impresionantes gráficos para explorar las relaciones en un conjunto de datos.

## 10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- ✓ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación: Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Sexta actualización. Bogotá: Icontec, 2008. NTC 1486.
- ✓ Dahlin, T., C. Bernstone, 1997. A roll-Along technique for 3d resistivity data acquisition with multi-electrode arrays. SAGEEP 97 (symposium on the application of geophysics to engineering and environmental problems), Reno, Nevada, March 23-26 1997, vol 2, 927-935.
- ✓ Loke, M.H. and Barker, R.D., 1996a. "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 survey and data inversion". Geophysical Prospecting, 44, 499-523.
- ✓ Orellana, Ernesto (1972). "Prospección Geoeléctrica en corriente continua". Paraninfo, Madrid. España.
- ✓ Keller, G.V and Frischknecht, F.C., 1966. Electrical methods in geophysical prospecting. Pergamon Press Inc., Oxford
- ✓ Kearey, P., Brooks M. y Hill, I., 2002, An introduction to Geophysical Exploration, Blackwell Publishing, Edic. 3, 183-185.
- ✓ Res3DInv, 2005, Geotomo Software, Manual V. 2.15.
- ✓ M. H. Loke. 1994-2004. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.
- ✓ Griffiths, D.H. and Turnbull, J., 1985. A multi-electrode array for resistivity surveying. First Break 3 (No. 7), 16-20.
- ✓ López Hidalgo, Andrés Antonio; Loke, Meng Heng; Fanton, Gerardo Oscar; Cara Rubí, Enrique. Técnicas prácticas para investigación de resistividad en dos y tres dimensiones (tomografía eléctrica 2D Y 3D). 2003.

- ✓ Bello, Verónica. Prospección geofísica con Tomografía eléctrica 2D y 3D para la caracterización del subsuelo en zonas kársticas de yesos (Provincia de Cuenca, España) y calizas (Provincia de Castilla y León, España),". 2008. Trabajo de Grado (Ingeniero Geofísico). Universidad Simón Bolívar. Coordinación de Ingeniería Geofísica.
- ✓ Arrubarrena Moreno, Manuel. "Caracterización de un sitio contaminado por hidrocarburos usando tomografía de resistividad eléctrica". México D.F, 2010. Trabajo de Grado (Ingeniero Geofísico). Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. División de Ciencias de la Tierra.
- ✓ Martínez Pagán, Pedro. "Aplicación de diferentes técnicas no destructivas de prospección geofísica a problemas relacionados con contaminación ambiental producida por diferentes actividades antrópicas en la región de Murcia". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena. Departamento de Ingeniería Minera, Geológica Y Cartográfica.
- ✓ Koefoed, O., 1979. Geosounding Principles 1: Resistivity sounding measurements. Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam.

## **ANEXOS**

### **Anexo A. FORMATO DE DATOS .dat.**

Malla 8x8.				
8	Número de electrodos en la dirección X.			
8	Número de electrodos en la dirección Y.			
1	Espaciamiento entre electrodos en el eje X.			
1	Espaciamiento entre electrodos en el eje y.			
2	Tipo de arreglo: Polo-Polo			
2014	Número de puntos de datos.			
0	no incluye datos de polarización inducida			
Posición del electrodo de corriente 1	Posición del electrodo de potencia 1	Posición del electrodo de corriente 2	Posición del electrodo de potencia 2	Valor de resistividad aparente
0.000	0.000	1.000	0.000	30,275
0.000	0.000	2.000	0.000	30,394
0.000	0.000	3.000	0.000	30,147
0.000	0.000	4.000	0.000	29,843
0.000	0.000	5.000	0.000	29,588
0.000	0.000	6.000	0.000	29,570
0.000	0.000	7.000	0.000	29,663
0.000	0.000	0.000	1000,00	30,209
0.000	0.000	1.000	1000,00	32,353
0.000	0.000	2.000	1000,00	31,787
0.000	0.000	3.000	1000,00	30,659
...				
1.000	7.000	7.000	7.000	30,331
2.000	7.000	3.000	7.000	28,344
2.000	7.000	4.000	7.000	27,884
2.000	7.000	5.000	7.000	28,504
2.000	7.000	6.000	7.000	29,208
2.000	7.000	7.000	7.000	29,647
3.000	7.000	4.000	7.000	28,344
3.000	7.000	5.000	7.000	28,022
3.000	7.000	6.000	7.000	28,487
3.000	7.000	7.000	7.000	28,946
4.000	7.000	5.000	7.000	28,594
4.000	7.000	6.000	7.000	28,336

4.000	7.000	7.000	7.000	28,571
5.000	7.000	6.000	7.000	29,077
5.000	7.000	7.000	7.000	28,848
6.000	7.000	7.000	7.000	29,560
0				
0				
0				
0				
0				

## **Anexo B. FORMATO DE DATOS VOXLER.**

X	Y	Z	RESISTIVIDAD
0.500	0.500	0.000	2,9954E+01
0.000	0.000	0.000	2,9954E+01
1.500	0.500	0.000	2,9211E+01
2.500	0.500	0.000	2,7196E+01
3.500	0.500	0.000	2,7230E+01
4.500	0.500	0.000	2,9053E+01
5.500	0.500	0.000	2,8625E+01
6.500	0.500	0.000	3,0086E+01
7.000	0.000	0.000	3,0086E+01
0.500	1.500	0.000	3,1166E+01
1.500	1.500	0.000	5,2736E+01
2.500	1.500	0.000	5,3465E+01
3.500	1.500	0.000	5,3737E+01
4.500	1.500	0.000	5,3488E+01
5.500	1.500	0.000	3,0143E+01
6.500	1.500	0.000	3,0202E+01
...			
1.500	5.500	-8.262	3,28E+01
2.500	5.500	-8.262	3,16E+01
3.500	5.500	-8.262	3,12E+01
4.500	5.500	-8.262	3,14E+01
5.500	5.500	-8.262	3,22E+01
6.500	5.500	-8.262	3,37E+01
0.500	6.500	-8.262	4,02E+01
1.500	6.500	-8.262	3,47E+01
2.500	6.500	-8.262	3,28E+01
3.500	6.500	-8.262	3,22E+01
4.500	6.500	-8.262	3,24E+01
5.500	6.500	-8.262	3,38E+01
6.500	6.500	-8.262	3,80E+01