



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESTUDIO DE UN PROBLEMA DE CONTAMINACIÓN
DEL SUBSUELO ASOCIADO A UN PROCESO DE
REFINACIÓN ELECTROLÍTICA MEDIANTE LOS
MÉTODOS DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA
CAPACITIVA Y GALVÁNICA

TESIS

Que para obtener el título de
INGENIERA GEOFÍSICA

P R E S E N T A

LUZ ELVA MARTÍNEZ LORENZO

DIRECTOR DE TESIS

M.C JUAN ESTEBAN HERNÁNDEZ QUINTERO



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016

*D*EDICATORIA

A la memoria de mi padre...
A mis padres que me han dado su apoyo incondicional para
alcanzar unas de las metas más importantes de mi vida.
A mi hermano y su familia por inspirarme a seguir a
delante con este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México por darme el privilegio de formarme como profesionista, por brindarme la oportunidad de adquirir conocimientos de calidad.

Gracias a mi tutor y padre académico M.C. Juan Esteban Hernández Quintero, por brindarme la oportunidad de trabajar bajo su tutela, por apoyarme en el aspecto académico todos estos años, por su dedicación y consejos en mi aprendizaje y sobre todo por su infinita paciencia.

Gracias al comité evaluador, al M.C. Gerardo Cifuentes, M.C. David Escobedo Ing. Alejandro y a la Ing. Aidé Esmeralda López, por sus aportaciones de conocimientos que gracias a ello mi proyecto ha concluido.

Gracias a todas las personas involucradas en el trabajo de campo, investigadores y amigos. Al DR. Andrés Tejero, DR. Claudia Arango, M.C. Luciano D. Constantino, Ing. René Sánchez, Ing. Rocío Zúñiga y M.C. Guillermo, por colaborar en la adquisición de los datos.

Gracias a la facultad de ingeniería y a todos mis profesores que me dieron las herramientas para mi formación académica.

Gracias a mis padres Cirilo Martínez Gutiérrez y Magdalena Lorenzo Tello, quienes desde el inicio de este proyecto de vida han depositado su confianza en mí, su amor y apoyo incondicional, especialmente a mi madre, que en ausencia de mi padre ha sabido darme la fortaleza para seguir adelante, su motivación y su trabajo. Gracias a mi pequeña y gran amor Naomi, por llegar a nuestras vidas y cambiar la por completo, por ser uno de mis más grandes motivos para seguir realizando mis aspiraciones.

A Thomas por enseñarme un panorama más amplio de la vida y el mundo, por sus sabios consejos, su amor, comprensión y confianza.

Gracias a mis hermanas y amigas Taygete y Yessica, por su amistad, sus consejos e inolvidables momentos que hemos pasado juntas, por compartir tantas experiencias y emociones, y por el buen gusto que tienen de la vida.

Gracias a mi querida amiga EuiYoung Yang y su familia, por su apoyo y amistad, por entrar a mi vida en un momento difícil y que gracias a ello pude superar un obstáculo más.

Gracias a mis amigos y compañeros que conocí a lo largo de mi estancia en la facultad, porque de ellos aprendí sobre la vida académica, porque muchos de ellos me han apoyado, animado y aconsejado:

A Gualberto Montiel, Jacob Valdés, Viridiana Sánchez y Yolanda, por ser mis primeros compañeros y amigos de la facultad, por su apoyo en las materias que llevamos juntos y sobre todo por las agradables y graciosas pláticas que teníamos.

A mi querido Reynaldo, Doris, Sergio, Iván, Rene, Lü, Dionicio, Miguel, por su amistad y compañía en las clases que llevamos juntos, por las inolvidables y caóticas prácticas de campo.

A Héctor Octavio, Diego Quiroz, Mariam Betancourt y Alan Rendon, por compartir sus conocimientos, sus técnicas de estudio y las largas horas de estudio en el cubículo.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT.....	X

INTRODUCCIÓN.....	1
-------------------	---

ANTECEDENTES.....	3
-------------------	---

1.1. Cuenca de México.....	3
1.1.1. Marco geológico	5
1.1.2. Geología Histórica.....	6
1.2. Localización de la zona de estudio.....	9
1.2.1. Geología local.....	10
1.2.2. Marco social y económico de la zona.....	11
1.3. Marco general del problema.....	11
1.3.1. Proceso de enriquecimiento del cobre.	13
1.3.2. Factores de Contaminación en la planta de refinación de cobre.....	15
1.3.3. Características físico-químicas y geodáficas de contaminación de suelo.....	16
1.4. Métodos geofísicos de resistividad en estudios de contaminación.....	18

MARCO TEÓRICO.....	23
--------------------	----

2.1. Fundamentos de la resistividad eléctrica.....	24
2.1.1. Ecuaciones fundamentales.....	26
2.1.2. Resistividad aparente.....	29
2.1.3. Configuraciones electródicas lineales de cuatro electrodos.....	31
2.1.4. Resistividad eléctrica en el subsuelo.....	34
2.1.5. Sondeo Eléctrico Vertical.....	35
2.1.6. Calicata eléctrica.....	36
2.2. Método Tomografía de Resistividad Eléctrica.....	37
2.2.1. Medición de resistividad.....	38

2.2.1.1. Resistividad capacitiva.....	40
2.3. Teoría de inversión 2D.....	42
2.3.1. Modelado directo.....	43
2.3.2. Modelado inverso.....	44
2.3.3. Criterios de convergencia.....	46
2.4. Fundamentos de Resistividad Capacitiva.....	48
2.4.1. El cuadrupolo electrostático.....	49
2.4.2. La impedancia de transferencia.....	51
2.4.3. El régimen cuasi-estático.....	52
2.4.4. Sensor capacitivo.....	53
2.4.5. Estimación de la Resistividad aparente.....	57
 METODOLOGÍA.....	 60
3.1. Adquisición de datos.....	62
3.2. Procesamiento de datos de resistividad.....	67
3.2.1. Parámetros de inversión.....	69
3.2.2. Resultados preliminares.....	70
 RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....	 73
4.1. Interpretación de resultados.....	74
4.2. Relación entre las modalidades de TRE.....	85
4.3. Análisis de Resultados.....	86
4.4. Conclusiones y recomendaciones.....	91
 REFERENCIAS.....	 95

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Mapa fisiográfico de la cuenca de México. Principales secciones geológicas. Figura modificada [López Quiroz, 2008].

Figura 1.2. Mapa de elevaciones del DF (INEGI, 2010). Mapa correspondiente para la zona de estudio (Google maps, 2015).

Figura 1. 3. Corte de la carta geológica para la zona de estudio, en escala 1:250000 (Servicio Geológico Mexicano, 2002).

Figura 1.4. Ejemplo de separación del cobre durante el proceso electrolisis.

Figura 1.5 Diagrama de la metodología para los análisis de laboratorio. CE-corriente eléctrica, EPT-elementos potencialmente tóxicos, DRX-difraccion de rayos X, MEB-microscopio electrónico de Bario, EPMA- microsonda electrónica, MFA-mocroscopio de fuerza magnética (Pérez Martínez, 20014).

Figura 2.1. Parámetros que definen la ley de Ohm para un conductor cilíndrico homogéneo de resistencia R , longitud L y sección transversal A (Lowrie, 2007).

Figura 2.2. Vectores densidad de corriente de una fuente puntual en un semiespacio homogéneo (Orellana, 1982; Loke, 2004).

Figura 2.3. Arreglo convencional de cuatro electrodos, dos electrodos de potencial P_1 y P_2 , y dos de corriente C_1 y C_2 (Modificado de Orellana, 1982).

Figura 2.4. Configuración Wenner (Modificado de Milsom, 2003).

Figura 2.5. Dispositivo Schlumberger (Modificado de Milsom, 2003).

Figura 2.6. Arreglo geometrico Dipolo-Dipolo (Modificado de Milsom, 2003).

Figura 2.7. Secuencia de medición para la construcción de una pseudosección mediante la configuración Dipolo-Dipolo. I electrodo de corriente y V electrodo de potencial (Lowrie, 2007).

Figura 2.8. Distribución de la corriente en el subsuelo con la técnica de resistividad capacitiva.

Figura 2.9. Modelos equivalentes de circuitos eléctricos de (a) una medida de resistividad genérica, b) la resistividad CC y (c) la resistividad capacitiva. El modelo genérico (Wait, 1995) muestra la impedancia de la tierra Z_{earth} y las impedancias de contacto Z_{C1} , Z_{C2} (inyección de corriente) y Z_{P1} , Z_{P2} (medición de potencial). Las impedancias de contacto son predominantemente óhmica en Resistividad CC y predominantemente capacitiva en RC.

Figura 2.10. Representación de una carga electrostática Q sobre la interface entre dos medios con permitividades dieléctricas $\epsilon^{(I)}$ y $\epsilon^{(II)}$. Q' es la imagen de la carga localizada en el medio II. (Kuras, et al. 2005).

Figura 3.1. Capas del concreto armado hasta el suelo natural y esquema de las capas con sus respectivos espesores.

Figura 3.2 Croquis de distribución de los perfiles de Tomografía de Resistividad Eléctrica.

Figura 3.3. *Diseño básico del arreglo utilizado para los perfiles de resistividad capacitiva con Ohm-Mapper (TR1)*. La distancia na de la figura puede modificarse para profundizar la señal.

Figura 3.4. Arreglo capacitivo colocado en la zanja del perfil 1.

Figura 3.5. Adquisición de datos de TRE capacitiva.

Figura 3.6. Flujo de Datos para el programa Magmap2000 de Geometrics INC.

Figura 3.7. Gráficos de los sensores del perfil RC-L1 del programa Magmap200 de Geometrics INC. Rojo-sensor 1, azul-sensor 2, verde-sensor 3, rosa-sensor4 y amarillo-sensor 5.

Figura 3.8. Pseudosección de resistividades del perfil RC-P1, Magmap2000 de Geometrics INC.

Figura 3.9. Ejemplo del perfil RG-P1.URF. Formato obtenido del manual del EarthImager2D (AGI, 2008).

Figura 3.10. Imágenes del perfil RG-L1 con (a) un método de inversión suave y (b) un método de inversión robusta, generadas con el programa EarthImager 2D (AGI, 2008). La imagen de inversión suave muestra un rango de resistividades entre 0.1 y

9 Ohm-m en la iteración 10 con un RMS de 11.72%, la imagen de inversión robusta tiene resistividades entre 0.1 y 8.3 Ohm-m en la iteración 10 y un RMS de 12.76%.

Figura 4.1. Secciones de a) resistividad capacitiva RC-L1 y b) resistividad galvánica RG-L1 de la zona de adquisición línea 1.

Figura 4.2. Secciones de a) resistividad capacitiva RC-L2 y b) resistividad galvánica RG-L2 de la zona de adquisición línea 2.

Figura 4.3. Secciones de a) resistividad capacitiva RC-L3 y b) resistividad galvánica RG-L3 de la zona de adquisición línea 3.

Figura 4.4. Secciones de a) resistividad capacitiva RC-L4 y b) resistividad galvánica RG-L4 de la zona de adquisición línea 4.

Figura 4.5. Sección de resistividad capacitiva RC-L5, línea 5.

Figura 4.6. Sección de resistividad capacitiva RC-L6, línea 6.

Figura 4.7. Esquema que representa la distribución de las resistividades dentro de la planta.

Figura 4.8. Mapa de distribución de las zonas potencialmente contaminadas.



Estudio de un Problema de Contaminación del Subsuelo Asociado a un Proceso de Refinación Electrolítica Mediante los Métodos de Tomografía Eléctrica Capacitiva y Galvánica



RESUMEN

Es bien conocido que en todas las etapas que incluyen un proceso minero (con excepción de la prospección) se generan problemas ambientales de alto impacto. Durante el procesamiento de minerales se generan aguas residuales y residuos peligrosos. Sin embargo, uno de los procesos que más contaminación produce es la refinación electrolítica.

La aplicación de los métodos eléctricos en esta problemática ha sido escasa, dada su naturaleza. En este trabajo se demuestra que mediante una adecuada selección y combinación de estos métodos (en particular la Tomografía Eléctrica) es posible el aporte de información de calidad para la resolución de algunos problemas de contaminación.

Al Noroeste de la Ciudad de México se llevó a cabo un estudio geofísico de exploración con fines ambientales. El estudio fue realizado dentro de las instalaciones de una planta refinadora de cobre, donde se implementó la Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D en dos modalidades, la resistividad galvánica y la resistividad capacitiva, con el objetivo de medir la respuesta resistiva del subsuelo y su profundidad asociado al contaminante (cobre diseminado). En este proyecto se realizaron 6 perfiles de resistividad capacitiva y 4 perfiles de resistividad galvánica, con un arreglo geométrico dipolo-dipolo. En ambos casos los datos fueron procesados con el programa de inversión EarthImager2D.

La combinación eficiente de las dos técnicas permitió aprovechar la buena resolución de la resistividad capacitiva en los primeros 4m de profundidad, por lo que *se logró reconocer características someras de construcción en el subsuelo*. Con la resistividad galvánica se alcanzó una profundidad de hasta 24m que permitió aportar imágenes donde se indican a grandes rasgos los horizontes principales asociados al manto acuífero somero y profundo.

Mediante esta información se consiguió ubicar zonas donde se concentran las anomalías de baja resistividad (efecto “dique”), por lo tanto la distribución en el subsuelo de las zonas con mayores niveles de concentración del contaminante, logrando así establecer un patrón de movimiento en el sistema hidráulico subterráneo.



Study of a subsurface contamination problem associated to a Electrolytic Refining Process through the methods of Electric Tomography Capacitive and Galvanic



ABSTRACT

It is well known that all stages that include a mining process (except prospecting) environmental problems generate high impact. In mineral processing sewage water and hazardous waste are generated. However, the electrolytic refining is one of the processes that produce most pollution.

The application of electrical methods in these issues has been limited, given its nature. In this paper we demonstrate that by proper selection and combination of methods (especially the Electrical Tomography) it is possible provide quality information to solve certain contamination problems.

Northwest of Mexico City we were conducted geophysical exploration study with environmental purposes. The study was done within the plant of a copper refining, in which the 2D electrical resistivity tomography implemented in two ways, galvanic resistivity and capacitive resistivity, with the objective of measuring the resistive response of the subsurface and depth associated with the contaminant (copper spread). In this project six capacitive resistivity profiles and four galvanic resistivity profiles, with a geometric arrangement dipole-dipole were performed. In both cases the data were processed with the software inversion EarthImager2D.

The efficient combination of the two techniques exploited the good resolution of the capacitive resistivity in the first 4m deep, so it was possible to recognize shallow structural features in the subsurface. Galvanic resistivity with a depth of 24m allowed to provide images which are given an overview of major mantle horizons associated with shallow and deep aquifer was reached.

Using this information it was possible to locate areas where low resistivity anomalies ("dock" effect) are concentrated, therefore the distribution in the surface of the areas with the highest concentration levels of contaminants, thus obtaining establish a pattern of movement in the underground hydraulics system.

INTRODUCCIÓN

En México existen normas para la protección ambiental, así como normas de salubridad, para prevenir y controlar los efectos generados por el beneficio de los minerales, que cada empresa dedicada a la metalurgia debe cumplir y mantenerse dentro de los márgenes que establecen ciertas organizaciones. Que debido a los impactos significativos que los residuos provenientes de procesos industriales podrían tener sobre el medio ambiente, se hace necesario su control y deben reunir condiciones de máxima seguridad, a fin de garantizar la protección de la población, las actividades económicas y sociales y, en general, el equilibrio ecológico, convirtiéndose en un problema de Legislación ambiental.

La presente investigación pretende contribuir con información complementaria para que la planta refinadora lleve a cabo el cumplimiento de estas normas.

Desde esta perspectiva, se presentan los antecedentes que comprenden información geológica de la zona de estudio que nos permite conocer las características físicas del subsuelo, así como los antecedentes del problema que para comprender la gravedad del asunto se requiere conocer el proceso de refinación que se lleva a cabo en la planta, los factores que generan la contaminación y las características de parámetros que influyen en el movimiento y acumulación del contaminante.

Asimismo en este apartado se aborda como antecedente importante los estudios geofísicos realizados en el ámbito ambiental, haciendo mayor énfasis en los estudios de polarización inducida que se realizaron en forma paralela a este estudio, obteniendo resultados satisfactorios y que demuestran que es posible diferenciar zonas con comportamiento electroquímico. El propósito de este estudio no es sustituir un método por otro sino integrar la información entre el método de polarización inducida y el método de tomografía de resistividad eléctrica aplicado en este estudio, por lo que este trabajo complementará la información que se tiene sobre el lugar.

Los fundamentos teóricos del método de resistividad son descritos en el apartado Tomografía de resistividad eléctrica. La finalidad de este apartado es explicar la relación entre la resistividad obtenida mediante el método capacitivo de corriente alterna y el método de resistividad de corriente directa e introducir los conceptos básicos de la teoría, teniendo gran importancia la ley de ohm para el análisis y estimación de la resistividad aparente, que en el caso del método capacitivo, se estima a partir de la medida de la impedancia de transferencia compleja.

Desde el aspecto físico y matemático, la diferencia significativa en la adquisición de los datos van desde de los electrodos enterrados y los datos adquiridos mediante el acoplamiento capacitivo de sensores en el suelo hasta el procesamiento de inversión, que en este mismo apartado se describe de manera básica la teoría de inversión 2D, por lo cual se presentan aspectos teóricos que permiten formarse una idea clara del tema.

En metodología, tanto la teoría y la práctica se consolidan para describir el trabajo de adquisición, desarrollado mediante las dos modalidades del método de tomografía de resistividad eléctrica, donde el objeto de estudio fue el subsuelo debajo de la planta refinadora, con el fin de evaluar las zonas afectadas por la presencia de residuos contaminantes, asociados al cobre y generados durante el proceso de refinación.

En resultados y conclusiones se desarrolla el análisis de las imágenes 2D, los cuales demuestran los beneficios de hacer la combinación de las dos modalidades de adquisición y los resultados generados ante la respuesta de los instrumentos utilizados en un medio altamente conductor, saturado de residuos procedentes del cobre, que por esta característica las bajas resistividades que se obtuvieron del subsuelo fueron cercanas a cero. Finalmente, con el aporte que tiene este estudio geofísico para la evaluación de zonas de contaminación se llevó a cabo los siguientes objetivos.

Objetivo general:

Estudiar las características resistivas del subsuelo mediante el análisis de imágenes de resistividad 2D, que indiquen las zonas de mayor concentración y filtración del contaminante, asociado a la respuesta del contraste de resistividades para estimar la profundidad y geometría de la pluma contaminante dentro de las instalaciones de la planta refinadora de cobre.

Objetivos particulares:

Demostrar que mediante una adecuada selección y combinación de metodologías de Tomografía de Resistividad Eléctrica, es posible el aporte de información de calidad para la resolución de algunos problemas de contaminación de esta naturaleza.

Con la adecuada combinación de la información, desarrollar un mapa de riesgo que señale las zonas donde se concentran las anomalías de baja resistividad para lograr establecer un patrón de flujo del sistema hidráulico subterráneo y la distribución en el subsuelo de las zonas con mayores niveles de contaminación.

ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO

1.1. Cuenca de México

La cuenca de México es una depresión cerrada endorreica de manera natural, geomorfológicamente de origen tectónico, que a fines de 1607 hasta 1789 fue modificada artificialmente, abierta por el tajo de Nochistongo y las obras civiles del desagüe profundo de la Ciudad de México para controlar las inundaciones en épocas de lluvias.

La cuenca de México se extiende desde los Meridianos $98^{\circ} 15'$ y $99^{\circ} 30'$ y los paralelos $19^{\circ} 00'$ y $20^{\circ} 15'$, con una extensión que cubre un área aproximada de 9600km^2 . Está limitada al sur por el campo volcánico Chichinautzin y la Sierra del Ajusco, al occidente por las estribaciones de la Sierra de las Cruces (Figura 1.1). Se limita al norte con las Sierras de Pachuca y Tepetzotlán y los cerros de Xalpa y Sincoque. Al Oriente está delimitada por la Sierra Nevada, que está conformada por los volcanes Popocatepetl e Iztaccihuatl (Enciso, 1992). Se divide políticamente entre las entidades Estado de México, Distrito Federal, Hidalgo, Tlaxcala y en una pequeña región del estado de Puebla, dentro de la cual se hallan las ciudades de Pachuca, Tizayuca, Apan, Texcoco, Amecameca, entre otras y casi toda la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, con excepción de la zona perteneciente al municipio de Huixquilucan.

Fisiográficamente, forma parte de la provincia llamada Eje Volcánico o Faja Volcánica Transmexicana y consta de dos elementos geomórficos principales: La primera se caracteriza por las partes altas, cerros, laderas, lomeríos y sierras volcánicas que bordean el Valle de México, como la Cordillera de la Sierra Madre Oriental, que rodea a la Ciudad de México, principalmente por los volcanes Ixtlacihuatl, Popocatepetl y la sierra del Ajusco, que forma una conexión elevada con una gran masa de volcanes basálticos y conos cineríticos al sur del Valle; las partes planas o de poca inclinación que morfológicamente corresponde a un valle o altiplanicie, el cual consta de varias depresiones lacustres en proceso de desecación y pequeñas elevaciones topográficas aisladas, como los cerros del Peñón y de Chapultepec (Enciso, 1992). Otros cuerpos volcánicos como son: la Sierra de Xochitepec, Cerro de Zacatepec, Sierra de Guadalupe, Sierra de las Cruces, Sierra de Monte Alto, Sierra de Santa Catarina y entre otros.

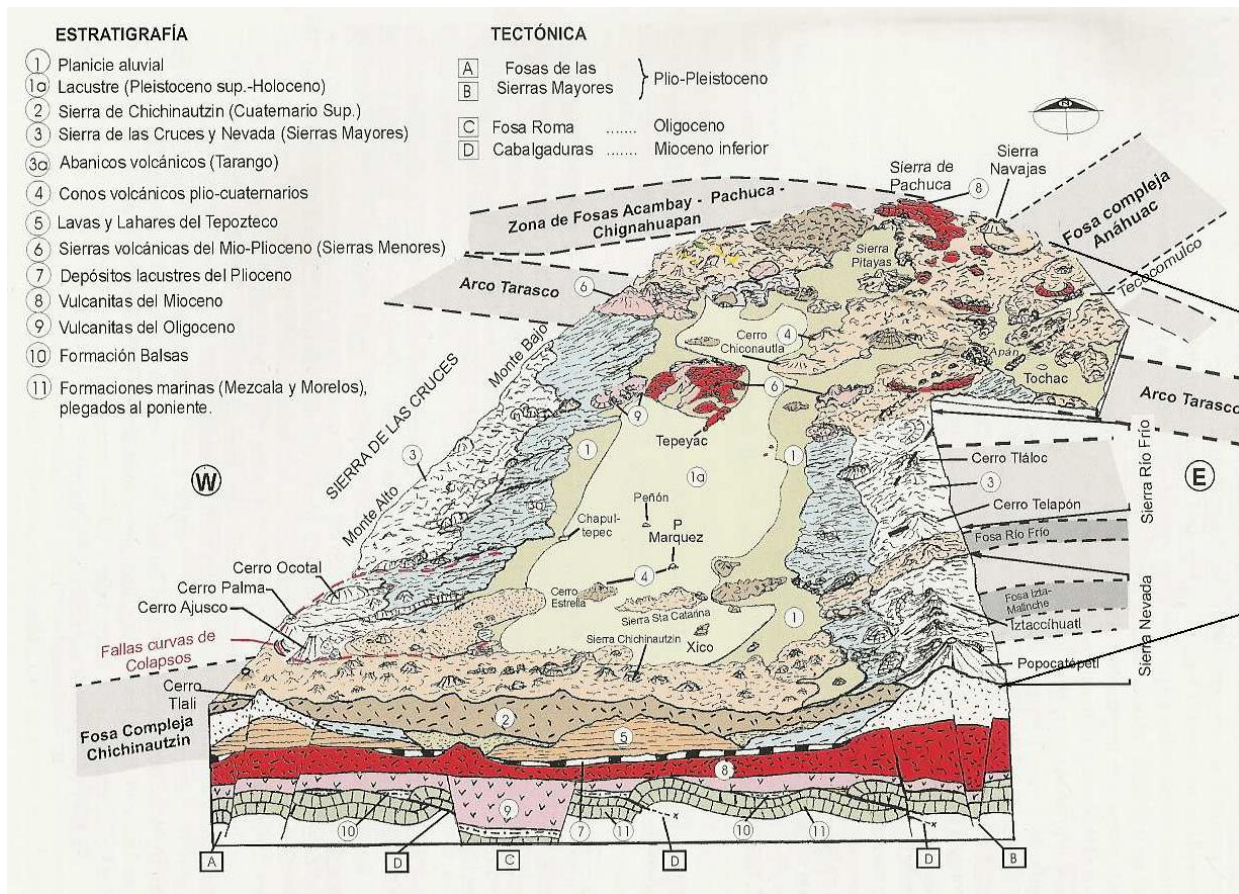


Figura 1.1 Mapa fisiográfico de la cuenca de México. Principales secciones geológicas. Figura modificada [López Quiroz, 2008]

Las sierras que la constituyen forman parte del origen del material de relleno de la zona ocupada por los antiguos lagos de Zumpango, Xaltocan, San Cristobal, Chalco, Xochimilco y Texcoco, constituidos por depósitos sedimentarios. Los lagos de Xochimilco y Chalco se ubicaban en la parte baja de la cuenca. Los lagos de poca profundidad, Zumpango y Xaltocan, se ubicaban en la parte alta, por lo que en época de lluvias descargaban al lago de Texcoco sus excedentes de agua. El lago de Texcoco era el más extenso de todos, se ubicaba en la parte central de la cuenca ocupando una superficie de entre 700 y 1,000 km², recibía agua de los lagos contiguos y su salinidad era alta debido a que sus únicas pérdidas de agua eran a través de la evaporación y la infiltración.

En los trabajos de De la O-Carreño (1954) y Rodríguez y Ochoa (1989), citados por Enciso-De la Vega (1992), se han reconocido hasta once subcuencas: Xochimilco, Cuautitlán, Texcoco, Techac, Churubusco, Pachuca, Chalco, Tecomulco, Ciudad de México, Teotihuacan y Apan.

En la década de los sesenta, la Dirección de Hidrología de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, realizó una delimitación de las principales corrientes del país, dividiendo el territorio mexicano en 37 Regiones Hidrológicas, el cual la Cuenca de México se ubica dentro de la región hidrológica Panuco (RH26), esta región tiene un área de 96,849 Km² y comprende varias entidades: Distrito Federal, Hidalgo, México, Querétaro, San Luis Potosí Veracruz y Tamaulipas; colinda al sur con la región hidrológica Balsas (RH18) y al oeste con Lerma-Santiago (RH12). Posteriormente, la Comisión Nacional del Agua (Conagua) realizó una nueva reagrupación de las Regiones Hidrológicas, delimitado a 13 Regiones Hidrológico-Administrativo (RHA); la región XIII Aguas del Valle de México, está conformada por las entidades D.F., Hidalgo, México y Tlaxcala, entidades pertenecientes a la Cuenca de México.

1.1.1.Marco Geológico

La cuenca de México comprende una amplia variedad de rocas, del Mioceno al Cuaternario, de origen volcánico, volcanoclástico y clástico, como derrames de lava, toba, ceniza volcánica, lahar, lapilli, y depósitos lacustres, aluviales y piroclásticos.

La cuenca se originó debido a los eventos volcánicos; las erupciones ocurridas en los distintos periodos han formado acumulaciones de lava, tobas y brechas. En sus partes topográficamente altas están conformadas por una amplia variedad de rocas volcánicas y de emplazamientos lávicos de tipo fisural. En sus partes bajas y planicies, están constituidas principalmente de depósitos clásticos, volcánicos y lacustres.

Las lavas que depositó el vulcanismo de las sierras Nevada, de Las Cruces y posteriormente la sierra del Chichinautzin, formaron la base en donde se acumularían los depósitos aluviales que constituyen en la actualidad el acuífero superior de la cuenca de México, el cual tiene entre 600 o 700 m de espesor, y en donde sobre yace la actual Ciudad de México.

En la cuenca de México, las descripciones litológicas que se conocen comprenden una amplia variedad de productos volcánicos, como aglomerados, derrames, lahares, surges, lapillis, brechas, ceniza volcánica, etc. La composición de estos materiales varía de riolítica, dacítica, andesítica, basáltica a combinaciones de estas familias de rocas. En el valle de México, han sido descritas sucesiones monótonas de arcillas, limos y horizontes arenosos en paquetes de más de 1,000m de espesor. Se sabe también de la existencia de horizontes de diatomita, turba y caliche, asociados a depósitos lacustres. La zona menos complicada litológicamente corresponde a la porción meridional de la cuenca formada por el campo volcánico-basáltico de la sierra de Chichinautzin (Enciso, 1992).

La cuenca se caracteriza por presentar un contexto geológico variado; las unidades litológicas que afloran la comprenden un registro estratigráfico desde el Paleoceno al Reciente. Se sabe de la existencia de rocas anteriores al Mesozoico que afloran geográficamente fuera y que podrían tener influencia en los eventos tectónicos de la región. Estas rocas han sido descritas al norte y Sur de la Cuenca por Fries (1962,1966).

1.1.2. Geología histórica

La formación de la cuenca de México data desde la era Cenozoica; es la era más reciente del tiempo geológico y se extiende desde el final de la era Mesozoica hasta la actualidad. Está dividida en dos periodos, el terciario y el cuaternario, a su vez se divide en épocas. Las rocas formadas en el Cenozoico se depositaron por sedimentación o acción volcánica sobre rocas más antiguas. Muchas zonas de rocas cenozoicas fueron elevadas o deformadas por el movimiento de la corteza terrestre formando grandes cadenas montañosas, como los que forman parte el Eje Neovolcánico Transmexicano, que constituye una franja volcánica del Cenozoico Superior que cruza transversalmente la república Mexicana a la altura del paralelo 20. La actividad de la franja ha dado lugar a un gran número de cuencas endorreicas como el consecuente desarrollo de la cuenca de México, que es el resultado de varios ciclos de vulcanismos en diferentes épocas.

En la porción central del eje se ha reconocido siete fases de volcanismo a partir del Oligoceno; la más importante de ellas es la quinta, ocurrida a fines del Mioceno, y que dio origen a las sierras de Las Cruces, de Río Frío y Nevada. Durante la sexta fase se desarrollaron los conos y domos del Iztaccihuatl y el cono activo del Popocatepetl. La última fase se desarrolló en el Cuaternario y es responsable de la actividad volcánica que interrumpió el drenaje de la Cuenca de México hacia la Cuenca del Río Balsas, lo que origino el carácter endorreico de aquella (Morán, 1986).

La historia geológica del dominio de la cuenca comprende eventos tectónicos, emplazamientos lávicos y actividad volcánica que probablemente se iniciaron con el depósito de moladas continentales durante el Paleoceno-Eoceno (Enciso, 1992)..

La Cuenca de México presenta una sedimentación rápida e irregular, compuesta de numerosos abanicos aluviales; sus depósitos continentales están interestratificados con capas de cenizas volcánicas y lavas. Sus formaciones volcánicas aluviales y lacustres pertenecen al los periodos Terciario Medio, Terciario Superior y Cuaternario, estas edades se basan en la superposición relativa de las formaciones.

Las formaciones correspondiente al Terciario Medio son las más antiguas; conformado por los productos volcánicos emitidos entre el Oligoceno superior y el Mioceno. Entre los depósitos de este periodo se reconocen restos de enormes volcanes estratificados, corrientes de lavas, tobas, brechas y depósitos laháricos, atravesados por chimeneas volcánicas y diques.

El Terciario Superior tiene distintas formaciones unas volcánicas y otras aluviales; descubiertos en el Plioceno Superior por abanicos aluviales. La región de Pachuca como la sierra de Guadalupe se caracterizan por el ciclo volcánico con extensiones de masas de lavas acidas, dacíticas y riolíticas. En la región de Pachuca estas lavas se denominan serie Zumate y en la Sierra de Guadalupe serie dacítica Chiquihuite (Hernández, 2007).

El campo volcánico Guadalupe, cubierta parcialmente por andesitas basálticas, en la Sierra La Muerta y en la Sierra Melchor Ocampo; también se encuentra los restos visibles de enormes volcanes estratificados compuestos de andesitas oscuras de piroxenos y olivino, siendo denominada como serie Santa Isabel-Peñón. Al norte de este campo se encuentra una serie de sedimentos lacustres, que están compuestos por arenas y limos arcillosos.

En la Sierra Nevada se encuentran los volcanes Telapón, Iztaccíhuatl y Popocatépetl, es representada por la Formación Tláloc que es un conjunto de derrames riodacíticos expuestos en la Sierra de Río Frío, están interdigitadas con sedimentos y tobas de la Formación Tarango. Se considera que esta sierra se formó en el Mioceno tardío-Pleistoceno temprano.

La Sierra de las Cruces se edificó sobre la secuencia andesítica-dasítica descrita como Formación Xochitepec, que está parcialmente cubierta por la Formación Las Cruces, así como por una serie de derrames de composición andesítico-dasítico con variación hasta riodacitas, está cubierta por lahares y tobas andesíticas de la Formación Zempoala y por derrames de andesitas basálticas de la Formación Ajusco, en la parte sur de la sierra de las Cruces, cubren a la Formación Las Cruces del Plioceno tardío, por lo que se infiere una edad del Pleistoceno medio. Los aparatos volcánicos que presentan un volcanismo de tipo andesítico-basáltico, fueron definidos como Formación Jumento, con edades de 0.004 a 0.01Ma (Servicio Geológico Mexicano, 2002).

Al Oeste de la Ciudad de México, la Formación Tarango Inferior está constituida por avalanchas de tipo Sillar superpuestas y separadas por horizontes de pómez y andesita. Abundan las capas horizontales de espesor variable, producidos por la alteración de cenizas en la parte superior (Hernández, 2007).

El Campo Volcánico Sierra Chichinautzin cubre parcialmente a la Sierra de las Cruces, y por esta razón se considera que su base son los lahares y tobas andesíticas, este campo fue estudiado por Mooser F. (1956,1957 y 1961) quién le denominó como Serie Basáltica Chichinautzin. En la cual incluye también otros apartados volcánicos esparcidos al norte de la Cuenca de México (Servicio Geológico Mexicano, 2002). Fries (1960) utilizó el nombre de Grupo Chichinautzin para las corrientes lávicas y los estratos de toba y brecha, así como de materiales clásticos interestratificados depositados por agua, que sobre yacen en discordancia a depósitos clásticos y volcánicos del Terciario y del Plioceno-Cuaternario (Enciso, 1992).

El periodo Cuaternario se caracteriza por los nuevos eventos tectónicos. Los principales eventos Pliocénico-Cuaternarios comprenden volcanes prominentes; los eventos cuaternarios incluyen, principalmente, depósitos lacustres y actividad volcánica de composición andesítico-basáltica, así como la actividad neotectónica del presente; las aguas socavan arroyos y cañones en los complejos volcánicos del Terciario y en los abanicos aluviales; el surgimiento de volcanes que obstruyen el drenaje del valle hacia el sur; represan los productos de erosión; conglomerados, gravas y arenas, interestratificándose con lavas y cenizas de los volcanes en erupción (Hernández, 2007).

Publicaciones de diversos autores como Brya (1948), Arellano (1953) y Zeevaert (1953) y posteriormente Waitz (1910), contribuyen al conocimiento del Cuaternario de la cuenca de México (siendo la primera clasificación), reconociendo suelos fósiles, que identificaron con ambientes climatológicos húmedos o secos, mismos que correlacionaron con la cronología glacial de América del Norte. Se definieron tres formaciones cuaternarias: Noche Buena (Holoceno), Becerra (Pleistoceno superior) y Tacubaya (Pleistoceno inferior-medio), que consiste en materiales poco consolidados, como arcilla, aluvión, piroclastos, suelo y depósitos eólicos. Las unidades están separadas por paleosuelos o costras de meteorización (Lugo-Hubp *et Al.*, 1994).

El Aluvión que rellena los Valles de México está conformado por gravas, arenas, cenizas y arcillas, el espesor varia de 30 a 300m.

1.2.1. Geología local

La delegación Azcapotzalco pertenece a la provincia fisiográfica del Eje Volcánico, a su vez la conforman las subprovincias Lagos y volcanes de Anáhuac; su territorio está distribuido sobre llanuras lacustres.

El suelo lacustre cubre más del 88% de la superficie de la delegación y el 12% de suelo aluvial. Estos afloramientos corresponden al periodo más reciente del Cuaternario de la Era del Cenozoica (63ma); sus principales unidades litológicas se localizan el oeste y este del territorio. Por ello el subsuelo de la zona esta uniformemente compuesto por sedimentos aluviales (Figura 1.3), como resultado de la antigua presencia de los lagos, no existen rupturas de pendientes o afallamientos.

Hidrológicamente, forma parte de la Región Hidrológica Pánuco (RH26) que incluye sólo la cuenca del Rio Moctezuma y las Subcuencas lago Texcoco y Zumpango. Por su topografía sensiblemente plana, en el territorio no existen cuerpos de agua ni ríos o canales a cielo abierto, cabe señalar que el área cuenta con recargas acuíferas subterráneas, actualmente sobre explotadas. Así mismo, la zona como área urbana consolidada, no presenta zonas naturales que coadyuven a la recarga de los mantos acuíferos. (Gaceta oficial del Distrito Federal, 2008-2010).

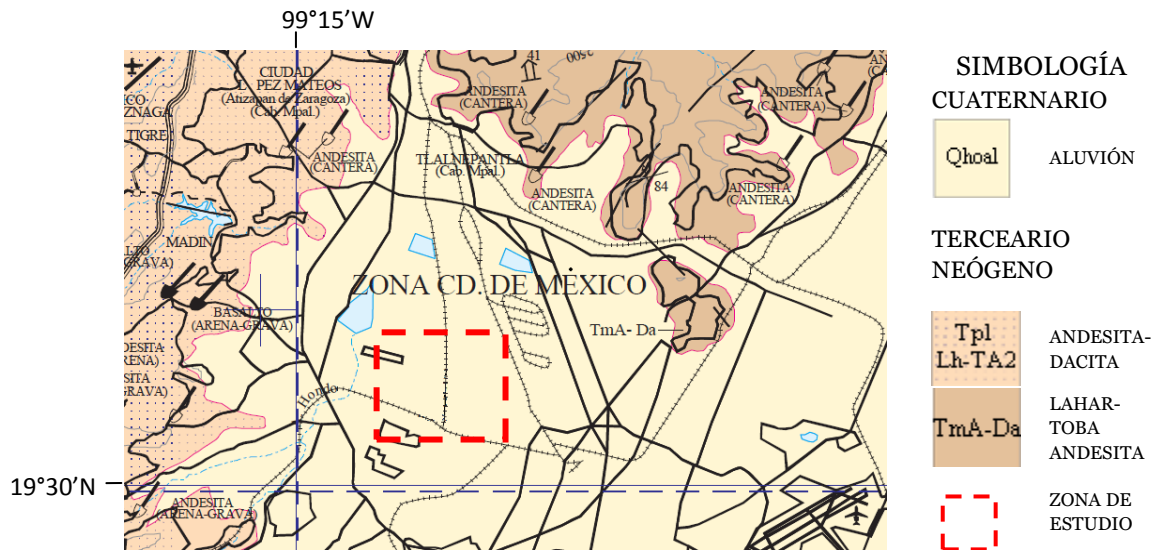


Figura 1. 3. Corte de la carta geológica para la zona de estudio, en escala 1:250000 (Servicio Geológico Mexicano, 2002)

1.2.2. Marco social y económico de la zona

Azcapotzalco, palabra náhuatl que significa hormiguero, sus orígenes se remonta al año 1500 AC. Es uno de los sitios con más tradición en la Ciudad de México. En 1898, bajo el gobierno de Porfirio Díaz, se crea la Municipalidad de Azcapotzalco. A partir de 1920, una vez concluida la Revolución Mexicana y asegurada la estabilidad del país, se inicia una etapa de crecimiento, caracterizada en la Ciudad de México por la modernización y el desarrollo de la industria. En 1929 se establecen las primeras industrias en la Colonia Vallejo, lo que definió el futuro asentamiento industrial en este sector de la Delegación.

A finales de la década de los 30 se instala la Refinería 18 de Marzo, la cual se constituyó como un importante polo de atracción de todo tipo de actividades industriales. En 1944 se establecieron dentro de la Delegación la Estación de Ferrocarriles de Carga de Pantaco y Ceylán, así como el Rastro de Ferrería.

En 1971 conforma sus límites y superficie actuales como resultado de la modificación de la estructura administrativa del Distrito Federal. Para el año 2005 a la fecha, en lo que respecta a obras y desarrollo urbano, se han logrado avances en cuanto a mantenimiento, construcción y algunas actividades complementarias a los equipamientos y servicios existentes.

Debido al desarrollo industrial es una delegación con un gran número de habitantes, de acuerdo al Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en el año del 2010 reporto en el conteo de la población de la zona un total de 414,711 habitantes.

La delegación tiene el 40 % del uso del suelo industrial del Distrito Federal, aporta el 15.04 % del empleo industrial productivo. El Programa Delegacional de desarrollo Urbano del 2005 data la distribución del territorio para uso industrial con 21.70 por ciento del territorio delegacional (Gaceta oficial del Distrito Federal, 2008-2010).

1.3. Marco general del problema

El estudio se realizó en las inmediaciones y dentro de una planta refinadora de cobre, que fue cerrada en el año 2009. Este tipo de planta asume un papel importante al convertirse en una fuente de contaminación latente para el subsuelo y el cuerpo de agua que yace a profundidad del sitio.

Para comprender el problema se requiere conocer el proceso que se lleva a cabo en la obtención de cobre electrolítico, los factores que generan la contaminación y las características de los parámetros físico, químicos y geodáficos que influyen en el

movimiento y acumulación del contaminante, así como el conocimiento de las normas oficiales mexicanas que toda empresa dedicada al uso y beneficio de minerales debe cumplir para prevenir riesgos ambientales, económicos y sociales, para remediar y controlar los efectos generados por el manejo de determinadas sustancias.

El cobre es un metal que se encuentra presente en bajas concentraciones en el suelo, el agua y los seres vivos. Su concentración promedio en la corteza terrestre es aproximadamente entre 25-75 mg/kg (López Velecela, 20013). Sin embargo, este mineral se asocia a problemas de contaminación antropogénicos causado por procesos de explotación, fundición y refinación. El cobre presente en el polvo generado en estos procesos se encuentra asociado con otros elementos como el sulfato de cobre (CuSO_4), que es un compuesto altamente soluble en agua y toxico de aspecto físico de color azul, producto de la precipitación de sulfato pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) por sobre saturación con ácido sulfúrico (H_2SO_4 , compuesto químico extremadamente corrosivo) a partir de soluciones concentradas de cobre.

Los tratamientos del cobre en estos procesos metalúrgicos alteran su estado natural (sulfuros metálicos), causan reacciones químicas (oxidación reducción) en combinación con otras sustancias originando soluciones acidas que liberan grandes cantidades de metales pesados como Zn, Pb, As y Fe (Barrera Olivarez, 2001), en grandes cantidades generan un alto nivel de toxicidad, pueden lixiviar al subsuelo y contaminar el nivel freático, que por efecto de la gravedad y otras condiciones del suelo, se filtran al manto acuífero y se convierte en un problema de contaminación de impacto social. Por tal motivo las normas oficiales mexicanas ambientales y de salubridad (norma oficial mexicana NOM-127-SSA1-1994) establecen como limite 2 mg/L de cobre para el agua de uso y consumo humano, al igual que la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006).

Otro de los elementos asociado a estos procesos y que las normas mexicanas requieren tener bajo estricto control es el arsénico, que se encuentra en la corteza a niveles entre 0.5 y 2.5 mg/kg, ya que es liberado y movilizado en grandes cantidades al aire, a la tierra y al agua debido a la volatilización de algunos compuestos (Carbonell, 1995). La mayoría de estas emisiones gaseosas se dan en forma de trióxido de arsénico (As_2O_3), el cual forma ácido arsenioso al disolverse en agua. El arsénico del agua es inorgánico, por tanto es más tóxico que el orgánico de los alimentos. De este modo suelos, aguas y plantas pueden presentar altas concentraciones de arsénico.

Por su toxicidad, la norma NOM-147-SERMANAT/SSA1-2004 establece criterios que considera un suelo contaminado por arsénico con 22 mg/kg para uso agrícola, residencial y comercial; 260mg/kg para uso industrial y 0.500mg/L de contaminante soluble. La NOM-127-SSA1-1994 establece niveles de referencia para el arsénico de 0.05

mg/L en el agua. Aunque este valor ha sido modificado a 0.025 mg/L en el año 2005. Otras organizaciones manejan valores entre 0.001-0.010 mg/L (IPCS, 2001 y OMS, 2003).

Algunas de estas normas proponen los métodos químicos para el análisis de evaluación de riesgo y remediación de suelos contaminados, establecen las concentraciones de los elementos químicos permitidos en el subsuelo y cuerpos de agua, como lo señalado en la norma NMX-AA-132-SCFI-2006: Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de muestras.

1.3.1. Proceso de enriquecimiento del cobre.

El valor del cobre en el mercado depende de su grado de pureza. Normalmente se comercializan tres calidades de cobre: “blíster” (97 a 99,5%), refinado a fuego RAF (99,6 a 99,8%) y electrolítico (cátodos), siendo este el resultado de la Electro-refinación, que es el último proceso metalúrgico al que es sometido el cobre (Cu_{RAF}) procedente de materias primas sulfuradas. Este proceso es utilizado para producir cátodos de cobre de alta calidad de 99.99% (por ello utilizado para fabricar conductores eléctricos) a partir de ánodos (Cu_{RAF}) que contienen una variedad de impurezas (Cifuentes, *et al*, 2009).

En el proceso se presenta el fenómeno químico llamado electrólisis. La electrólisis consiste en hacer pasar una corriente eléctrica por una solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) diluido en agua (solución usada como electrolito debido a que contiene iones libres y se comporta como un medio conductor eléctrico), a una temperatura cercana a los 65°C. Durante la electrólisis, los componentes de la solución se cargan eléctricamente produciéndose una disociación iónica en la que el anión sulfato (SO_4^{-2}) es atraído por el ánodo (+) y el catión (Cu^{+2}) es atraído por el cátodo (-). El anión sulfato ataca al ánodo formando sulfato de cobre ($CuSO_4$), que se ioniza en la solución por efecto de la corriente eléctrica, liberando cobre como catión que migra al cátodo y se deposita en él (Figura 1.4). El ión sulfato liberado migra al ánodo y vuelve a formar sulfato de cobre que va a la solución, recomenzando la reacción. El proceso sucede gracias a que es más fácil que ocurra la reducción del Cu^{2+} que la del agua.

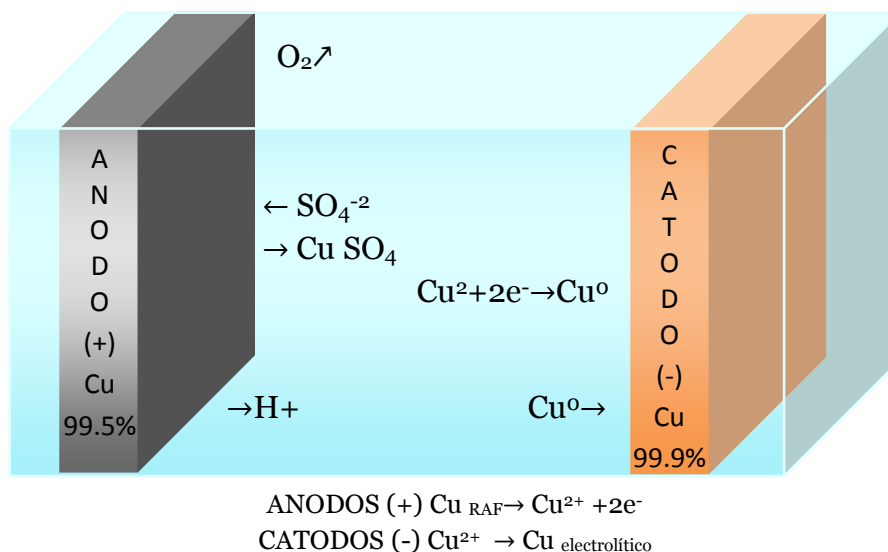


Figura 1.4. Ejemplo de separación del cobre durante el proceso electrolisis

En este proceso además del cobre existe la presencia de otros elementos o impureza que tienen un cierto comportamiento e influencia en la obtención. Se resume en lo siguiente:

- Los elementos menos nobles que el cobre, como cinc, níquel y hierro que se disuelven fácilmente en el electrolito y permanecen en él hasta que son removidos por el electrolito de descarte.
- Los elementos más electropositivos que el cobre, como la plata, oro, paladio, platino y elementos que son insolubles en ácido sulfúrico, como el plomo, forman compuestos sólidos insolubles que caen del ánodo al fondo de las celdas formando el denominado “barro anódico”, que es bombeado y almacenado para extraer su contenido metálico.
- Los elementos que constituyen las impurezas como el arsénico, antimonio y bismuto tienen un potencial de disolución comparable al cobre.

Estas impurezas causan efectos dañinos sobre las propiedades físicas del cobre como la disminución de su conductividad eléctrica, impurezas que el refinado electrolítico elimina. Los cátodos de cobre que no cumplen con las normas de calidad exigidas para su comercialización son rechazados y recirculados a las operaciones previas de fundición. Esto implica un aumento en la carga circulante de impurezas en el sistema y alto consumo de energía. La calidad del cobre electrolítico es una de las mayores preocupaciones de las plantas refinadoras, de tal manera, que los niveles de impurezas adquieren una gran importancia (Cifuentes, *et al*, 2009).

1.3.2. Factores de Contaminación en la planta de refinación de cobre.

En relación al proceso de refinación, se pueden plantear tres causas posibles de contaminación: la primera relacionado al almacenamiento del material en donde se involucran los factores de tiempo de almacenamiento, el clima y la humedad que pueden generar una reacción de oxidación y lixiviar al subsuelo, aunque las medidas de seguridad de acuerdo con la normativa ambiental, establecen el manejo y almacenamiento de materiales industriales en lugares de ambiente seco y alejado de agentes oxidantes fuertes.

Otro tipo causal se asocia a la filtración de disolución, donde se combinan factores como la temperatura, el tipo de disolvente, el consumo de energía y las condiciones en las que se encuentran las calderas por el tiempo de uso y desgaste. Respecto al alto consumo de energía, relacionado a la presencia de otros componente ajenos al cobre como metales e impureza, y la calidad de sustancias como el agua destinada a las celdas, puede contribuir a la disminución de la resistencia, desgaste y corrosión de las celdas electrolíticas, y por consecuencia provocar la filtración de sustancias que al paso del tiempo se convierte en un problema de contaminación.

También durante el proceso se generan reacciones químicas que además de producir sustancias en fase líquida o sólida, se generan sustancias volátiles, lo que lleva a una contaminación por emisión atmosférica mediante la volatilización de sustancias, que posteriormente se depositan en la superficie del suelo. Un ejemplo de ello es el sulfato de cobre que se utiliza como electrolito, este compuesto puede presentar exposiciones de neblina ácida, producto de la reacción de oxidación del agua en el ánodo. Esta neblina ácida es perjudicial, puede producir niveles altos de corrosión dañando la estructura de los edificios y la maquinaria de la planta (ENAMI, 2006).

En general, todas las etapas que incluye un proceso minero, con excepción de la prospección que involucra estudios preliminares, generan problemas ambientales de alto impacto. En todas las etapas se generan aguas residuales, residuos peligrosos y en algunos casos emisiones a la atmósfera. La refinación es una de las etapas que más contaminación genera.

1.3.3. Características físico-químicas y geoedáficas de contaminación de suelo

La contaminación en el subsuelo se da por la presencia de concentraciones nocivas de algunos elementos y compuestos químicos que alteran su estado natural. El contaminante está en concentraciones mayores de las habituales (anomalías) y generalmente causa algún efecto adverso (inestabilidad, desorden, daño, etc.) sobre algunos organismos, aunque también puede ser indiferente. Su origen puede ser geogénico o antropogénico. Los primeros pueden proceder de la roca madre en la que se formó el suelo, de la actividad volcánica o del lixiviado de mineralizaciones. Por el contrario, los antropogénicos se producen por los residuos derivados de actividades industriales, agrícolas, mineras o de residuos sólidos urbanos. La contaminación se puede clasificar según el tipo de fuente, ya sea puntual, lineal o difusa, por el tipo de contaminante que se emite o medio que contamina (atmosférica, hídrica, del suelo, genética, radioactiva, electromagnética, térmica, etc.).

La mayoría de los contaminantes inorgánicos son “metales pesados”. Entre estos se encuentran elementos traza que están presentes en bajas concentraciones (mg.kg^{-1}) en la corteza de la Tierra y en plantas. De todos los elementos traza encontrados en el suelo, 17 se consideran muy tóxicos y a la vez disponibles en concentraciones que sobrepasan los niveles de toxicidad. De ellos, diez son fácilmente movilizados por la actividad humana en proporciones que exceden en gran medida la de los procesos geológicos. Este es el caso de: plata (Ag), arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), mercurio (Hg), níquel (Ni), plomo (Pb), antimonio (Sb), estaño (Sn) y talio (Tl) (Seoáñez, 1999; Galán et al, 2008), incluidos en la lista de contaminantes prioritarios de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA).

El comportamiento de un contaminante en el suelo está determinado por una variedad de factores que interactúan de manera compleja y que dependen de las características propias del contaminante así como las del suelo. Es necesario contar con información acerca del tipo de contaminante, su concentración en estado natural, los niveles de concentraciones tolerables y toxicidad (si el contaminante como tal no es tóxico), así como el medio en el que se encuentra, en agua o en partículas de suelo.

Para hacer la determinación de un contaminante se deben describir sus características físico-químicas importantes tales como su estructura, ya que cada compuesto químico posee características únicas que dictan el mecanismo o combinación entre ellos, que controlan su movimiento y degradabilidad. Su estructura química determina la polaridad, solubilidad, volatilidad y capacidad para reaccionar con otras sustancias, también depende del mineral o minerales que forman parte de su estructura, no es lo mismo que el metal se encuentre formando parte de un sulfuro (relativamente oxidante

y soluble) que de un silicato (prácticamente resistente en todos los medios); las reacciones de oxidación-reducción pueden degradar compuestos orgánicos, o bien, convertir compuestos metálicos a formas que son más o menos solubles que la forma original del contaminante.

Otra característica como lo es la densidad determina la migración de un compuesto y la tendencia a flotar o sumergirse en la superficie del suelo, por consiguiente el lugar en donde este quedará concentrado. Así como los mecanismos de sorción que incluyen la adsorción que es la atracción de un compuesto hacia una superficie sólida y la absorción que es la penetración de un contaminante en un sólido (Volke, 2002).

La movilidad de los metales pesados es muy baja, quedando acumulados en los primeros centímetros del suelo y siendo lixiviados a los horizontes inferiores en muy pequeñas cantidades. Esto sucede precisamente porque la disponibilidad de un elemento depende también de las características del suelo, de una serie de parámetros geodáficos tales como el *pH* que determina el grado de adsorción de iones por las partículas del suelo, afectando así su solubilidad, movilidad y disponibilidad (Volke, 2002). La mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido porque son menos adsorbidos excepto el arsénico (As) entre otros elementos que son más móviles a pH alcalino (Galán et al, 2008). En suelo ácido el zinc y el cobre pueden ser tóxicos.

Los óxidos e hidróxidos de hierro (Fe) y manganeso (Mn) son otros de los parámetros importantes en la retención de metales pesados y en su inmovilización; la textura del suelo arcilloso retiene más metales por adsorción, por el contrario, los arenosos carecen de capacidad de fijación y puede contaminarse el nivel freático. De manera similar, el aumento de la salinidad puede incrementar la movilización de metales y su retención (Galán et al, 2008). Por mencionar otros parámetros como materia orgánica, minerales de la arcilla, permeabilidad, etc.

En materia del agua, es importante conocer los mecanismos de transporte que influyen en su comportamiento desde el momento en que se incorpora el contaminante al subsuelo.

Un contaminante comúnmente se desplaza en el subsuelo a través de un medio geológico poroso no-saturado o saturado de agua.

Algunos procesos de transporte son:

- Advección o convección. Proceso mediante el cual un contaminante es transportado por el movimiento del agua subterránea.
- Difusión molecular. Proceso mediante el cual un contaminante se transporta en

el agua subterránea en un área de alta concentración a otra de menor concentración; incluso, cuando no exista movimiento del agua. En medios porosos saturados el transporte por difusión es más lento que en el agua.

- Dispersión mecánica e hidrodinámica. Cuando el agua cargada de sustancias disueltas avanza por el terreno, es interceptada por las partículas sólidas, desviando su trayectoria hacia los espacios vacíos (poros). El movimiento por dispersión de las sustancias contaminantes produce una pluma contaminante que se va extendiendo por el subsuelo a favor del sentido de flujo de las aguas subterráneas.
- Sorción. Este proceso puede estar presente y obligar que el contaminante se fije en las superficies minerales del acuífero o en el carbono orgánico que pueda estar presente. Debido a esto algunos solutos se moverán más lentamente que el agua subterránea que los está transportando.

Las sustancias contaminantes que generan las actividades industriales de tipo inorgánico son el grupo más importante correspondiente a los metales pesados, su presencia en el agua subterránea se verá mitigada por los mecanismos de depuración del subsuelo (Seoáñez, 1999).

1.4. Métodos geofísicos de resistividad en estudios de contaminación

Generalmente los métodos geoquímicos son aplicados para la evaluación de sitios contaminados en el subsuelo y cuerpos de agua subterráneos. Suelen ser agresivos e invasivos debido a excavaciones y perforaciones que se realizan a ciegas en zonas de muestreo. Cuantas más zonas de muestreo se obtengan mejor será la información sobre la contaminación, ya que la calidad de la evaluación depende de la cantidad y distribución de las muestras que se colecten, pero esto supone un alto costo en perforación, preparación y análisis químico de las muestras. Sin embargo la ubicación y continuidad del contaminante seguirían siendo parcialmente desconocidas.

Los estudios que evalúan la contaminación se llevan a cabo a través de la caracterización geoquímica de muestras del suelo afectado, en suelo superficial o a profundidad. En el tratamiento de las muestras, las muestras se preparan, trituran y tamizan para obtener partículas en el orden de μm para su análisis físico-químico y determinar la cantidad de elementos potencialmente tóxicos por algún método (de extracción simple, análisis de microscopía electrónica o difracción de rayos X).

En el análisis químico se cuantifican los elementos como Cu, As, Fe, Pb, etc., usando técnicas de espectroscopia (por emisión atómica por plasma acoplado inductivamente y de masas con fuente de plasma inductivamente acoplado) y las concentraciones de elementos tales como Ca, Fe, Mn y S (por fluorescencia de rayos X), así como el contenido de arcilla para evaluar la composición de suelos por tamaños de partículas (Lopez velecera, 2013). Hay parámetros indirectos que se miden como la conductividad eléctrica, el pH y la susceptibilidad magnética. Mediante métodos de extracción basados en la fisiología se determinan las concentraciones de la Geodisponibilidad.

Finalmente se realiza un análisis estadístico donde los resultados obtenidos en cada una de las pruebas, se analizan a través de la estadística descriptiva y multivariable, para entender el comportamiento de las variables (pH, conductividad, susceptibilidad magnética, la concentración de los elementos potencialmente tóxicos e índice de contaminación). (Lopez velecera, 2013 y (Pérez Martínez, 2014).

En la *Figura 1.5* se muestra un ejemplo de un diagrama de la metodología usada en el análisis de laboratorio para determinar la contaminación de suelos por elementos potencialmente tóxicos en una zona minera y otra metalúrgica, en el estado de San Luis Potosí, México. En este estudio se evaluó el uso de la susceptibilidad magnética, la conductividad eléctrica y el pH como parámetros indirectos para la delimitación de la distribución espacial de tres elementos potencialmente tóxicos (As, Cd y Pb) en residuos y suelos afectados.

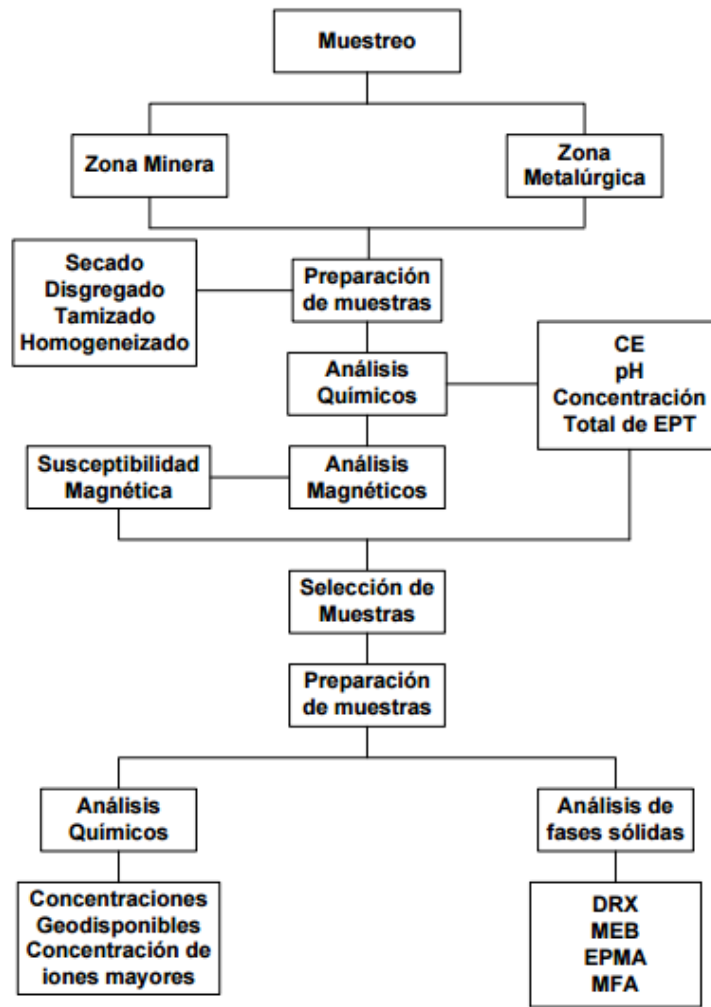


Figura 1.5 Diagrama de la metodología para los análisis de laboratorio. CE-corriente eléctrica, EPT-elementos potencialmente tóxicos, DRX-difracción de rayos X, MEB-microscopio electrónico de Bario, EPMA- microsonda electrónica, MFA-microscopio de fuerza magnética (Pérez Martínez, 20014).

La aplicación de métodos geofísicos en apoyo a estudios geoquímicos de contaminación, permiten en la mayoría de los casos una mejor interpretación y definición de los suelos con diferente grado de contaminación tanto vertical como horizontalmente, lo que implica el origen, ubicación y dirección, disminuyendo así el número de zonas de muestreo y dando una mejor definición geométrica de la pluma contaminante. Posteriormente, se utilizan como una guía objetiva para la realización de estudios geoquímicos convencionales en áreas específicas, reduciendo la cantidad de muestras para la caracterización química y asegurar la calidad del estudio de valoración ambiental, ya que la distribución espacial de los contaminantes es fundamental para la gestión ambiental y toma de decisiones. (Pérez Martínez, 2014).

Hay una variedad de métodos eléctricos aplicables a la búsqueda de zonas contaminadas en acuíferos y suelo, tales como la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y la Polarización inducida.

La TRE es utilizada en diversos casos de contaminación. Ha sido aplicada en la caracterización de rellenos sanitarios. En la caracterización de sitios contaminados por hidrocarburos, se ha logrado representar la distribución de la pluma contaminante. En ambos casos es importante aludir la importancia de la información que consiste en muestras de suelo bien ubicadas y caracterizadas, información que permite establecer los valores de resistividad relacionados a la presencia del contaminante y descartar valores bajos de resistividad asociados al contenido de arcillas u otro material, y la efectividad de las técnicas geofísicas si se aplicaran de manera extensiva y previa a la toma de muestras químicas para tener una mejor idea de dónde ubicar dichas muestras (Arrubarrena, 2010; Castro, 2014).

Otro método utilizado es la Polarización Inducida (PI). La PI ha sido usada en la búsqueda de minerales como el oro y el cobre. Fue desarrollada a partir de estudios mineros de los años cincuenta. En la actualidad también es aplicada en casos de contaminación por hidrocarburos y rellenos sanitarios, entre otros.

La técnica de PI aprovecha las propiedades electroquímicas del medio, como la resistividad y la cargabilidad que es la capacidad que tienen los materiales para retener carga eléctrica durante un periodo de suministro de corriente para posteriormente deshacerse de dicha carga cuando se interrumpe. Esta característica lo hace un método apropiado para situaciones de contaminación en ambientes de difícil acceso por condiciones de profundidad y diseminación, como en caso de la búsqueda de yacimientos mineros. Durante la adquisición de datos de resistividad se puede aprovechar la PI para completar la información de las características del subsuelo mediante la obtención de la polarización que ha sufrido el medio.

En el trabajo de investigación “El método de polarización inducida aplicada a problemas de contaminación en la ciudad de México” (López, 2010), la aplicación de PI para los casos de contaminación por hidrocarburos como por cobre, tuvo éxito en la determinación de zonas de mayor concentración del contaminante. El método fue puesto a prueba, en el dominio del tiempo, mediante un perfil de tomografía eléctrica con datos de resistividad y cargabilidad.

Los resultados entre la respuesta eléctrica con la polarización inducida fueron mostrados de manera comparativa. En el caso del cobre, se detectó una zona anómala casi invisible para el método de resistividad a pesar del ruido generado en los datos

debido a la susceptibilidad que tiene el método al ruido de fondo. Para el caso de los hidrocarburos los resultados que se obtuvieron con las secciones de cargabilidad fueron muy congruentes con la información de muestras de laboratorio, adquiridas previamente, en este caso los niveles de ruido fueron menor en comparación con el caso de contaminación por cobre. Se concluyó que la respuesta de PI en el dominio del tiempo aporta información en conjunto con la resistividad, permiten una mejor comprensión e interpretación de problemas de contaminación. La PI es una herramienta que ayuda a mejorar los modelos de predicción de movilidad de contaminación.

Para este trabajo el estudio de la zona contaminada se realizó mediante el método de TRE, en dos modalidades: capacitiva para aprovechar la buena resolución en los primeros metros de profundidad y galvánica para localizar a mayor profundidad el manto acuífero asociado, asimismo combinar eficientemente los resultados de las dos técnicas para proporcionar información mucho más completa.

La implementación del método de TRE se realizó bajo ciertas condiciones que en la aplicación de otros métodos geofísicos, tales como los métodos potenciales que son muy exigentes para su aplicación, no serían convenientes. En el caso de la magnetometría, aunque el cobre es eléctricamente conductor no es magnético, por lo que el método no es aplicable. El método gravimétrico es sensible a los contrastes de densidad pero este método puede resultar inapropiado para buscar zonas cercanas a cuerpos de agua subterráneas donde las diferencias de densidad entre las rocas saturadas y no saturadas son prácticamente despreciables. Por tales características, en este estudio los métodos más adecuados serían los que son sensibles a los cambios en las propiedades físicas.

Pero en el caso del georadar (GPR), aunque la propagación de la señal emitida por el radar depende de las propiedades del subsuelo, tales como la conductividad, permitividad eléctrica y permeabilidad magnética, la alta conductividad del suelo (como la alta saturación de contaminante (Cu) en el suelo de la planta) disminuiría la capacidad de penetración del radar provocando una atenuación de la señal. Este y otros métodos, no serían apropiados debido al ruido de fondo que se generaría en los datos.

El estudio se realizó dentro de las instalaciones de la planta refinadora, que presenta condiciones de construcción adecuadas a los procesos de refinación del cobre pero inadecuados para los métodos mencionados.

Es de suma importancia resaltar que un estudio geofísico sólo proporciona medidas indirectas mientras que un sondeo o estudio geoquímico es una muestra física del terreno. Para realizar una buena interpretación geofísica, es fundamental contar con información geológica, físico-química de la zona de estudio.

MARCO TEÓRICO

Los métodos eléctricos de prospección, también denominados geoelectrónicos estudian, por medio de mediciones efectuadas en la superficie, la distribución en profundidad y lateralmente de alguna propiedad electromagnética. Estos métodos se basan en mediciones del voltaje o campos magnéticos asociados con las corrientes eléctricas que fluyen en el subsuelo. Algunas de estas corrientes existen de manera natural, pero algunos son generados artificialmente para su prospección. Cual sea el caso, lo que se obtiene es la distribución de las resistividades en el subsuelo.

Los orígenes de los métodos geoelectrónicos se remontan al siglo XVIII con los trabajos de Gray y Wheeler (1720) sobre la resistividad de rocas y el descubrimiento realizado el 1746 por Watson, de que el suelo es conductor. Investigadores como Brow, quien patentó en 1883 un sistema de prospección eléctrica con dos electrodos; Daft y William (1902) obtuvieron otra patente basada en el empleo de corrientes de baja frecuencia; entre otros, dirigieron su atención a campos eléctricos producidos artificialmente. Alrededor de 1915, Conrad Schlumberger y el americano Frank Wenner, independientemente, idean el dispositivo tetra electrodico que será base del progreso posterior. La época clásica destaca por la importante solución de Stefanescu (1932) a la distribución del potencial en un semiespacio estratificado. En 1938 se efectuaron los primeros sondeos eléctricos profundos. En la época contemporánea, las computadoras ponen al alcance del geofísico cálculos inabordables anteriormente (Orellana, 1982).

A continuación se describen de manera general los fundamentos básicos de la teoría de la resistividad eléctrica; el método tomografía de resistividad eléctrica (TRE) que aborda dos modalidades de adquisición de datos: las mediciones que implican la inyección directa de corriente a través de electrodos en la superficie del suelo (por contacto galvánico), generalmente, denominadas como mediciones de corriente continua (CC) y las mediciones en las que una corriente alterna (CA) de frecuencia dada se hace fluir en el suelo por acoplamiento capacitivo; la descripción de la teoría básica y criterios de inversión bidimensional de datos de TRE; finalmente, la descripción de los fundamentos de resistividad capacitiva a partir del formalismo electrostático y las condiciones que permiten una relación muy estrecha entre las mediciones de resistividad capacitiva y las mediciones de corriente continua.

2.1. Fundamentos de la resistividad eléctrica

Las propiedades electromagnéticas del subsuelo se expresan fundamentalmente por medio de tres magnitudes físicas, estas son la resistividad eléctrica ρ , la constante dieléctrica ϵ y la permeabilidad μ (Orellana, 1982, Telford et al., 1990). Entre ellas la resistividad eléctrica es la magnitud cuya distribución en el suelo se estudia en los métodos de resistividad.

Para explicar el concepto de resistividad se parte de la ley de Ohm, establecida en 1827 (Lowrie, 2007), donde enuncia que la corriente eléctrica I que fluye en un cable conductor, en la mayoría de los casos, es proporcional a la diferencia de potencial V a través de él. La relación lineal de estos parámetros es expresada por la ecuación:

$$V = IR \quad (1)$$

donde R es la resistencia del conductor, definida como la capacidad de impedir el movimiento del flujo de electrones producido por la fuerza electromotriz, su unidad de medición es ohm [Ω]; V , el voltaje, es la responsable del movimiento de cargas a través de un medio, medido en volt [v]; I es la corriente, definida como el flujo de electrones que pasa a través de una sección por unidad de tiempo y su unidad es el Amperio [A]. Estas son variables físicas esenciales para comprender las propiedades eléctricas del medio.

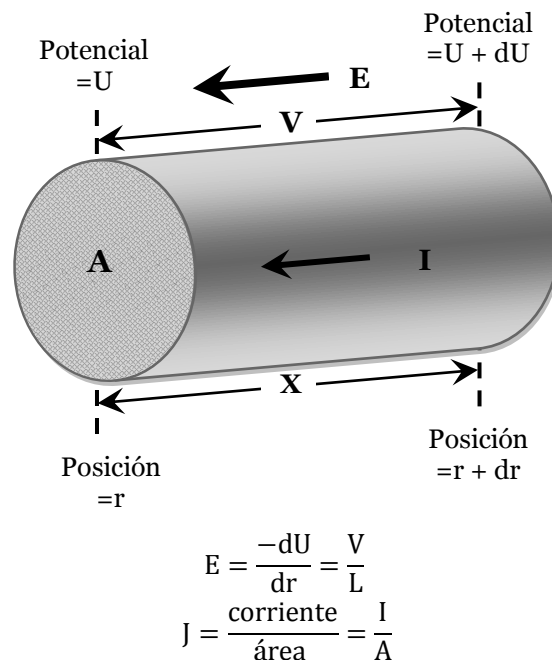


Figura 2.1. Parámetros que definen la ley de Ohm para un conductor cilíndrico homogéneo de resistencia R , longitud L y sección transversal A (Lowrie, 2007).

Ahora, para un material dado la resistencia R es proporcional a la longitud L , e inversamente proporcional al área de la sección transversal A de un conductor cilíndrico homogéneo (Figura 2.1), esta relación es expresada por la ecuación:

$$R = \rho \left(\frac{L}{A} \right) \quad (2)$$

donde la constante de proporcionalidad ρ es la resistividad del conductor. Es un coeficiente que depende de la naturaleza y estado físico del cuerpo considerado, ya que cada material tiene diferente resistividad.

A partir de esta expresión se determina el concepto de resistividad eléctrica, como una medida de la dificultad que la corriente eléctrica encuentra a su paso en un material determinado, medida en Ohm-metro ($\Omega \text{ m}$); pero igualmente puede considerarse como la facilidad de paso, resultando así el concepto de conductividad eléctrica (su unidad de medida es el Siemens por metro (S m^{-1})) que se expresa matemáticamente con el inverso de la resistividad (Orellana, 1982) y es representada por la letra σ de modo que:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

Al relacionar las ecuaciones (1) y (2), y reagrupando se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{V}{L} = \rho \frac{I}{A} \quad (4)$$

De esta expresión, si la proporción $\frac{V}{L}$ es comparada con un campo eléctrico E (asumiendo la diferencia de potencial constante a lo largo de un conductor) y la proporción $\frac{I}{A}$ con la densidad de corriente J (la corriente por unidad de área de la sección transversal del conductor), entonces la expresión se puede reescribir como $E = \rho J$, sustituyendo los términos en la expresión (4), y despejando J tendremos la forma puntual de la ley de Ohm:

$$J = \sigma E \quad (5)$$

2.1.1. Ecuaciones fundamentales

Partiendo de las ecuaciones de Maxwell, la ley de inducción de Faraday y la ley de Ampere (Orellana, 1982; Telford, 1992):

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (6)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (7)$$

Por tratarse de un campo estacionario, es decir, el campo no varía respecto el tiempo, se anulan las derivadas temporales, entonces las ecuaciones anteriores quedan expresadas como:

$$\nabla \times E = 0 \quad (8)$$

$$\nabla \times H = J \quad (9)$$

La ecuación (8) establece que los campos eléctricos estáticos son conservativos e irrotacionales. Siendo un campo vectorial con rotacional nulo se puede expresar como el gradiente de un campo escalar, por lo tanto podemos definir un potencial eléctrico U escalar a partir de esa ecuación, de manera que:

$$E = -\nabla U \quad (10)$$

En esta ecuación hay que incluir el signo negativo por la convención de que el potencial eléctrico U aumenta al ir en contra del campo eléctrico E, esto significa que el campo eléctrico está dirigido de las cargas positivas a las negativas, mientras que el potencial aumenta en dirección opuesta.

En un medio lineal e isotrópico debe cumplirse $J = \sigma E$. Esta ley rige el comportamiento del flujo de corriente en el subsuelo y es utilizada para los estudios de resistividad. Nos dice que la densidad de corriente J en un punto, tiene la misma dirección y sentido que el campo E en el mismo punto, y que es proporcional a él.

Se define la ecuación de continuidad para el caso de un campo estacionario, donde la densidad de carga no cambia con el tiempo y donde se cumple en todos los puntos, excepto en los electrodos, como:

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (11)$$

combinando esta ecuación con la ley de Ohm (5), se tiene:

$$\nabla \cdot J = \nabla \cdot (\sigma E) = 0 \quad (12)$$

desarrollando la ecuación:

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

Dentro de una zona de conductividad uniforme $\sigma \nabla = 0$, por consiguiente:

$$\nabla^2 U = 0 \quad (13)$$

Esta es la ecuación de Laplace la cual será válida en todo el semiespacio conductor, pero no en los electrodos ni en las superficies de discontinuidad de la resistividad.

Si se traza una superficie semiesférica alrededor del electrodo C1, donde la densidad de corriente (J) fluirá perpendicularmente, alejándose de la fuente con el mismo valor en cualquier punto, dicha superficie estará dirigida radialmente como se muestra en la Figura 2.2. La integral de J sobre la superficie será igual a I por lo que si el radio es r, entonces se tendrá:

$$2\pi r^2 J = I \quad (14)$$

Por lo tanto, combinando las expresiones (10) y (14) y despejando el campo eléctrico:

$$|E| = \frac{I}{\sigma 2\pi r^2} = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (15)$$

Esta expresión describe que la intensidad de campo E de un electrodo puntual (asemejando una carga puntual positiva) tiene dirección radial hacia afuera y la magnitud proporcional a la carga es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia r.

La diferencia de potencial entre dos puntos cuales quiera M y N, deducida a partir de la expresión (10), es dada por:

$$U_N^M = - \int_N^M E \cdot dI \quad (16)$$

Si r_M y r_N se toman como las distancias respectivas de los puntos M y N al electrodo C1, y se combinan las expresiones (15) y (16), se tiene:

$$U_N^M = \frac{I\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_M} - \frac{1}{r_N} \right) \quad (17)$$

Por convención universal se toma como origen de potenciales un punto situado a distancia infinita de la fuente, por lo que se haya el potencial absoluto en el punto M calculando el límite de la expresión (17) para $r_N \rightarrow \infty$, entonces:

$$U_M = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{r_M} \quad (18)$$

Como el potencial es una magnitud aditiva, si son varias fuentes habrá que sumar algebraicamente los potenciales respectivos de modo que:

$$U = \frac{\rho}{2\pi} \sum \frac{I_i}{r_i} \quad (19)$$

donde r_i es la distancia de la fuente de índice i al punto considerado e I_i la intensidad de corriente que entra o sale por él, con su signo correspondiente.

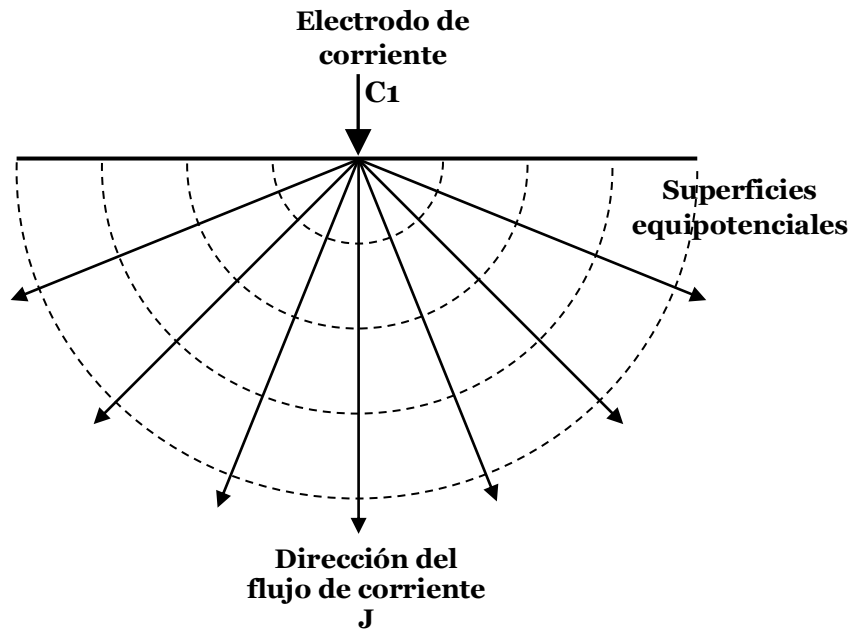


Figura 2.2. Vectores densidad de corriente de una fuente puntual en un semiespacio homogéneo (Orellana, 1982; Loke, 2004).

2.1.2. Resistividad aparente

En prospección eléctrica el principio de los cuatro electrodos se denomina cuadripolo o tetrapolo (Figura 2.3). La diferencia de potencial medido en un arreglo de cuatro electrodos, en un medio considerado homogéneo e isotrópico de resistividad ρ , está dada por la siguiente expresión:

$$\Delta V = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}} \right) \quad (20)$$

En esta ecuación los valores en los paréntesis representan las distancias entre los electrodos de corriente A y B y los electrodos de potencial M y N, expresada por r

En un cuadripolo, las mediciones de la resistividad (ρ) se realizan a través de dos electrodos de corriente A y B, mediante la inyección de corriente (I) que se hace circular en el subsuelo, y dos electrodos de potencial M y N, donde se mide el resultado de la diferencia del potencial entre los electrodos de corriente.

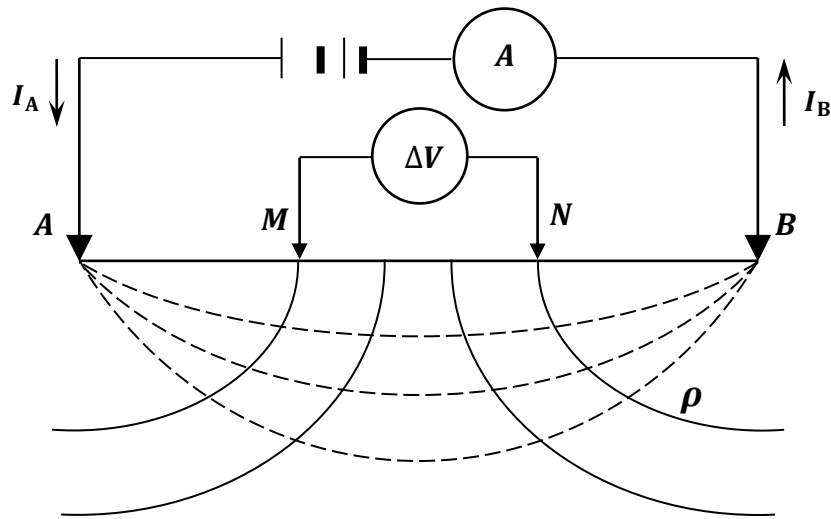


Figura 2.3. Arreglo convencional de cuatro electrodos, dos electrodos de potencial P1 y P2, y dos de corriente C1 y C2 (Modificado de Orellana, 1982).

Las mediciones de resistividad obtenidas en campo se les denomina mediciones de resistividad aparente (ρ_a) y se consigue aplicando a los datos obtenidos en un medio heterogéneo la expresión correspondiente a un medio homogéneo (Orellana, 1982). Sólo si la medición se realiza en un medio homogéneo la resistividad aparente será igual a la verdadera.

La ρ_a se obtiene para cualquier arreglo geométrico. En el caso más general, donde cuatro electrodos puntuales están alineados a intervalos regulares sobre la superficie, son conocidas las distancias entre los electrodos, los valores de la corriente (I) y de la diferencia de potencial (ΔV), despejando la ecuación (20) el valor de la ρ_a estará calculada por:

$$\rho_a = K \frac{\Delta V}{I} \quad (21)$$

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}\right)} \quad (22)$$

donde K es el factor geométrico, resultado de una medición individual que depende de la geometría del cuadripolo, cuyas dimensiones son la longitud.

El factor geométrico representa el efecto de la distancia entre electrodos, no es afectado por el intercambio de electrodos de corriente y de potencial, pero el espacio entre los electrodos de potencial se mantiene pequeño para minimizar los efectos del potencial natural (Milsom, 2003), por lo tanto las mediciones de la resistividad son independientes de la posición de los electrodos; cuando se intercambian de posición los electrodos de corriente por los de potencial se cumple el principio de reciprocidad, tanto en un medio homogéneo como heterogéneo, por lo que la expresión (22) permanece invariable (Orellana, 1982).

Tomando en cuenta que la resistividad medida en los instrumentos normalmente es dada por el valor de la resistencia:

$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (23)$$

En la práctica la resistividad aparente es calculada por la ecuación resultante de la relación entre las ecuaciones (21) y (23):

$$\rho_a = KR \quad (24)$$

El valor de la resistividad calculada no es la verdadera resistividad del subsuelo, pero un valor aparente que es la resistividad de un suelo homogéneo dará el mismo valor de resistencia para el mismo arreglo de electrodo (Loke, 2000).

2.1.3. Configuraciones electrónicas lineales de cuatro electrodos

El método de los cuatro electrodos puede adoptar cualquier disposición geométrica sobre el plano que representa la superficie del terreno. Estas disposiciones geométricas son denominados dispositivos o configuraciones (Orellana, 1982).

Existe una variedad de configuraciones, que se diferencian entre sí por las distancias entre electrodos y las posiciones de los electrodos de corriente respecto a los de potencial, donde la función del espacio entre electrodos establece el comportamiento de la profundidad de investigación (depende de las capas del subsuelo, por ejemplo, una capa de baja resistividad reducirá la profundidad de investigación) por lo que no se relaciona directamente con la profundidad de la penetración de la corriente. A mayor espaciamiento entre electrodo mayor es la profundidad alcanzada, sin embargo, la resolución puede disminuir (Loke, 2000).

La configuración electródica que se utiliza en campo depende del objetivo y el nivel de ruido de fondo, así como del método eléctrico empleado. Entre las posibles configuraciones lineales que se pueden utilizar en un estudio 2D se encuentran el tipo Wenner, Wenner-Schlumberger y el Dipolo-Dipolo.

Aunque también se usan arreglos no convencionales para modelos tridimensionales que permiten aplicar cualquier configuración, arreglos novedosos que son aplicados en zonas de difícil acceso: el arreglo de mínimo acoplamiento y ecuatorial paralelo (Sánchez, 2013); el arreglo tipo “L” y esquinas desarrollado por Tejero *et. al.* (2015); los arreglos en círculo, triángulo y doble herradura, que combinados con diferentes configuraciones (WS, DD, Ecuatoriales (EQ) y Mínimo Acoplamiento (MA)) han sido utilizados en trabajos recientes (Vargas, 2015).

Las características que se deben considerar en una configuración son: la profundidad de investigación, la sensibilidad de la configuración a cambios verticales y horizontales de resistividad en el subsuelo, la cobertura de datos horizontal y la intensidad de la señal (Loke, 2000).

Las configuraciones lineales mencionadas y sus respectivas formulas matemáticas de la resistividad aparente están expresadas de la siguiente manera:

En la configuración *Wenner* los electrodos se mantienen equidistantes, de tal manera que la distancia entre electros es $r_{C1P1} = r_{P1P2} = r_{P2C2} = a$, como se observa en la figura 2.4.

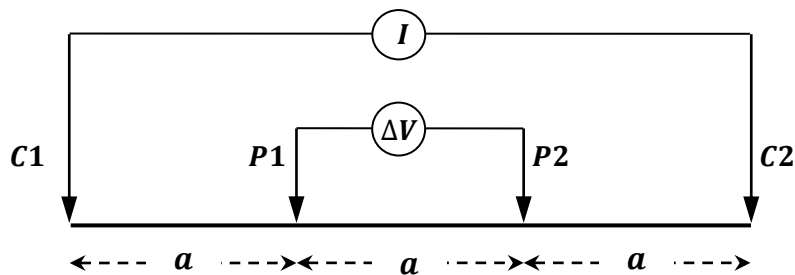


Figura 2.4. Configuración Wenner (Modificado de Milsom, 2003).

La expresión de la resistividad aparente para este arreglo es:

$$\rho_a = 2\pi a \frac{V}{I} \tag{25}$$

En donde el factor geométrico del dispositivo está dado por $K = 2\pi a$

En la configuración *Schlumberger* la distancia entre los electrodos de potencial P1 y P2 es muy pequeña con respecto a la distancia entre los electrodos de corriente C1 y C2 (Orellana, 1982), Por lo que la distancia en los electrodos de potencial se mantiene fija, mientras que la distancia entre los electrodos de corriente es progresivamente aumentada. Esto hace que las líneas de corriente penetren cada vez a mayor profundidad.

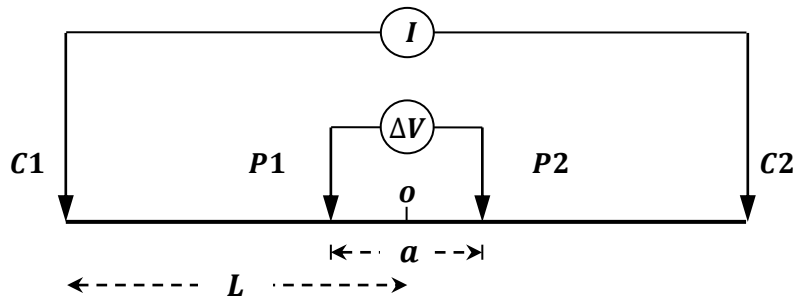


Figura 2.5. Dispositivo Schlumberger (Modificado de Milsom, 2003).

Si L representa a la distancia $OC_1=OC_2$, la expresión (25) se podrá representar de la siguiente manera:

$$\rho_a = \pi \left(L^2 - \frac{a^2}{4} \right) \frac{V}{Ia} \quad (26)$$

Esta configuración junto con la configuración Wenner forman un híbrido, *Wenner-Schlumberger*. La disposición de los electrodos es la misma que en el arreglo Wenner, con la diferencia de que el factor “ n ” para este arreglo es la relación de distancia entre C_1 - P_1 (o P_2 - C_2) (Loke, 2000).

La configuración *dipolo-dipolo* se caracteriza por la distancia entre los electrodos de corriente (C_1 , C_2) y los de potencial (P_1 , P_2), que forman los dipolos como se muestra en la Figura 2.6. Este espaciamiento se denota por la letra “ a ”. La separación entre los dipolos es de un factor de “ n ” veces el espaciamiento a .

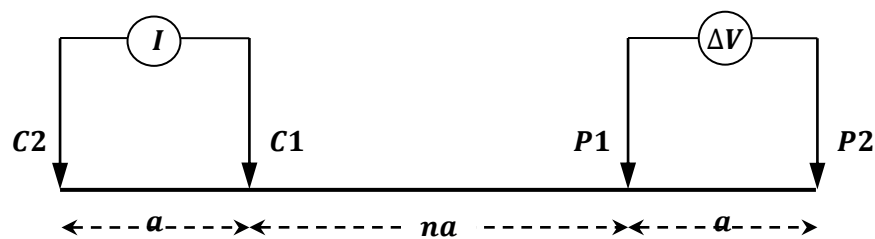


Figura 2.6. Arreglo geométrico Dipolo-Dipolo (Modificado de Milsom, 2003).

La expresión de la resistividad aparente para este arreglo es:

$$\rho_a = \pi a(n + 1)(n + 2)n \frac{V}{I} \quad (27)$$

En el siguiente cuadro comparativo se muestran las características principales de estas configuraciones.

Configuración eléctrica	Características principales	Profundidad de investigación
Wenner	Apropiado para cambios verticales (estructuras horizontales). Deficiente para detectar cambios horizontales (estructuras verticales)	Moderada, aproximadamente 0.5 veces el espaciamiento “a” (Loke,2000)
Wenner-Schlumberger	Moderadamente sensible para estructuras horizontales (“n” valores menores) y verticales (“n” valore mayores). La intensidad de la señal es, aproximadamente, inversamente proporcional al cuadrado del factor “n”. Probablemente es el mejor arreglo entre el Wenner y Dipolo-Dipolo.	Aproximadamente 10% más profunda que el Wenner
Dipolo-Dipolo	Altamente sensitivo a los cambios horizontales (estructuras verticales como diques y cavidades.) Deficiente para cambios verticales (estructuras horizontales, capas sedimentarias) En estudios 2D tiene mejor cobertura de datos horizontales que el Wenner. La intensidad de señal es muy pequeña para valores grandes del factor “n”	Depende el espaciamiento “a” y el factor “n”. Poca profundidad en comparación con Wenner

Tabla 1. Características generales de las configuraciones eléctricas para corriente continua.

2.1.4. Resistividad eléctrica en el subsuelo

La corriente que entra al subsuelo se puede propagar de tres maneras diferentes: por conducción dieléctrica (asociada a materiales muy poco conductivos o aislantes), conducción electrónica u óhmica (asociada a materiales con electrones libres, en metales y cristales) y conducción electrolítica (asociada al movimiento de los iones presentes en el fluido intersticial del terreno). La conducción electrolítica es el modo de propagación más importante y en el que se basan los métodos de resistividad.

La resistividad en el subsuelo varía ampliamente debido al comportamiento físico de las rocas que depende de diversos factores como el modo de agregación de sus minerales y de la forma, volumen y relleno (generalmente agua o aire) de los poros. Así como la temperatura y la presión que ejercen un efecto sobre dicha propiedad a grandes profundidades. Además el grado de fracturación, salinidad y humedad en la roca, si el medio es heterogéneo u homogéneo, si es isótropo o anisótropo, entre otros factores.

Los metales y la mayoría de los sulfuros metálicos conducen la electricidad de manera eficiente por el flujo de electrones. La mayoría de los minerales que forman rocas son muy malos conductores, por lo tanto las mediciones de las corrientes en el subsuelo se lleva a cabo principalmente por iones en el agua que se encuentran en los poros del material rocoso. El agua pura está ionizada a sólo un grado muy pequeño y la conductividad eléctrica del agua en el poro depende de la presencia de sales disueltas, principalmente cloruro de sodio. Los minerales de la arcilla están iónicamente activos que incluso libres de humedad son conductivos (Milsom, 2003).

Los materiales isotrópicos tienen la misma resistividad en todas las direcciones. La mayoría de las rocas son isotrópicas, pero las que están fuertemente laminadas como pizarras y lutitas son más resistivas debido a las laminaciones en paralelo entre ellas (Milsom, 2003). La acumulación de sales en las capas cercanas a la superficie produce una alta conductividad, lo que permite muy poca penetración de corriente eléctrica a mayor profundidad, sin embargo las capas superficiales altamente resistivas son obstáculos en las mediciones con corriente continua.

2.1.5. Sondeo Eléctrico Vertical

Un Sondeo Eléctrico es una serie de valores de resistividad aparente, efectuadas con el mismo tipo de dispositivo y separación creciente entre los electrodos de corriente y potencial. Se denomina Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) cuando el dispositivo es simétrico (o asimétrico con un electrodo en el infinito) que durante la medición permanecen fijos el azimut del dispositivo y el centro del segmento (los electrodos de potencial).

Un SEV tiene como finalidad averiguar la distribución vertical de resistividades bajo el punto de atribución. El punto de atribución de un SEV es el punto del terreno a cuya vertical deben atribuirse los resultados obtenidos por el SEV. Por razones de simetría, se toma como punto de atribución de cada SEV el centro del dipolo de potencial (P1-P2). La eficacia del método corresponde al caso en que el SEV se efectúa sobre un terreno compuesto por capas laterales homogéneas en lo que respecta la resistividad, limitadas por medios estratificados. Dando como resultado un modelo considerado

unidimensional (1D), es decir, sólo varía en una sola dirección, respecto con la profundidad y no lateralmente.

La configuración Schlumberger es comúnmente utilizado para el SEV, debido que es un dispositivo en el que solo influye una distancia. La distancia entre los potenciales se considera nula frente a los de corriente y sólo dos electrodos son movidos.

Los datos de resistividad aparente obtenidos en cada SEV se representan por medio de una curva, en función de las distancias entre electrodos. Esta curva se denomina curva de resistividades aparentes y representa gráficamente en escala logarítmica la solución del problema directo, para deducir la distribución vertical de resistividades en el punto sondeado, partiendo de dicha curva, esto es la solución del problema inverso (Orellana, 1982).

Durante varios años el SEV se utilizó de manera muy generalizada, sin embargo en la actualidad se utiliza en estudios de gran profundidad, es aplicado a objetivos horizontales. Tal es el caso del estudio de capas tectónicas, búsqueda de agua subterránea (estudios hidrogeológicos), infiltración de agua marina en zonas costeras, estratificación y todo tipo de situaciones geológicas, en estudios en donde otros métodos eléctricos de innovación no permiten visualizar a mayor profundidad. El SEV no es adecuado para contactos verticales tales como, fallas, diques, cavernas y discordancias (Salas, 2008; Díaz, 2010; Vences, 2013).

2.1.6. Calicata eléctrica

La finalidad de las calicatas eléctricas es el estudio de las variaciones laterales de resistividad del subsuelo. Es un método de investigación horizontal que suelen efectuarse a lo largo de perfiles, generalmente paralelos donde los resultados se relacionan entre sí, resultando un estudio en planta a profundidad aproximadamente constante. Esto lo hace adecuado para la detección de contactos verticales o inclinados, cambios laterales de facies, metalizaciones, diques y otros cuerpos o estructuras que se presentan como heterogeneidades laterales de resistividad.

La zona explorada por calicatas eléctricas se extiende desde la superficie hasta una profundidad más o menos constante, que es función tanto de la separación entre electrodos como de la distribución de resistividades bajo ellos. En la práctica, las calicatas eléctricas consisten en desplazar conjuntamente los 4 electrodos a lo largo de un perfil, manteniendo constante la separación entre electrodos y posiciones mutuas para obtener un perfil de resistividades. En ellos el campo eléctrico en el terreno es

diferente para cada posición del dispositivo. En otro tipo de calicata los electrodos de corriente permanecen fijos durante la medición, de modo que se crea en el terreno un campo estacionario, el cual es explotado colocando los electrodos de potencial en diversas posiciones.

El método para la interpretación de las calicatas eléctricas, consiste en comparar las curvas de resistividad aparente obtenidas en campo, con curvas patrón correspondientes a cortes geoelectricos conocidos. Esta comparación puede hacerse visualmente o por superposición en gráficos semilogarítmicos; otro procedimiento consiste en establecer, mediante análisis de las curvas patrón, las relaciones entre la posición de puntos característicos y la geometría del corte geoelectrico correspondiente. Estas relaciones se aplican luego a las curvas de campo para la determinación de las discontinuidades laterales de la resistividad del subsuelo. Las curvas patrón pueden obtenerse mediante el recurso al cálculo numérico de métodos de aproximación, como el de elementos finitos y el de diferencias finitas (Orellana, 1982).

2.2. Método Tomografía de Resistividad Eléctrica

La Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) es una técnica de adquisición particular en prospección eléctrica de corriente continua para generar un modelo (2-D o 3-D) de resistividades, donde se muestren cambios de resistividad en la dirección vertical así como en la dirección horizontal a lo largo de la línea de estudio, de manera que el modelo permita investigar la variación de la resistividad del subsuelo a profundidad y lateralmente.

El método requiere de los datos de resistividad aparente, obtenidos en campo, a los cuales se les aplica un algoritmo de inversión para construir la Tomografía o Imagen Eléctrica, con ayuda de programas comerciales que ofrecen métodos de inversión bien probados (RES2MOD/RES2DINV by Geotomo Software (2000, 2010), DC2DPRO by J.H. Kim (2012), EarthImager 2D by Advanced Geosciences, Inc (2002-2009), ZONDRES2D (ZOND GEOPHYSICAL SOFTWARE)), la cual presenta en una escala visual de colores la distribución real de las resistividades a profundidad, de tal manera que proporciona información sobre las características físicas que se buscan en el subsuelo y permite la identificación de estructuras de interés, para obtener un mejor análisis de interpretación con ayuda de información geológica disponible.

El desarrollo del método TRE se debe a la mayor limitación del método SEV, no tener en cuenta los cambios horizontales en la resistividad del subsuelo o cambios verticales en el caso de las calicatas eléctricas, por lo tanto fue desarrollado para la investigación

de áreas geológicamente complejas.

En muchas situaciones geológicas los estudios de TRE pueden dar resultados eficientes que son complementarios a la información obtenida por el otro método geofísico. Por ejemplo, los métodos sísmicos que pueden mapear interfaces, pero tendrán dificultad en el mapeo de cuerpos discretos como cantos rodados, cavidades y plumas de contaminación, las mediciones de radar pueden proporcionar imágenes más detalladas, pero tienen muy limitada la profundidad de penetración en zonas conductoras con sedimentos no consolidados tales como suelos arcillosos (Loke, 2001).

En el método de TRE cabe distinguir dos modalidades de operación para adquirir los datos de resistividad: en uno de ellos se inyecta una corriente continua (2-2.5A) por medio de electrodos enterrados en el suelo (por contacto galvánico) y en el otro la adquisición se puede realizar utilizando sensores de acoplamiento capacitivo (no hay electrodos clavados en el suelo por donde se inyecte corriente o se mida la diferencia de potencial) que usa una corriente Alterna (0.125-16mA). No obstante, sea cual sea el tipo de corriente utilizado, las observaciones se interpretan según las leyes de la corriente continua, de acuerdo al capítulo de fundamentos de resistividad capacitiva.

2.2.1. Medición de resistividad

El principio físico del método TRE se basa en la medición de resistividades por el método de los cuatro electrodos, donde cada uno de los electrodos puede ser fuente (se inyecta la corriente) o receptor (se lee la caída de potencial), además pueden adoptar diversas configuraciones electrónicas: Dipolo-Dipolo, Wenner o bien Wenner-Schlumberger, entre otras.

La TRE es un método multielectrónico. Las mediciones se realizan de forma totalmente automatizada, es decir, sin necesidad de mover manualmente ningún electrodo. Ello se debe a que por un lado se trabaja con un gran número de electrodos, conectados a un cable multi-núcleo (Loke, 2000) en una dirección determinada, y por otro lado al empleo de resistímetro o dispositivo de medida de resistividades, que se encarga de realizar automáticamente toda la secuencia de medidas preestablecida, formando para ello todas las combinaciones posibles de 4 electrodos.

En un estudio de TRE, una serie de electrodos clavados en el suelo son conectados a un cable de varios núcleos a lo largo de una línea recta, utilizando una separación adyacente constante entre electrodo. El cable de varios núcleos se une al resistímetro. La secuencia de medidas a tomar, el tipo de arreglo en uso y otros parámetros de la medición (como la corriente a usar) se introducen normalmente en un archivo de texto,

que puede ser leído por un programa de computadora. Después de leer el archivo de control, el programa selecciona automáticamente los electrodos apropiados para cada medición. En un estudio, la mayor parte del trabajo de campo es en la disposición de los cables y electrodos.

En la adquisición de los datos, a medida que las distancias entre electrodos aumentan, el número de mediciones disminuye. El número de mediciones que se puede obtener para cada separación de los electrodos, de un determinado número de electrodos, depende del tipo de arreglo utilizado. Por ejemplo, la configuración Wenner da el menor número de posibles mediciones en comparación con otras configuraciones que se utilizan en los estudios de TRE.

La figura 2.7 muestra una posible secuencia de mediciones para la configuración de electrodos Dipolo-dipolo. Para esta configuración, por lo general, la medición comienza con una separación de "a" entre los electrodos C1-C2 (también el P1-P2). La primera secuencia de medidas se hace con un valor de 1 para el factor "n" (que es la relación de la distancia entre los electrodos C1-P1 a la longitud del dipolo C1-C2), seguido por "n" igual a 2, manteniendo fija la separación del dipolo C1-C2 como en "a". Cuando "n" es igual a 2, la distancia del electrodo C1 al electrodo P1 es el doble de la longitud del dipolo C1-C2.

Para las mediciones posteriores, el factor de separación "n" por lo general se incrementa a un valor máximo de 6, arriba de este valor las mediciones precisas del potencial son difíciles debido a los valores muy bajos del potencial. Para aumentar la profundidad de investigación, el valor de "a" de la separación entre el dipolo C1-C2 se aumenta, y se hace otra serie de mediciones con diferentes valores de "n". Si es necesario, esto puede repetirse con valores más grandes de separación entre los dipolos C1-C2 y P1-P2. Una técnica de medición similar se puede utilizar para la configuración Wenner-Schlumberger y polo-dipolo con diferentes combinaciones del espaciamiento "a" y el factor "n" (Loke, 2000).

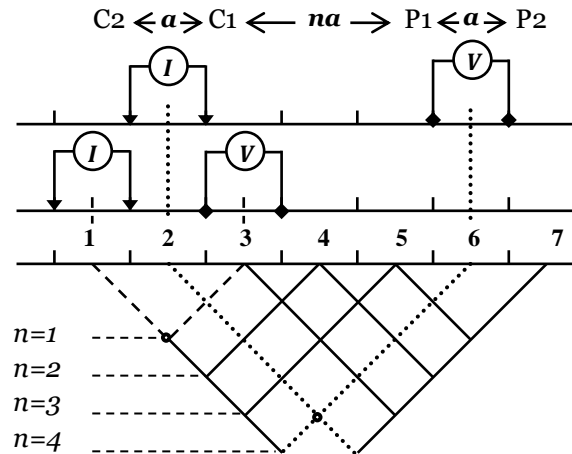


Figura 2.7. Secuencia de medición para la construcción de una pseudosección mediante la configuración Dipolo-Dipolo. I electrodo de corriente y V electrodo de potencial (Lowrie, 2007).

Este arreglo es muy popular en trabajos con polarización inducida (IP), debido a la separación completa de los circuitos de corriente y potencial, que reduce la vulnerabilidad al ruido inductivo (Milsom, 2003 y Loke, 2000), y en estudios con el método de TRE, de manera particular los realizados mediante sensores por acoplamiento capacitivo, debido a que esta configuración tiende a ser la geometría más favorable para este tipo de acoplamiento.

2.2.1.1. Resistividad capacitiva

Este método geofísico fue diseñado para su aplicación en ambientes donde el contacto galvánico es difícil, por ejemplo en estructuras de ingeniería (carreteras, aceras, etc.), roca dura, suelo seco o helado (Kuras, 2005). Es utilizado en exploración para aguas subterráneas, minerales, ambientales y otros estudios así como arqueológicos.

El principio físico de medición de la TRE capacitiva consiste en un arreglo de sensores de cuatro puntos que está acoplado capacitivamente al suelo, similar al dipolo-dipolo, en contraste con la TRE galvánica que puede adoptar cualquier configuración electródica. Este sistema está diseñado para ser arrastrado por un operador o un móvil. Consiste de un dipolo transmisor que inyecta corriente al subsuelo, asemejando a los electrodos de corriente, mientras que el dipolo receptor mide la diferencia de potencial, cumpliendo las funciones de los electrodos de potencial.

El arreglo de sensores actúa como un dipolo eléctrico oscilante sin conexión a la tierra. Este dipolo se utiliza como una fuente controlada para crear el flujo de corriente

eléctrico en el subsuelo. Una corriente alterna es acoplada a la tierra por el transmisor y la resultante distribución del potencial oscilante en la superficie del suelo es medida por el receptor. El voltaje medido es proporcional a la resistividad de la Tierra entre los dipolos. La resistividad aparente es calculada usando el factor geométrico modificado para el arreglo de antenas de acoplamiento capacitivo (Kuras, 2005).

El método de TRE capacitiva es somera por su geometría. La profundidad de investigación, depende del tamaño del dipolo, y la distancia (na) entre el dipolo transmisor y el dipolo receptor. Por lo tanto, la distancia práctica a la cual el receptor puede detectar al transmisor depende de la resistividad del subsuelo. Es por ello que las profundidades de investigación que pueden alcanzar este tipo de arreglos, se encuentra entre los primeros 5m.

En la práctica, el transmisor electrifica dos cables coaxiales (dipolo transmisor) con una corriente alterna mínima de 0.125 mA a una máxima de 16mA con una frecuencia de 16.5 kHz, causando que la corriente alterna fluya en la tierra, a pesar de la presencia de los aisladores. La corriente es entonces acoplada a la tierra a través de la capacitancia del cable. Un receptor acoplado y sintonizado automáticamente a la frecuencia del transmisor mide el voltaje asociado, recogido por los cables del dipolo receptor. El receptor entonces envía el voltaje normalizado de la corriente a la unidad de almacenamiento de datos (figura 2.8)

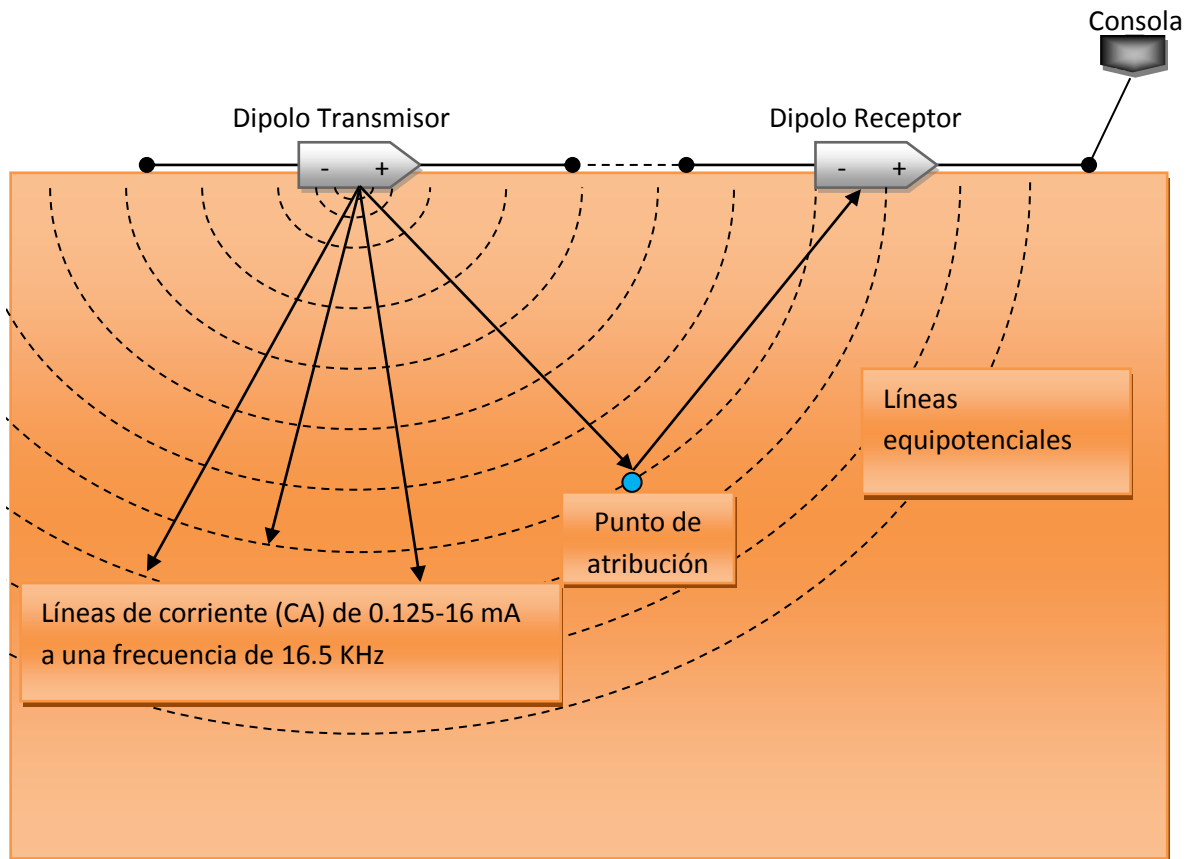


Figura 2.8. Distribución de la corriente en el subsuelo con la técnica de resistividad capacitiva.

2.3. Teoría de inversión 2D

La teoría de inversión es un conjunto organizado de métodos matemáticos cuyo propósito común es analizar series de datos u observaciones con objeto de extraer información significativa sobre algún fenómeno físico, con base en inferencias derivadas de las observaciones mismas. Las incógnitas por resolver se plantean en términos de los valores numéricos que pueden asumir las propiedades más características del fenómeno estudiado. Estas propiedades se denominan “parámetros del modelo” y se presume la existencia de alguna teoría matemática o “modelo” que describe adecuadamente la relación entre los parámetros del modelo y los datos (Menke, 1989).

El estudio de un fenómeno físico se divide en tres etapas (Tarantola, 2005):

1. Parametrización del sistema. Obtener un conjunto mínimo de parámetros que lo caracterice completamente desde un determinado punto de vista.
2. Modelado directo. Conocer los parámetros del modelo, calcular los valores de

dichos parámetros de un modelo conocido. Para los valores dados de los parámetros del modelo se pueden hacer predicciones sobre los resultados de las mediciones de acuerdo con algunos parámetros observables.

3. Modelado inverso. Utilizar resultados reales de algunas mediciones de parámetros observables, es decir, la respuesta para inferir los valores reales de los parámetros del modelo.

2.3.1. Modelado directo

El Modelado directo o problema directo se define como el proceso que predice una serie de datos a partir de la distribución de parámetros de un modelo conocido y un conjunto de condiciones específicas relevantes para el problema de interés (Menke, 1989), en la práctica, la configuración del electrodo y el modelo. El modelo directo crea un conjunto de datos sintéticos.

Un modelo de resistividad 2D se obtiene a partir de resolver la siguiente ecuación, esta ecuación rige la relación entre los datos y los parámetros:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) = I(x, y, z) \quad (28)$$

Se trata de un modelo 2D de la tierra pero debido a un campo eléctrico 3D de una fuente puntual. El problema directo de resistividad se resuelve mediante métodos numéricos por discretización, es decir, estos métodos pueden subdividir el subsuelo en miles de celdas con diferentes valores de resistividad. Para discretizar la ecuación se implementa tanto el método de diferencias finitas como el método de elementos finitos.

La ecuación (28) es transformada en una ecuación 2D para reducir el tiempo de cálculo. La solución directa se puede conseguir mediante la resolución de la ecuación diferencial parcial 2D en el dominio de la transformada de Fourier:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \right) - k^2 \sigma V = -I \cdot \delta(x) \cdot \delta(z) \quad (29)$$

donde V es el potencial eléctrico escalar, I es la corriente eléctrica, k es el número de onda en el dominio de la transformada, σ es la conductividad eléctrica como una función de (x, z) y δ es la función delta de Dirac de (x, z) (Earthimager 2D Advanced Geosciences Inc, 2009).

2.3.2. Modelado inverso

La Inversión se define como el proceso que determina la estimación de los parámetros del modelo a partir de los datos y un modelo apropiado (Menke, 1989).

La determinación de las resistividades reales del subsuelo, a partir de los valores de resistividad aparente, se resuelve como un problema de inversión (Loke, 2004), El problema de inversión reconstruye la distribución de la resistividad del subsuelo a partir de los datos obtenidos de las mediciones de campo, medidos del voltaje y la corriente. Los datos de resistividad aparente son transformados en resistividades reales usando algún algoritmo de inversión, de tal manera que un conjunto de resistividades aparentes sintéticas son comparadas con las medidas en campo. Los algoritmos matemáticos para calcular una imagen de resistividad se basan en el método de mínimos cuadrados como lo desarrollaron Loke y Barker (1995, 1996).

La distribución de la resistividad del subsuelo es el parámetro del modelo. La distribución de las resistividades se calcula a partir de un modelo basado en una superficie compuesta por una serie de prismas bidimensionales contiguos llamados dominios (Loke y Barker, 1995, 1996). La determinación de las resistividades en los bloques se logra mediante un método iterativo de optimización no-lineal (Barker, 1992). Si se tiene un problema no-lineal, se linealiza suponiendo cambios pequeños de resistividad, por lo que se discretiza el subsuelo en celdas de resistividad constante y se obtiene una matriz de sensibilidad que relaciona todas las medidas de una configuración electródica con diferentes celdas.

Matemáticamente, para un problema inverso no lineal el vector de datos calculado (d), es decir, la respuesta del modelo, es una función no lineal de los parámetros del modelo de un vector (m), por lo tanto, $d = g(m)$ representa a los datos calculados, siendo $g(m)$ un modelo propuesto.

El conjunto de datos de resistividad aparente es representado por el vector de datos observados:

$$d_{\text{obs}} = (d_1, d_2, \dots, d_n) \quad (30)$$

Los parámetros del modelo, que representan las resistividades reales, son representados por el vector:

$$m = (m_1, m_2, \dots, m_n) \quad (31)$$

Donde n es el número de parámetros del modelo.

De modo que $(d_{\text{obs}} - g(m))$ es la diferencia entre los datos de resistividad aparente medidos y los datos calculados a partir del modelo propuesto.

Existen diversos métodos para disminuir la diferencia entre ambos vectores, entre estos métodos se encuentra la *inversión de mínimos cuadrados amortiguados* que tiene por objetivo reducir el desajuste entre los datos ponderados:

$$S(m) = (d_{\text{obs}} - g(m))^T W_d (d_{\text{obs}} - g(m)) \quad (32)$$

donde W_d es una matriz de datos ponderados, contiene la diferencia entre los algoritmos de los valores medidos y calculados de la resistividad aparente.

El problema inverso no lineal se resuelve iterativamente. En cada iteración un vector actualizado del modelo Δm es obtenido para resolver el siguiente sistema de ecuaciones linealizado:

$$(J^T W_d J + \lambda I) \Delta m = J^T W_d \cdot (d_{\text{obs}} - g(m)) \quad (33)$$

donde $J = \frac{\partial g(m)}{\partial m}$ es la matriz Jacobiana de las derivadas parciales. λ es el factor de amortiguamiento cuyo efecto es garantizar que la inversión resuelva características principales en las primeras iteraciones, limita el rango de valores que pueden tomar las componentes del vector del parámetro. I es la matriz identidad.

El modelo de inversión suavizado es otro método utilizado en la inversión de datos. Encuentra el modelo más suave posible cuya respuesta ajusta los datos a una estadística “a-priori” Chi-cuadrada. Este modelo se basa en la suposición de la distribución Gaussiana de los errores de datos. La función objetivo del modelo de inversión suave está dada por:

$$S(m) = (d_{\text{obs}} - g(m))^T W_d (d_{\text{obs}} - g(m)) + \alpha \cdot m^T R m \quad (34)$$

donde α es un multiplicador de Lagrange y un factor estabilizador. Este factor determina la rugosidad del modelo impuesto durante la inversión. R es un operador de rugosidad.

El uso de este método de inversión es aceptable cuando la distribución de los datos de resistividad real del subsuelo varía de manera suave o gradual, no ruidosos, de lo contrario, si no se satisface este requisito, conviene usar el método de inversión robusto (AGI, 2009).

Tanto la inversión de mínimos cuadrados y la inversión del modelo suave se basan en un criterio de la norma L2. Por otro lado la Inversión robusta se basa en la suposición de la distribución exponencial de los datos erróneos y la reducción al mínimo de una norma L1 de la combinación de los datos desajustados y el modelo funcional estabilizado.

Los problemas geofísicos son indeterminados por la falta intrínseca de datos y los errores en los datos, así como en el modelo (Tarantola, 2005). Es por esto que el problema inverso no tiene una solución única, puede haber más de una solución que satisfaga el problema planteado.

2.3.3. Criterios de convergencia

El proceso de inversión cuenta con un conjunto de criterios de convergencia para determinar una solución óptima, entre estos criterios se destacan el número de iteraciones, el error cuadrático y la norma L2.

Para detener un proceso de inversión se establece un número máximo de iteraciones. Para estudios de resistividad en superficie, la inversión generalmente converge en las primeras 5 o 6 iteraciones, aunque en datos de TRE a menudo se necesita más de 10 iteraciones para converger. Si la inversión diverge, se detendrá después del número máximo prescrito de iteraciones.

El objetivo principal de la inversión es reducir el desajuste entre los datos medidos de campo y los datos calculados de un modelo reconstruido para encontrar un modelo de resistividad cuya respuesta (datos de predicción) se ajusta mejor a los datos medidos. La bondad de ajuste se puede caracterizar por la raíz del error cuadrático medio (RMS) en tanto por ciento (%):

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i^{\text{pred}} - d_i^{\text{med}}}{d_i^{\text{med}}} \right)^2}{N}} \times 100\% \quad (35)$$

donde N es el número total de mediciones, d_i^{pred} son los datos predichos y d_i^{med} son los datos medidos.

El error RMS depende del número de datos erróneos y cada cuanto se presentan entre sí. El RMS no indica el porcentaje de datos malos, ya que un solo dato erróneo puede producir un error muy grande. Se espera que el valor del error RMS se reduzca de iteración en iteración. Cuando el valor del error RMS sea muy pequeño o aumente, la inversión debe ser terminada, se recomienda cuando la reducción del error sea menor que 10%, aunque depende del caso. Se puede generar un RMS grande debido a de factores como datos ruidosos, y error en el modelado numérico, entre otros.

En cuanto a la norma L2, es otra medida de los datos desajustados. Se define como la suma de los cuadrados de los errores de los datos ponderados. Esta norma depende de la estimación de los pesos de los datos erróneos:

$$\text{Norm} - \text{L2} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i^{\text{cal}} - d_i^{\text{med}}}{W_i} \right)^2 \quad (36)$$

N es el número de mediciones, d_i^{cal} son los datos calculados, d_i^{med} los datos medidos y W_i es la ponderación de los datos (AGI, 2009).

2.4. Fundamentos de Resistividad Capacitiva

El énfasis de la técnica se encuentra en la naturaleza capacitiva del mecanismo de acoplamiento entre los sensores y el suelo, en contraste con otras técnicas de resistividad que se basan en el acoplamiento galvánico o acoplamiento inductivo. Desde un punto de vista fundamental, ambas técnicas comparten el mismo modelo de circuito eléctrico genérico equivalente (figura 2.9).

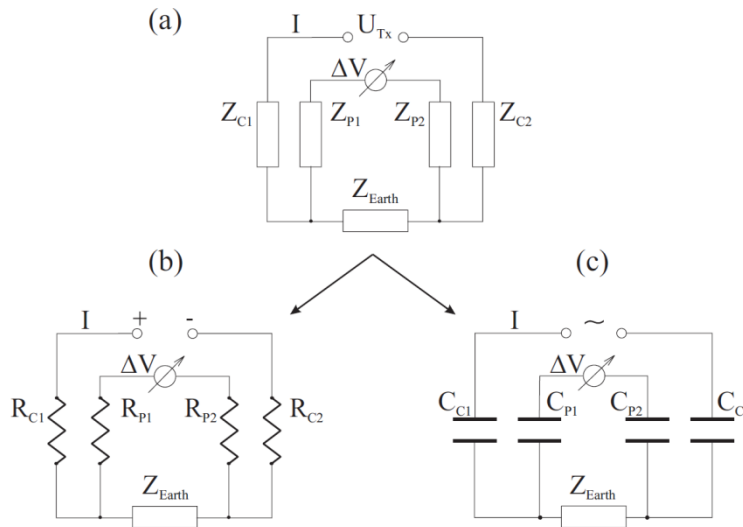


Figura 2.9. Modelos equivalentes de circuitos eléctricos de (a) una medida de resistividad genérica, b) la resistividad CC y (c) la resistividad capacitiva. El modelo genérico (Wait, 1995) muestra la impedancia de la tierra Z_{Earth} y las impedancias de contacto Z_{C1} , Z_{C2} (inyección de corriente) y Z_{P1} , Z_{P2} (medición de potencial). Las impedancias de contacto son predominantemente óhmica en Resistividad CC y predominantemente capacitiva en RC.

Los objetivos de la técnica son emular la medición de corriente continua de tal manera que las técnicas de resistividad puedan emplearse con resistividad capacitiva y asegurar que las resistividades aparentes adquiridas de esta manera cumplan con los esquemas de interpretación establecidos en corriente continua.

El uso de la técnica de Resistividad Capacitiva se deriva de las investigaciones realizadas en la década de 1950 para el departamento de defensa de Estados Unidos, donde el propósito era detectar grietas ocultas en Groenlandia y la Antártida (Cook, 1956; Kuras, 2005). En la década de 1970, el trabajo pionero fue llevado a cabo en la Unión Soviética por Timofeev (1973; 1974; 1978). La aplicación requirió del acoplamiento capacitivo para facilitar las mediciones de resistividad del suelo congelado para la elaboración de mapas sobre el permafrost. A partir de la década de 1990, se incluyó una variedad de información empírica, técnica y teórica que se ha incorporado en los diseños actuales,

por ejemplo, el sistemas de medición en superficie que incluyen el cuadrupolo electrostático descrito por Grard y Tabbagh (1991), Tabbagh et al. (1993) y Panissod et al. (1998).

2.4.1. El cuadrupolo electrostático

El cuadrupolo electrostático es un arreglo geométrico de cuatro puntos (cuatro polos formando dos dipolos) que representa a los electrodos, utilizado en la técnica de resistividad capacitiva para explicar la aproximación de la carga de corriente de los puntos cerca de una interfaz.

Las cargas puntuales electrostáticas cercanas a una interfaz plana entre dos semiespacios homogéneos e isotrópicos, representan eléctricamente diferentes medios.

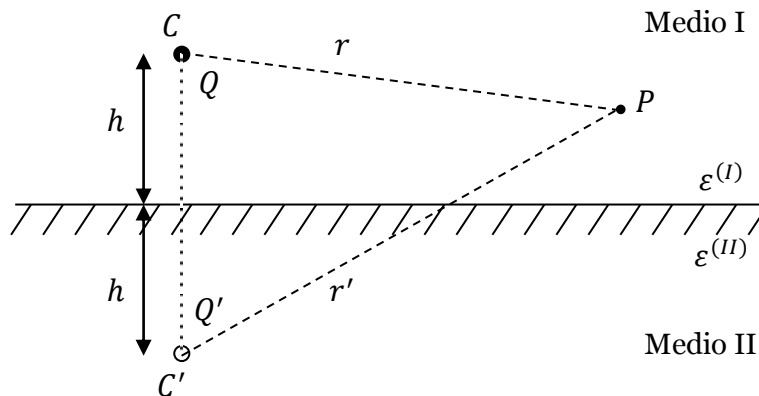


Figura 2.10. Representación de una carga electrostática Q sobre la interface entre dos medios con permitividades dieléctricas $\epsilon^{(I)}$ y $\epsilon^{(II)}$. Q' es la imagen de la carga localizada en el medio II. (Kuras, et al. 2005).

Una carga situada en las proximidades de una interfaz va a crear un potencial electrostático en sus alrededores, dicha carga está en función de las propiedades dieléctricas de ambos medios y puede calcularse por un potencial en un punto P :

$$V(P) = \frac{Q}{4\pi\epsilon^I} \left(\frac{1}{r} - \alpha \frac{1}{r'} \right) \quad (37)$$

donde r corresponde a la distancia \overline{CP} y r' a la distancia $\overline{C'P}$.

La ecuación (37) contiene una contribución adicional debido a la carga imagen $Q' = -Q$. El factor real α , que comprende las permitividades dieléctricas de los dos medios, se define como:

$$\alpha = \frac{\epsilon^{(II)} - \epsilon^{(I)}}{\epsilon^{(II)} + \epsilon^{(I)}} \quad (38)$$

En el caso de una interfaz de aire-tierra, las permitividades se dan para $\epsilon^{(I)} = \epsilon_0$ y $\epsilon^{(II)} = \epsilon_0 \epsilon_r$, por lo tanto para las cargas estáticas, el factor α está determinado por la permitividad relativa (constante dieléctrica) del subsuelo:

$$\alpha = \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \quad (39)$$

Esta ecuación es introducida al concepto del cuadripolo electrostático, donde dos polos cargados C_1 y C_2 llevan cargas $+Q$ y $-Q$, respectivamente, que actúan como una fuente de corriente, mientras que la diferencia de potencial $\Delta V = V_1 - V_2$ se mide entre los dos polos P_1 y P_2 :

$$\Delta V = \frac{Q}{C_0} (1 - K^{ES} \alpha) \quad (40)$$

Donde el factor geométrico electrostático K^{ES} contiene las distancias entre todos los polos, incluyendo los polos virtuales que llevan cargas imagen. El factor está definido por:

$$K^{ES} = \frac{\frac{1}{r'_{11}} + \frac{1}{r'_{22}} - \frac{1}{r'_{12}} - \frac{1}{r'_{21}}}{\frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{22}} - \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{21}}} \quad (41)$$

C_0 se considera una capacitancia mutua de la configuración en el espacio libre:

$$C_0 = \frac{4\pi\epsilon_0}{\frac{1}{r_{11}} + \frac{1}{r_{22}} - \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{21}}} \quad (42)$$

Las ecuaciones anteriores están basadas en la electrostática, por lo tanto sólo son validas para las cargas que son constantes en el tiempo. Con la inserción de una carga arbitraria en el tiempo en la ecuación (40) la expresión de la diferencia de potencial en función del tiempo queda expresado como:

$$\Delta V(t) = \frac{I(t)}{i\omega C_0} (1 - K^{ES} \alpha) \quad (43)$$

ω es la frecuencia angular.

Por lo tanto las permitividades dieléctricas se consideran cantidades complejas.

La forma general de la permitividad compleja contiene la resistividad en su componente imaginario y la permitividad relativa en su componente real:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r - i \frac{1}{\rho \omega} \quad (44)$$

En consecuencia, el factor α de la ecuación (39) es ahora también un número complejo:

$$\alpha = \frac{\rho \omega \varepsilon_0 (\varepsilon_r - 1) - i}{\rho \omega \varepsilon_0 (\varepsilon_r + 1) - i} \quad (45)$$

Esta ecuación cumple con las propiedades eléctricas de los dos medios junto con la frecuencia de operación; es representativa del comportamiento eléctrico del arreglo.

2.4.2. La impedancia de transferencia

Así como la resistencia es definida en la teoría de resistividad de corriente continua (ecuación 23), en la teoría de la resistividad capacitiva se define análogamente la impedancia de transferencia (Z) como la razón entre el dipolo de potencial y el dipolo de corriente, el cual se considera como una característica de la función de respuesta del cuadrupolo:

$$Z = \frac{\Delta V}{I} \quad (46)$$

identificando como la impedancia de transferencia (Z_0) del cuadrupolo en el espacio libre (donde $\alpha=0$):

$$Z_0 = \frac{1}{i\omega C_0} \quad (47)$$

sustituyendo esta ecuación y la ecuación (43) en la ecuación (46), da como resultado la relación de la impedancia de transferencia compleja:

$$Z = Z_0 (1 - K^{ES} \alpha) \quad (48)$$

La desviación del valor Z_0 del espacio libre está dada por el producto del factor geométrico K^{ES} y el factor complejo α que representa las propiedades eléctricas de la subsuelo.

2.4.3. El régimen cuasi-estático

En el marco electrodinámico de las ecuaciones de Maxwell, la corriente $I(t)$ se asocia a un campo electromagnético oscilante y a las corrientes secundarias inducidas, estableciendo las condiciones necesarias para tales efectos electromagnéticos, de modo que los cuadripolos de corriente alterna podrían ser omitidos.

Grard y Tabbagh (1991) sostienen que la aplicación de la aproximación cuasi-estática y la ecuación (43) siguen siendo válidas si las longitudes de onda λ (I) y λ (II) de una onda electromagnética de frecuencia angular ω , en los medios de permitividades ϵ (I) y ϵ (II) son mucho mayores que las distancias características r y r' en el medio respectivo. La llamada aproximación casi-estática es el régimen electromagnético en el cual no se tiene en cuenta las corrientes de desplazamiento que dependen de ϵ (permitividad dieléctrica). Este régimen no es válido en todos los casos, pues si la resistividad es muy grande y la frecuencia aplicada alta, dicha aproximación deja de ser satisfactoria. En términos electromagnéticos, esto corresponde a la condición del régimen de bajo número de inducción, por lo cual las distancias características implicadas deben ser pequeñas en comparación con el skin depth electromagnético el cual podría definirse como δ , que representa la profundidad superficial de los conductores como el área efectiva por la que circula corriente en el conductor, que depende de la frecuencia, permeabilidad magnética y resistividad.

El número de inducción B (que es diferente del vector de inducción magnética B), es una manera de describir la naturaleza de la inducción Electromagnético (EM) como una función de la geometría y de las propiedades eléctricas. B se define como la relación entre la longitud de escala L y el δ :

$$B = \frac{L}{\delta} = L \sqrt{\frac{\omega \mu_0 \sigma}{2}} \quad (49)$$

La ecuación está sujeta a la condición propuesta por Benderitter et al. (1994) (citado por Kuras), donde:

$$B^2 \ll 1 \quad (50)$$

Si no se cumple esta condición las ecuaciones (43) y (48) ya no son válidas como aproximación cuasi-estática y los efectos inductivos se vuelven significativos. La

característica de longitud de escala L se toma de una separación r del transmisor al receptor. Entonces la ecuación (50) proporciona un límite superior de frecuencia para el funcionamiento cuasi-estático:

$$f < f_U = \frac{\rho}{\pi\mu_0 r^2} \quad (51)$$

La frecuencia limitada f_U disminuye con la separación como $1/r^2$ y es proporcional a la resistividad, en otras palabras, la condición puede cumplirse ya sea con separaciones más grandes en los ambientes más resistivos o separaciones cortas en ambientes más conductores. Por ejemplo, si suponemos que $r < 10$ m para aplicaciones cercanas a la superficie y un límite de resistividad baja de $10 \Omega \text{ m}$, se obtiene un límite superior de frecuencia de aproximadamente 25 kHz. La condición (50) se satisface al mismo tiempo que las condiciones de longitud de onda, definidas anteriormente. En el ejemplo anterior (25 kHz), la longitud de onda de espacio libre es aproximadamente 12,000 m, mientras que en un medio de $10 \Omega\text{m}$ la longitud de onda se reduce a 45 m.

En resumen, la frecuencia de operación es el parámetro fundamental que determina si los efectos inductivos son importantes o se pueden despreciar. Esta condición es restrictiva en términos de un límite de altas frecuencias. Por otro lado, la frecuencia también es importante para el mecanismo de acoplamiento capacitivo puesto que el transmisor requiere de una frecuencia para inyectar una corriente eléctrica a través de un dipolo que representa una carga predominantemente capacitiva.

2.4.4. Sensor capacitivo

En la práctica, la corriente de salida del transmisor está en función de una variedad de factores externos, incluyendo el diseño del sensor.

Un simple modelo de circuito eléctrico se puede utilizar para estimar la corriente en el circuito de salida del transmisor para una frecuencia dada. El circuito transmisor puede ser modelado como la resistencia de la tierra en serie con la capacitancia de los sensores, impulsado por la fuerza electromotriz del generador (figura, 2.9)

La carga es representada por la impedancia compleja:

$$Z(\omega) = X_C + R = \frac{1}{i\omega C} + R \quad (52)$$

donde X_C es la componente reactiva de la impedancia y C la capacitancia efectiva del sensor. R comprende principalmente la resistencia óhmica de tierra. Esta resistencia está en contraste con la resistencia de transferencia medida en la resistividad de corriente continua, que se calcula a partir de la corriente inyectada y el voltaje medido en el receptor. En este caso, el voltaje U_{Tx} generado por el transmisor es relevante. Su aplicación resultará en los términos del flujo de corriente I :

$$I = \frac{U_{Tx}}{z(\omega)} \quad (53)$$

Un fin práctico, tanto en la resistividad de corriente continua como en la resistividad capacitiva, es crear altos momentos dipolares eléctricos en el transmisor de modo que la señal observada en el receptor es detectada por encima del nivel para una separación dada del arreglo. Esto es particularmente importante para los arreglos de electrodos con factores geométricos de gran tamaño. De la experiencia con la resistividad de corriente continua, se requieren corrientes del orden de 10 mA y superiores para investigaciones poco profundas. Para conseguir esto, la carga compleja debe ser superada en la salida del transmisor. Por ejemplo, un transmisor alimentado por una batería con una potencia de salida de 10 W puede conducir una corriente de 10 mA en voltajes de 1000 V. Este transmisor sería capaz de superar la máxima impedancia de salida que sería del orden de $10^5 \Omega$, mientras se mantenga una corriente constante.

En la práctica, los valores para los sensores capacitivos son decisivos para una estimación significativa de la impedancia total. Shima et al. (1995) ha usado la aproximación de placas paralelas para estimar la capacitancia del sensor. Aunque esto puede ser suficiente para un cálculo aproximado, se requiere un análisis más detallado si la influencia de la geometría del sensor es de interés. La fórmula de placas paralelas está dada por:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (54)$$

donde A es el área de las placas y d su separación. El factor A/d será del orden de 10^2 m de modo que las capacitancias en el aire ($\epsilon_r = 1$) se esperan que sean del orden de $C \approx 1$ nF. Esto es seguro al asumir que la resistencia óhmica de la tierra (de unos pocos Ω) es despreciable con respecto a la reactancia del sensor, por consiguiente, la impedancia total se convierte en:

$$Z(\omega) \approx \frac{1}{i\omega C} \quad (55)$$

Para mantener la impedancia por debajo del umbral deseado, la frecuencia debe satisfacer:

$$f \geq f_L = \frac{1}{2\pi C U_{Tx}} \quad (56)$$

Para los valores anteriores, es decir, una capacitancia de 1 nF y un límite de impedancia $10^5 \Omega$, se obtiene un límite inferior de frecuencia $f_L = 1.6 \text{ kHz}$. Esto significa que la condición de la expresión (51) es restrictiva en cuanto a un límite de frecuencia más baja.

Este análisis muestra que las mediciones de resistividad capacitiva son dependientes de la capacitancia del sensor. La capacitancia del dipolo transmisor controla la inyección de corriente en el suelo. Una capacitancia mayor se asocia con una impedancia de salida inferior por lo que es posible generar corrientes más altas. Las mediciones del campo eléctrico se hacen por encima de la superficie del terreno mediante el dipolo receptor pasivo, debido al flujo de corriente generado por el transmisor. Para ambos tipos de dipolo, la capacitancia del sensor es una medida cuantitativa del grado de acoplamiento eléctrico con el terreno.

En la práctica, el modelo de placas paralelas es demasiado simplista para los sensores, ya que asume placas de área infinita. Una estimación más precisa de la capacitancia del sensor se puede obtener mediante el modelado de estructuras geométricas para la capacitancia, esta se determina por la forma geométrica del conductor, su perímetro y la distancia del conductor a la superficie. Por lo tanto la geometría del segmento de cable y de la placa delgada por encima del terreno es relevante. En este caso la capacitancia de una sola placa es más grande porque la "placa" opuesta del condensador ha sido sustituida por el terreno infinitamente amplio. Una antena puede ser considerada como un compuesto de segmentos de alambre de igual longitud, cada uno tiene una capacitancia distinta, por analogía con el condensador de placas paralelas, mayores capacitancias se observaran si el alambre está más cerca de la superficie.

En un modelo conceptual de una combinación de placa–alambre, la capacitancia total del sensor está dada por la suma individual de los componentes de la capacitancia del cable y la capacitancia de la placa, que actúan como condensadores en paralelo. El objetivo principal en el diseño de un sensor de placa-alambre es hacer que la capacitancia del cable sea despreciable respecto a la capacitancia de la placa. Esta condición es destinada a hacer que el sensor opere de manera "similar a un polo", de modo que el acoplamiento se centrará en un área pequeña y se podrá aplicar el formalismo electrostático. El objetivo se consigue simplemente mediante el uso de una

mínima elevación de la placa y asegurar que el cable esté lo suficientemente elevado por encima de la superficie del suelo.

Hay un rango de parámetros relacionados al comportamiento funcional de la impedancia de transferencia compleja en condiciones casi-estáticas que son implementados en un instrumento de resistividad capacitiva, que permite el funcionamiento práctico de esta técnica, estos son:

- Variación de la frecuencia. Kuras, et al, (2005) han demostrado que la gama de frecuencias de operación está limitada por una frecuencia límite superior (25 kHz) y una frecuencia límite inferior (1,6 kHz) asociada con la condición de bajos números de inducción, como resultado de la necesidad de inyectar corrientes eléctricas lo suficientemente altas a través del dipolo transmisor, donde incluso la impedancia de transferencia Z sigue siendo una función de la frecuencia. Sus resultados también demostraron que no hay una sola frecuencia "ideal" de operación en la resistividad capacitiva. Por lo que se acordaron valores lo suficientemente alejados de los dos límites de frecuencias f_L y f_U , esto es, una frecuencia fija de 15 kHz.
- Variación del arreglo geométrico. En cuanto a las dimensiones del arreglo, por analogía con el caso de corriente continua, la impedancia de transferencia de la resistividad capacitiva está en función de las dimensiones del arreglo. La condición limitante para la elección del tipo de arreglo geométrico está en la influencia de los cables de conexión en la capacitancia del sensor. El arreglo más apropiado para su uso con sensores capacitivos es el arreglo Dipolo-dipolo, este permite que las líneas de alimentación tengan una longitud mínima.

La elevación del arreglo de sensores por encima de la superficie del suelo también tiene influencia sobre la impedancia de transferencia. El tamaño de este efecto es importante para el diseño de instrumentos prácticos. Kuras, et al, (2005), considera un rango de elevaciones entre 10^{-4} y 10^{-1} m. La impedancia de transferencia no es sensible a la resistividad en el espacio libre, por lo tanto, las elevaciones de gran tamaño deben ser evitadas, porque un aumento en la elevación del sensor está asociado con el aumento en la impedancia en el circuito de salida del transmisor. En pequeñas elevaciones el voltaje observado está en fase, de acuerdo con el caso de corriente continua.

- Variación con propiedades eléctricas. Las propiedades eléctricas resistividad y permitividad relativa, son las únicas variables prácticas en una medición de resistividad capacitiva y cualquier variación en la impedancia de transferencia se

puede atribuir a una variación en dichas propiedades eléctricas. para bajas resistividades y pequeñas separaciones del dipolo (<1m) el efecto de la componente en cuadratura es significativo. Con la disminución de la separación del dipolo, este efecto se produce en resistividades muy altas. Para altas resistividades y grandes separaciones, el ángulo de fase es cercano a cero, es decir, el potencial observado está en fase con la corriente inyectada. Sin embargo para resistividades bajas, se producen los cambios de fase y la respuesta con el tiempo se mueve en cuadratura.

La sensibilidad de la técnica de resistividad capacitiva con respecto a la permitividad relativa (constante dieléctrica) es sólo marginal en las frecuencias de audio 20 Hz-20KHz. Una variación medible de la impedancia de transferencia de la resistividad capacitiva con ϵ_r a frecuencias de audio, puede ser obtenida en entornos altamente resistivos (Kuras, et al., 2005)

2.4.5. Estimación de la Resistividad aparente

Kuras, et al, (2005) señala que el formalismo electrostático predice la respuesta de la resistividad capacitiva en función de la impedancia de transferencia, basado en un modelo eléctrico del subsuelo y de los parámetros geométricos de la medición. La resistividad aparente se obtiene a partir de la medición de la impedancia de transferencia y puede estimarse a partir de la magnitud y la fase de la impedancia. Para determinar la ecuación de la resistividad aparente, la expresión compleja de la ecuación (45) se divide en sus componentes real e imaginaria. Resolviendo tales expresiones para ϵ_r y ρ , se obtiene la interdependencia y la relación de la resistividad en función de α , entonces:

$$\rho = -\frac{1}{2\omega\epsilon_0} \left(\frac{(1 - \text{Re } \alpha)^2}{\text{Im } \alpha} + \text{Im } \alpha \right) \quad (57)$$

$$\epsilon_r = \frac{2 |1 - \text{Re } \alpha|}{(1 - \text{Re } \alpha)^2 + (\text{Im } \alpha)^2} - 1 \quad (58)$$

Esto demuestra que la formulación de la impedancia de transferencia compleja contiene información independiente sobre ϵ_r y ρ . Sin embargo, la determinación de ϵ_r con la técnica de resistividad capacitiva puede ser posible a frecuencias más altas y en entornos geológicos altamente resistivos (Tabbagh et al., 1993).

La impedancia de transferencia Z se puede expresar mediante una corriente $I(t) = \hat{I}e^{i\omega t}$ inyectada a través del dipolo de corriente (C1-C2) y el voltaje $U(t) = \hat{U}e^{i\omega t}e^{i\varphi}$ observado en el dipolo de potencial (P1-P2), donde φ representa el desplazamiento de fase entre las dos señales:

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{\hat{U}e^{i\varphi}}{\hat{I}} = \frac{\hat{U}(\cos\varphi + i\text{sen}\varphi)}{\hat{I}} = \hat{Z}(\cos\varphi + i\text{sen}\varphi) \quad (59)$$

Ordenando los términos de la ecuación (48) para establecer la función α en términos de la impedancia de transferencia:

$$\alpha = \frac{1}{K^{ES}} \left(1 - \frac{Z}{Z_0} \right) \quad (60)$$

y sustituyendo las ecuaciones (47) y (59), entonces α queda definida como:

$$\alpha = \frac{1}{K^{ES}} \left(1 - i\omega C_0 \hat{Z}(\cos\varphi + i\text{sen}\varphi) \right) \quad (61)$$

Finalmente la resistividad aparente estará dada por la ecuación:

$$\rho_a = -\frac{1}{2\omega\epsilon_0} \left(\frac{(1 - \text{Re } \alpha)^2}{\text{Im } \alpha} + \text{Im } \alpha \right) \quad (62)$$

donde

$$\begin{aligned} \text{Re } \alpha &= \frac{1}{K^{ES}} (1 + \omega C_0 \hat{Z} \text{sen}\varphi) = \frac{1}{K^{ES}} (1 + \omega C_0 \text{Im}Z) \\ \text{Im } \alpha &= -\frac{1}{K^{ES}} (\omega C_0 \hat{Z} \cos\varphi) = -\frac{1}{K^{ES}} (\omega C_0 \text{Re}Z) \end{aligned}$$

Estas tres ecuaciones representan la expresión para la resistividad aparente, resultado de una medición capacitiva bajo condiciones cuasi-estáticas. La $\rho_a = \rho_a(\hat{Z}, \varphi)$ está ahora en función de la magnitud de la impedancia de transferencia medida y la fase.

Bajo ciertas condiciones la expresión de la resistividad aparente se reduce a:

$$\rho_a \approx -\frac{\text{Im } \alpha}{2\omega\epsilon_0} \approx \frac{C_0}{2\epsilon_0} \text{Re}Z \quad (63)$$

Esto indica que la respuesta de la resistividad capacitiva está en fase y la componente en cuadratura con Z se desvanece si el cuadrupolo se encuentra cerca de la superficie (en este caso $K^{\text{ES}} \approx 1$ y con un bajo número de inducción $\text{Re } \alpha \approx 1$) y junto con la definición C_0 de la ecuación (42) se reduce a la clásica expresión de la resistividad de corriente continua:

$$\rho_a \approx \frac{\text{Re}U}{\hat{I}} \cdot K^{\text{cc}} \quad (64)$$

Los instrumentos de resistividad capacitiva operan bajo la suposición de que el potencial observado está completamente en fase con la corriente inyectada, por lo que es suficiente para medir su magnitud. Sin embargo, haciendo caso omiso de la sensibilidad de la fase del potencial sólo se justifica si la condición cuasi-estática se mantiene sobre todos los puntos de medición, es decir, si los efectos inductivos son, o pueden ser, insignificantes a determinada frecuencia, y la disposición geométrica de los sensores sea tal que el dipolo de potencial esté, ni demasiado cerca ni demasiado distante del dipolo de corriente.

La dependencia de la fase de una medición de resistividad capacitiva es debida principalmente al mecanismo de acoplamiento capacitivo y la geometría del arreglo de los sensores, esta no está directamente asociada a las propiedades del material del subsuelo.

METODOLOGÍA

El trabajo de campo dependió principalmente del objetivo: estudiar las características resistivas del subsuelo mediante el análisis de imágenes de resistividad 2D para indicar las zonas de mayor concentración y filtración del contaminante, asociado a la respuesta del contraste de resistividades, y para estimar la profundidad y geometría de la pluma contaminante dentro de las instalaciones de una planta refinadora de cobre.

Para llevar a cabo dicho objetivo se consideraron condiciones específicas en los levantamientos que se evaluaron durante una visita preliminar. Con base en esta evaluación se decidió implementar los métodos de TRE capacitiva y galvánica con el fin de combinar la resolución de rasgos y penetración. Se aportó información somera que alcanzó 4m de profundidad e información más profunda de 24 m, respectivamente. Los resistivímetros Ohm-Mapper de Geometrics y Syscal-Pro Switch de 48 canales fueron utilizados para medir la respuesta resistiva del subsuelo.

Se realizaron pruebas preliminares para definir el diseño y desarrollo del trabajo con las diferentes modalidades. Las pruebas aportaron información respecto a la profundidad alcanzada y se probó la respuesta de los resistivímetros en el suelo altamente conductor debido al contenido de cobre diseminado. Para que la corriente penetrara se necesitó una configuración geométrica adecuada (dipolo-dipolo) y una corriente entre los 1.5 y 2.5 Amperes (en el caso del syscal) para romper el efecto capacitivo de las capas más superficiales.

Previo a las inversiones se realizó un proceso diferente para cada modalidad, que consistió en la exportación de los datos y la creación de archivos de formatos .dat y .urf. Finalmente los datos se trabajaron con el programa de inversión EarthImager 2D (Advanced Geosciences, Inc., 2008). Se usó el método de inversión suavizado con el fin de estimar las resistividades del subsuelo. Mediante la integración de los resultados se caracterizaron y localizaron las zonas potencialmente contaminadas, utilizando los perfiles de resistividad 2D.



Figura 3.1. Capas del concreto armado hasta el suelo natural y esquema de las capas con sus respectivos espesores.

Durante la evaluación previa se observaron ciertos percances, por lo tanto fue necesario realizar algunos ajustes antes de continuar con la adquisición de datos. Se encontró con el problema de alta conductividad en la capa más superficial, debido a los residuos de sulfato de cobre diseminado en el piso de concreto. Una alta conductividad permite poca penetración de la corriente en niveles más profundos. Otro percance fue la loza de concreto armado, se encontró que además del suelo actual existían más capas de suelos de concreto antiguos. Fue solucionado con zanjas de aproximadamente 1.1 m de profundidad para obtener las características de las resistividades propias del suelo natural (figura 3.3).

3.1. Adquisición de datos

En la figura 3.2 se muestra un croquis con la distribución espacial del área de estudio. Las casas 1 y 2 son de mayor interés ya que en estas zonas se llevaba a cabo el proceso de refinación de cobre. El pasillo entre la casa 4 y 6 y las calles laterales ubicadas en Norte 55 y Poniente 44 se consideran en el estudio para observar los límites que tiene el contaminante.

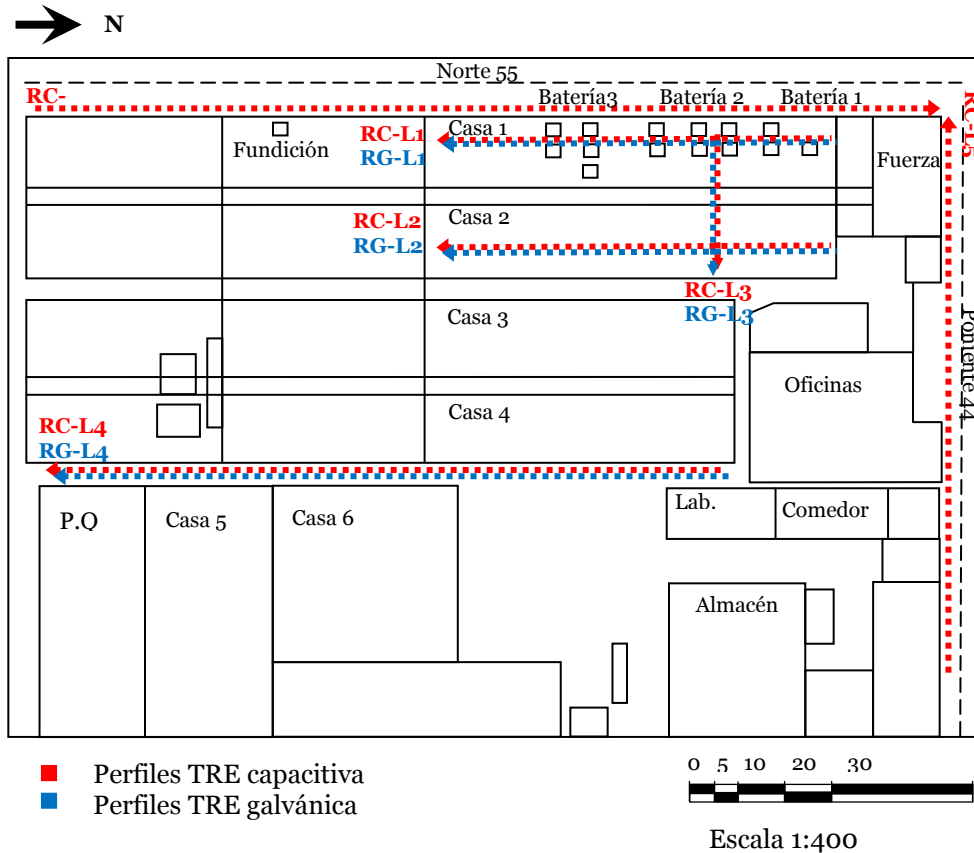


Figura 3.2 Croquis de distribución de los perfiles de Tomografía de Resistividad Eléctrica.

En el caso del método capacitivo, el levantamiento se comenzó estableciendo la localización y dirección de cada línea de estudio. Como se muestra en la figura 3.2, las líneas RC-L1 y RC-L2 que se ubicaron en el interior de la nave y RC-L4 fueron orientados de Norte-Sur, el perfil RC-L3 de Oeste-Este y los perfiles RC-L5 y RC-L6, ubicados en el exterior, fueron orientados en dirección Este-Oeste y de Sur-Norte respectivamente. Dando como resultado un total de seis perfiles para la TRE capacitiva con una configuración geométrica similar al dipolo-dipolo.

El levantamiento se realizó mediante el uso del resistivímetro Ohm-Mapper de Geometrics. El arreglo consistió de un dipolo transmisor Tx, 5 dipolos receptores Rx y una consola donde se registran las lecturas.

Tanto el transmisor como los receptores son dispositivos que contienen 2 baterías de 6.12 V. Están cubiertos por un protector de plástico duro de PVC para evitar que se dañen. El transmisor envía una corriente alterna mínima de 0.125 mA a una máxima de 16mA con una frecuencia de 16.5 kHz. Los receptores se encargan de medir la diferencia de potencial en los electrodos.

La consola tiene una pantalla LCD para mostrar posición de los perfiles y datos. Cuenta con un teclado para ingresar los parámetros de la configuración del sistema y permite almacenar los datos de medición.

Otros elementos importantes del equipo son los cables de 2.5m y 5m de longitud con conectores en los extremos para unir el transmisor a los receptores y de receptor a receptor. El cable coaxial es una línea de transmisión que permite la propagación de una señal eléctrica. Está constituido por un conductor interno para transmitir la señal, un dieléctrico como aislante, una cinta (acoplado o triplex) para asegurar una cobertura total y garantizar la protección de la señal (del campo magnético externo) que pasa a través del cable, una trenza que es un conductor externo que influye en la impedancia de transferencia y una cubierta protectora.

Los receptores se ensamblan por medio de cables de 2.5m de longitud. Para el primer receptor que se une al transmisor se usaron dos cables de 2.5m y una cuerda de 1.25m para su separación, su longitud se determinó mediante las pruebas preliminares. En la práctica la longitud de la cuerda puede variar entre 1.25, 2.0 y 2.5m. Una vez acoplados los seis sensores, el último receptor de este arreglo se conecta a la consola. Este arreglo alcanzó una longitud total de 26.25m como se muestra en la figura 3.4.

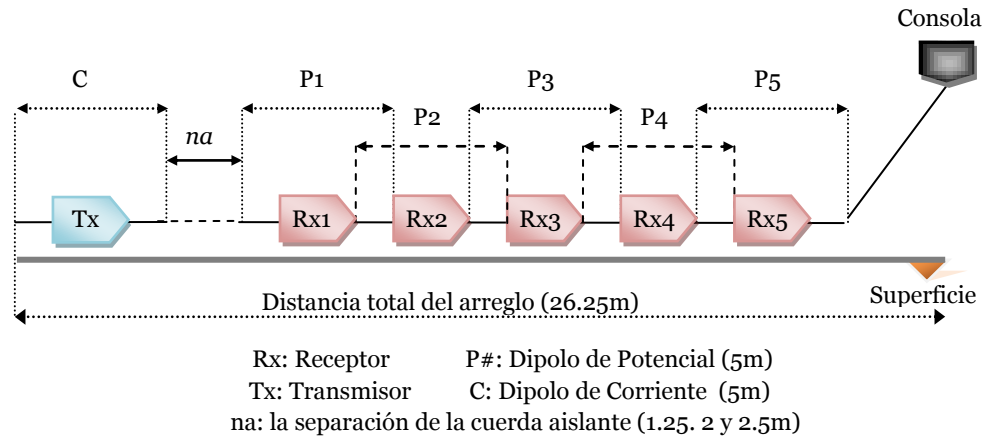


Figura 3.3. Diseño básico del arreglo utilizado para los perfiles de resistividad capacitiva con Ohm-Mapper (TR1). La distancia na de la figura puede modificarse para profundizar la señal.

Para la adquisición de los datos definitivos se colocó el arreglo capacitivo en el suelo libre de concreto (zanja), cuidando que los sensores estuviesen correctamente conectados.

Al encender el sistema, los leds de todos los sensores deben prender para asegurar que se está obteniendo respuesta del equipo y la adecuada comunicación entre el transmisor y los receptores (Figura 3.5).



Figura 3.4. Arreglo capacitivo colocado en la zanja del perfil 1.

Para obtener una buena calidad en los datos fue necesario cuidar el contacto entre el arreglo capacitivo y el suelo, esto se logra al asegurarse que cada dispositivo, ya sea receptor o transmisor, esté totalmente pegado al suelo, de otra manera el dispositivo quedaría en el aire trayendo como consecuencia datos de mala calidad (ruido).

Durante la adquisición se tomaron en cuenta otras medidas para asegurar la calidad de los datos. Los cables no debían de enrollarse, se evitaron obstáculos que no permitieran el buen contacto entre el electrodo capacitivo y el suelo, la zona donde pasó el arreglo capacitivo debía estar en línea recta y asegurarse que no existiera material conductor cerca de la toma de datos.

Asegurado este contacto, el operador inyecta la corriente alterna a la frecuencia de 16.5 kHz para obtener la primera medición de resistividad. En la siguiente toma de datos se repiten las mismas consideraciones, mientras tanto el operador debe caminar distancias constantes, aproximadamente la longitud de la cuerda que separa el primer receptor del transmisor (1.25m), hasta llegar al final de la línea de estudio. Este procedimiento se repitió para los 6 perfiles, sin embargo en las líneas RC-L4, RC-L5 y RC-L6 se tomaron las lecturas sobre el pavimento, en estos casos no fue necesario hacer las zanjas.

Para el método de la TRE galvánica, también se ubicaron cuatro perfiles en el interior de la planta. Los perfiles RG-L1, RG-L2 y RG-L4 se orientaron de Norte-Sur, mientras que el perfil RG-L3 de Oeste-Este (figura 3.1). Estos perfiles fueron planeados para una configuración geométrica dipolo-dipolo.

En la adquisición de datos se utilizó el resistivímetro marca IRIS, modelo Syscal-Pro Switch de 48 canales. Este equipo consistió de un resistivímetro eléctrico que combina un transmisor, un receptor y una unidad de conmutación en una sola cubierta. Se suministra con una batería de 12V. Esta unidad central es el cerebro de todo el dispositivo, encargada de ejecutar automáticamente la secuencia de medición y verificar el estado de las conexiones, así como el almacenamiento digital de las mediciones de campo.

La corriente de salida (de hasta 2.5 A) puede ser ajustado automáticamente para optimizar los valores del voltaje de entrada. El sistema también ofrece la posibilidad de inyectar la corriente con un voltaje especificado por el operador.

El valor de inyección constante del voltaje es otro parámetro a elegir en el rango de 12 V a 800 V, el tiempo de inyección a su vez puede seleccionarse en el rango de 250 ms a 8 s, ambos parámetros son de gran importancia. El tiempo de medición en campo depende mucho del número de ciclos a medir y del tiempo de inyección. Los valores seleccionados se almacenan en la memoria interna.

Además de la consola, los electrodos de cobre y los cables inteligentes (con 12 conectores y conexiones cada 5m de intervalo), así como la batería que es la fuente de alimentación de todo el sistema, son indispensables para armar el equipo de medición.

Previamente a la adquisición de los datos, con el programa Electre-Pro (IRIS Instruments, 2007) se eligió el tipo de arreglo, el número y espaciamiento de electrodos, así como el factor de calidad. La secuencia de medición se programó de acuerdo a la longitud del tendido y a la posición en el que fue colocado el resistímetro. Al especificar estas variables en la programación de secuencias, también se definieron todas las posibles combinaciones en la que los dipolos podían desplazarse de acuerdo al arreglo a ejecutar, la distancia de este desplazamiento y la función que el electrodo debía tomar, ya sea de corriente o de potencial. Estas variables fueron cargadas a la unidad (Syscal Switch Pro).

Posteriormente se procedió a medir la separación entre electrodos, perforar el suelo e insertar y conectar los electrodos a cada 5m en línea recta, con excepción del perfil RG-L3 que fue a cada 2m. Los electrodos se clavaron cuidando que no estuvieran sobre material que impidiera la buena conducción de la corriente al subsuelo ni que quedaran flojos. Se procuró colocar en la parte central del tendido la consola Syscal Switch Pro.

Generalmente para obtener una buena calidad en los datos es necesario asegurar una buena conductividad entre el electrodo y el suelo. Cada electrodo puede ser bañado con agua salada o sulfato de cobre, usados como electrolito, esto con el fin de evitar la polarización de los electrodos y poder disminuir la resistencia de contacto. En este caso no fue necesario puesto que el suelo se encontraba cubierto de cobre diseminado.

Se midió la resistencia de contacto de los electrodos, esperando una respuesta menor a 2 k Ω (Manual AGI, 2009). De no ser así, se revisa el electrodo que presenta un valor mayor a 2 k Ω , se localiza el electrodo y se procede a clavarlos más o a agregarles un electrolito y en el caso de no tener buena respuesta, se opta por cambiar de posición al electrodo. Una vez comprobada la resistencia de contacto se procedió con la toma de lecturas, inyectando una corriente 2A, parámetro establecido por algunas pruebas preliminares. Este procedimiento se repitió para cada línea de estudio.



Figura 3.5. Adquisición de datos de TRE capacitiva.

3.2. Procesamiento de datos de resistividad

Para procesar los datos obtenidos por el método de TRE capacitiva se debe pasar la información a un lenguaje de cómputo para poder trabajar con ellos de manera relativamente sencilla. Esto se logró utilizando un programa de fácil acceso, el programa Magmap2000 de Geometrics INC.

En la figura 3.6 se muestra un diagrama de flujo que ejemplifica la importación de los datos binarios (adquiridos en campo) al programa. Los datos almacenados en la consola se pueden pasar a un equipo de cómputo en los formatos BIN y STN (ASCII) y exportar con extensión DAT.

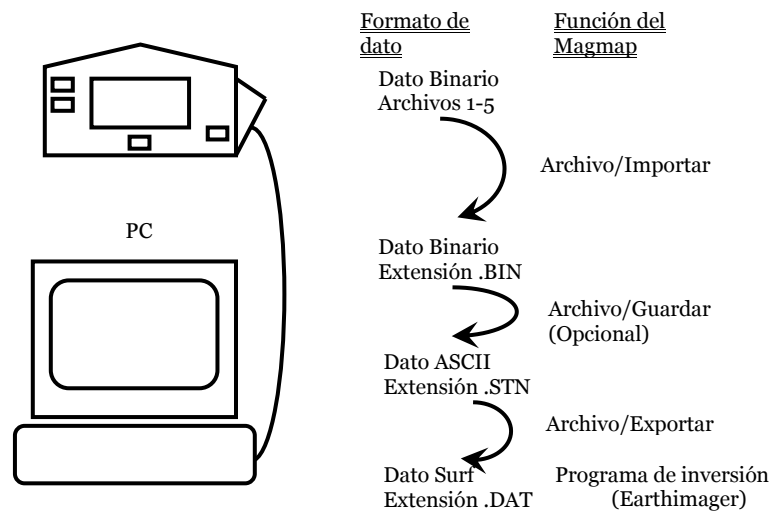


Figura 3.6. Flujo de Datos para el programa Magmap2000 de Geometrics INC.

Los datos guardados en la consola son transmitidos y almacenados en un archivo binario con extensión BIN, este archivo se abre desde el programa Magmap2000 para poder visualizar los perfiles, también es posible filtrarlos.

Desde este programa podemos visualizar las lecturas de respuesta de los 5 sensores, cada uno representado por un color diferente. Con esto podemos visualizar el funcionamiento óptimo de los sensores (figura 3.7) y el comportamiento de los datos.

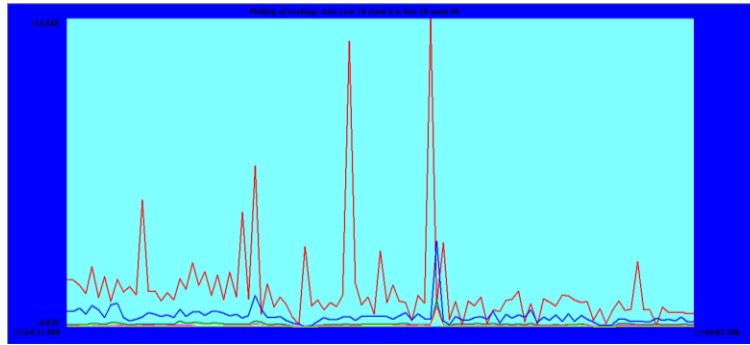


Figura 3.7. Gráficos de los sensores del perfil RC-L1 del programa Magmap200 de Geometrics INC. Rojo-sensor 1, azul-sensor 2, verde-sensor 3, rosa-sensor4 y amarillo-sensor 5.

Con este programa también se puede visualizar una pseudosección de resistividad aparente (Figura 3.8). Los datos de esta pseudosección se pueden exportar en un archivo con extensión DAT. El archivo generado está diseñado, en el caso de los datos de resistividad, para usarse en el programa de inversión Res2Inv. Sin embargo el programa EarthImager también trabaja con archivos con extensión DAT.

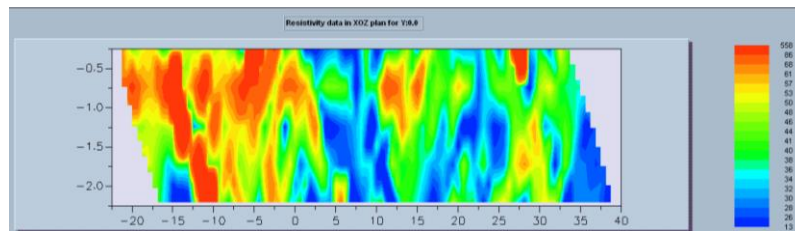
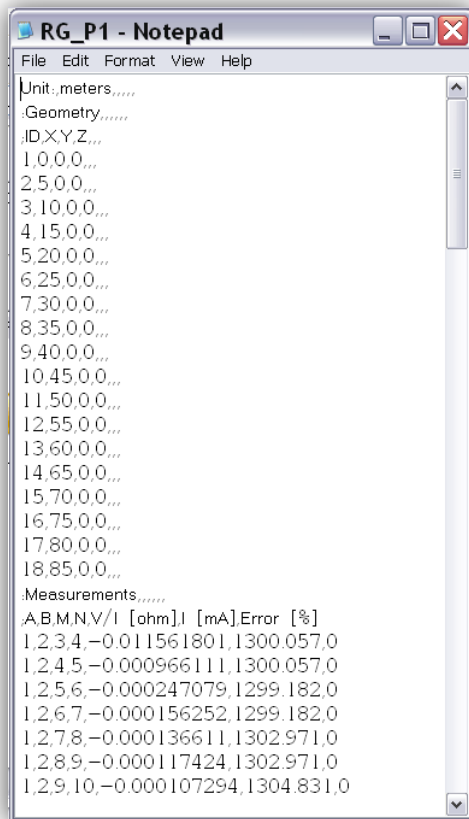


Figura 3.8. Pseudosección de resistividades del perfil RC-P1, Magmap2000 de Geometrics INC.

En el caso de las lecturas obtenidas por el resistímetro Syscal-Pro, los archivos .bin fueron descargadas con el programa Prosys II, que puede visualizar gráficamente los datos de resistividad y procesarlos (filtrar, insertar topografía, etc.). Los datos que se obtienen mediante el programa Prosys II son el tipo de arreglo, la cantidad de corriente inyectada, la desviación estándar, la resistividad aparente calculada, la diferencia de potencial medida y la posición de los electrodos en cada una de las mediciones.

Posteriormente los datos fueron exportados en un archivo txt, generado por el programa (también puede generar archivos que pueden ser interpretados por otros programas como RES2DINV, SENSINV2D, GEOSOFT O INTERPEX) de estos datos se seleccionaron los parámetros para formar un archivo URF (Universal Resistivity Files), necesario para generar el modelo directo y el modelo de inversión con el programa EarthImager2D (AGI, 2008).

El archivo URF se crea para poder utilizar los datos adquiridos de otros equipos como en el caso del Syscal Pro. Aun que también se puede trabajar con otros formatos de datos de entrada como el STG formato del equipo Sting, así como DAT obtenida de acuerdo al programa de inversión de Loke (1995).



```
RG_P1 - Notepad
File Edit Format View Help
Unit: meters,,,,,
.Geometry,,,,,
ID,X,Y,Z,,,
1,0,0,0,,,
2,5,0,0,,,
3,10,0,0,,,
4,15,0,0,,,
5,20,0,0,,,
6,25,0,0,,,
7,30,0,0,,,
8,35,0,0,,,
9,40,0,0,,,
10,45,0,0,,,
11,50,0,0,,,
12,55,0,0,,,
13,60,0,0,,,
14,65,0,0,,,
15,70,0,0,,,
16,75,0,0,,,
17,80,0,0,,,
18,85,0,0,,,
.Measurements,,,,,
A,B,M,N,V/I [ohm],I [mA],Error [%]
1,2,3,4,-0.011561801,1300.057,0
1,2,4,5,-0.000966111,1300.057,0
1,2,5,6,-0.000247079,1299.182,0
1,2,6,7,-0.000156252,1299.182,0
1,2,7,8,-0.000136611,1302.971,0
1,2,8,9,-0.000117424,1302.971,0
1,2,9,10,-0.000107294,1304.831,0
```

Figura 3.9. Ejemplo del perfil RG-P1.URF.
Formato obtenido del manual del EarthImager2D (AGI, 2008).

3.2.1. Parámetros de inversión

El programa EarthImager 2D utilizado para la inversión de los datos es una plataforma de Windows de 32 bits basada en un programa computacional que interpreta datos de resistividad, muestra la distribución de las resistividades reales del objeto de estudio y superficies geológicas del subsuelo, produce imágenes de secciones con las resistividades invertidas en dos dimensiones. EarthImager lee un archivo de datos (por ejemplo URF o DAT), calcula el modelo directo de resistividades y realiza el proceso de inversión de los datos. Además tiene la opción de hacer ajustes en los modelos directo e inverso.

En ajustes iniciales cuenta con el método de inversión de mínimos cuadrados con amortiguamiento, suavizado y robusto. En el Modelado directo se puede calcular la distribución de la resistividad utilizando el modelo de diferencias finitas o en su caso elemento finito, precisos para calcular los valores teóricos de resistividad aparente. En la configuración de Inversión para detener el proceso generalmente se usan los criterios número de iteraciones y el máximo error RMS.

Para el procesamiento de los datos se conservó el mismo criterio en la elección de los parámetros, de los cuales se trabajó finalmente con el modelo de inversión suave para caracterizar las zonas de baja resistividad que podrían estar asociados a la sustancia contaminante. Tanto en los datos de resistividad capacitiva como galvánica se usó el método de elementos finitos según el manual AGI (2009) la solución del modelo directo es más precisa en la discretización de los datos.

El criterio para detener el proceso fue un máximo de 10 iteraciones y un error RMS menor que 50% en la mayoría de los casos. Debido que los valores de RMS obtenidos en cada iteración no satisfacían los resultados esperados se decidió no tratar de bajar dicho error porque en algunos casos era necesario eliminar más del 15% de los datos y se perdía información.

3.2.2. Resultados preliminares

La adquisición de los datos de resistividad en una zona caracterizada por tener un suelo superficial altamente conductivo, la sensibilidad del equipo y las características del arreglo geométrico utilizado, tuvo como consecuencia la generación de datos con buena información así como datos ruidosos, tanto en el método de resistividad capacitiva como galvánica.

En la inversión de estos datos se realizaron pruebas con un método de inversión suavizado, dando como resultado valores inusuales de resistividad cercanos a 0 Omh-metro y rangos de altas resistividades que variaron según el método de adquisición, entre 10 y 300 Omh-metro para el método de resistividad galvánica y entre los 100 y 600 Omh-metro para el método de resistividad capacitiva. Estos resultados se esperaban dadas las condiciones mencionadas y a la naturaleza del método, por lo tanto errores RMS elevados.

Generalmente este tipo de inversión es utilizado para series de datos con buena distribución de resistividades, pero debido a la calidad de los datos obtenidos en campo también se realizaron pruebas con el modelo de inversión robusto, este tipo de inversión

es empleado cuando los datos de resistividad son ruidosos ya que tiende a producir regiones más homogéneas.

Con el modelo de inversión robusto se obtuvieron rangos de resistividad con valores cercanos a 0 Omh-metro y valores altos entre 8 y 40 Omh-metro para el método de resistividad galvánica y entre 20 y 400 Omh-metro para el método de resistividad capacitiva. En estos perfiles las anomalías de alta resistividad eran más prominentes debido al rango de resistividades.

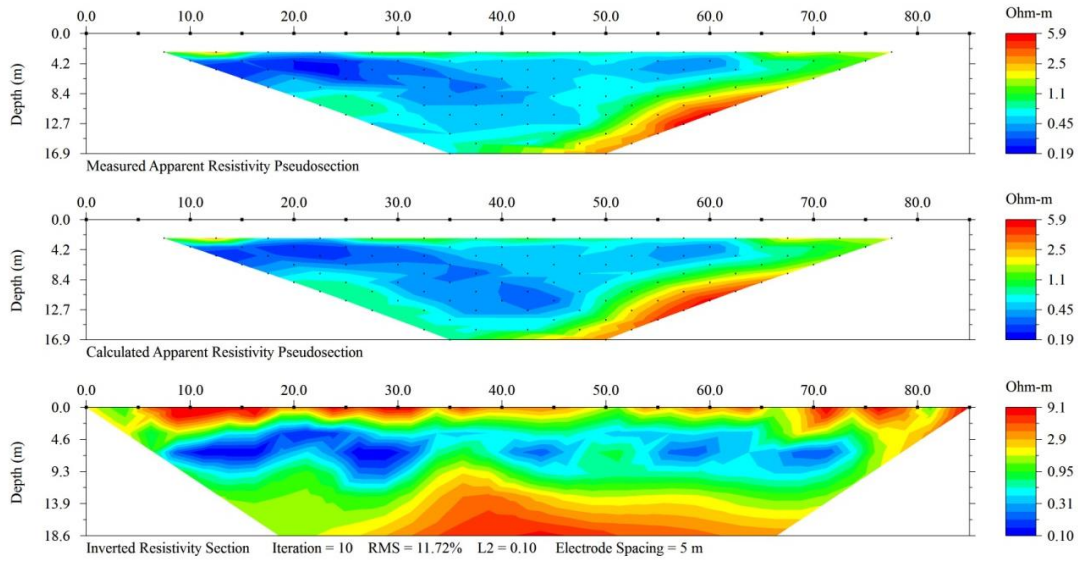
Como consecuencia de dichas pruebas el método de inversión suave se eligió sobre el método robusto, que aunque este modelo definía mejor las altas resistividades no era el objeto de estudio. Con el método de inversión suave se obtuvieron resultados entre las primeras 6 iteraciones en la mayoría de los casos, mientras tanto en el método robusto se obtuvieron los mismos resultados a más de 10 iteraciones establecidas como criterio de paro de la inversión.

En la mayoría de las inversiones, para mejorar el ajuste entre los datos de la pseudosección de resistividad aparente generada con los datos de campo y la pseudosección de resistividad aparente calculada por el programa de inversión, se empleó el histograma de datos desajustados con el fin de reducir el porcentaje de error RMS.

Las inversiones en ambos casos no cumplieron el criterio de error RMS menor a 10%, por lo que el criterio que se usó para elegir el mejor modelo de inversión fue el número de iteraciones relacionado a un RMS mínimo posible, que como se mencionó menor al 50%, este porcentaje de error fue determinado al realizarse varias pruebas, que en algunos de los casos no fue posible reducir. Con ayuda de la grafica de correlación de los datos calculados y los datos medidos y la grafica de la curva de convergencia, así como el valor mínimo y máximo de las resistividades de los datos obtenidos en campo en relación con el objetivo planteado.

En la Figura 3.10 se muestra un ejemplo del proceso de inversión suave y robusta, en cada una se generaron 3 imágenes: la primera contiene las distribución de los datos de resistividad adquiridos en campo que es la pseudosección de resistividad aparente, la segunda imagen representa la pseudosección de resistividad aparente calculada por el programa a partir de los parámetros y la ultima es el modelo de resistividad real 2D, resultado de la inversión con un RMS y una norma L2.

(a) Método de inversión suave



(b) Método de inversión robusta

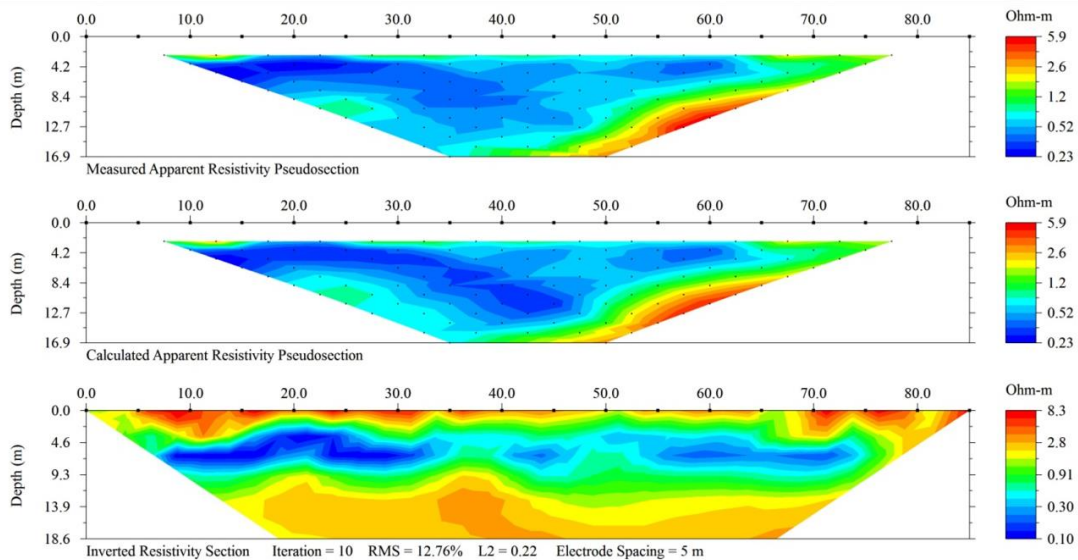


Figura 3.10. Imágenes del perfil RG-L1 con (a) un método de inversión suave y (b) un método de inversión robusta, generadas con el programa EarthImager 2D (AGI, 2008). La imagen de inversión suave muestra un rango de resistividades entre 0.1 y 9 Ohm-m en la iteración 10 con un RMS de 11.72%, la imagen de inversión robusta tiene resistividades entre 0.1 y 8.3 Ohm-m en la iteración 10 y un RMS de 12.76%.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Con la aplicación de los métodos de resistividad capacitiva y galvánica, se ha buscado la manera de obtener respuesta del subsuelo que contenga información suficiente para delimitar zonas de contaminación y con vulnerabilidad. En este sentido, se presentan los aportes y las diferencias que existe entre las dos modalidades de TRE empleadas, por una parte la profundidad de investigación, que como se ha mencionado en los capítulos 2 y 3, dependió principalmente de las características de operación del equipo, de la configuración geométrica de la adquisición y separación de los electrodos (o sensores), así como de las características del subsuelo estudiado, entre estas la alta conductividad en la capa más superficial incluyendo el suelo de concreto armado.

Otra de las diferencias que se marcan entre las modalidades son los rangos de resistividad obtenidos con el método de inversión suave, incluyendo el porcentaje de error RMS, mostrando menor porcentaje en los datos obtenidos con el método galvánico en comparación con los datos del método capacitivo. Generalmente en los trabajos de resistividad se consideran errores RMS menores al 10%, sin embargo, dadas las condiciones descritas en los resultados se manejaron hasta un 57% de error RMS, como en el caso particular del método capacitivo y 50 % en el método galvánico.

Estas características se presentan mediante la descripción cuantitativa y cualitativa de las imágenes de resistividad, mostrándose los resultados por secciones de resistividad (por ejemplo RC-L1 y RG-L1) correspondientes a la misma línea de adquisición. Así mismo, se describe la relación entre las modalidades de TRE, evaluando las geometrías que se utilizaron, la profundidad de investigación y sus alcances.

En el análisis de resultados se presenta la descripción e interpretación de la información y las ventajas de utilizar estos métodos de manera paritaria, así mismo se evalúan las aportaciones que cada uno tiene respecto al caso de contaminación. Finalmente se llega a las conclusiones y recomendaciones, donde se denota la posibilidad que estos métodos tienen para apoyar otros estudios geoquímicos y darle el carácter geométrico para la definición del problema.

4.1. Interpretación de resultados

Las secciones presentadas en las figuras 4.1 al 4.6 muestran las imágenes de resistividad, asociadas a las zonas de contaminación por residuos generados durante el proceso de refinación del cobre.

Las secciones son descritas por líneas de adquisición, a cada línea le corresponden una sección de resistividad capacitiva y otra de resistividad galvánica, con excepción de las líneas 5 y 6, que les corresponde una sección de resistividad capacitiva.

Secciones de resistividad, línea 1:

La imagen a) muestra la sección de resistividad RC-L1 (figura 4.1), tiene 86m de longitud, de los cuales los primeros 26m corresponden a la longitud del instrumento, esto explica las longitudes negativas. Debido al método de resistividad se alcanzó la profundidad de investigación de 4.07m y se obtuvo un rango de resistividad que varía entre 0.10 a 308 ohm-m.

En esta sección se observa sólo una capa con valores de resistividad entre 0.1 y 5 ohm-m, que verticalmente cubre la zona más somera hasta los 4m de profundidad. Las estructuras que se observan a lo largo de la sección, como los señalados en los recuadros denominados C1 y C2 en las longitudes 1, 8, 17, 24, 37 y 38m, se encuentran en el rango de resistividad entre 5 y mayores que 25 ohm-metro, de acuerdo con la escala de resistividades, y son asociadas a estructuras de alta resistividad como cimientos presentes en la zanja y a la influencia de las baterías situadas cerca de esta la línea de estudio.

La imagen b) correspondiente a la sección RG-L1, tiene 85m de longitud y la profundidad alcanzada fue de 18.6m. El rango de variación de resistividades que se obtuvo a partir del proceso de inversión se encuentra entre 0.10 a 9.1 ohm-m.

En esta sección de resistividad se observan dos horizontes geoelectrónicos principales, según los contrastes de colores (azul y rojo) obtenidos en la escala de resistividades. En la capa más superficial se observan estructuras con valores de resistividad entre 2 y 9 ohm-m que llegan hasta los 4m de profundidad, como lo señalan los recuadros R1, R2, R3 Y R4, y son asociadas a estructuras de construcción. La capa con valores mínimos entre 0.1 y 1 ohm-m corresponde a un horizonte de baja resistividad que se extiende lateralmente a lo largo de todo la sección, de aproximadamente 8 m de espesor. Estas resistividades bajas pueden estar asociadas a la saturación de fluido rico en minerales, por lo tanto a un acuífero somero.

También se observa otro horizonte a mayor profundidad con valores de resistividad mayores que 2 ohm-m. Esta capa pierde continuidad lateral en los últimos 30 metros de la sección. Este horizonte puede estar asociado a un material menos saturado o saturado con fluido de diferente concentración (acuífero profundo). La capa con resistividades entre 1 y 2 ohm-metro que delimita estos horizontes se puede relacionar a una zona de transición.

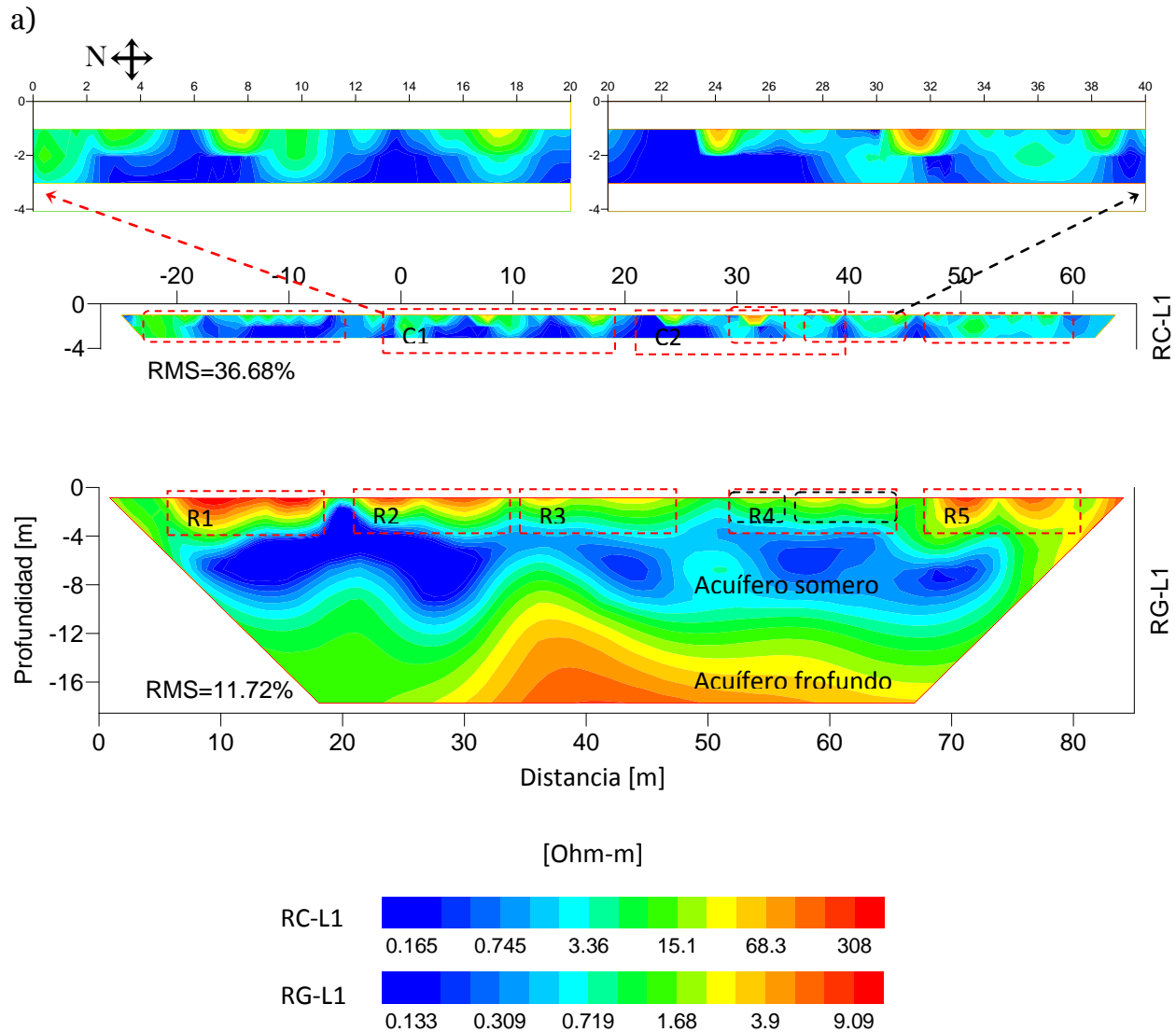


Figura 4.1. Secciones de a) resistividad capacitiva RC-L1 y b) resistividad galvánica RG-L1 de la zona de adquisición línea 1.

Secciones de resistividad, línea 2:

La sección a) de resistividad RC-L2 (Figura 4.2.) tiene 86 metros de longitud de los cuales los primeros 26 metros corresponden a la longitud del instrumento. La profundidad de investigación alcanzada fue de 4.07 metros y el rango de variación de resistividades obtenido se encuentra entre 0.16 y 211 ohm-m.

Se observa una capa con valores de resistividad entre 0.1 y 4 ohm-m, que verticalmente cubre la zona más somera hasta los 4m de profundidad. Las estructuras que resaltan se encuentran entre los valores de resistividad mayores que 20 ohm-m y valores de transición con resistividades entre 4 y 19 ohm-metro, que de acuerdo con la escala de colores, estas altas resistividades son asociadas a la existencia de estructuras como cimientos presentes en la zanja, que se observan dentro de los recuadros en las longitudes -20 m, -6 m, 20 m, 40m y 50m con profundidades en los primeros 2 m.

La sección b) de resistividad RG-L2 tiene 85 metros de longitud. La profundidad de investigación alcanzada fue de 18.6 metros. El rango de resistividades que se obtuvo a partir del proceso de inversión se encuentra entre 0.14 y 46 ohm-metro.

En la imagen de resistividad se observan dos horizontes geoelectricos, como en el caso de RG-L1, según los contrastes de resistividades obtenidos en la escala de colores. En la capa más superficial se observan estructuras con valores de resistividad entre 6 y 45 ohm-m que llegan hasta los 4m de profundidad, como lo señalan los recuadros, asociadas a estructuras de construcción. La capa con valores mínimos entre 0.1 y 2 ohm-m corresponde a un horizonte de baja resistividad que se extiende lateralmente a lo largo de toda la sección, de 12 m de espesor aproximadamente. Estas bajas resistividades pueden estar asociadas a la saturación de fluido rico en minerales.

A su vez se observa otro horizonte a mayor profundidad que presenta valores de resistividades entre 2 y 6 ohm-m, resistividades que corresponde a valores de transición, en esta capa también se nota la presencia de un alto resistivo. La capa presenta continuidad lateral perdiendo continuidad en los últimos 30 metros. Este horizonte puede estar asociado a un material menos saturado o saturado con fluido de diferente concentración (acuífero profundo).

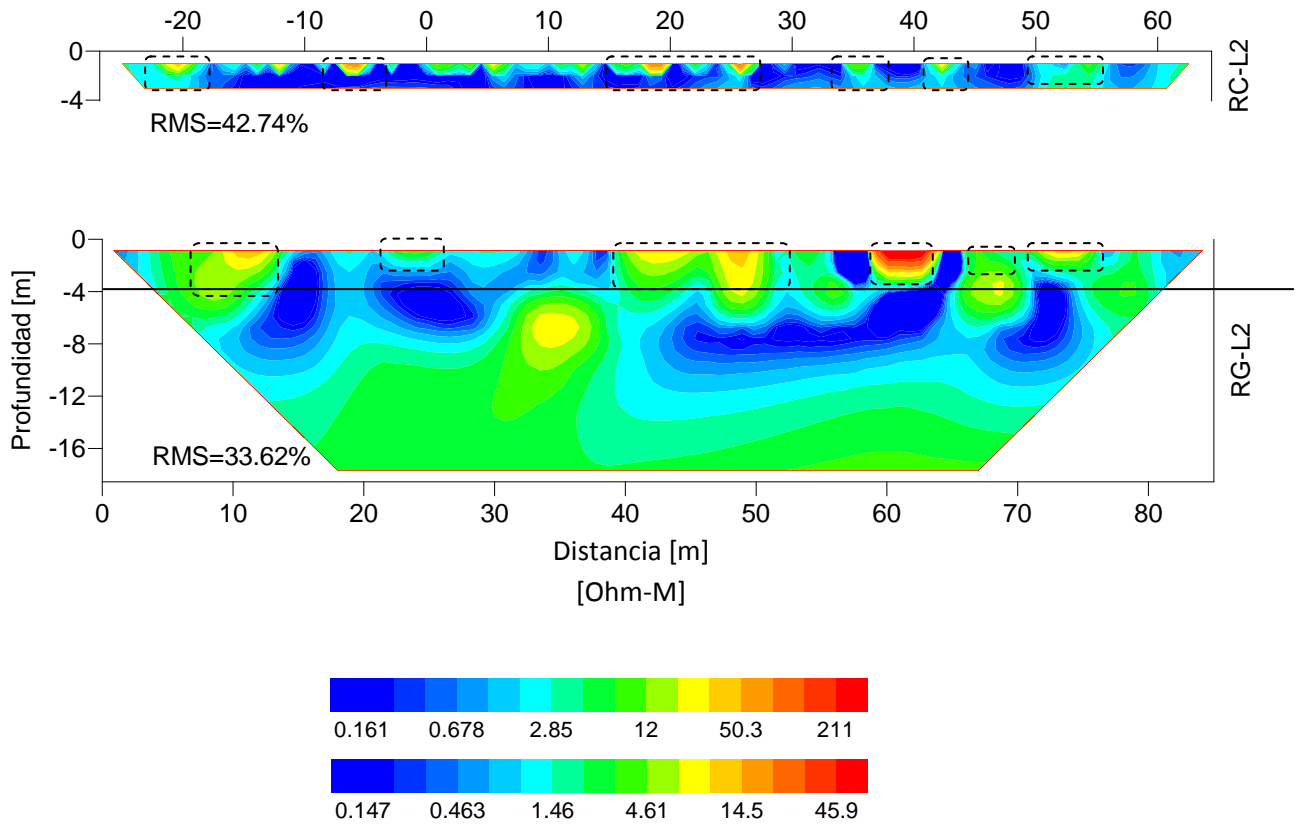


Figura 4.2. Secciones de a) resistividad capacitiva RC-L2 y b) resistividad galvánica RG-L2 de la zona de adquisición línea 2.

Secciones de resistividad, línea 3:

La sección a) de resistividad RC-P3 (Figura 4.3) tiene 45 metros de longitud de los cuales los primeros 26 metros corresponden a la longitud del instrumento. La profundidad de investigación alcanzada fue de 4.07 metros y el rango de resistividades obtenido en el proceso de inversión se encuentra entre 0.15 y 142 ohm-m.

Las estructuras que se observan dentro de los recuadros se encuentran entre los valores de resistividades mayores que 14 ohm-m y valores de transición entre 3 y 14 ohm-m con espesores de 2m aproximadamente, que de acuerdo con la escala de resistividades, estos altos valores son asociados a la existencia de estructuras como cimientos presentes en la zanja.

En esta imagen también se observa que la capa con valores bajos de resistividad entre 0.15 y 4 ohm-m, cubre verticalmente la zona más somera hasta los 8m de profundidad. Estas bajas resistividades pueden estar asociadas a la saturación de fluido rico en minerales.

La imagen correspondiente a la sección b) de resistividad RG-L3 tiene 32 metros de longitud. La profundidad de investigación alcanzada fue de 8.6 metros. El rango de resistividades que se obtuvo a partir del proceso de inversión se encuentra entre 0.16 y 288 ohm-m.

Dadas las características de longitud y profundidad de este perfil se pueden observar con más detalle las estructuras de espesores variables entre 1 a 4m, que se encuentran en la zona más somera y que corresponden a anomalías geoelectricas de alto resistivo con valores de resistividad mayor que 23 ohm-m y valores de transición entre 5 y 23 ohm-m, según la escala de resistividades, estos altos valores son asociados a la existencia de estructuras de construcción como cimientos presentes en la zanja. Las geometrías de estas anomalías podrían servir como un indicador de la dirección de flujo del contaminante debido a la influencia que tienen las anomalías señaladas en los recuadros al adoptar su forma geométrica.

Bajo estas anomalías se observa una capa de bajo resistivo, con valores de resistividad entre 0.16 y 5 ohm-m, que verticalmente cubre la zona más somera hasta los 8m de profundidad. Estas resistividades bajas pueden estar asociadas a la saturación de fluido rico en minerales.

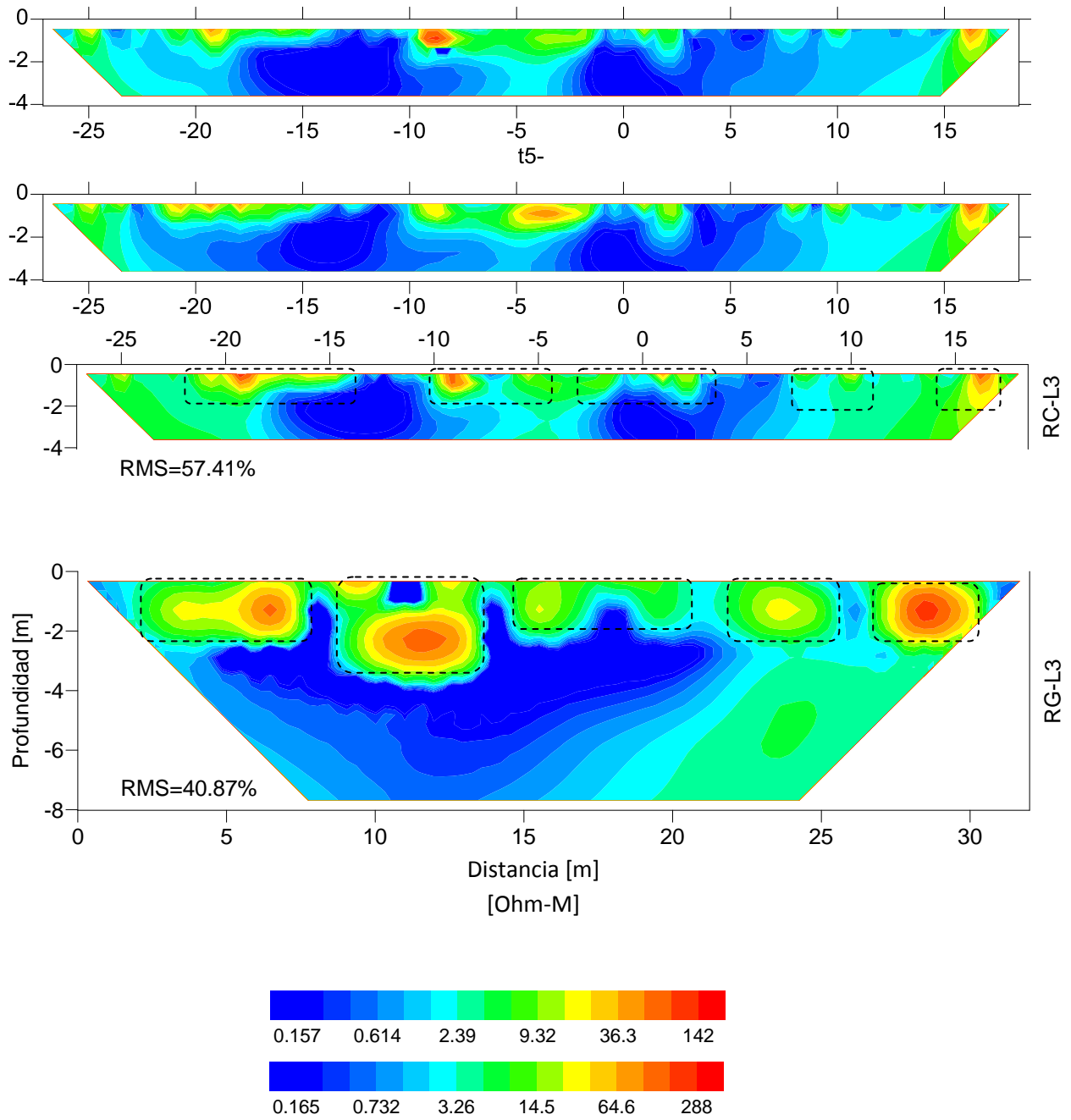


Figura 4.3. Secciones de a) resistividad capacitiva RC-L3 y b) resistividad galvánica RG-L3 de la zona de adquisición línea 3.

Perfiles de resistividad, línea 4:

La sección a) de resistividad RC-P4 (Figura 4.4) tiene 140 metros de longitud de los cuales los primeros 26 metros corresponden a la longitud del instrumento. La profundidad de investigación alcanzada fue de 4.07 metros y el rango de variación de resistividades obtenido en el proceso de inversión se encuentra entre 0.55 y 344 ohm-m.

En la zona más superficial del perfil se pueden observar anomalías de alta resistividad con valores entre 40 y 344 ohm-m y valores de transición entre 11 y 40 ohm-m que se asocia al piso de concreto del patio. En esta zona no se realizaron zanjas para llegar al suelo natural. Parte de las anomalías de alta resistividad también son asociadas a estructuras como drenajes o tuberías y a otras estructuras propias de la construcción.

En esta imagen también se puede observar una capa de baja resistividad con valores cercanos a cero entre 0.5 y 11 ohm-m a lo largo de toda la sección, a partir de los 2m de profundidad, que se podría asociar a al nivel freático. El espesor de esta capa es variable, influenciada por la presencia de las anomalías de alto resistivo, sin embargo en dirección sur el espesor de esta capa es mayor.

En la sección b) de resistividad RG-P4 tiene 115 metros de longitud. La profundidad de investigación alcanzada fue de 24.6 metros y el rango de variación de resistividades obtenido en el proceso de inversión fue entre 0.16 y 263 ohm-m.

En la imagen de resistividad se observan resistividades bajas cercanas a cero entre 0.16 y 5 ohm-m a lo largo de todo el perfil y verticalmente, que se asocia a la saturación de fluido rico en minerales. En los primeros 30m de longitud y hasta los 8 m de profundidad se pueden observar anomalías de alta resistividad con valores entre 22 y 263 ohm-m en la zona más superficial. Entre la longitud 60m y 80m se observan otras estructuras con resistividades entre 5 y 22 ohm-m. Estas anomalías pueden estar relacionadas a la influencia de estructuras como concreto del piso, drenajes o tuberías, y otras estructuras propias de la construcción. Entre las longitudes 70 y 105m y a partir de lo 4m de profundidad, aproximadamente, se observa otra anomalía de alto resistivo, que puede estar asociado a material menos saturado o saturado con fluidos de diferente concentración, por lo tanto relacionado a un acuífero.

Esta sección corresponde a la zona externa de las casas 1 y 2 (Figura 3.2). El objetivo de este perfil fue monitorear la variación de la resistividad eléctrica fuera de la zona de mayor contaminación.

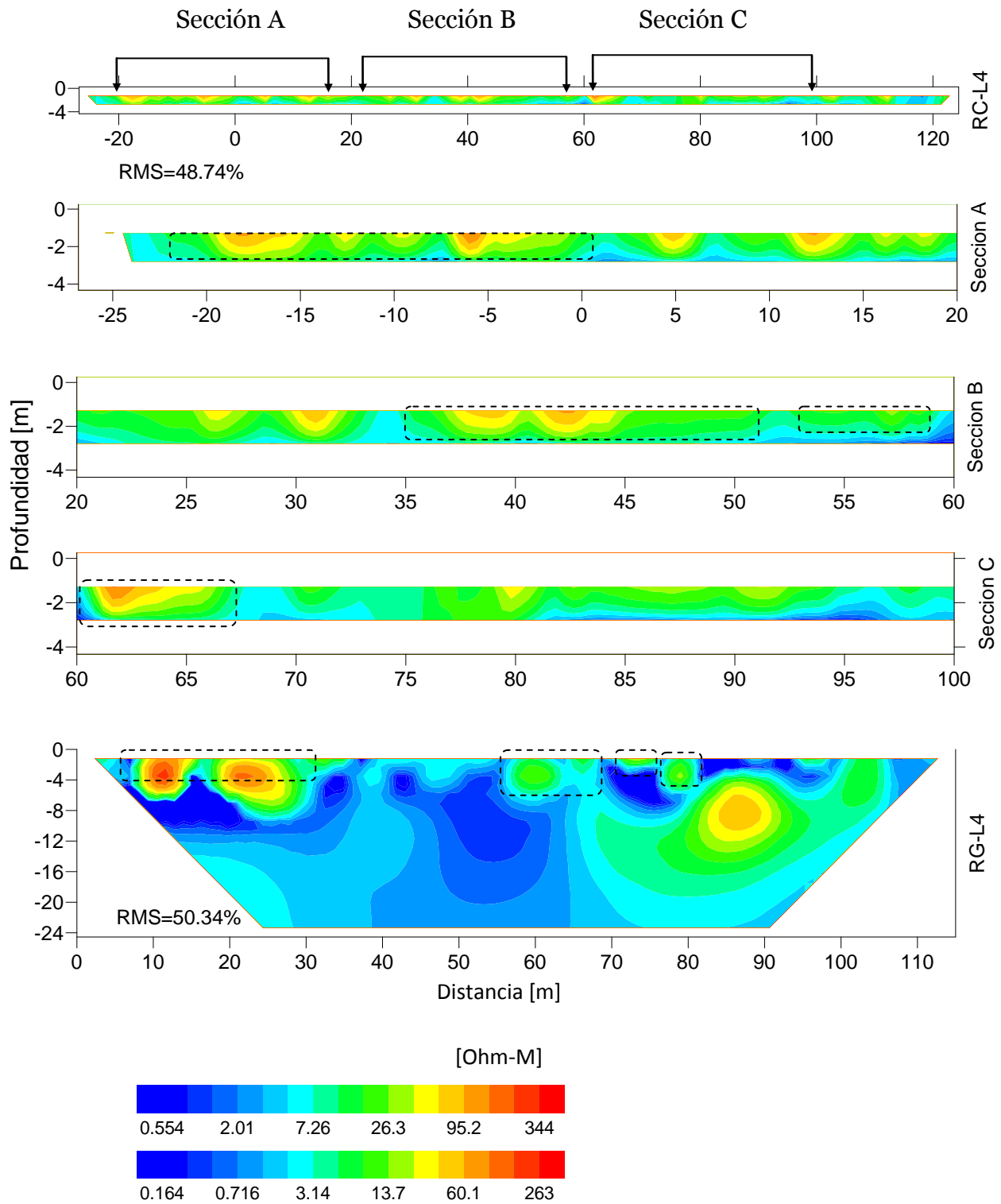


Figura 4.4. Secciones de a) resistividad capacitiva RC-L4 y b) resistividad galvánica RG-L4 de la zona de adquisición línea 4.

Perfil de resistividad, línea 5:

La sección de resistividad RC-P5 (Figura 4.5) tiene 115 metros de longitud de los cuales los primeros 26 metros corresponden a la longitud del instrumento. La profundidad de investigación alcanzada fue de 4.07 metros y el rango de variación de resistividades obtenido en el proceso de inversión se encuentra entre 2 y 615 ohm-m.

En la imagen se pueden observar dos capas geoelectricas, una de alta resistividad que se encuentra entre los valores 92 y 615 ohm-m en la parte más somera del perfil, con un espesor aproximado de 2m, esta capa está asociado al asfalto de la calle y a tuberías de agua, drenaje y gas. La segunda capa geoelectrica de baja resistividad con valores entre 2 y 30 ohm-m, presenta una tendencia a hacerse más somero y muestra mayor espesor en dirección oeste del perfil, hasta la longitud 90m. Esta capa puede estar asociada al nivel freático y por tanto a material saturado rico en minerales de baja resistividad o rico en fluidos.

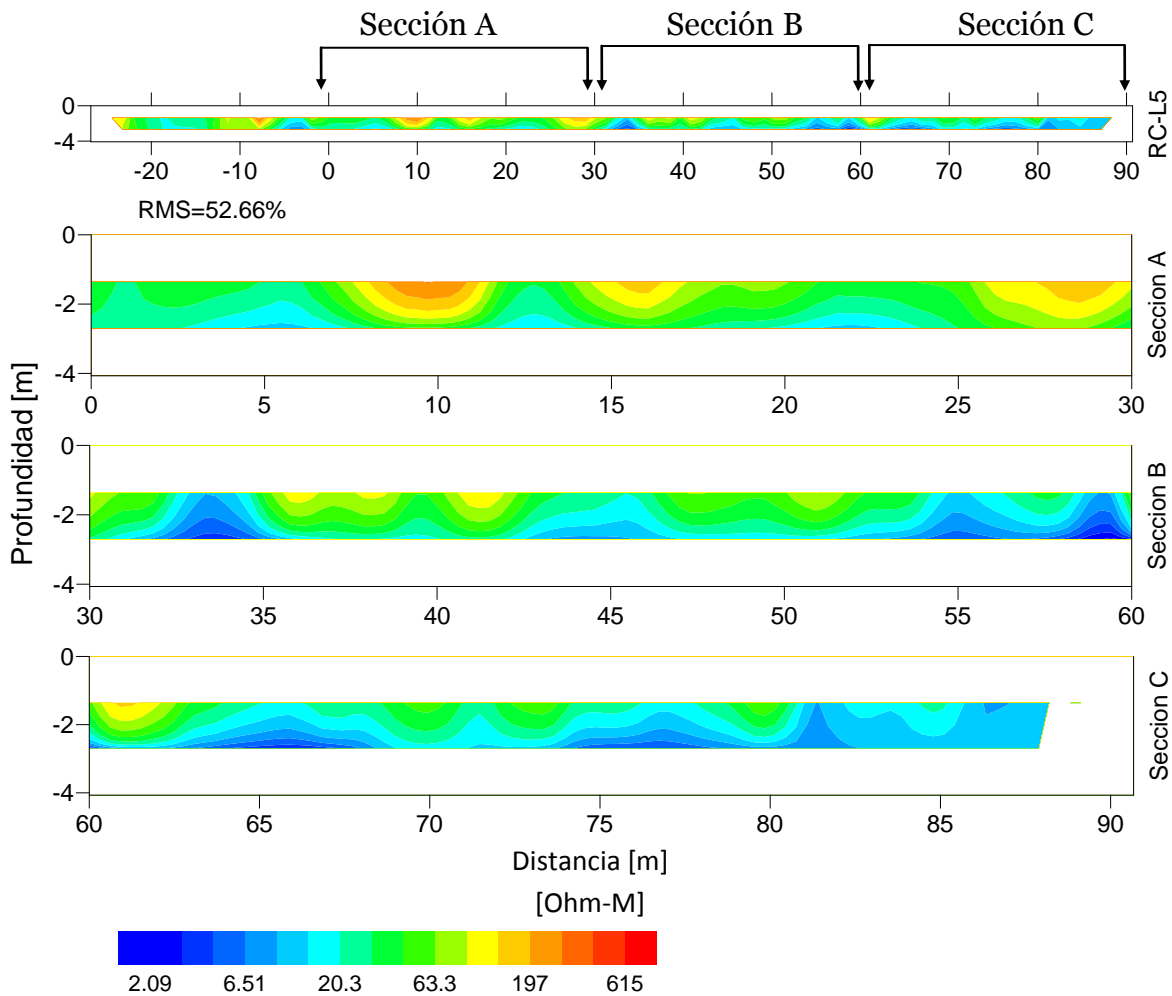


Figura 4.5. Sección de resistividad capacitiva RC-L5, línea 5.

Perfil de resistividad línea 6:

La sección de resistividad RC-P6 tiene 200 metros de longitud de los cuales los primeros 26 metros corresponden a la longitud del instrumento. La profundidad de investigación alcanzada fue de 4.07 metros y el rango de variación de resistividades obtenido en el proceso de inversión se encuentra entre 0.9 y 129 ohm-m.

En esta imagen se pueden observar dos capas geoelectricas, una de alta resistividad que se encuentra entre los valores 26 y 230 ohm-m en la parte más somera del perfil, con un espesor aproximado de 3m, esta capa está asociado al concreto de la acera y a obstáculos que enmascaraban la resistividad natural del subsuelo, entre estos obstáculos se encuentran las tuberías de agua, drenaje y gas.

La segunda capa geoelectrica de baja resistividad con valores entre 0.9 y 10 ohm-m, muestra mayor espesor en dirección norte del perfil, hacia la longitud 180m, esta capa está relacionada a material saturado con fluidos rico en minerales y puede estar asociado al nivel freático. Con respecto a los resultados, se puede señalar que el nivel freático estimado es más superficial y por lo tanto servirá como referencia de la dirección de las anomalías relacionadas al material saturado de minerales de baja resistividad.

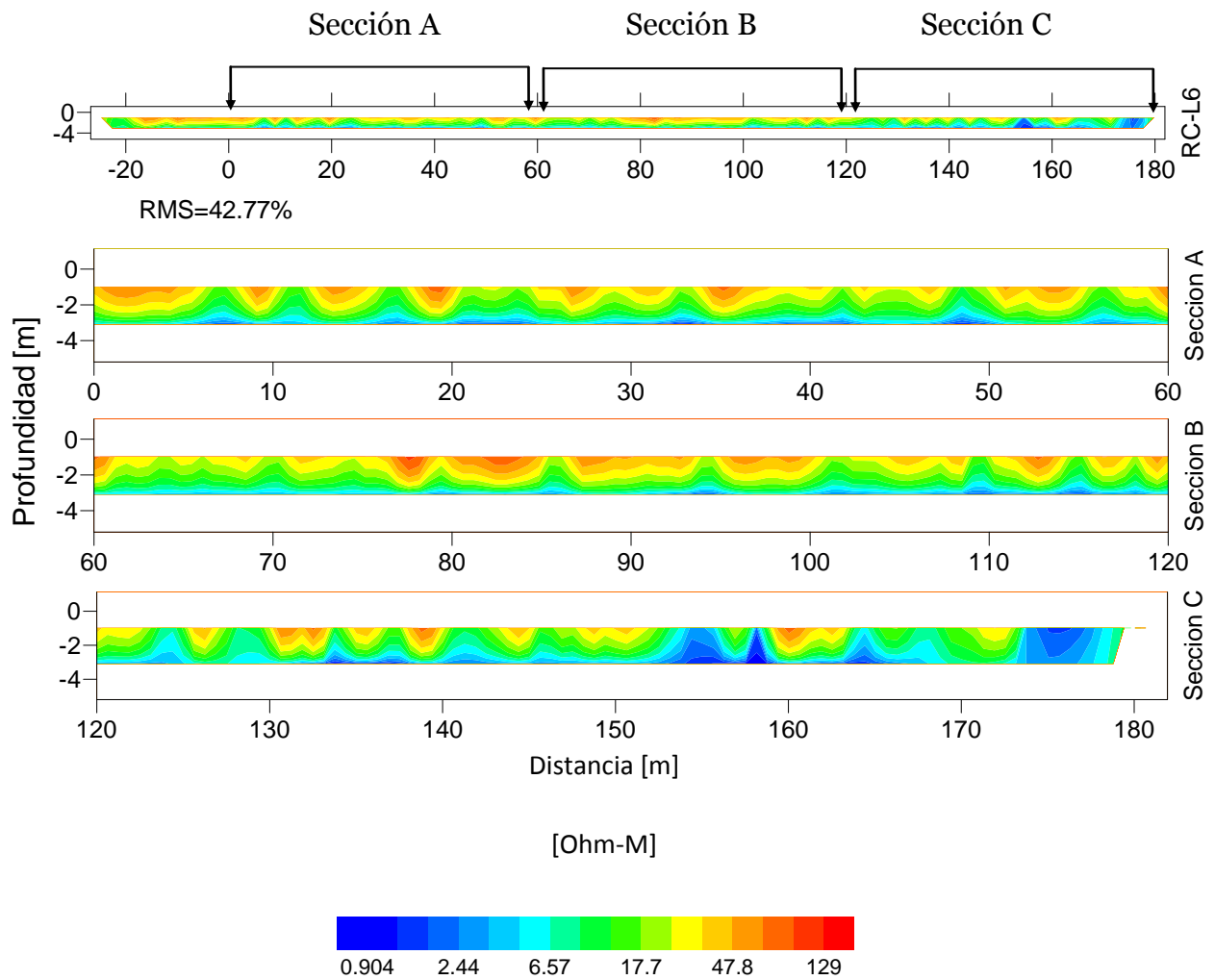


Figura 4.6. Sección de resistividad capacitiva RC-L6, línea 6.

4.2. Relación entre las modalidades de TRE

La resolución tanto vertical como horizontal de las técnicas de TRE, fue determinada por el tipo de instrumento utilizado. Por lo tanto la profundidad de investigación dependió principalmente de las características de operación de los equipos y de la característica conductiva del subsuelo, ya que una capa superficial de baja resistividad reduce la profundidad. Estas particularidades marcan una diferencia significativa.

Para nuestro estudio la configuración geométrica de adquisición fue dipolo-dipolo para los resistivímetros Ohmmapper y Syscal.

En el caso de la TRE capacitiva la profundidad de investigación fue de 4 m en todos los perfiles, permitiendo realizar la toma de datos a cada 1.25m de longitud (en el caso de RC-L3 0.625m) de tal manera que la resolución de investigación fue mayor. Debido a esta característica se pudieron reconocer estructuras relacionadas a altos resistivos que corresponden a cimientos, tuberías, drenaje, e incluso las baterías que se encontraron dentro de las casas 1 y 2, descritos en los perfiles RC-L1, RC-L2 y RC-L3.

Aunque la profundidad de investigación se ve limitada debido a la configuración electródica (dipolo-dipolo) de los sensores, impidiendo el uso de otros arreglos geoelectrónicos y distancias grandes entre los sensores, la resolución en investigaciones someras es mayor. Sin embargo los perfiles con grandes dimensiones y poca profundidad no son lo más recomendable ni adecuados como en el caso de los perfiles RC-L4, RC-L5 y RC-L6.

En cuanto a la TRE galvánica, la profundidad de investigación máxima que se alcanzó fue de 24.6m con 5m de separación entre electrodos, en el caso particular del perfil RG-L4, y la profundidad mínima fue de 8m con 2m de separación entre electrodos en el perfil RG-L3. Las grandes profundidades se debieron a la facilidad de manipulación de las distancias entre electrodos con una configuración dipolo-dipolo, pero en otros casos también al uso de otras configuraciones geométricas, primacía de esta técnica.

Debido a esta particularidad fue posible identificar horizontes geoelectrónicos a mayor profundidad, como es el caso de los perfiles RG-L1 y RG-L2, sin embargo en comparación con la técnica capacitiva, no fue posible observar estructuras someras con mayor resolución debido a las grandes distancias entre los electrodos, por lo tanto las estructuras de los cimientos tienen menos influencia en perfiles con profundidades mayores a 4m.

Las anomalías resistivas que se observaron en los perfiles de resistividad galvánica RG-

L1, RG-L2 y RG-L3 se vieron reducidas en los perfiles de resistividad capacitiva como en el caso de los perfiles RC-L1, RC-L2 y RC-L3, sin embargo, las anomalías de baja resistividad que se observaron en la parte más somera del perfil RG-L4 no se observaron en el perfil RC-L4, en este caso se logró ver las anomalías de alto resistivo que se esperaban y que corresponde a las estructuras de construcción mencionadas.

4.3. Análisis de resultados

Entre los objetivos estuvo realizar un mapa de distribución que señale de las zonas de mayor concentración de material saturado de fluido, rico en minerales, asociado en algunos casos al contaminante y establecer un patrón de escurrimiento del sistema hidráulico subterráneo, a partir de la integración de la información obtenida de los resultados de las inversiones.

Zona de alta concentración:

Mediante la integración de los resultados obtenidos de las líneas RC-L1, RC-L2 y RC-L3 se constató la presencia de anomalías de bajo resistivo cercanos a cero que cubren todo el perfil hasta los 4m de profundidad, resultado esperado debido a la alta saturación de minerales como el sulfato de cobre diseminado, evidencia superficial observado en el suelo natural dentro de las zanjas.

Acuífero somero y Acuífero profundo:

Los resultados de los perfiles RG-L1, RG-L2 y RG-L3 en conjunto con el perfil RG-L4 nos permiten visualizar dos horizontes geoelectricos, así como su continuidad lateral. Fue posible estimar el espesor de estas capas, así como la profundidad a la que encuentran.

Con los perfiles RG-L1, RG-L2 y RG-L3 se pudo identificar la primera capa geoelectrica de baja resistividad que se observa a partir de los primeros metros de los perfiles y que llega a una profundidad de entre 10 y 15m, que puede asociarse a un acuífero somero de espesor variable.

La segunda capa geoelectrica corresponde a un horizonte de alta resistividad que se encuentra a mayor profundidad, esta capa sólo fue identificada en los perfiles RG-L1 y RG-L2 ya que el perfil RG-L3 por su longitud solamente se llegó a los 8m de profundidad. Dadas estas condiciones, la capa se puede asociar a una zona libre de contaminación y quizá la presencia de un acuífero profundo.

En el caso del perfil RG-L4, que fue realizado fuera de las naves, la distribución de las resistividades bajas cubre todo el perfil por lo que no fue posible identificar los horizontes descritos. Sin embargo se pudo identificar una estructura de alta resistividad entre la longitud 70 y 110m con más de 15m de espesor, esta estructura se puede vincular como parte del acuífero profundo.

Distribución en el sistema hidráulico:

Para determinar la tendencia y distribución de las anomalías de baja resistividad, se hace el análisis a partir de los resultados de los perfiles RC-L5 y RC-L6, debido a que se realizaron en el exterior de la planta. Estos perfiles presentan resistividades altas en los primeros 2m y bajas resistividades a partir de esta profundidad, por lo cual se tomaron como referencia para la profundidad del nivel freático y comparar con los resultados de los perfiles que se ubican dentro de la zona crítica. Sus características dieron la pauta para pensar que algunas zonas correspondientes a estos perfiles podrían estar libres de la saturación de fluidos rico en minerales (como sulfato de cobre).

No obstante, en el perfil RC-L5 se observó que las anomalías de baja resistividad son más someras en los últimos 50m de longitud, correspondiente a la parte externa de la zona crítica, perdiendo continuidad en la dirección este. En el perfil RC-L6 también se observó este comportamiento en los últimos 60m de longitud que corresponde igualmente la zona crítica, perdiendo continuidad en dirección sur.

Los perfiles de resistividad capacitiva (RC-L1, RC-L2 y RC-L3), que se encuentran dentro de la zona crítica, presentan mayor dificultad para determinar una orientación preferencial a grandes rasgos de las anomalías de baja resistividad, dado que dichas anomalías se encuentran en la totalidad de los perfiles. Sin embargo, las estructuras de alta resistividad relacionadas a los diversos factores de la construcción mencionados, como baterías y cimientos, tienen cierta importancia, ya que pueden cambiar la forma natural del escurrimiento, además pueden bloquear y desviar el flujo natural del contaminante (efecto “represa”) en el sistema hidráulico. Tales estructuras pueden ayudar a determinar la dirección preferencial de las anomalías de baja resistividad, en zonas de alta concentración o filtración, debido a que dichas anomalías se comportan de manera tal que adoptan las formas geométricas de las estructuras de alta resistividad. Un ejemplo de esto se muestra en el perfil RC-L3 y RG-L3, en estos perfiles se observa un efecto claro tipo “vasos comunicantes” de las anomalías de baja resistividad en forma de “u”, que literalmente rodea parte de la estructura de alta resistividad, señalado en los recuadros.

Los perfiles RG-L1 y RG-L2 permitieron establecer la orientación del horizonte de baja resistividad asociado a un acuífero somero, en dirección norte-sur, el horizonte de alta resistividad asociado a un acuífero profundo, que pierde continuidad en dirección sur. En el perfil RG-L2 es posible apreciar que estos horizontes están ligeramente más profundos. Estas particulares se pueden observar en la Figura 4.7.

La presencia de estructuras verticales de alta resistividad en las posiciones 78 y 113 al sur del perfil RC-P4, que se pueden suponer estructuras propias de la construcción, como en el caso de vigas y juntas, nuevamente son consideradas guías de la anomalía de baja resistividad, por lo tanto se pueden observar que estas anomalías son más profundas en la dirección norte y más somera en dirección sur. Las anomalías que se encuentran en dirección sur se analizaron a mayor profundidad con el perfil RG-L4, ya que en esta dirección pone en duda la orientación en que fluye el sistema hidráulico somero. Se observa que efectivamente las anomalías de baja resistividad son más someras al sur del perfil y llegan a 4m de profundidad aproximadamente, pero subyace en la misma dirección un horizonte resistivo que pierde continuidad a los 70m. En la parte central no hay una dirección preferencial pero se observa la influencia de otras anomalías, mientras tanto al norte la anomalía de baja resistividad es más profunda. Las anomalías de alta resistividad que se observan hacia el norte seguramente corresponderán a alguna estructura y a material poco saturado. De acuerdo con el análisis anterior podemos vincular este perfil a una zona de acumulación de “efecto dique”, donde el flujo de la anomalía geoelectrica de baja resistividad se concentra en la parte central del perfil, el cual se va filtrando por efecto natural de la gravedad.

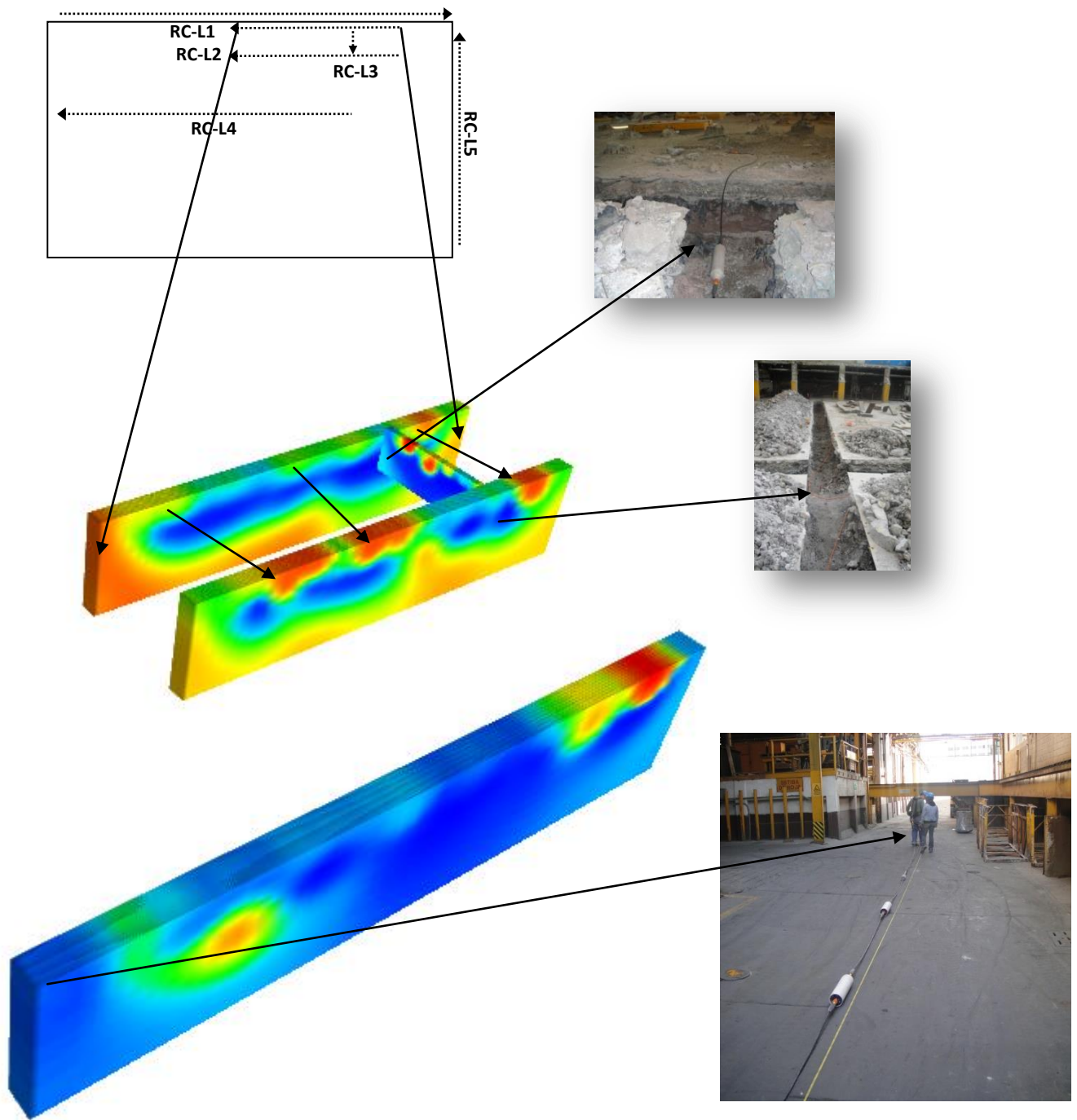


Figura 4.7. Esquema que representa la distribución de las resistividades dentro de la planta.

Mapa de distribución de zonas contaminadas:

Dado el análisis de resultados anterior se pudo elaborar un mapa de distribución de las zonas potencialmente contaminadas (Figura 4.8). Con ayuda de la información adquirida de cada unas de las técnicas, el reconocimiento de las “firmas” de las anomalías asociadas a los residuos contaminantes y a las estructuras de construcción, por sus valores de resistividad y sus formas, se logró interpretar e indicar las zonas que pueden tener mayor concentración y reconocer un patrón de distribución en el subsuelo somero y profundo (hasta 24m).

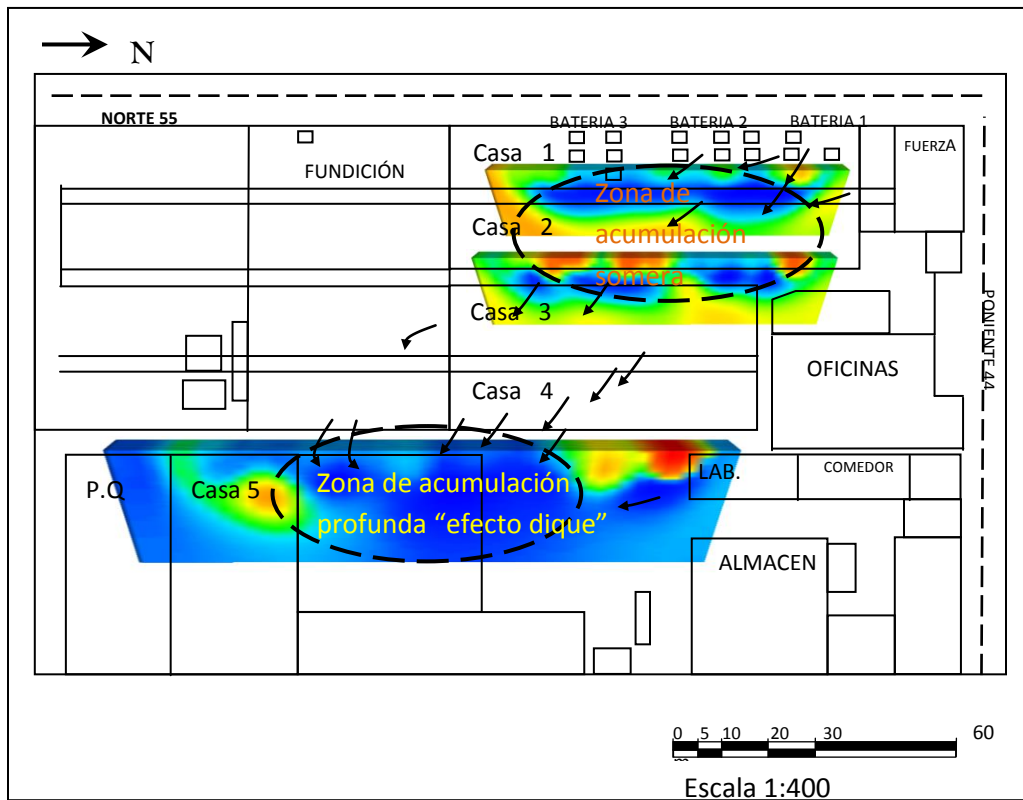


Figura 4.8. Mapa de distribución de las zonas potencialmente contaminadas.

En la imagen se muestra el área de refinación (casa1 y casa2) como la zona de mayor concentración somera, dadas las evidencias superficiales tanto como las obtenidas en las secciones de resistividad, esta zona crítica se indica en color rojo y se relaciona a la contaminación de al sistema hidráulico somero. Las flechas indican la dirección en la que se deduce el movimiento del contaminante, estimado de acuerdo con la profundidad de los horizontes geoelectricos de baja resistividad. La zona que se indica en color azul corresponde a la zona de concentración profunda.

Los resultados indican que el acuífero somero tiene una mayor concentración que el acuífero profundo, el cuál varía entre 10 y 18m de profundidad de acuerdo a cada una de las imágenes de resistividad analizadas (RG-L1 y RG-L3).

4.4. Conclusiones y recomendaciones

Como conclusiones se pueden establecer los siguientes puntos:

Método y procesamiento:

1. Los métodos de TRE se pudieron llevar a cabo a pesar de la alta conductividad del suelo superficial (por saturación de sulfato de cobre diseminado), que caracteriza la zona estudiada. Los instrumentos respondieron con éxito ante dicha condición por lo que fue posible obtener lecturas. No obstante, los datos que se obtuvieron no fueron de excelente calidad. El ruido en las lecturas se atribuye a la respuesta de los instrumentos en un suelo altamente conductor, como se sabe en los métodos de resistividad, la atenuación de la señal es más rápida en estos medios, aunque también se atribuye a otras fuentes de ruido como corrientes telúricas, potencial espontáneo, a efectos electromagnéticos por fuentes artificiales, así como la polarización de los electrodos en el caso de el método galvánico.

En el caso del OhmMapper, si la resistencia del subsuelo es baja el voltaje resultante también lo es, por lo que la medición será más difícil. La atenuación es rápida en ambos suelos conductor y resistivo, pero puesto que la señal comienza a reducirse mucho más en el suelo conductor también desaparece mucho más rápido, entonces, el transmisor puede ser detectado a una gran separación del receptor en suelo resistivo que en el conductor.

Aunque la profundidad de investigación está determinado únicamente por la geometría del arreglo dipolo-dipolo, para una señal de corriente alterna la separación máxima del transmisor-receptor, que puede ser utilizado en un entorno conductor, es una función del skin depth. Si la distancia desde el transmisor hasta el receptor es mayor que el skin depth no habrá suficiente señal para ser detectada por el receptor.

Generalmente, debido al estrecho ancho de banda del receptor, el ruido en el sistema no tiende a ser un problema, pero como se mencionó, mientras más lejos este el receptor del transmisor la señal disminuye rápidamente, sobre todo en un ambiente conductor. En algún momento habrá una relación señal-ruido en el que no se pueda hacer más mediciones.

La distancia a la que el ruido sobrepasa la señal del transmisor se determina obviamente por nivel de ruido. Por lo que en entornos de alto ruido el transmisor debe estar relativamente cerca del receptor, lo que conlleva a una reducción en la profundidad de la investigación.

2. La generación de datos muy ruidosos conllevó a obtener errores altos de RMS en las inversiones. Pero manejar porcentajes de errores RMS altos no impidió la posibilidad de obtener resultados satisfactorios y hacer un análisis de resultados favorables.
3. La combinación eficiente de los métodos de TRE permitió aprovechar la buena resolución del método capacitivo en los primeros 4m de profundidad, para reconocer estructuras relacionadas a lozas, tuberías y otras características de construcción en el subsuelo, con la finalidad de identificar las zonas más aptas para estudios posteriores. Mientras que el método galvánico aportó información a mayor profundidad, llegando hasta los 24 m, para localizar a grandes rasgos los horizontes principales así como su continuidad lateral.
4. Con la información obtenida se logró mostrar zonas donde se concentran las anomalías de baja resistividad (efecto “dique”), consiguiendo así establecer un patrón de distribución en el sistema hidráulico subterráneo y de las zonas con mayores niveles de contaminación en el subsuelo somero. Estos resultados muestran que el potencial de la metodología aplicada es combinar técnicas en alta resolución somera (hasta los 4m) y otra con baja resolución pero con mayor profundidad de investigación (24m).
5. Los métodos aplicados pueden asumir un rol importante como apoyo alternativo en colaboración con otros métodos químicos o físicos (como en el caso de estudios geoquímicos, arqueológicos, etc.), aportando información complementaria mediante imágenes de resistividad, que permiten hacer una estimación de la profundidad y dimensión de la zona estudiada y darle el carácter geométrico para la definición del problema.
6. Con la PI se puede obtener información de las características del subsuelo, debido a la polarización que ha sufrido el medio. La ventaja (bien probada) de la PI en este problema de contaminación es que detecta anomalías casi invisibles para el método de resistividad ya que la técnica aprovecha las propiedades electroquímicas del subsuelo. Aunado a esto, con los métodos de resistividad

(TRE) se pueden aprovechar los datos para complementar dicha la información. Sin embargo, es usual correlacionar los valores de resistividad de diferentes materiales obtenidos en laboratorios con las resistividades de los datos de campo, ya que se cuenta con información preliminar geológica. No obstante, en el caso de PI dicho análisis no puede efectuarse de manera directa ya que la gama de factores que producen el fenómeno es más amplia que para la resistividad por sí sola (López, 2010).

Resultados:

7. Conocidas las “firmas” de las anomalías asociadas a contaminantes por sus geometrías, sus valores de resistividad y profundidades, etc., se ha establecido la presencia de un acuífero somero entre los 2 y 10 m de profundidad, que ha sido relacionado con la filtración del contaminante por su alta conductividad y por la presencia de evidencia superficial (figura 3.4) , sin embargo esto se comprobará con otras técnicas; la presencia de un acuífero profundo entre los 10 y más de 18 m, del cual no se puede determinar si está contaminado o no a dicha profundidad debido a que los métodos geofísicos son de carácter geométrico, en estos casos para determinar si ha sido contaminado se requiere de otras técnicas invasivas tal como los estudios geoquímicos que determinen cuantitativamente el grado de concentración de sustancias contaminantes en el subsuelo; así mismo la existencia de una zona de transición (acuitardo) entre el acuífero somero y el profundo de espesor variable entre los 8 y los 11 m que se define como frontera entre los dos acuíferos.
8. Los resultados indican que existe una tendencia de movimiento subterráneo de un material altamente conductor (con resistividades prácticamente cercanas a cero ohm-m) que va de norte a sur (NW-SE), basado en la evidencia de anomalías someras de alta conductividad observadas a partir de los estudios realizados en las esquinas entre las calles Poniente 44 y Norte 67. El patrón que muestra está influenciado por varios factores de la construcción como son: las Baterías dentro de las casas 1 y 2, los cimientos debajo del piso de concreto actual, las columnas de carga, así como las juntas estructurales de las edificaciones. Estos elementos estructurales hacen las veces de represas y cambian la forma natural del escurrimiento. En otras circunstancias bloquean y desvían el patrón de movimiento. La distribución del material altamente conductor tiende a profundizarse hacia la casa5.

Se recomienda considerar los siguientes criterios:

1. Los resultados de las técnicas de TRE aportaron información de calidad, que deberán combinarse con otros estudios físicos y químicos para la toma de cualquier decisión.
2. En caso de emplear una técnica invasiva para un estudio complementario y/o toma de muestras sobre el acuífero somero se deberá considerar las zonas indicadas, zonas de “sombra” de la pluma contaminante. Esta recomendación se basa en la hipótesis de que en una zona de “represa” subterránea puede existir un incremento en la presión hidrostática. Si se realiza un pozo más profundo, puede romper el supuesto equilibrio hidrostático actual.
3. Para realizar un estudio eléctrico más detallado con respecto a la geometría de la pluma contaminante y del sistema hidráulico subterráneo, se recomienda realizar estudios con mayor número de perfiles paralelos entre sí, para elaborar modelos 3D y delimitar las estructuras someras en el caso del método capacitivo y los sistemas hidráulicos que se señalan como acuífero somero y profundo en el caso del método galvánico, así como el uso de otras configuraciones electródicas no convencionales. Sin embargo no se recomienda el uso de otras técnicas geofísicas debido a las condiciones mencionadas al final del capítulo 1.
4. En un estudio de exploración es inusual la combinación de las técnicas de resistividad galvánica y capacitiva, generalmente se hace entre técnicas diferentes, sin embargo se ha expuesto la eficacia de usar estas dos técnicas para un mismo estudio. La aplicación de esta combinación en trabajos futuros dependerá del objetivo, se recomienda en casos de contaminación así como para representar estructuras geológicas como fracturas, principalmente si es de interés mapear profundidades someras con mayor resolución para reconocer estructuras en los primeros 4m, a su vez grandes profundidades donde se requiera conocer la presencia de mantos acuíferos que puedan ser vulnerables ante una problemática de contaminación y ante el seguimiento de estructuras profundas.

REFERENCIAS

- Arrubarrena Moreno, M., 2010. Caracterización de un sitio contaminado por hidrocarburos usando tomografía de resistividad eléctrica. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. UNAM. 47 P.
- Carbonell Barrachina A. A.; Burló Carbonell F. M.; Mataix Beneyto J. J., 1995, Arsénico en el sistema suelo-planta Significado ambiental, universidad de Alicante, España, p. 139.
- Castro S. D., 2014, Caracterización geoelectrica del relleno sanitario de prados de la montaña en la delegación Álvaro Obregón, México D. F., Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Chávez, G., 2011. Modelación 3D de datos de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) con arreglo tipo “L”. Tesis de Maestría. Instituto de Geofísica, UNAM.
- Cifuentes G., Vargas C. y Simpson J., 2009, Análisis de las principales variables de proceso que influyen en el rechazo de los cátodos durante el electrorrefino del cobre, REVISTA DE METALURGIA, Madrid, 45 (3), MAYO-JUNIO, 228-236, 2009, ISSN: 0034-8570, eISSN: 1988-4222, doi: 10.3989/revmetalm.0729.
- Díaz A. E., 2010, Implementación del Código ZONDRES2D para la Modelación Directa e Inversa de Datos de Tomografía de Resistividad Eléctrica. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Earthimager 2D Advanced Geosciences Inc, 2009.
- Enciso-De la Vega, Salvador, 1992, Propuesta de nomenclatura estratigráfica para la cuenca de México. Universidad Nacional Autónoma de México, instituto de geología. Revista, volumen 10, número 1, p. 26-36.
- Gaceta oficial del Distrito Federal, 2008-2010, Programa Delegacional de Desarrollo Urbano en Azcapotzalco, No. 427
- Galán Huertos Emilio y Romero Baena Antonio, Contaminación de suelos por metales pesados. Macla. No. 10 noviembre 2008. revista de la sociedad española de mineralogía. *Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química*

Agrícola. Facultad de Química. Apartado 553. Universidad de Sevilla. Sevilla 41071

- Hernández Cervantes, O., 2007, Estudio de fracturamiento somero del subsuelo por métodos geofísicos en la Noria, delegación Xochimilco, Ciudad de México, Tesis de Licenciatura, México D. F., Facultad de Ingeniería UNAM., p.139.
- Kuras O., Beamish D., Meldrum P. I., and Ogilvy R. D., 2005, Fundamentals of the capacitive resistivity technique, *British Geological Survey, Kingsley Dunham Centre, Keyworth, Nottingham NG12 5GG, United Kingdom, 63p.*
- Loke M. H., 2001, Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys
- Loke, M. H., 2000. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys, 68 p.
- Loke, M. H., 2004, Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys
- López G. A., 2010, El método de Polarización Inducida Aplicada a Problemas en la Ciudad de México, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- López Velecela, F., 2013, Bioaccesibilidad del arsénico, cadmio, cobre, plomo y zinc en jales mineros y en suelos contaminados por residuos minero-metalúrgicos, Tesis de Maestría, Instituto de Geología, UNAM.
- Lowrie W., 2007. Fundamental of Geophysics. Cambridge, University Press. 381p.
- Lugo-Hubp, José; Mooser, Federico; Pérez-Vega, Azucena; y Zamorano-Orozco, Juan, 1994, Geomorfología de la sierra de Santa Catarina, D.F., México. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol.11, no. 1, p. 43-52.
- *Mapa correspondiente para la zona de estudio (Google maps, 2015)*
- *Mapa de elevaciones del DF (INEGI, 2010)*
- Menke, W., 1989, Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory. International Geophysics Series, v. 45, p.285.
- Milsom J., 2003, Field Geophysics: The Geological Field Guide Series, Wiley

Third Edition, England, 232p.

- NMX-AA-132-SCFI-2006: Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de muestras.
- NOM-127-SSA1-1994: Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- NOM-147-SERMANAT/SSA1-2004, que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo selenio, talio y/o vanadio.
- Orellana, E., 1982. Prospección geoelectrica en corriente continua. Paraninfo, Madrid, 523 p.
- Pérez Martínez, I., 2014, Uso de parámetros indirectos en la determinación de la contaminación de suelos por elementos potencialmente tóxicos en zonas minero-metalúrgicas, Tesis de Doctorado, Instituto de Geología, UNAM.
- Salas E. B., 2008, Determinación de Metales en Sedimentos y Lixiviados del Ex-Basurero a Cielo Abierto el Zapote, Tesis de Maestría en Tecnología Avanzada.
- Sánchez V. V., 2013. Estudio de Tomografía de Resistividad Eléctrica previo a una excavación arqueológica. Tesis de Licenciatura. México D.F.
- Seoáñez Calvo Mariano, 1999, Contaminación de suelo: Estudios, tratamiento y gestión, mundi-prensa.
- Servicio Geológico Mexicano, 2002, Carta Geológico-Minera, Ciudad de México, E14-2, Edo. de Méx., Tlax., D.F., Pue.,Hgo. y Mor. Primera Edición.
- Tarantola, A., 2005, Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation, Institut de Physique du Globe de Paris, Paris, France. P.358.
- Telford, W., Geldart, L., Sheriff, R., 1992, Applied Geophysics 2ª Edición, Cambridge University Press.
- Vargas García, D. 2015. Arreglos no convencionales de Tomografía de

Resistividad Eléctrica 3D. Tesis de Licenciatura. México D.F.

- Vences E. O., 2013, Adaptación de Datos de Sondeos Eléctricos Verticales para Obtener Imágenes Eléctricas 2D, Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Volke Sepúlveda, Tania, Tecnologías de remediación para suelos contaminados /Tania Volke Sepúlveda y Juan Antonio Velasco. México: INE-SEMARNAT, 2002, 64 pp.
- Zúñiga Lara, R. 2010. Detección de zonas de riesgo a lo largo del colector de drenaje de la Ciudad de Guatemala. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería. UNAM. 70 p.