



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**Caracterización electromagnética, una aplicación de la geofísica  
somera, Templo del Sol, Sogamoso (Boyacá)**

**Diana Paola Serralde Ordóñez**

**Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias  
Bogotá, Colombia**

**2011**



**Caracterización electromagnética, una aproximación as la  
geofísica somera, Templo del Sol, Sogamoso (Boyacá)**

**Diana Paola Serralde Ordóñez**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título  
de Magister en Ciencias – Geofísica

**Directora: MsC. Luz Amalia Ordóñez Burbano**

**Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias, Departamento de Geociencias  
Bogotá, Colombia**

**2011**



*A mi directora de este proyecto y de la vida ....*  
*A mi esposo por todo lo que es y me hace ser ....y*  
*A mi hermana por estar tan lejos y tan cerca .....*  
*Los amo inmensamente ...*

## Resumen

Este trabajo está enmarcado en el contexto de la Exploración Geofísica somera y es el resultado del análisis e interpretación de una tomografía electromagnética obtenida en las inmediaciones del Templo del Sol en Sogamoso Boyacá, con el sistema de adquisición *Profiler EMP 400*. Comprende un análisis de las propiedades eléctricas y magnéticas del medio, con el fin de establecer modelos de distribución de la susceptibilidad magnética y conductividad eléctrica a tres niveles de profundidad, asociados a las frecuencias de adquisición y la injerencia de estos en los contornos de la reserva arqueológica del Templo del Sol. Para esto se analizaron las series de datos obtenidas a frecuencias entre los 1 y 15 KHz, encontrando anomalías electromagnéticas que van desde la profundidad alcanzado la superficie, con centro ubicado a una profundidad aproximada de 3.4 metros y localizado alrededor de las coordenadas 5° 42' 31.35" Latitud Norte y 72° 55' 23.23" Latitud Este. Mediante el desarrollo se logró diseñar y ejecutar una metodología completa de filtro, procesamiento, análisis e interpretación de los métodos electromagnéticos en el dominio de la frecuencia.

## Abstract

This work is framed within the context of Shallow Geophysics Exploration and it is the result of an electromagnetic analysis of the acquired data in the vicinity of the "El Templo del Sol" in Sogamoso (Boyacá), it includes a complete analysis of electrical and magnetic properties of half-space, in order to establish distribution patterns of magnetic susceptibility and electrical conductivity to three depth levels associated with different acquired frequencies and its influence in the archeological reserve. In order to analyze the data series obtained with the equipment *Profiler EMP 400*, we found anomalies that come from deep to surface, that has a center approximately at a 3.4 meters depth and is located around the 5° 42' 31.35" North and 72° 55' 23.23" West. These works allow us to develop a complete methodology to filter, process, analyze and interpret electromagnetic methods in the frequency domain.

**Contenido**

|  | <b>pág.</b> |
|--|-------------|
| <b>RESUMEN</b>   | <b>VI</b>   |
| <b>Lista de Figuras</b>  | <b>X</b>    |
| <b>INTRODUCCIÓN</b>  | <b>1</b>    |
| <br>   |             |
| <b>1. CONTEXTO TEÓRICO</b>   | <b>8</b>    |
| 1.1. Ecuaciones de Maxwell   | 9           |
| 1.2. Ecuación de onda  | 13          |
| 1.3. Dirección de propagación de las ondas electromagnéticas   | 16          |
| 1.4. Propiedades electromagnéticas de los medios materiales  | 17          |
| <br>   |             |
| <b>2. METODOS ELECTROMAGNÉTICOS (MEM)</b>  | <b>26</b>   |
| 2.1. Aspectos generales de los MEM   | 26          |
| 2.1.1 Métodos electromagnéticos inductivos   | 29          |
| 2.2. Métodos electromagnéticos de fuente controlada  | 32          |
| 2.2.1 Método Slingram  | 34          |
| 2.3 Régimen a bajo número de inducción, aproximación casi estacionaria                               | 39          |
| 2.3.1 Conductividad eléctrica a bajos número de inducción (LIN FEM)                                  | 39          |
| 2.3.2 Aproximación casi estacionaria   | 49          |
| 2.4 Aproximaciones metodológicas de interpretación de registros EM<br>en el dominio de la frecuencia | 53          |
| <br>   |             |
| <b>3. DESCRIPCIÓN DEL LEVANTAMIENTO</b>  | <b>57</b>   |
| 3.1. Equipo de adquisición " <i>Profiler EMP 400</i> "   | 57          |
| 3.2. Descripción de las estaciones o puntos de observación   | 61          |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.3. Mapas de conductividad y susceptibilidad   | 64        |
| 3.3.1. Mapas de conductividad y susceptibilidad por frecuencias                                   | 64        |
| 3.3.2. Mapas de conductividad y susceptibilidad por frecuencia<br>de los cuadrantes seleccionados | 67        |
| <b>4. ANÁLISIS E ENTERPRETACIÓN</b>   | <b>71</b> |
| 4.1. Análisis de la información   | 71        |
| 4.2. Análisis de mapas  | 72        |
| 4.2.1. Análisis de mapas por frecuencia   | 72        |
| 4.2.2. Análisis de mapas de cuadrantes por frecuencia   | 74        |
| 4.3 Análisis detallado unidimensional   | 77        |
| 4.3.1 Correlación conductividad- susceptibilidad en profundidad                                   | 77        |
| 4.3.2 Calicateo electromagnético  | 79        |
| 4.4 Síntesis del proceso de análisis e interpretación del levantamiento<br>Electromagnético       | 83        |
| <b>5. CONCLUSIONES</b>  | <b>82</b> |
| <b>ANEXOS</b>   | <b>85</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b>   | <b>88</b> |

---

| <b>Lista de Figuras</b>  | <b>pag.</b> |
|--|-------------|
| <b>Figura. I.1.</b> Área de estudio  | 7           |
| <b>Figura 1.1.</b> Ilustración de los Modos Transversal electromagnético (TEM); Transversal eléctrico (TE) y Transversal magnético (TM).                     | 17          |
| <b>Figura 1.2</b> Ilustración de las componentes vectoriales de la resistividad, en un medio anisótropo  | 19          |
| <b>Figura 1.3</b> Representación de la distribución de momentos magnéticos atómicos en medios materiales.  | 20          |
| <b>Figura 1.4</b> Representación esquemática de un condensador   | 24          |
| <b>Figura 1.5</b> Representación de la polarización de dieléctricos sólidos  | 24          |
| <b>Figura 2.1</b> Representación esquemática del comportamiento de la Tierra como un circuito eléctrico  | 31          |
| <b>Figura 2.2</b> Representación de los distintos circuitos emisores   | 32          |
| <b>Figura 2.3</b> Representación esquemática del sistema de adquisición del método Slingram  | 35          |
| <b>Figura 2.4</b> Representación esquemática de la interacción de los campos electromagnéticos primario y secundario   | 37          |
| <b>Figura 2.5</b> Representación del sistema de adquisición <i>Dipolo-dipolo</i> , en configuraciones vertical y horizontal                                  | 38          |
| <b>Figura 2.6</b> Representación de la atenuación de la onda incidente en superficie con la profundidad  | 41          |
| <b>Figura 2.7</b> Representación esquemática del comportamiento conductivo del terreno y las direcciones de los campos primario y secundario en el receptor. | 45          |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 2.8</b> Componentes del campo magnético total, perpendicular y paralela, a la espira receptora      | 45 |
| <b>Figura 2.9.</b> Esquema representativo de la relación entre la frecuencia y profundidad de penetración     | 55 |
| <b>Figura 3.1</b> Equipo de adquisición <i>Profiler EMP 400</i>   | 58 |
| <b>Figura 3.2</b> Datos originales importados a Microsoft Excel para tres frecuencias tomadas simultáneamente | 60 |
| <b>Figura 3.3</b> Delimitación de las zonas del levantamiento de la información                               | 63 |
| <b>Figura 3.4</b> Mapas de Conductividad y Susceptibilidad a 1 KHz  | 65 |
| <b>Figura 3.5</b> Mapas de Conductividad y Susceptibilidad a 9 KHz  | 66 |
| <b>Figura 3.6</b> Mapas de Conductividad y Susceptibilidad a 14 KHz   | 66 |
| <b>Figura 3.7</b> Mapas de Conductividad cuadrante seleccionado para análisis detallado a 1, 9 y 14 KHz       | 68 |
| <b>Figura 3.8</b> Mapas de Susceptibilidad cuadrante seleccionado para análisis detallado a 1, 9 y 14 KHz     | 68 |
| <b>Figura 3.9</b> Cortes transversales de los cuadrantes y frecuencias seleccionadas, conductividad           | 69 |
| <b>Figura 3.10</b> Cortes transversales de los cuadrantes y frecuencias seleccionadas, susceptibilidad        | 70 |
| <b>Figura 4.1</b> Mapa de conductividad a 15 KHz  | 73 |
| <b>Figura 4.2</b> Mapas vectoriales de conductividad y susceptibilidad a las tres frecuencias                 | 76 |
| <b>Figura 4.3</b> Correlación en profundidad de la conductividad y susceptibilidad magnética                  | 78 |
| <b>Figura 4.4</b> Sondeo electromagnético para calicateo resistivo  | 79 |

---

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 4.5</b> Seudo-sección electromagnética de resistividad aparente y susceptibilidad constante. | 79 |
| <b>Figura 4.6</b> Mapa de resistividad aparente a frecuencia de 9KHz.                                  | 80 |
| <b>Figura 4.7</b> Ubicación geográfica aproximada del centro de la anomalía                            | 81 |
| <b>Figura 4.8</b> Síntesis del proceso de análisis de la información                                   | 82 |

## **Introducción**

Este trabajo corresponde al desarrollo de los objetivos planteados en el proyecto de tesis, cuya propuesta general, fue la elaboración de modelos de distribución de la susceptibilidad magnética y conductividad eléctrica, a tres niveles de profundidad asociados a las frecuencias de adquisición, mediante la aplicación del método electromagnético inductivo denominado Slingram e inferir sobre los contornos de la reserva arqueológica del Templo del Sol a partir del análisis e interpretación de la tomografía electromagnética adquirida.

La metodología general corresponde a la interpretación de mapas y perfiles de susceptibilidad magnética y conductividad eléctrica a distintas frecuencias asociadas a diferentes profundidades, de cuyo análisis e interpretación se infiere una imagen aproximada del área afectada por la reserva arqueológica.

Este trabajo se fundamenta en la Exploración Geofísica Somera, identificada por varios autores como Geofísica Ambiental, la cual en los últimos años ha cobrado gran importancia dentro del estudio de las Ciencias de la Tierra, por el gran interés que despierta el abordaje de problemas de orden ambiental, mediante técnicas eficientes, como para la determinación de plumas contaminantes, aplicaciones ingenieriles como la caracterización del medio, para el establecimiento de obras civiles y problemas arqueológicos como la localización de reservas. La geofísica somera, propende por una solución a este tipo de estudios mediante procedimientos no invasivos, participando en la identificación de problemas (diagnóstico) y mediante la elaboración de modelos cualitativos y cuantitativos de

imágenes del medio, proponer alternativas de solución, para lo cual no solo adopta nuevas técnicas sino que adapta métodos geofísicos convencionales con el fin de dar respuesta a estas problemáticas convirtiéndose en una alternativa novedosa, rentable y eficiente. (Reynolds, J. M., 1997)

La geofísica somera, se caracteriza por que la profundidad de investigación es acotada al Geosuelo<sup>1</sup>, es decir a profundidades menores, que van desde los centímetros hasta los centenares de metros (Whitten D., y Brooks, J., 1972). Las distintas técnicas de caracterización del medio somero, entre ellas los análisis de distribución de las propiedades electromagnéticas, se complementan entre sí de forma eficiente, con una relación costo beneficio equilibrada, ya que estas técnicas multidisciplinarias permiten plantear soluciones rápidas y efectivas a problemas complejos, esto es dependientes de gran número de variables y parámetros, que incluyen tanto propiedades del material sólido, como de los fluidos y grados de saturación.

Teniendo en cuenta los recientes avances de esta aplicación de la Geofísica, son varios los métodos que se han empleado para el análisis de fenómenos que tienen lugar a poca profundidad, entre los que se encuentra los métodos geolétricos 2D, 3D y 4D, los de polarización inducida y los de potencial espontáneo, que son una

---

<sup>1</sup> Geosuelo (Suelo): Considerado por los geólogos como la acumulación de material meteorizado, no consolidado que cubre gran parte de la superficie terrestre, hasta una profundidad que oscila entre los centímetros y centenares de metros. Entre el suelo y la roca firme existe una zona de roca diseminada y/o parcialmente meteorizada (el subsuelo), el término "regolito", que se refiere al manto superficial poco firme de fragmentos de roca, suelo, arena eólica, aluviones, cenizas volcánicas etc. es adecuado para abarcar tanto el suelo como el subsuelo (Whitten D., y Brooks, J., 1972).

herramienta útil para establecer el grado de penetración de fluidos contaminantes o no, en los poros de las rocas.

En términos generales, entre los métodos geofísicos utilizados para los propósitos de la geofísica somera, los más utilizados son la refracción sísmica, la geoelectrica y aunque en menor proporción los métodos electromagnéticos inductivos.

La sísmica de refracción resulta conveniente ya que por la metodología, sistemas de adquisición y relación fuente-receptor permiten abarcar más extensión que profundidad, a diferencia de la sísmica de reflexión más conveniente y utilizada en otros campos de interés de la Geofísica como la prospección de recursos energéticos del subsuelo. Los métodos resistivos o geoelectricos, los cuales presentan la mayor cantidad de trabajos reportados, favorecidos por los bajos costos comparativos de sistemas de adquisición, aunque limitados en precisión por su carácter galvánico y en efectividad por la complejidad del levantamiento que exige el contacto directo entre los electrodos y el terreno, además bajo las mismas condiciones instrumentales, aunque en menor cantidad de trabajos reportados, se usan los métodos de potencial, limitados por la posibilidad de elaborar modelos cuantitativos, permitiendo inferir sobre tendencias de la dirección de los fluidos generadores de corrientes iónicas. También se encuentran los métodos electromagnéticos inductivos, que involucran técnicas más recientes debidas al avance en la generación de equipos de adquisición y técnicas de análisis, que superan la complejidad de los levantamientos y la necesidad de contacto directo con la superficie aunque limitados por la determinación de su alcance en profundidad, razones por las cuales se ha generado el interés de su aplicación a estudios someros bajo condiciones de adquisición de fuente

controlada y adquisición en el dominio de la frecuencia, e incluso a algunos miles de metros de profundidad como la magnetotélrica. (Ortega, 1985, Rodríguez y otros, 1975)

Bajo esta perspectiva, en este trabajo se presentan los fundamentos que sustentan los métodos de inducción electromagnética, específicamente los de configuración “*Loop-Loop*” (*Dipolo-dipolo*) con distancia de separación constante, método denominado Slingram, cuyas metodologías de adquisición superan el factor galvánico de los métodos resistivos, y cuyo proceso e interpretación, permiten dar respuesta a la localización del área afectada por la reserva arqueológica del templo del Sol, objeto de estudio de este trabajo, mediante la inferencia sobre los contornos de los contrastes de las características electromagnéticas asociadas a la reserva.

Esta reserva ubicada en el Museo Arqueológico de Sogamoso, se construyó en 1952 sobre los restos del lugar donde se considera se encontraba el Templo del Sol en el siglo XVI, lugar construido por los Muisca como santuario de adoración al sol y albergue de numerosas riquezas almacenadas por los indígenas y propiedades del Cacique *Suamox*. Con el fin de encontrar el área afectada por la reserva, mediante contrastes de características electromagnéticas del medio, la información adquirida abarca una extensión de aproximadamente 500 m<sup>2</sup>, alrededor de las coordenadas 5° 70' 85.07" N, 72° 92' 26.33" y a una altitud media de 2541 m.s.n.m.

Para este estudio, se cuenta con los registros electromagnéticos obtenidos en el área, con el sistema de última generación *Profiler EMP 400*, que genera información en el dominio de la frecuencia; ésta contiene alrededor de 20000 datos correspondientes a registros de susceptibilidad magnética y conductividad eléctrica obtenidos simultáneamente a combinaciones de tres frecuencias entre los 1000 Hz y los 14000 Hz. La información original fue cedida por el profesor Ramiro Díaz Campos, a quien se agradece además el aporte de material bibliográfico para el desarrollo del trabajo.

El método, corresponde a la determinación de las variaciones espaciales de la conductividad eléctrica y la susceptibilidad magnética en el entorno de medios ilimitados espacialmente en extensión y profundidad, bajo la aproximación de la solución de la ecuación de onda plana y por la dirección relativa de las componentes del campo electromagnético, modo **TEM** (Transversal Electromagnético) que permite asociar los campos eléctrico **E** y magnético **H**, ambos transversales a la dirección de propagación en medios homogéneos y relacionarlos con las medidas de fase y cuadratura respectivamente.

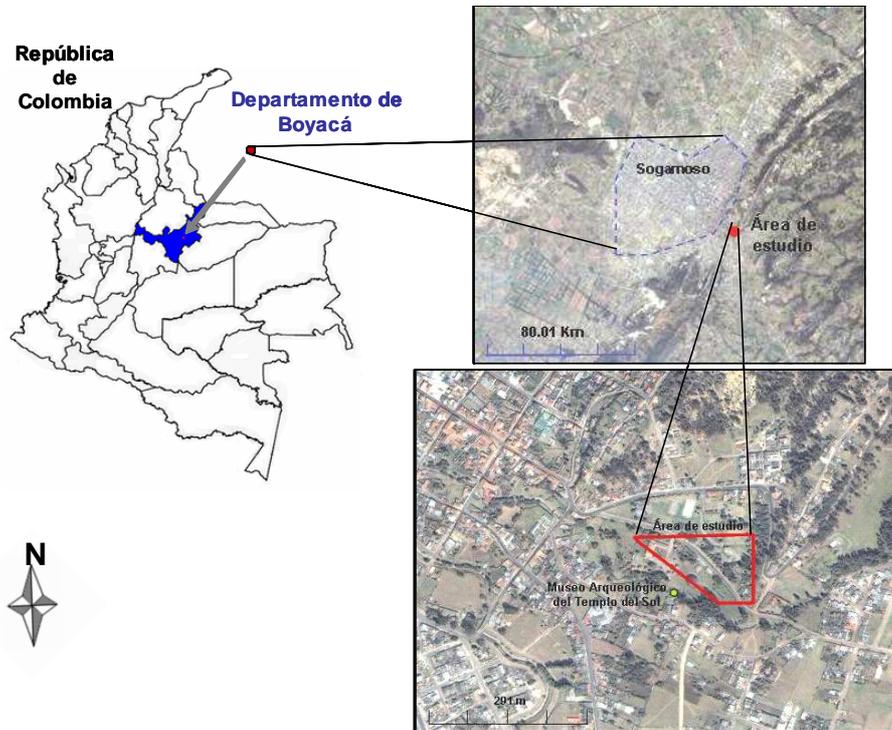
En este documento se presentan los fundamentos teóricos básicos que sustentan la aplicación del método, la descripción de las metodologías del levantamiento proceso e interpretación de la información, el análisis de la misma y los modelos de distribución de la conductividad y susceptibilidad asociados al objeto de interés; unas conclusiones generales del trabajo realizado y la bibliografía referenciada.

De acuerdo con esto en los dos primeros capítulos de este documento, se presentan los fundamentos teóricos básicos de los métodos electromagnéticos en

el dominio de la frecuencia mediante una descripción de las ecuaciones de Maxwell y las relaciones constitutivas, además de la aproximación de onda plana para la transmisión de las ondas electromagnéticas en medios materiales y su aplicación en los métodos electromagnéticos (MEM).

En los capítulos subsiguientes se presenta la descripción del levantamiento de la información, su análisis e interpretación, iniciando con la descripción del equipo de adquisición, la localización de los puntos donde se tomaron las series de datos, y los modelos de distribución de la susceptibilidad magnética y conductividad eléctrica a tres niveles de profundidad.

Como medida preliminar para el análisis de la información electromagnética levantada es importante aclarar que la información adquirida sobre el área de estudio, corresponde a un intento por establecer dentro de las inmediaciones del Templo del Sol, el lugar donde se presume puede estar ubicada la reserva arqueológica, es decir que el gran volumen de información colectada corresponde a un estudio exploratorio para determinar la zona afectada por las actividades antrópicas que tuvieron lugar en los dominios del Cacique *Suamox*, en el siglo XVI cuando la cultura Muisca dominaba esta región del país, hoy conocida como el Departamento de Boyacá, en la Figura I.1 se presenta la ubicación aproximada del área de estudio.



**Figura I.1** Ubicación del área de estudio. Las fotografías satelitales presentadas fueron obtenidas del programa *Google Earth* y el área de estudio fue determinada ubicando las coordenadas sobre las mismas.

Como se muestra en la imagen de la anterior figura, el área de estudio se encuentra por fuera de la zona urbana del Municipio de Sogamoso (delimitado por línea azul punteada), aunque hace parte del territorio municipal que de acuerdo con la información litológica de municipio esta ubicado sobre depósitos aluviales, tiene un régimen de precipitación anual bajo, entre 500 y 1000 mm anuales y sus suelos son desarrollados en áreas depresionales.

## **1. Contexto teórico**

En este capítulo, se presentan en términos descriptivos, las ecuaciones de Maxwell, y los fundamentos teóricos básicos que sustenta la aplicación de los métodos electromagnéticos - MEM, particularmente los referentes al trabajo desarrollado, métodos de inducción electromagnética de fuente controlada, de cuyas observaciones es posible inferir una imagen del terreno.

Indudablemente, la complejidad del comportamiento electromagnético de la materia, ha sido objeto de estudio a lo largo de la historia y exigido en diversas aplicaciones tecnológicas y técnicas. En el contexto de la geofísica, el tema es tratado en textos y publicaciones clásicas como Orellana E., 1974; Blakely R., 1995.

Las notas que se presentan a continuación, de forma descriptiva, corresponden al reconocimiento de la importancia que tiene la comprensión de los fundamentos electromagnéticos que soportan la aplicación de los mismos a problemas reales, dado que estos mantienen su carácter estable, mientras que las técnicas son de rápida sustitución, dado el continuo avance en la evolución de los procesos de adquisición.

## 1.1 Ecuaciones de Maxwell <sup>2</sup>

El fundamento teórico de los métodos electromagnéticos lo constituye la determinación del comportamiento espacio-temporal del campo electromagnético en medios materiales. El campo electromagnético es conformado por cuatro componentes vectoriales y sus relaciones: el campo eléctrico (**E**), la inducción magnética (**B**), el desplazamiento dieléctrico (**D**) y la intensidad del campo magnético (**H**).

De los modelos físicos y matemáticos que ligan las componentes del campo se obtiene un sistema de ecuaciones diferenciales, ecuaciones de Maxwell, que pueden expresarse de forma diferencial, de forma integral, en el dominio del espacio o en el dominio de la frecuencia.

Las ecuaciones de Maxwell, conforman un sistema de cuatro ecuaciones vectoriales, que sintetizan las leyes básicas del electromagnetismo obtenidas como resultado de hechos experimentales que en forma diferencial y en el Sistema Internacional - SI de unidades son:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad [1.1]$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad [1.2]$$

---

<sup>2</sup> Las notas expuestas son extraídas de diferentes textos y de las clases de la maestría correspondientes al tema, se omiten las referencias precisas ya que la organización del contenido y el nivel de la descripción del tema se realiza tratando de hacer una aproximación clara a los fundamentos teóricos evitando, hasta donde es posible, formulaciones cuya complejidad excede los propósitos del trabajo.

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_c \quad [1.3]$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad [1.4]$$

Para ligar esta formulación, planteada en el vacío, con las propiedades electromagnéticas de medios materiales, el sistema de ecuaciones se complementa con las denominadas relaciones constitutivas (Ecuaciones 1.5, 1.6 y 1.7) y la ley de conservación de la carga eléctrica, que para el vacío significa ausencia de carga neta y para medios materiales implica que su variación temporal genera una corriente eléctrica (Ecuación 1.8)

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad [1.5]$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad [1.6]$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad [1.7]$$

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

En donde las componentes del campo y sus unidades en el SI son:  $\mathbf{E}$  (V/m), vector intensidad del campo eléctrico;  $\mathbf{D}$  (C/m<sup>2</sup>), vector intensidad del flujo eléctrico;  $\mathbf{H}$  (A/m) vector intensidad del campo magnético y  $\mathbf{B}$  (Wb/m<sup>2</sup> o Tesla), el vector densidad del flujo magnético. La caracterización electromagnética del medio es dada por  $\sigma$  (S/m), que es la conductividad eléctrica (inversa de la resistividad  $\rho$  ( $\Omega m$ ) =  $1/\sigma$ );  $\epsilon$  (F/m) es la constante dieléctrica y  $\mu$  (H/m) la permeabilidad magnética. En la ley de conservación de la carga  $\mathbf{J}$  (A/m<sup>2</sup>) es el vector densidad de corriente y  $\rho$  (C/m<sup>3</sup>) la distribución o densidad de la carga eléctrica.

Así pues, la caracterización electromagnética de un medio, particularmente de las rocas o sedimentos no consolidados, es determinada por el valor absoluto o contrastes en la distribución espacial de todas o algunas de sus propiedades electromagnéticas, lo que conforma el fundamento de los métodos electromagnéticos, cuyo objetivo general es la determinación de contrastes electromagnéticos y/o anomalías generadas por regiones conductoras en medios resistivos o al contrario aislantes en medios conductores, que a la vez mantienen relaciones con medios dieléctricos con mayor o menor grado o posibilidad de polarizarse naturalmente o por la acción de campos externos y contrastes de susceptibilidad magnética asociada a la permeabilidad magnética.

Las ecuaciones de Maxwell en el dominio de la frecuencia, que fundamentan la aplicación de los MEM, y corresponden al modo de operación del sistema de adquisición empleado para el desarrollo de este trabajo, pueden obtenerse considerando campos oscilantes en el tiempo, mediante oscilaciones de forma sinusoidal o lo que resulta equivalente aplicando la Transformada de Fourier a las ecuaciones en el dominio espacio-tiempo, de lo que se obtienen relaciones complejas, que en forma diferencial se expresan en las siguientes ecuaciones:

$$\nabla \cdot \vec{D}(r, \omega) = \rho(r, \omega) \quad [1.9]$$

$$\nabla \times \vec{E}(r, \omega) + i\omega \vec{B}(r, \omega) = 0 \quad [1.10]$$

$$\nabla \cdot \vec{B}(r, \omega) = 0 \quad [1.11]$$

$$\nabla \times \vec{H}(r, \omega) - i\omega \vec{D}(r, \omega) = \vec{J}(r, \omega) \quad [1.11]$$

Las consecuentes relaciones constitutivas (Ecuaciones 1.13, 1.14 y 1.15) se transforman en el dominio de la frecuencia, bien sea considerando la respuesta del medio a la acción de campos oscilantes o matemáticamente mediante la descomposición espectral o análisis de Fourier.

$$\vec{D}(\vec{r}, \omega) = \epsilon\omega\vec{E}(\vec{r}, \omega) \quad [1.13]$$

$$\vec{J}(\vec{r}, \omega) = \sigma\omega\vec{E}(\vec{r}, \omega) \quad [1.14]$$

$$\vec{B}(\vec{r}, \omega) = \mu\omega\vec{H}(\vec{r}, \omega) \quad [1.15]$$

Del las ecuaciones de Maxwell y las relaciones constitutivas en el dominio de la frecuencia, conviene resaltar algunos aspectos inherentes a su aplicación a los MEM, particularmente a los que se expresan en el dominio de la frecuencia tanto para fuentes naturales como para fuentes controladas o artefactos.

Entre las mencionadas consideraciones se destacan:

- Los componentes vectoriales dependen de la posición o punto de observación y de la frecuencia  $(\vec{r}, \omega)$ .
- Las expresiones de las ecuaciones de Maxwell se expresan en términos complejos.

- Las derivadas temporales en las ecuaciones formuladas en el dominio espacio-tiempo (Ecuaciones 1.1 a 1.7), se transforman en productos.
- De las relaciones entre las componentes del campo y las propiedades electromagnéticas, se infiere que las características electromagnéticas dependen de alguna manera de la frecuencia de oscilación de las componentes del campo.

## 1.2 Ecuación de onda

De las ecuaciones de Maxwell, mediante operaciones vectoriales de las componentes del campo, se obtienen las ecuaciones de transmisión de las componentes eléctrica y magnética del campo electromagnético, denominadas ecuaciones del telégrafo, que se expresan para cada una de las componentes como un sistema de ecuaciones de la forma:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \varepsilon \left[ \frac{\sigma}{\varepsilon} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \right] = 0 \quad [1.16]$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu \varepsilon \left[ \frac{\sigma}{\varepsilon} \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \right] = 0 \quad [1.17]$$

La solución o soluciones de este sistema de ecuaciones depende de las condiciones específicas a tratar, esto es, no hay una solución general, sin embargo, asumiendo algunas condiciones que implican aproximaciones, es

posible expresar en forma general el comportamiento de las componentes magnética y eléctrica del campo.

Entonces, considerando un medio lineal, homogéneo e isótropo y bajo la aproximación de ondas planas, condiciones que resultan convenientes para el propósito de su aplicación en MEM, se tienen ecuaciones armónicas que corresponden al modelo de ecuación de onda, expresiones [1.18 a y b], cuyas soluciones para las magnitudes de las componentes magnética y eléctrica, expresadas en forma compleja son dadas en la expresión [1.19].

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu\epsilon \left[ \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \right] = 0 \quad [1.18 \text{ a}]$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu\epsilon \left[ \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \right] = 0 \quad [1.18 \text{ b}]$$

El significado más general de estas ecuaciones, es que, en ausencia de fuentes internas en una región de un medio lineal, homogéneo e isótropo el comportamiento de las componentes del campo es de tipo armónico, cuya solución más general es dada en [1.19].

$$\begin{aligned} H &= H_0 e^{i(\omega t - \gamma_z z)} \\ E &= E_0 e^{i(\omega t - \gamma_z z)} \end{aligned} \quad [1.19]$$

El primer factor de la exponencial expresa el comportamiento armónico del campo relacionado con la frecuencia ( $\omega$ ), y el segundo es un factor de decaimiento exponencial a lo largo de la dirección de propagación o transmisión del campo, desde el punto de localización de la fuente hasta el punto  $\mathbf{z}$ , el parámetro ( $\gamma z$ ) denominado **coeficiente de atenuación**, resulta ser expresión del medio de propagación y como tal, involucra características electromagnéticas del medio, en términos de su capacidad de responder a la acción del campo.

El coeficiente de atenuación conocido también como constante de propagación, representa el número de onda y resulta ser muy importante en la teoría de los MEM de campos variables. Es una cantidad compleja que involucra las propiedades electromagnéticas del medio y a pesar de su designación no es estrictamente constante porque depende de la frecuencia, sus expresiones en términos operacionales están dadas en las ecuaciones [1.20, 1.21 y 1.22].

$$\gamma = a + bi \quad [1.20]$$

$$a = \frac{1}{\sqrt{2}}(\omega\mu)^{1/2} \left[ (\varepsilon^2 \omega^2 + \sigma^2)^{1/2} + \varepsilon\omega \right]^{1/2} \quad [1.21]$$

$$b = \frac{1}{\sqrt{2}}(\omega\mu)^{1/2} \left[ (\varepsilon^2 \omega^2 + \sigma^2)^{1/2} - \varepsilon\omega \right]^{1/2} \quad [1.22]$$

La ecuación [1.20] representa el carácter complejo, y las dos siguientes las componentes real e imaginaria respectivamente, que como se mencionó antes depende de la frecuencia del campo oscilante, esto es de la frecuencia del sistema de operación y de las propiedades del medio, su importancia radica para la aplicación de los métodos MEM, en que de su valor se obtiene la relación entre el

sistema de adquisición y las propiedades del medio que involucran la capacidad de su respuesta a la acción del campo incidente.

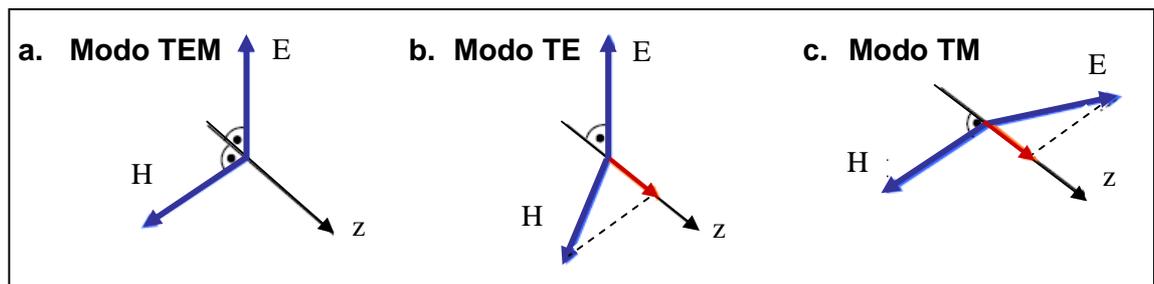
### 1.3 Dirección de propagación de las ondas electromagnéticas

En el vacío y en medios ilimitados, las soluciones de las ecuaciones de Maxwell son ondas electromagnéticas **transversales**, es decir, ambos campos **E** y **H** son perpendiculares a la dirección de propagación y perpendiculares entre sí.

Para la propagación en espacios limitados, no es posible describir los campos como funciones de una única coordenada por la existencia de condiciones de contorno que imponen las fronteras del recinto, entonces existen otras posibilidades en las cuales uno o los dos campos tienen componentes en la dirección de propagación, lo que fundamenta la inclusión de mediciones en fase y cuadratura, esto es en términos de las componentes real e imaginaria del campo electromagnético.

Convencionalmente se llama **modo TEM** (Transversal Electro Magnético) a la situación donde los dos campos son transversales a la dirección de propagación (**z**); **modo TE** (Transversal Eléctrico) cuando sólo el campo eléctrico es transversal y **modo TM** (Transversal Magnético) cuando sólo el campo magnético es transversal. Se puede demostrar que cualquier tipo de propagación se puede resolver como la superposición de un modo TE y un modo TM, lo que se ilustra en

la Figura 1.1 (Fernández, 2004) y resulta de interés para definir los alcances de las observaciones en terreno.



**Figura 1.1** En **a.** modo transversal electromagnético TEM, los vectores  $H$  y  $E$  y la dirección de propagación  $z$  son ortogonales; **b.** modo transversal eléctrico  $E$  es perpendicular a  $z$  y  $H$  toma distintas direcciones; y **c** modo transversal magnético,  $H$  es normal a la dirección de propagación y  $E$  es de dirección variable.

Atendiendo a las condiciones y aproximaciones expuestas, en geofísica, los MEM, de acuerdo a su propósito y de ello al diseño de distintas configuraciones de sistemas de adquisición, dan lugar a una gran diversidad de métodos y de ello la determinación de las variables o parámetros electromagnéticos observados en superficie, que corresponden a la respuesta de la sub-superficie a la acción de una fuente generadora de ondas electromagnéticas.

#### 1.4 Propiedades electromagnéticas de los medios materiales

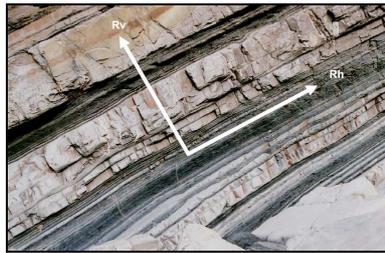
La caracterización electromagnética de un medio consiste en medir o inferir la distribución espacial de todos o algunos de los parámetros involucrados en las ecuaciones de Maxwell, esto es básicamente, elaborar modelos de distribución de las propiedades de los medios materiales dependientes de varios factores, entre

estos algunos considerados de carácter intrínseco del medio como su constitución y otros dependientes de condiciones referentes al ambiente, tales como: la temperatura, la presión, el grado de compactación etc., relaciones que manifiestan la complejidad de generar modelos representativos sin hacer aproximaciones tales como linealidad, homogeneidad e isotropía, dependiendo de los intereses particulares a analizar.

De la Ley de Ohm, que relaciona la densidad de corriente con el campo eléctrico a través de la conductividad eléctrica ( $\sigma$ ) y de las ecuaciones de Maxwell en medios materiales que relacionan las componentes del campo se definen las propiedades electromagnéticas del medio. Así, el vector desplazamiento  $D$  y el vector del campo eléctrico  $E$  se relacionan a través de la permitividad eléctrica ( $\epsilon$ ) y la relación de la inducción magnética  $B$ , con el vector del campo magnético  $H$ , es la permeabilidad magnética ( $\mu$ ).

La conductividad eléctrica, entendida como una propiedad de los materiales para permitir el paso de la corriente eléctrica, permite clasificar los materiales en conductores, aislantes y semiconductores. De esta clasificación se consideran básicamente dos tipos de conducción: la conducción electrónica, que ocurre por el transporte de electrones libres y se da en los metales, y la conducción iónica o transporte de iones que corresponde a la circulación de electrolitos sólidos o fluidos, que predomina en los medios rocosos y sedimentos no consolidados. La conductividad eléctrica en el SI, se mide en Siemens por metro ( $S/m$ ) y su inverso la resistividad en *Ohmio-m* ( $\Omega\cdot m$ ). Para medios isótropos y homogéneos resulta ser una cantidad escalar y en caso contrario, como se ilustra en la Figura 1.2, es necesario considerarla como una cantidad vectorial. De las relaciones constitutivas

se deduce que ésta es una propiedad que se manifiesta bajo la acción tanto de campos oscilantes como de campos estacionarios.



**Figura 1.2** Ilustración de las componentes vectoriales de la resistividad, en un medio anisótropo.

Como se mencionó, la permeabilidad magnética y la permitividad eléctrica o constante dieléctrica de medios materiales, bajo las aproximaciones de homogeneidad e isotropía, resultan ser magnitudes escalares, en caso contrario tensoriales, éstas son dadas en términos de las correspondientes al vacío,  $\epsilon_0$  y  $\mu_0$  cuyos valores están bien establecidos y en medios materiales:  $\epsilon = k_\epsilon \epsilon_0$ ;  $\mu = k_m \mu_0$ , siendo  $k_\epsilon$  y  $k_m$  los coeficientes de inducción eléctrica y magnética respectivamente, cuyos valores son características del medio .

La permeabilidad constante  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ , es referida por organizaciones de estándares internacionales como una constante física fundamental, **Constante Magnética**, aclaración que evita considerar el significado de los términos o conceptos de vacío y sus propiedades, ya que su valor es definido teóricamente y no es el resultado de su medida experimental. En la práctica, la permeabilidad es generalmente una función de la frecuencia y bajo condiciones de inducción oscilante en el tiempo, ésta puede ser un valor complejo, correspondiendo a respuestas en fase y fuera de fase, con respecto al campo inductor, lo que hace

que sus mediciones en la aplicación de los MEM sea un valor relativo y no absoluto.

El magnetismo de materiales o de medios materiales, consiste en la distribución de momentos magnéticos atómicos, ilustrado en la Figura 1.3, cuya contribución al momento magnético total puede describirse desde el punto de vista macroscópico, como una densidad de momentos magnéticos por unidad de volumen, llamada Magnetización ( $\vec{M}$ ). La susceptibilidad magnética ( $\chi$ ), cantidad adimensional que en una primera aproximación, puede entenderse como la capacidad de un material de imantarse bajo la acción de un campo magnético externo ( $\vec{H}$ ) y la permeabilidad magnética ( $\mu$ ) están relacionadas por:

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad [1.23]$$

$$\chi = \frac{\mu}{\mu_0} - 1 \quad [1.24]$$

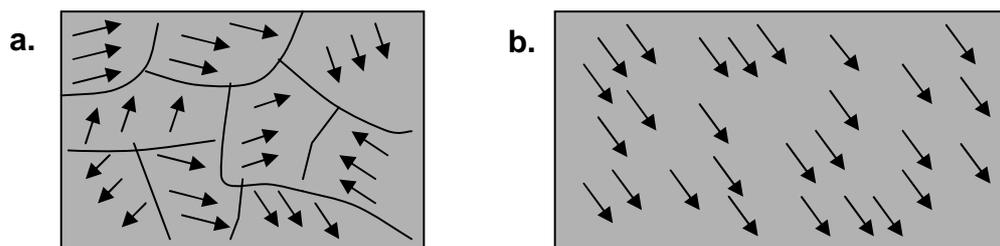


Figura 1.3 **a.** Representación de dominios magnéticos orientados en forma aleatoria  
**b.** orientación uniforme, determinada por la dirección del campo externo y la respuesta del medio.

La orientación preferencial de los dominios magnéticos, resulta de considerar el comportamiento de un medio conformado por un número grande de átomos o moléculas bajo la acción de un campo magnético externo. El campo magnético, ejerce una acción orientadora de los momentos magnéticos de los átomos, que tiende a orientarlos en la dirección del campo; por otra parte, el movimiento térmico, desorganiza la tendencia a su distribución regular y como resultado de la concurrencia de los dos procesos se establece una distribución media de las orientaciones de los momentos magnéticos, respecto a la dirección del campo magnético. A esta distribución media de la orientación de los momentos magnéticos elementales corresponde el momento magnético medio del material, admitiendo que no existe interacción entre los momentos magnéticos elementales de modo que cada cual se orienta libremente.

Dependiendo del signo de la relación de las magnitudes del momento magnético del medio ( $\mathbf{M}$ ) y del campo magnético ( $\mathbf{H}$ ), que define la susceptibilidad magnética ( $\chi_m$ ), los materiales naturales o construidos se clasifican en diamagnéticos ( $\chi_m < 0$ ) y paramagnéticos ( $\chi_m > 0$ ); además de éstos existe el grupo de los materiales ferromagnéticos, en los que la susceptibilidad magnética es muy grande y depende sensiblemente del campo magnético externo.

La permitividad eléctrica o constante dieléctrica es una cantidad física que describe cómo el campo eléctrico afecta y es afectado por un medio dieléctrico, es determinada por la capacidad de un material a polarizarse en respuesta al campo y de tal modo reduzca el campo eléctrico total dentro del material. Así, la constante dieléctrica se relaciona con la capacidad de un material de transmitir un campo eléctrico. Su valor para el vacío es deducido de la velocidad de la luz en el

vacío y es igual a  $8.8541878176... \cdot 10^{-12}$  F/m (o  $C^2 N^{-1} m^{-2}$ ), en medios materiales es una cantidad adimensional.

Dado que la permitividad eléctrica de un medio es asociada a la capacidad de este a polarizarse bajo la acción de un campo eléctrico, se puede expresar en términos de la relación de los vectores, campo eléctrico  $\mathbf{E}$  y la polarización  $\mathbf{P}$  en la forma:  $\mathbf{P} = \chi_e \mathbf{E}$ , donde  $(\chi_e)$ , es el denominado coeficiente de polarización o susceptibilidad dieléctrica, magnitud esencialmente positiva, de modo que el vector polarización tiene siempre la misma dirección del campo eléctrico y se relaciona con la constante dieléctrica en la forma  $\chi_e = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} - 1$

Para considerar el flujo de corriente en dieléctricos sólidos, se ha de tener en cuenta que la corriente de desplazamiento representa un mecanismo conductivo, cuya magnitud es significativa sólo en materiales de muy alta resistividad y bajo la acción de ondas electromagnéticas de altas frecuencias.

Bajo la consideración de un medio de respuesta lineal, las relaciones entre las componentes del campo pueden escribirse matricialmente, siendo las matrices que las ligan, la “matriz dieléctrica del medio” ( $\epsilon$ ) y la “matriz inducción del medio” ( $\mu$ ), respectivamente:

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad \text{Matriz dieléctrica del medio}$$

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix} \quad \text{Matriz inducción del medio}$$

Para un medio isótropo, entendido como un medio en el que todas las direcciones resultan equivalentes para la transmisión de las ondas electromagnéticas se tiene que:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \mu_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{33} \end{bmatrix}$$

Para un medio homogéneo e isótropo,  $\varepsilon$  y  $\mu$  son constantes  $\varepsilon = \varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_{33}$  y  $\mu = \mu_{11} = \mu_{22} = \mu_{33}$ .

El significado de la constante dieléctrica, puede ilustrarse si se considera un condensador, representado en la Figura 1.4, conformado por un par de placas planas paralelas separadas por un material dieléctrico, que reduce la magnitud del campo eléctrico y por lo tanto, la diferencia de potencial disminuye como consecuencia de la polarización en su interior. Al factor de disminución se le llama constante dieléctrica, y es un número adimensional característico de cada material. En medios materiales rocosos la constante dieléctrica está relacionada con la capacidad de polarización de los dieléctricos sólidos o fluidos, como se muestra en la Figura 1.5.

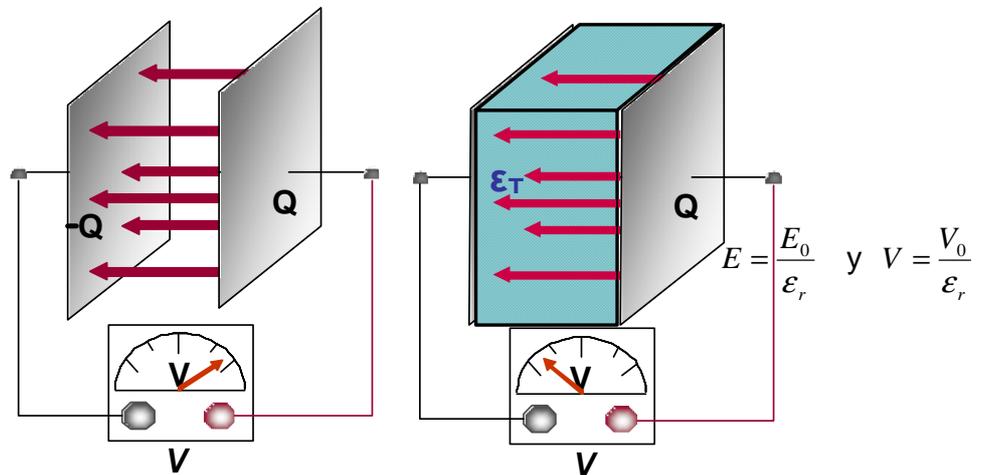


Figura 1.4 Representación esquemática de un condensador.

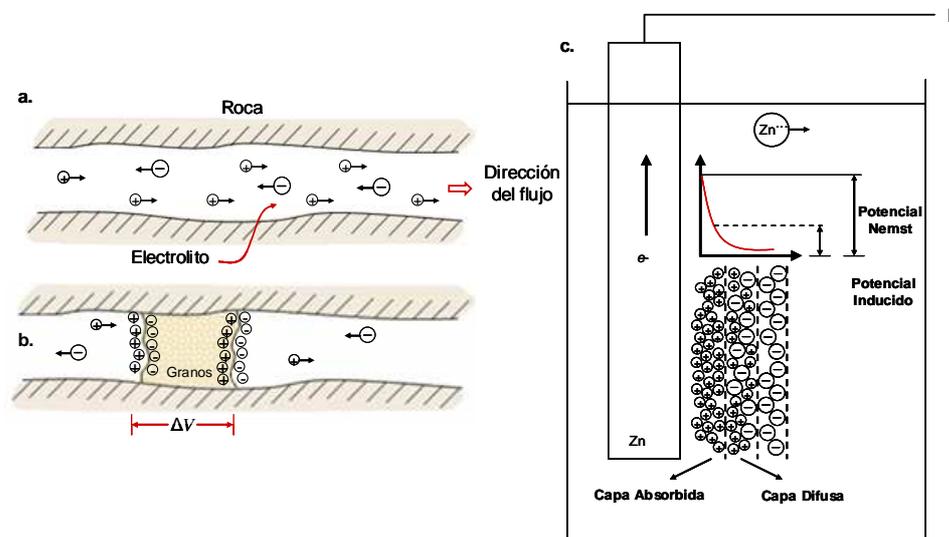


Figura 1.5 Representación de la polarización de dieléctricos sólidos. a. Orientación aleatoria en medios rocosos; b. polarización espontánea; c. Polarización inducida por la acción de un campo externo. (Tomado y modificado de Reynolds, 1997)

En la aplicación de los métodos de corriente directa las variables a medir son, la corriente eléctrica, el potencial eléctrico y su gradiente o campo eléctrico ( $E$ ) y la propiedad del medio la resistividad ( $\rho$ ), inverso de la conductividad, de cuyos contrastes se infiere un modelo o imagen del terreno. Para la aplicación de corrientes variables, es necesario considerar las cuatro componentes del campo electromagnético  $D$ ,  $H$ ,  $E$ , y  $B$  en especial las dos últimas y para la caracterización del terreno han de tenerse en cuenta no solo la resistividad  $\rho$ , sino también la constante dieléctrica  $\epsilon$  y la permeabilidad magnética  $\mu$ .

## **2. Métodos electromagnéticos (MEM)**

En este capítulo, se presentan los fundamentos de los métodos electromagnéticos<sup>3</sup>, atendiendo básicamente a las técnicas de adquisición, proceso e interpretación correspondientes al trabajo realizado. Esto es, a las aplicaciones bajo las aproximaciones de bajos números de inducción y casi estacionarias a y las técnicas de adquisición de información en el dominio de la frecuencia.

### **2.1 Aspectos generales de los MEM**

Aunque el desarrollo de la exploración electromagnética es relativamente reciente, sus orígenes se remontan a los primeros estudios sobre la resistividad de las rocas (1720), al descubrimiento de la conductividad del suelo (1746) y el descubrimiento de la polarización espontánea de algunos yacimientos minerales (1815), (Orellana, E., 1973).

Actualmente los MEM, constituyen el grupo de mayor diversidad entre los métodos geofísicos, tanto en metodología como en instrumentación, resultando conformar herramientas eficaces para abordar una gran variedad de problemas en el

---

<sup>3</sup> Los Métodos Electromagnéticos hacen referencia a métodos inductivos, es decir a la determinación de la respuesta de la sub-superficie a la acción de campos electromagnéticos oscilantes, a frecuencias superiores a los 10 Hz, la respuesta a fuentes de corriente directa o bajas frecuencias  $\leq 10$  Hz , se denominan métodos resistivos, galvánicos o geoelectrónicos.

contexto de la geofísica somera, entre ellos como se ha mencionado anteriormente se destacan el estudio de aguas subterráneas, la cartografía de la intrusión marina, la detección de vertidos de contaminantes, la localización de cavidades, y estudios arqueológicos.

Bajo condiciones específicas los MEM, permiten también obtener información a profundidades del orden de los Km., mediante sistemas de adquisición apropiados como los magneto telúricos y los métodos inductivos de adquisición aerotransportada.

Las medidas de resistividad para mapeo geológico son utilizadas hace alrededor de medio siglo, las técnicas de levantamiento se han extendido para algunas otras aplicaciones, las primeras y más convencionales son los estudios galvánicos, técnica que requiere una cantidad relativamente alta de mano de obra, lo que eleva los costos de adquisición y adicionalmente, se sabe que las variaciones verticales y horizontales de resistividad, que son la base de la interpretación, presentan valores con cierto grado de incertidumbre, lo que hace que pocas mediciones resulten satisfactorias (McNeill,. 1980).

Un problema adicional inherente a las técnicas galvánicas convencionales es que su alcance en profundidad, determinado por la configuración del sistema de adquisición, específicamente por la distancia entre los electrodos, en muchos casos resulta ser inferida por heterogeneidades resistivas pequeñas comparadas con la profundidad de investigación, pero localizadas cerca a los electrodos de potencia, lo que puede generar fluctuaciones significativas en las medidas,

resultando ser asimiladas como verdadero ruido geológico porque no es posible determinar el tamaño físico, el contraste de resistividad o la localización de la fuente. Como resultado de tales heterogeneidades perfiles realizados a espaciamientos constantes resultan ser ruidosos, limitando la resolución en términos de las medidas de resistividad, aunque la instrumentación sea capaz de generar mayor exactitud (McNeill, J.D., 1980)

Un análisis de las ventajas y desventajas de la aplicación de métodos resistivos convencionales para estudios someros, lleva a examinar la posibilidad de aplicar técnicas inductivas como una alternativa para estudios resistivos, ya que estos permiten adquirir información mediante un operador u operadores caminando virtualmente sobre el área de interés, de tal manera que el gran volumen de información promediado da una mejor resolución a profundidades del orden requerido para aplicaciones típicas tales como:

- Delimitación de las regiones de agua congelada entre poros (*permafrost*)
- Conocimiento de la extensión de depósitos de grava
- Mapeo de intrusiones salinas
- Detección de cavernas en rocas carbonatadas
- Mapeo de plumas contaminadas en aguas subterráneas
- Mapeo geológico (tipo de suelos, fallas y zonas de falla etc.)
- Exploración arqueológica
- Localización de metales y conductores tipo metálico (McNeill, J.D., 1980)

La versatilidad y gran celeridad en la toma de datos (aspectos que posibilitan el reconocer extensas áreas de terreno en un corto espacio de tiempo), son las dos

principales características de los MEM, además la no necesidad de contacto físico con el terreno (no precisan electrodos), evitan la generación de ruido instrumental por el contacto galvánico y permiten incluso el realizar estudios tanto en barco como en avión.

Existe una gran diversidad de sistemas de adquisición, con distintos diseños y formas de operación, sin embargo todos obedecen a un mismo principio, la inducción electromagnética.

### 2.1.1 Métodos electromagnéticos inductivos

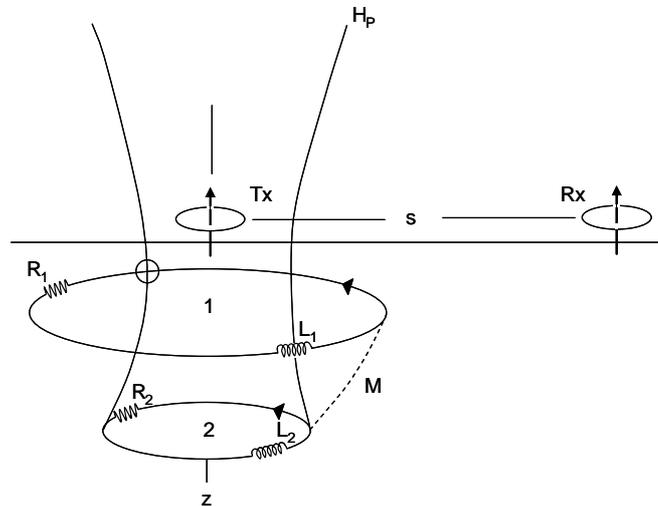
Los métodos de exploración electromagnética, fueron desarrollados principalmente por las escuelas suecas y rusas hacia 1920, éstos se basan en establecer un campo electromagnético variable mediante el flujo de una corriente alterna por una bobina o un cable largo, denominados **transmisor o emisor**, el campo generado por éstos es denominado **campo primario**.(Chelotti, et al. 2009)

El campo primario induce corrientes eléctricas alternas en cualquier conductor que encuentre en su recorrido de propagación, particularmente al incidir sobre la superficie de la Tierra, considerada como un conductor ( $\sigma > 0$ ), comparada con el aire ( $\sigma = 0$ ), hecho que permite asumir que por el contraste de las propiedades electromagnéticas en la interfase aire-tierra, el campo primario penetra verticalmente el interior del terreno generando corrientes eléctricas aleatorias, corrientes *eddy* o remolino, también conocidas como corrientes de Foucault (Llamadas así por los estudios realizados al respecto por el Francés León Foucault quien estudio su comportamiento 1850), (Feyman, 1971). La intensidad

de estas corrientes depende fundamentalmente de la resistividad del conductor y de la frecuencia del campo primario, su intensidad será mayor cuanto menor sea la resistividad del medio y más alta sea la frecuencia del campo inductor. Las corrientes alternas inducidas en el conductor (tierra) generan a su vez un campo electromagnético que se opone al campo primario, denominado **campo secundario**.

La interacción de los campos primario y secundario es detectada en un circuito eléctrico localizado en superficie, una bobina o un cable largo, denominado **receptor**, en general con características semejantes al circuito inductor o generador del campo primario.

Así, los sistemas de adquisición de los MEM pueden considerarse como la interacción de tres campos electromagnéticos, el campo primario, el secundario y el observado en el receptor, de la relación entre el campo primario y el observado es posible inferir sobre las características o propiedades electromagnéticas generadoras del campo secundario, esto es de la tierra, entendida como la zona de estudio y comportándose como un circuito eléctrico (Figura 2.1).



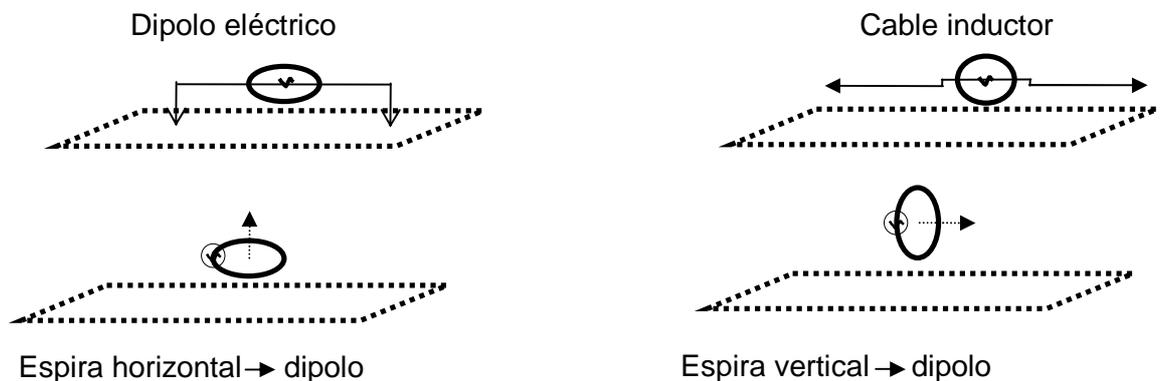
**Figura 2.1** Representación esquemática del comportamiento de la Tierra como un circuito eléctrico (Tomado y modificado de MacNeill, 1980). Transmisor (Tx), Receptor (Rx), Separación entre las espiras ( $s$ ), campo primario ( $H_p$ ), Flujo campo primario (1), flujo del campo secundario (2), Resistencia eléctrica ( $R_L$ ), Inductancia mutua ( $M$ ), dirección del flujo ( $z$ ).

Los MEM se pueden clasificar atendiendo a dos aspectos:

1. La naturaleza del campo electromagnético primario, generado por la fuente electromagnética, distinguiendo entre los de campo natural (corrientes telúricas u oscilaciones del campo geomagnético) o artificial que se refiere a fuente controlada.
2. La configuración del sistema de adquisición caracterizada por el tipo de dispositivos utilizados como emisor y receptor, la distancia a la que se encuentre el receptor con respecto al origen del campo primario (fuente) y la frecuencia de emisión-recepción de las ondas electromagnéticas. (Figuerola, J.C., 1987)

## 2.2 Métodos electromagnéticos de fuente controlada

En cuanto a los sistemas de fuente controlada, además de la generación de pulsos, se consideran cuatro tipos fundamentales que dependen del tipo de circuito emisor: un dipolo vertical, un cable largo inductor, una espira horizontal y una espira vertical, como se ilustra en la Figura 2.2, para el receptor se pueden utilizar los mismos circuitos resultando 16 posibles configuraciones (Gómez, E., 2002)



**Figura 2.2** Representación de los distintos circuitos emisores.  
Tomada y modificada de Orellana, 1973.

En cuanto a la frecuencia de la corriente alterna primaria, ésta se elige de tal manera que el campo electromagnético inducido, por la presencia de las corrientes *eddy* en terreno, resulte significativa en el receptor, se determina de

acuerdo a las necesidades, tanto de posibilidades de penetración como del detalle requerido. Aunque no es necesario tener contrastes de conductividad muy elevados, si resulta importante no tener un cubrimiento conductivo cuya respuesta sea muy alta y minimice la de conductores más profundos. Las mejores condiciones para su aplicación son una topografía suave y cubrimiento superficial de alta resistividad (Chelotti, I., et.al., 2009; McNeil, 2002).

Desde el punto de vista de la variación de la distancia emisor-receptor se tienen tres configuraciones posibles (Orellana, 1973):

- Emisor fijo, receptor móvil, denominado método *Turam*, método que utiliza como inductor y receptor, cables largos o espiras de gran extensión.
- Emisor móvil, receptor fijo, poco utilizado salvo el reconocido como de inclinación del campo.
- Emisor y receptor móviles con distancia fija entre ellos, conformados por dos espiras (emisor y receptor), denominado método ***Slingram***, que es el utilizado en este trabajo.

En general, estos métodos no determinan cortes geológicos longitudinales sino la presencia de heterogeneidades conductivas, su aplicación para prospectar áreas arqueológicas, tienen como objetivo detectar objetos remantes en los suelos o características de estos, alteradas por actividades humanas en el pasado. El

interés en arqueología no es solamente localizar lugares para excavar, sino para definir áreas evitando excavaciones innecesarias (Tabbagh A, 1986).

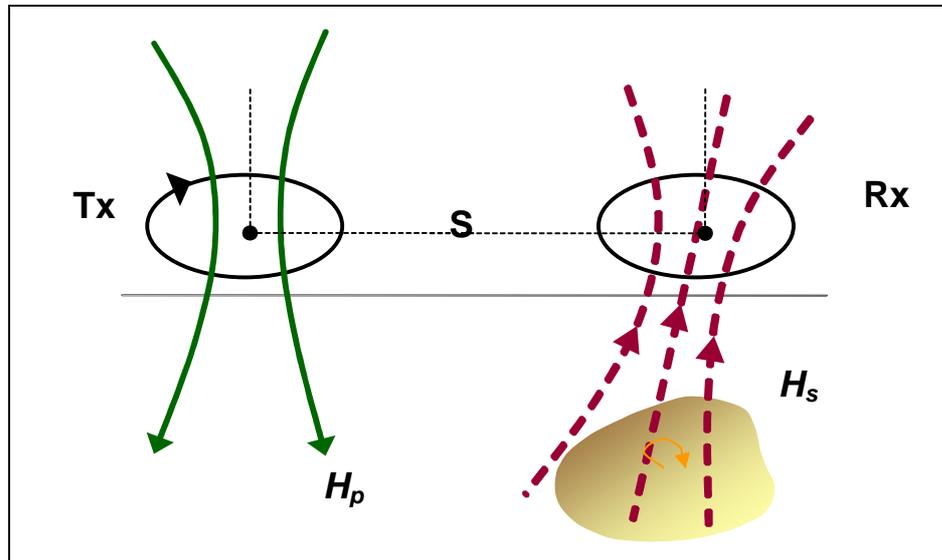
### 2.2.1 Método Slingram

El método *Slingram*, corresponde a unos de los métodos electromagnéticos de fuente controlada (FDEM), son sistemas que trabajan con un transmisor (**TX**) y un receptor (**RX**) móviles, con distancia de separación fija (**s**) tipo espira, representado esquemáticamente en la Figura 2.3.

La aplicación del método provee dos tipos de información de la sub-superficie simultáneamente:

- La conductividad aparente o su inverso la resistividad aparente y
- La susceptibilidad aparente

De una o de la integración de esta información, es posible inferir sobre los parámetros de la fuente, objetos metálicos o zonas de contraste de conductividad y/o susceptibilidad con el entorno.

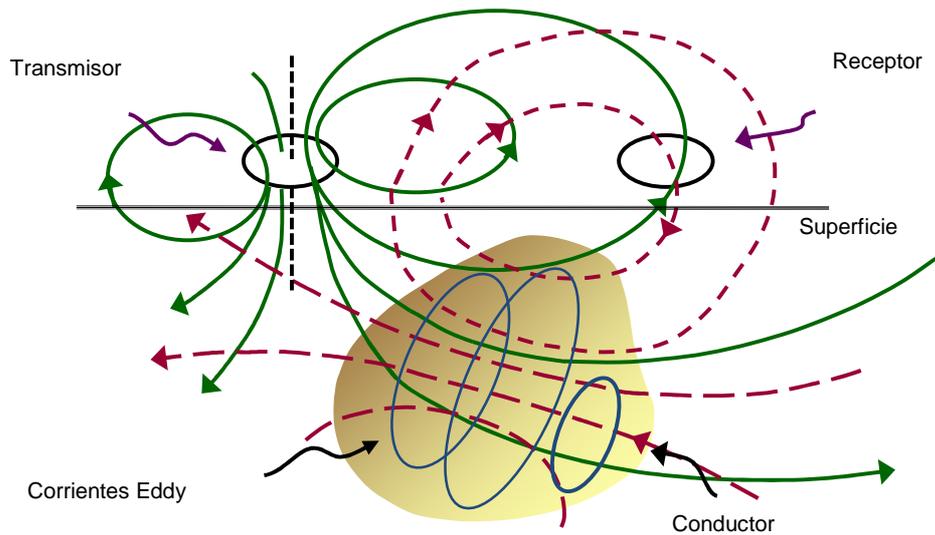


**Figura 2.3** Representación esquemática del sistema de adquisición del método Slingram, TX y RX son los circuitos emisor y receptor respectivamente, la distancia entre los centros de las espiras ( $s$ ), se representan las líneas de flujo de campo primario como líneas continuas apuntando al interior del terreno y el flujo inducido en sentido contrario. (Tomada y modificada de Unsworth, 2009)

Para construir un sistema de adquisición que de ésta información se requiere de un apropiado acople entre distintos parámetros tales como la frecuencia de operación, la distancia entre las espiras y su orientación, además se requiere de una serie de cálculos que incluyen la geometría del sistema y su calibración, que es ejecutada por el fabricante y corresponde a las especificaciones técnicas de cada equipo de adquisición.

La forma general de operación del método se sintetiza en tres pasos:

1. A través del transmisor, que es una bobina por la que circula una corriente alterna sinusoidal de frecuencia  $f$  (Hertz); se genera un campo electromagnético primario  $H_p$ , que se propaga libremente tanto por la superficie como por el interior del terreno. Este campo está formado por una componente magnética y una eléctrica ortogonales entre si, y a su vez perpendicular a la dirección de propagación de la onda.
2. En presencia de un cuerpo conductor, la componente magnética del campo primario induce corrientes aleatorias (corrientes *eddy*), que a su vez generan un campo magnético secundario  $H_s$ .
3. Este campo secundario, junto con el campo primario que circula libremente por la superficie del terreno, serán detectados por la bobina receptora, dando lugar a un campo resultante, que diferirá tanto en fase como en amplitud con respecto al campo primario, aspecto que proporciona información acerca del tamaño y conductividad eléctrica del elemento conductor, la interacción de los campos se representa en la Figura 2.4.



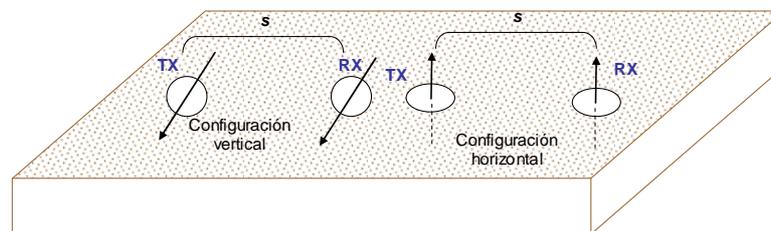
**Figura 2.4** Representación esquemática ilustrativa de la interacción de los campos electromagnéticos primario y secundario en el receptor, tomado y modificado de Reynolds, 1997.

Entre los sistemas de adquisición para la aplicación del método *Slingram*, están los métodos electromagnéticos en el dominio de frecuencia, en modo de campo próximo o bajo número de inducción, para los que la profundidad de investigación es dominada por la frecuencia de la fuente. Estos corresponden al sistema utilizado en el trabajo desarrollado, por lo que al respecto se presenta una descripción de los fundamentos que sustentan su aplicación.

Los métodos electromagnéticos de fuente controlada en el dominio de la frecuencia, al igual que el resto de los métodos electromagnéticos, tienen como objetivo básico medir la conductividad eléctrica del terreno y en algunos casos

simultáneamente las otras propiedades electromagnéticas, como la susceptibilidad magnética *in situ*, que corresponden a observaciones relativas deducidas a partir de la interacción de las componentes del campo electromagnético.

Los sistemas de adquisición, corresponden a sistemas “*Dipolo-dipolo*” (espira-espira, nominación justificada por la similitud del campo electromagnético generado por un dipolo y una corriente que circula por una espira circular), en donde la conformación geométrica de los dipolos o espiras permite distinguir básicamente dos modos de operación, el modo vertical, con espiras en un arreglo horizontal o coplanar (dipolos verticales) y el modo horizontal o espiras coaxiales (dipolos horizontales); para los dos modos, la fuente (TX) y el receptor (RX) están separados una distancia fija ( $s$ ), y se representan en la Figura 2.5



**Figura 2.5** Representación del sistema de adquisición *Dipolo-dipolo*, en configuraciones vertical y horizontal.

La posibilidad de elaborar modelos cualitativos o cuantitativos, en la dimensionalidad requerida (una, dos o tres dimensiones, sus extrapolaciones y variaciones temporales), mediante la información adquirida por la aplicación de los MEM, al igual que para la aplicación de otros métodos geofísicos, depende de la capacidad para transformar las medidas en variaciones verticales y horizontales de propiedades pertinentes al objeto de estudio, lo que se asocia generalmente como la construcción de una imagen del subsuelo.

Estos métodos operan bajo las aproximaciones de bajo número de inducción y transmisión de campos en modo casi estático, aproximaciones que corresponden tanto a los fundamentos teóricos involucrados, como a la geometría de los dispositivos que conforman el sistema y a la frecuencia del inductor. El significado de estas aproximaciones se expone a continuación.

### **2.3 Régimen a bajo número de inducción, aproximación casi estacionaria**

Atendiendo a que el método Slingram en el dominio de la frecuencia opera bajo el régimen de bajo número de inducción y aproximación casi estacionaria, se hace una descripción de su significado y de la forma de operación para la determinación de la conductividad y la susceptibilidad.

#### **2.3.1 Conductividad eléctrica a bajos números de inducción (LIN FEM)**

Los métodos de inducción electromagnética en el dominio de la frecuencia a bajo número de inducción, conocidos como LIN FEM, usan la propagación de los campos electromagnéticos alternos a través del suelo para medir la conductividad eléctrica y la susceptibilidad magnética aparentes. Estas propiedades medidas son un complicado promedio de la distribución espacial de las características de la sub-superficie, que es afectada por varios factores, entre ellos el contenido de agua o fluidos, la mineralogía y textura de la roca sólida, su porosidad, permeabilidad y salinidad, como también factores del ambiente como la

temperatura e influencia de sólidos y fluidos que alteran el comportamiento del medio.

La gama de aplicaciones de los LIN FEM para estudios ambientales e hidrológicos y su monitoreo es amplia y creciente. Las aplicaciones incluyen estudios de la extensión de acuíferos y contenido de agua, estudios litológicos, salinidad del suelo y asignación de textura, también han sido utilizados para delinear vertederos, plumas contaminante y áreas de recarga en cultivos.

Considerando que para un amplio rango de aplicaciones, la profundidad del muestreo o el volumen de la muestra en tres dimensiones, es decir el alcance en profundidad, resulta independiente de la conductividad eléctrica subterránea. McNeill (1980) define las profundidades eficaces de exploración, mediante cálculos aproximados de las soluciones asintóticas de las ecuaciones de Maxwell, para modelos de medios homogéneos y de capas horizontales homogéneas. Los cálculos aproximados de esos modelos constituyen los fundamentos de la determinación de la sensibilidad espacial vertical de varios instrumentos LIN FEM.

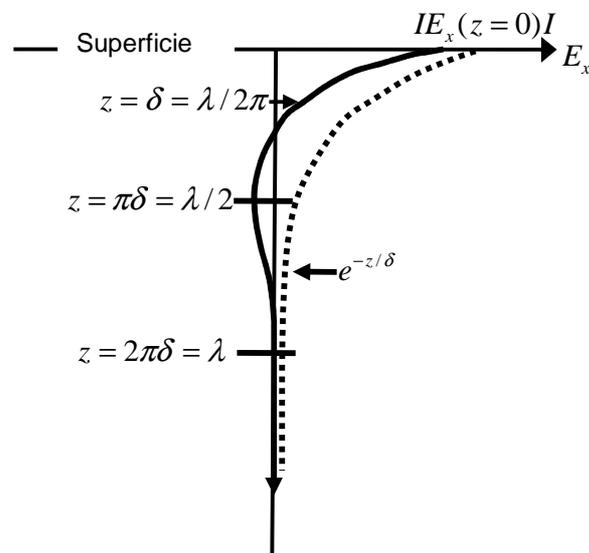
La aproximación asintótica, solución que se conoce a veces como la aproximación LIN, se obtiene a bajo número de inducción ( $\beta$ ), bajo otras condiciones la profundidad depende también de la resistividad aparente (Callegary, et al. 2007).

El número de inducción ( $\beta$ ) es definido por la relación entre la separación ( $s$ ) de las espiras transmisora y receptora (Figura 2.4) y el factor de penetración,

operacionalmente se expresa por la siguiente ecuación (Singh, N. P. y Mogi, T.,2003):

$$\beta = \frac{s}{\delta} = \frac{s}{\sqrt{\frac{2}{\sigma_a \omega \mu}}} \quad [2.1]$$

Donde  $\omega$  ( $s^{-1}$ ) es la frecuencia angular de la fuente,  $\mu$  la permeabilidad magnética del medio ( $Hm^{-1}$ ),  $\sigma_a$  la conductividad aparente y  $\delta$  la profundidad piel o factor “skin”, que se define como la profundidad a la cual la intensidad de la amplitud de la onda incidente disminuye en un factor  $1/e$  con respecto a la intensidad incidente (Figura 2.6).



**Figura 2.6** Representación de la atenuación de la onda incidente en superficie con la profundidad. (Tomado y reformado de Telford, W., et al. 1990)

El efecto superficial o *skin*, se define teniendo en cuenta que la disminución de la amplitud de los campos y por ende de las ondas EM y de la densidad de corriente, disminuyen gradualmente al penetrar el terreno, por lo que no existe una profundidad definida por debajo de la cual puedan considerarse nulos los campos y la corriente; esta profundidad se obtiene considerando el coeficiente de atenuación o número de onda ( $\gamma$ ) y su carácter complejo, como se expuso en el primer capítulo y tomando su parte real se tiene la relación numérica que lo determina:

$$\delta = \frac{1}{b} = \left( \frac{\omega\mu}{2\rho} \right)^{-1/2} = 503 \left( \frac{\rho}{\nu} \right)^{1/2} \quad [2.2]$$

Con,  $\mu = \mu_0$

Callegary y otros, 2007, evaluaron la profundidad efectiva de exploración, usando soluciones completas de las ecuaciones de Maxwell. En esta evaluación, determinan una gama de resistividades aparentes y números de inducción, para los cuales se mantienen las condiciones de LIN y cómo cambia cuando la condición no se satisface. Del análisis concluyen que solamente para medios de baja conductividad la aproximación es válida; esto es la profundidad efectiva dependiente exclusivamente de la frecuencia del emisor y la permeabilidad magnética, que para efectos prácticos se toma el valor del número de inducción magnética.

Esto implica, que para caracterizar tablas de agua, interfases entre capas y variaciones de sal o mezclas de contenidos de fluidos, es necesario tener en cuenta la conductividad aparente para definir la profundidad. Los autores atribuyen las diferencias entre los cálculos de la profundidad LIN, que no imponen

condiciones en la determinación de la profundidad efectiva, a la aproximación asintótica que no tiene en cuenta los efectos de dispersión y reflexión en las interfaces.

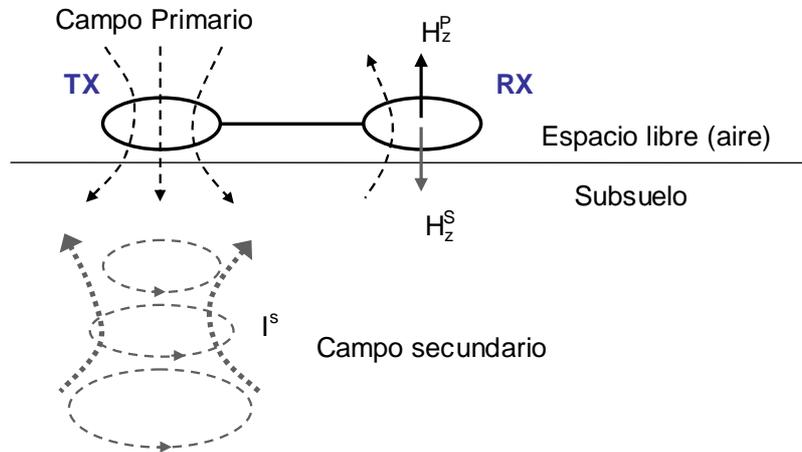
La aproximación, considerando bajos números de inducción, en la que la frecuencia del transmisor es baja, la separación transmisor-receptor ( $s$ ) es pequeña comparada con la profundidad piel ( $\delta$ ) y a bajas conductividades, la sensibilidad espacial vertical y  $\delta$  son independientes de la conductividad aparente ( $\sigma_a$ ), consideraciones bajo las cuales la aproximación LIN resulta válida (Callegary J., 2007). Método que aplica el sistema utilizado para el desarrollo de este trabajo, *Profiler EMP 400*, que registra en el dominio de la frecuencia y cuyas especificaciones técnicas y modo de operación se presentan más adelante.

Los sistemas electromagnéticos inductivos (EMI) formados por dos espiras circulares móviles, un transmisor y un receptor, que operan en el dominio de la frecuencia, están entre los más utilizados para aplicaciones ambientales y son muy adecuados para realizar prospección de yacimientos arqueológicos, que presuponen medios de baja conductividad (Martinelli y Osella, 1993).

En estos sistemas ambas espiras se mueven sobre la superficie a una altura constante, separadas entre sí por una distancia ( $s$ ) también constante. El punto medio entre las espiras, determina la posición de cada punto de sondeo, punto que se va desplazando a lo largo de líneas de adquisición.

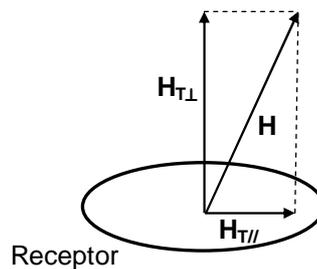
Para aplicaciones arqueológicas, que son las que aquí interesan, los sistemas de adquisición usualmente son conformados por un único instrumento transmisor-receptor, con una distancia entre espiras fija que varia dependiendo del equipo entre 1m y 2m; estos sistemas permiten dependiendo de su diseño penetrar a una profundidad entre los cinco y diez metros aproximadamente dependiendo de la frecuencia de adquisición. Para estas aplicaciones, los tipos de instrumentos más adecuados son los de inducción electromagnética multifrecuencial, para los cuales la sensibilidad o profundidad vertical es dominada por la frecuencia del emisor.

Para cada punto de sondeo, en la posición del receptor se tiene la superposición del campo magnético primario  $\mathbf{H}_P$  generado por la corriente externa, y el campo secundario  $\mathbf{H}_S$  producido por las corrientes inducidas en el subsuelo, que es quien contiene información sobre la estructura eléctrica del terreno. Ambos campos oscilan a la frecuencia de la corriente externa con amplitudes proporcionales a la intensidad de la corriente  $I_0$ . La dependencia con el tiempo de  $\mathbf{H}_P$  es la misma que la de la corriente externa, por eso se dice que este campo está en fase con la corriente externa. En cambio, la dependencia con el tiempo de  $\mathbf{H}_S$  se presenta desfasado (atrasado en fase) en un ángulo  $\Phi_S$  respecto a la corriente externa y al campo primario. El campo total en el receptor,  $\mathbf{H}_T$ , es la suma de  $\mathbf{H}_P$  y  $\mathbf{H}_S$ . Bajo estas consideraciones el terreno se comporta como un circuito conformado por espiras horizontales como se ilustra en la Figura 2.7.



**Figura 2.7** Representación esquemática del comportamiento conductivo del terreno y las direcciones de los campos primario y secundario en el receptor. (Tomado y modificado de Unsworth M., 2009)

El campo total puede separarse en dos componentes, una componente perpendicular a la espira receptora ( $H_{T\perp}$ ), cuyas variaciones temporales inducen una fuerza electromotriz en el receptor, y una componente paralela a ella ( $H_{T\parallel}$ ) que no ejerce efecto inductivo (Figura 2.8).



**Figura 2.8** Componentes del campo magnético total, perpendicular y paralela, a la espira receptora.

Bajo estas consideraciones, la relación entre el campo primario (inductor)  $H_{P0\perp}$  y el campo observado  $H_{S\perp}$  están dadas por las siguientes expresiones:

$$H_{P0\perp}(t) = H_{P0} \cos(2\pi f t) \quad [2.2]$$

$$H_{S\perp}(t) = H_{S0} \cos(2\pi f t - \phi_s) \quad [2.3]$$

$H_{P0}$  y  $H_S$  son las amplitudes de las componentes normales de los campos primario y secundario, respectivamente y  $\phi_s$  la diferencia de fase entre estas.

La relación entre las dos componentes, respuesta perpendicular total en el receptor y componente vertical del campo inductor, puede expresarse como:

$$\frac{H_{S\perp}(t)}{H_{P0\perp}} = IP \cos(2\pi f t) + Q \cos(2\pi f t - \pi/2) \quad [2.4]$$

**IP** y **Q** son las componentes real e imaginaria respectivamente, en el dominio del espacio complejo, que suelen llamarse respuestas en fase y cuadratura. Son cantidades adimensionales, se expresan en partes por millón (ppm) y no dependen de la corriente inductora  $I_0$ .

Hay tanto sistemas que trabajan a una sola frecuencia, como sistemas multifrecuenciales que permiten seleccionar las frecuencias de adquisición dentro de un rango determinado que depende de cada instrumento. En cada punto de sondeo se miden entonces **IP** y **Q** para todas las frecuencias seleccionadas.

Los suelos que se encuentran en aplicaciones ambientales y arqueológicas están conformados usualmente por materiales que van desde resistivos hasta moderadamente conductores, con resistividades aproximadas en el rango entre  $1\Omega\cdot\text{m} < \rho < 1000 \Omega\cdot\text{m}$ . Para estas situaciones, en general, se satisface las siguientes condiciones:

- Las variables observadas en el dominio de la frecuencia IP (respuesta en fase) y Q (Respuesta en cuadratura), son asociadas a la susceptibilidad magnética (componente real) y a la conductividad eléctrica (componente imaginaria), respectivamente.
- En cada punto sondeado, IP y Q disminuyen al disminuir la frecuencia.
- Para cada frecuencia, IP y Q son mayores en los puntos donde el terreno es menos resistivo.
- En cada punto y a cada frecuencia, Q es mayor que IP.

Esta son consideraciones empíricas a tener en cuenta para el análisis de la información, además, es importante señalar que la presencia de medios magnéticos sólo afecta a la componente **IP** de la respuesta (Martinelli, P y Osella, A, 1993).

En resumen, el procedimiento de los métodos inductivos se efectúa mediante los siguientes pasos:

- Un campo electromagnético **primario** (EM) controlado o natural incide sobre la superficie. El generador puede considerarse como una onda plana incidente generada por un dipolo transmisor (TX). La variación temporal puede ser una señal harmónica o un pulso.
- El campo primario genera un campo **secundario** en la tierra debido a corrientes aleatorias, corrientes *eddy* inducidas, con amplitudes y fase variables. En una primera aproximación, la tierra puede considerarse como un conductor y el aire como aislante. El campo electromagnético **total** medido en el receptor (RX) es la superposición de los campos primario y secundario.
- Medidas en superficie o pozos del campo eléctrico total  $E$  y/o  $H$  inducción magnética total, son registradas en el receptor móvil RX desplazado sobre líneas/grillas o puntos. Estas medidas pueden hacerse en el dominio de la frecuencia o del tiempo.

Entender totalmente el comportamiento electromagnético de suelos y rocas puede ser difícil debido a la complejidad matemática y la variedad de configuraciones de los MEM, sin embargo todos tienen algunas características comunes y diversas aplicaciones, entre ellas por ejemplo, en hidrogeología y en mapeo de acuíferos y contaminantes; también se reporta su uso en exploración de minerales, en exploración geotérmica, en estudios ambientales y estudios profundos como los tectónicos. (Martinelli y Osella, 1993)

### 2.3.2 Aproximación casi estacionaria

Esta aproximación, significa que no se tienen en cuenta las corrientes de desplazamiento en el medio conductor, en consecuencia su capacidad de polarizarse en presencia de un campo eléctrico representada en la constante dieléctrica no se refleja; en otros términos, la constante dieléctrica se manifiesta sólo a altas frecuencias (del orden de los MHz), cuando la constante dieléctrica es el término dominante en el número de onda  $\gamma$  cuyo significado y definición operacional se presentan en el capítulo 1. Las expresiones complejas para el factor de atenuación y sus componentes real e imaginaria definen el régimen casi estacionario y son dadas por:

$$\gamma = a + bi \quad [2.5]$$

$$a = \frac{1}{\sqrt{2}} (\omega\mu)^{1/2} \left[ (\epsilon^2 \omega^2 + \sigma^2)^{1/2} + \epsilon\omega \right]^{1/2} \quad [2.6]$$

$$b = \frac{1}{\sqrt{2}} (\omega\mu)^{1/2} \left[ (\epsilon^2 \omega^2 + \sigma^2)^{1/2} - \epsilon\omega \right]^{1/2} \quad [2.7]$$

En estas relaciones, el segundo término (entre paréntesis cuadrados), contiene el término representativo de la constante dieléctrica ( $\epsilon$ ), cuyo valor se considera nulo para el régimen casi estacionario y en consecuencia:

$$a = b = \left( \frac{\omega\mu\sigma}{2} \right)^{1/2} = \left( \frac{\omega\mu}{2\rho} \right)^{1/2} \quad [2.8]$$

Esta aproximación depende no sólo de las condiciones de la fuente sino también de las condiciones de terreno, lo que permite distinguir los regimenes casi estacionario y no estacionario.

Así, para determinar bajo qué condiciones se satisfacen las aproximaciones, conviene analizar la situación calculando la parte real y la parte imaginaria del factor de atenuación o número de onda  $\gamma$ . Orellana, 1973 realiza cálculos para valores característicos de la resistividad de algunas rocas, y presenta en un gráfico las condiciones bajo la cuales se satisface el régimen casi estacionario, de los que se infieren, a nivel de guía, las condiciones bajo las cuales el comportamiento valida la operación con sistemas que utilizan esta aproximación.

De los mencionados cálculos de Orellana, se tiene que: (1) Para una roca seca con resistividad  $\rho = 100 \Omega\text{m}$ , lo que es lo mismo que conductividad  $\sigma = 10^{-2} (\Omega\text{m})^{-1}$ , constante dieléctrica  $75 \text{ pF/m}$  y  $\mu = \mu_0$ , operando a una frecuencia de  $500\text{Hz}$  o sea  $\omega = 1000 \pi$ , se tiene que:  $a = b = 4.44 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ ; (2) Si la roca es más conductiva y se baja la frecuencia a  $1\text{Hz}$ ,  $\omega = 2\pi$  también se mantiene la igualdad:  $a = b = 6.29 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$  y (3) Si se aumenta la frecuencia a  $1\text{MHz}$ , se disminuye  $\epsilon = 50\text{pF}$  y se aumenta la resistividad  $\rho = 10^5 \Omega\text{m}$ , los cálculos dan valores diferentes:  $a = 4.98 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$  y  $b = 7.92 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$

De los resultados de los cálculos se infiere que el factor determinante para definir la condición de régimen casi-estacionario es la frecuencia, la condición y nominación casi estacionaria puede entenderse si se considera que aunque la fuente inductora varía en el tiempo, la frecuencia relacionada con la intensidad del campo inductor no alcanza a polarizar los dieléctricos.

Del la mencionado gráfica de Orellana, que contiene cálculos para distintos valores de resistividad en función de la frecuencia, considerando las características del medio de trabajo sobre el que se obtuvo la información (bajas conductividad) y frecuencias de operación máxima 15K, corresponde al régimen casi estacionario.

Teniendo en cuenta que los sistemas de adquisición correspondientes a la aplicación del método Slingram, que registran la información en el dominio de la frecuencia, operan bajo las aproximaciones de bajo número de inducción y casi estacionaria, antes descritas, se presenta una descripción de la forma en que transforman la relación entre los campos primario y el campo observado, para entregar los valores de la conductividad y la susceptibilidad magnética para una caracterización electromagnética completa del terreno, sin considerar la constante dieléctrica.

Para ilustrar la forma de operación antes mencionada, se presentan algunas notas aclaratorias de la forma como se relacionan los campos primario y observado, que dan lugar a los cálculos inherentes al sistema de adquisición, notas que son extraídas y adecuadas de Unsworth,2009

De las relación entre el campo primario, obtenido de la interacción de las espiras TX y RX en espacio libre, que actúa como un campo de referencia  $H_z^p$  y el campo observado  $H_z$ , bajo las consideraciones de bajo número de inducción y régimen casi estacionario se obtiene la conductividad eléctrica del medio, mediante las siguientes relaciones.

$$\frac{H_z}{H_z^p} = 1 - \frac{k^2 r^2}{4} = 1 - \frac{i\omega\mu\sigma r^2}{4} \quad [2.9]$$

Con  $k^2 = i\omega\mu\sigma$

$$\sigma = \frac{4}{\omega\mu r^2} \operatorname{Im}\left(\frac{H_z}{H_z^p}\right) \quad [2.10]$$

La susceptibilidad magnética se obtendrá tomando la parte real de la misma relación, lo que sustenta las asociaciones en fase y cuadratura asociadas en la información, con las propiedades electromagnéticas del medio.

En resumen, el campo secundario afectado por el receptor es descompuesto en los componentes de fase y cuadratura, expresados en partes por millón del campo primario. El componente en fase, depende principalmente de la susceptibilidad magnética del medio, por lo que esta componente es especialmente sensible a la presencia de objetos metálicos. La cuadratura, está relacionada con la distribución de la conductividad eléctrica y puede ser convertida en conductividad aparente en función de la frecuencia mediante la siguiente expresión:  $\sigma_a = 0.360 * Q \text{ (PPM)} / \text{Frecuencia (S/m)}$  (Wong, et al, 1996).

## **2.4 Aproximaciones metodológicas de interpretación de registros electromagnéticos en el dominio de la frecuencia.**

En la mayoría de los casos, los sistemas EMI se utilizan para detectar, mediante modelos cualitativos u observación directa de los datos, las variaciones laterales de la conductividad del subsuelo de un punto a otro de sondeo, las cuales permiten inferir, con aproximación razonable, sobre posibles localizaciones de estructuras o cuerpos bajo superficie.

Sin embargo, de las mediciones es posible obtener más información del subsuelo, pero ésta sólo puede obtenerse realizando análisis cuantitativo de las series o volumen de los datos medidos, de lo que es posible no sólo localizar y delimitar aproximadamente las fuentes de anomalías conductivas o magnéticas, sino caracterizarlas, esto es definir su distribución de resistividad (asociada a los materiales que las conforman), su forma geométrica y la profundidad a la que se encuentran. Además, permite determinar la estructura del terreno en el que éstas se encuentran.

Tanto los métodos cualitativos, como los cuantitativos generan modelos de dimensionalidad 1D, 2D o 3D, de acuerdo a la información obtenida en un punto (sondeo), sobre perfiles o distribución de la información en dos dimensiones, sobre áreas conformadas por perfiles.

Bajo estas perspectivas, se describen los métodos de análisis cualitativos y cuantitativos, generalmente utilizados, los cuales fundamentan la aplicación a la información analizada en este trabajo.

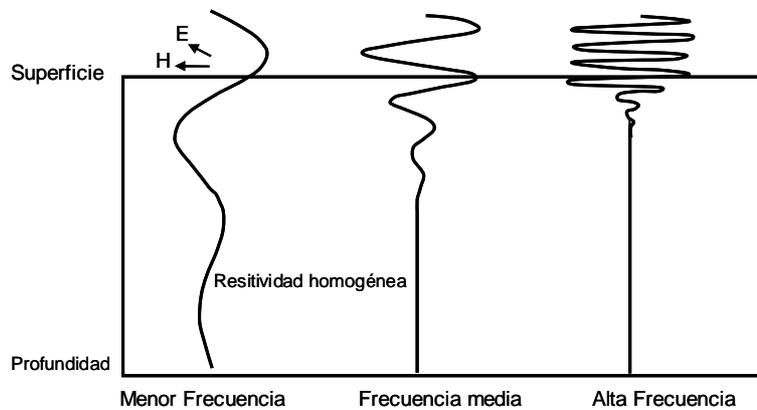
Para una aproximación cualitativa bidimensional en superficie de la información, se realizan gráficos 2.5D para cada frecuencia, esto es, cortes o vistas en planta, de las componentes medidas **IP** y **Q**, en los cuales se incluyen todos los puntos de observación. A partir de estos cortes transversales, se determinan anomalías resistivas, conductivas y/o magnéticas. De estos cortes y curvas de las componentes en fase (**IP**) y en cuadratura (**Q**), para las distintas frecuencias se infiere una imagen aproximada del subsuelo (West y Macnae, 1991).

Esta forma cualitativa de analizar los datos, permite localizar estructuras enterradas y tener una idea aproximada de sus dimensiones laterales. Ambos resultados de importancia en exploraciones someras, particularmente exploraciones arqueológicas y en muchos casos es todo lo que se espera obtener.

Para elaborar modelos cuantitativos, se requiere la aplicación de métodos numéricos, como en general para la interpretación de la información procedente de los distintos métodos geofísicos, estos pueden ser directos, inversos o híbridos (combinación de las dos aproximaciones).

En el caso de los métodos directos, se propone un modelo simplificado de la fuente de anomalía y el método calcula su respuesta sintética. Para interpretar los datos a través de métodos directos se emplean procedimientos de prueba y error y mediante procesos iterativos de ajuste se definen los parámetros de la fuente que

mejor aproximan la respuesta sintética con los datos observados. La mejor aproximación, depende de la precisión requerida por el modelo, que está relacionada horizontalmente con la frecuencia de muestreo y verticalmente por la frecuencia del sistema emisor, a mayor frecuencia mayor resolución, pero menor poder de penetración, como se ilustra en la Figura 2.9



**Figura 2.9.** Esquema representativo de la relación entre la frecuencia la resolución y profundidad de penetración (Factor piel "skin")

Dado que en todos los casos se cuenta con un número finito de datos, cada uno con cierto error de medición, siempre existe una variedad de modelos que se ajustan a la precisión requerida. La selección del modelo final, exige entonces considerar algún criterio adicional, de acuerdo al objeto de estudio.

Cada vez que se quiere realizar una inversión es importante proponer un ajuste adecuado, en general, si se permite un factor de ajuste demasiado grande, el modelo que se obtiene tiene una baja resolución y parte de la información

contenida en los datos no es utilizada. Por el contrario, si el factor de ajuste es demasiado pequeño, en algunos casos los programas de inversión directa no convergen y sus resultados no representan características reales del terreno sino artificios que el programa genera para ajustar los datos; en otros casos, el modelo final contiene detalles espurios generadores de ruido.

Las técnicas de modelado directo actualmente más utilizadas, en los distintos métodos de inducción electromagnética, entre los cuales, el método EMI y el método magneto-telúrico<sup>4</sup>, aplican soluciones en diferencias finitas o elementos finitos.

En todos los casos, los modelos 3D se generan mediante grillas de elementos cúbicos homogéneos, que van variando gradualmente la conductividad eléctrica  $\sigma$  y la susceptibilidad magnética  $\chi$  asociada con la permeabilidad magnética  $\mu$ . La elaboración de éstos modelos exige no sólo tener una cantidad suficiente de datos, ya que una de las ventajas del método EMI es justamente la rapidez con la que se realizan las mediciones, sino un alto costo computacional, tan alto que su aplicación resulta poco práctica, para los objetivos planteados en este trabajo.

Bajo esta perspectiva la interpretación realizada en este trabajo, se fundamenta en el análisis cualitativo del que se infieren las profundidades superior e inferior de las fuentes de anomalía asociadas a los contrastes de conductividad eléctrica y susceptibilidad magnética, representativos de la reserva arqueológica de interés.

---

<sup>4</sup> “El método magnetotelúrico es, como el EMI, un método de inducción electromagnética, pero utiliza campos inductores de origen natural que pueden considerarse espacialmente uniformes. Actualmente es uno de los más utilizados para estudiar la estructura eléctrica de la corteza terrestre e inclusive del manto superior”. (Kauffman, A. y Keller, G.1981)

### **3. Descripción del levantamiento**

En este capítulo se presentan las características generales del levantamiento e incluye una descripción del sistema de adquisición, que corresponde a la configuración tipo Slingram, explicado en el capítulo anterior. Se presenta además la descripción del recorrido o determinación de las estaciones; los mapas de conductividad eléctrica y susceptibilidad magnética elaborados a distintas frecuencias de adquisición de cuyo análisis preliminar se infiere sobre la localización de las anomalías electromagnéticas asociadas con la reserva arqueológica.

#### **3.1 Equipo de adquisición *Profiler EMP 400* (GSSI, 2007)**

Los sistemas geofísicos de inducción electromagnética que emplean fuentes electromagnéticas oscilantes, artificiales o controladas, han sido y son empleados para la solución de problemas correspondientes a diversas áreas del conocimiento, entre ellos problemas propios de la geofísica, de la geología, la arqueología, ingeniería civil, estudios de orden ambiental y de agricultura de precisión. Esta amplia diversidad de aplicaciones está relacionada con las ventajas que proveen este tipo de instrumentos, de las cuales la más importante es que no requiere contacto directo con la superficie, lo que permite abarcar

grandes extensiones de terreno en corto tiempo, además de adquirir información en terrenos de difícil acceso y pueden ser empleados en adquisiciones aéreas y acuáticas.

El sistema de adquisición utilizado para el levantamiento de la información de este trabajo, fue el *Profiler EMP 400*, cuya información electromagnética fue tomada en las inmediaciones del Templo del Sol, en abril de 2008, y fue cedida para su análisis por el profesor Ramiro Díaz. El sistema es desarrollado por la GSSI (*Geophysical Survey Systems, Inc.*), compañía Norteamericana, dedicada al diseño de sistemas de georradar (GPR), sistemas electromagnéticos (EM) y al desarrollo de *softwares* para la industria geofísica, arqueológica, forense y de infraestructura. En la Figura 3.1 se presentan fotografías del equipo y sus aplicaciones en diversos estudios.



**Figura 3.1** Fotografías representativas del equipo de adquisición *Profiler EMP 400* y sus posibles aplicaciones (Tomado y modificado de GSSI, 2007)

Es de anotar, que entre los sistemas de adquisición electromagnética se distinguen básicamente dos, los que operan fundamentados en la transmisión de las ondas que registran los primeros tiempos de llegada al sistema receptor GPR y los que operan fundamentados en el análisis de las componentes del campo electromagnético EM, que corresponde al utilizado en este levantamiento.

El *EMP 400*, es un sensor de inducción electromagnética digital, portátil y multifrecuencial. Permite recolectar información a tres frecuencias discretas simultáneamente. El ancho de banda del sistema se extiende desde los 1 KHz hasta los 15 KHz medidos en secuencias de 1 KHz. El sistema de datos de salida comprende: las componentes en fase y cuadratura del campo observado dadas en partes por millón, la conductividad y susceptibilidad obtenidas de la relación entre las componentes del campo, que son características del equipo determinadas por el fabricante. En la Figura 3.2 se presenta una imagen de salida de los datos originales importados a Excel.

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet titled 'DATOS POR ZONAS 1'. The data table has the following columns: Record #, X Coord, Y Coord, Time, InPhase [1], Quad [1], Conduc tivity [1], Suscepti bility [1], InPhase [2], Quad [2], Conduc tivity [2], Suscepti bility [2], InPhase [3], Quad [3], Conduc tivity [3], Suscepti bility [3], Long, Lat, Alt, Errors. The spreadsheet contains 50 rows of data. Three red circles are drawn around the column headers for the three frequencies, with arrows pointing to the labels 'Frecuencia 1', 'Frecuencia 2', and 'Frecuencia 3' placed below the table.

Figura 3.2 Datos originales importados a Microsoft Excel para tres frecuencias tomadas simultáneamente.

El sistema incluye un sistema de localización GPS, cuyos datos se almacenan en cadena con el formato *NMEA 0183 GGA*, que es un conjunto estándar de mensajes desarrollado y controlado por la *National Marin Electronics Association*, de Estados Unidos, para la comunicación con la información de posicionamiento global.

El *EMP 400* es un equipo liviano de fácil de transportar, pesa aproximadamente 5 Kilogramos. El sistema de configuración de bobinas básico es co-planar horizontal, sin embargo los datos pueden ser colectados en cualquier modo dipolar tanto horizontal como vertical. La distancia de separación entre las bobinas o espiras, es de 1.219 metros.

El *EMP 400*, está equipado con sistema de almacenamiento de información denominado por sus siglas en inglés PDA (*Personal Digital Assistant*), el cual cuenta con una interface para gráficos GUI (*Graphic User Interfase*), y con un sistema de calibración, que permite además de verificar la precisión de la información del GPS, calibrar el equipo para las condiciones locales donde se va adquirir la información, de tal forma que se compense la presencia del operador y se determine la altura de las bobinas con la superficie.

El *EMP 400*, permite configurar las especificaciones del levantamiento, como la grilla, de modo que puede programarse el recorrido para el levantamiento de la información, de esta forma el PDA almacena la información de forma adecuada. Para esto se deben definir los parámetros de la misma, como el tipo de grilla y la dirección del transepto.

Las especificaciones técnicas del equipo de adquisición y formato de la información original entregada por el sistema se presentan en el Anexo 1.

### **3.2 Descripción de las estaciones o puntos de observación**

El levantamiento fue realizado sobre una extensión aproximada de 25Km<sup>2</sup> sobre la que se toma información en 3 Km<sup>2</sup> aproximadamente, el levantamiento analizado consta de 3967 estaciones, se hizo a lo largo de tres recorridos, con distintas localización y orientación, determinando zonas del levantamiento. Del diseño o distribución de las estaciones o puntos de levantamiento de la información, se

infiere un levantamiento de búsqueda o reconocimiento, más que orientado a la elaboración de modelos de cuerpos específicos. Bajo esta consideración, la selección de la zona de interés, asociada a la reserva arqueológica es considerada por los contrastes de conductividad y susceptibilidad siendo esta parte fundamental de este trabajo.

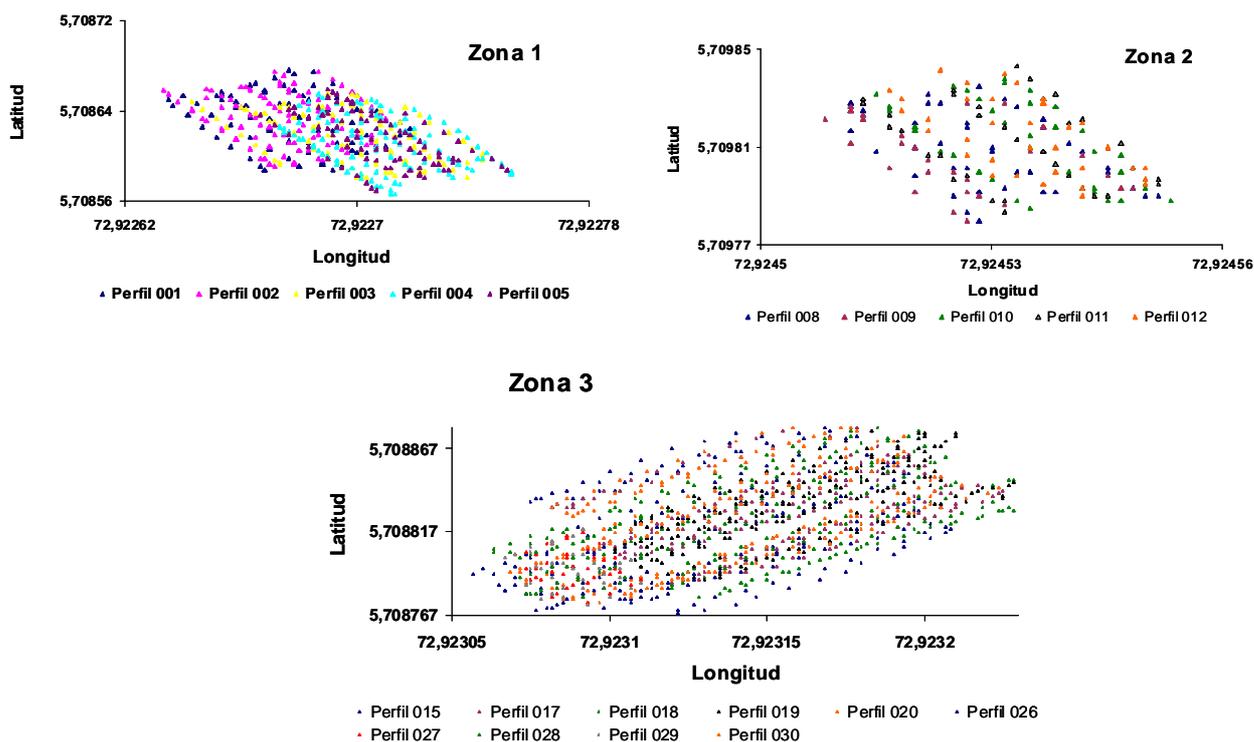
Los distintos recorridos o zonas de búsqueda mencionados se presentan en la Figura 3.3, obtenidos con la información de GPS. En cada una de estas gráficas, los símbolos están diferenciados por el recorrido seguido en la adquisición, que se notan con la denominación de perfil, tal como lo describe la información original. En las tres zonas se tomó información en el rango entre 1 y 15 KHz, la frecuencia de 16 KHz que revelaría la información más superficial, es usada para calibración del equipo, esto es campo a distancia que no toca la superficie; la calibración es realizada por el fabricante y utilizada como valor de referencia. A continuación se presenta la descripción general de los perfiles de cada uno de las zonas:

**Zona 1**, ubicada entre 5°70'85.66" N - 72°92'27.53"W y 5°70'86.77 N - 72°92'27.53" W, a una altura promedio de 2546.5 msnm. El perfil 001 corresponde a las frecuencias 1, 2 y 3 KHz; el perfil 002 a frecuencias de 4, 5 y 6 KHz; el perfil 003 a frecuencias de 7, 8 y 9 KHz ; el perfil 004 a frecuencias de 10, 11 y 12 KHz y el perfil 005 a frecuencias de 13, 14 y 15 KHz

**Zona 2**, ubicada entre 5°70'97.8" N - 72°92'45.55"W y 5°70'98.43 N - 72°92'45.08" W, una altura promedio de 2534.7 msnm. El perfil 008 corresponde a las frecuencias 1, 2 y 3 KHz; el perfil 009 a frecuencias 4, 5 y 6 KHz; el perfil 010 a frecuencias 7, 8 y 9 KHz; el 011 a frecuencias de 10, 11 y 12 KHz y el perfil 012 a frecuencias 13, 14 y 15 KHz.

**Zona 3**, ubicada entre  $5^{\circ}70'88.9''$  N -  $72^{\circ}92'32.28''$ W y  $5^{\circ}70'87.68$  N -  $72^{\circ}92'30.56''$  W, una altura promedio de 2540.1 msnm. Los perfiles 015 y 026 corresponden a las frecuencias 1, 2 y 3 KHz; los perfiles 017 y 027 a frecuencias de 4, 5 y 6 KHz; los perfiles 018 y 028 a frecuencias 7, 8 y 9 KHz; los perfiles 019 y 029 a frecuencias de 10, 11 y 12 KHz y los perfiles 020 y 030 a frecuencias 13, 14 y 15 KHz

Es de anotar que el levantamiento de la zona 3, presenta más información, de lo que se infiere también una zona más promisoría de localización del reservorio arqueológico.



**Figura 3.3** Delimitación Zonas del levantamiento de la información.

### **3.3 Mapas de conductividad y susceptibilidad**

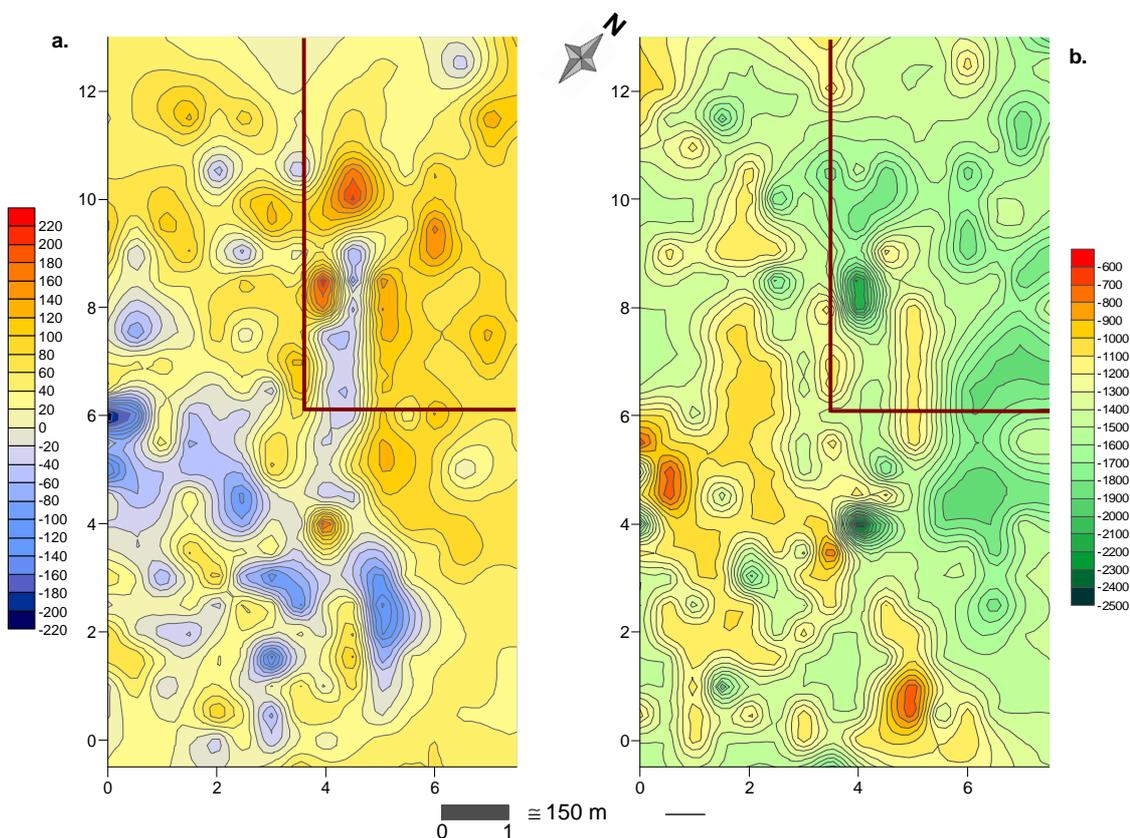
Teniendo en cuenta que la distribución de las estaciones refleja únicamente el recorrido del levantamiento, se elaboraron mapas por frecuencia de adquisición de los que se seleccionaron los más representativos para el objeto de estudio, utilizando el *software* de uso libre Golden Surfer 8.0

#### **3.3.1 Mapas de conductividad y susceptibilidad por frecuencias de adquisición.**

Teniendo en cuenta que a cada frecuencia es posible asociar una profundidad, se elaboraron mapas de distribución espacial de la conductividad y la susceptibilidad magnética independientes por cada frecuencia, esto es 30 mapas para las 15 frecuencias, de cuyo análisis preliminar, se escogieron los correspondientes a las frecuencias más relevantes, atendiendo en principio a dos criterios: el primero, aquellos donde se percibe la presencia de anomalías más definidas, coincidentes para las dos variables; y segundo, apreciación de continuidad en profundidad de las anomalías, criterios que orientan la presencia de características revelantes de la acción de remoción de material y/o presencia de cuerpos anómalos.

Bajo estos criterios, se analizaron tanto las anomalías positivas como las negativas que pueden corresponder a la acción de las características de la región anómala, y se tomó la decisión más adecuada, enfocar el análisis a anomalías de conductividad positiva, asumiendo criterios que se sustentan más adelante.

De los 15 pares de mapas atendiendo los criterios expuestos, se seleccionaron los mapas o cortes transversales del volumen de la información correspondientes a 14 KHz, que refleja la capa más somera, 9 KHz a profundidad intermedia y la más profunda 1 KHz, mapas que se presentan a continuación en las Figuras 3.4, 3.5 y 3.6, los recuadros superpuestos en los mapas corresponden a la sección escogida para un estudio mas detallado. Los mapas restantes asociados a las frecuencias intermedias dentro de las seleccionadas se presentan en el anexo 2.



**Figura 3.4 a.** Mapa de conductividad a 1 KHz, **b.** Mapa de susceptibilidad a 1 KHz.

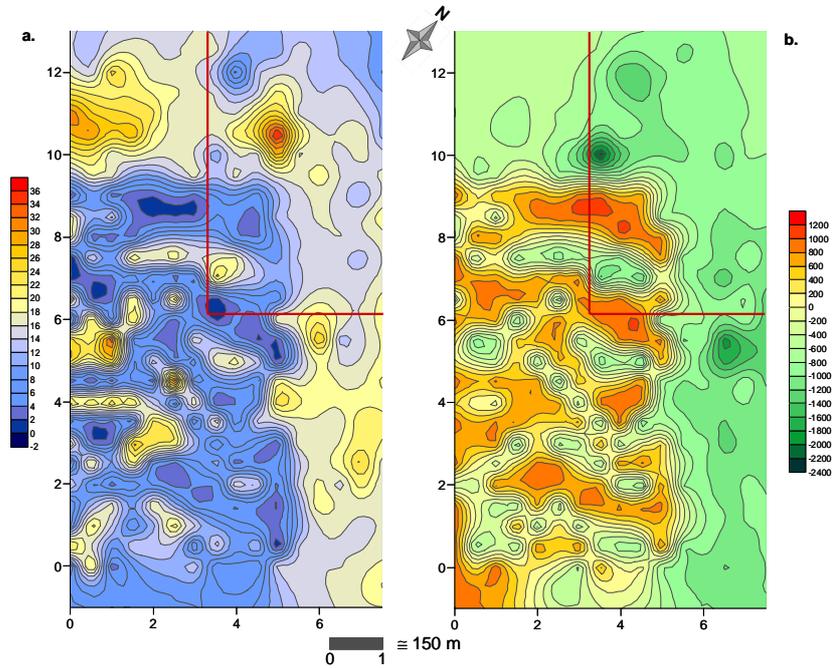


Figura 3.5 a. Mapa de conductividad a 9 KHz , b. Mapa de susceptibilidad a 9 KHz.

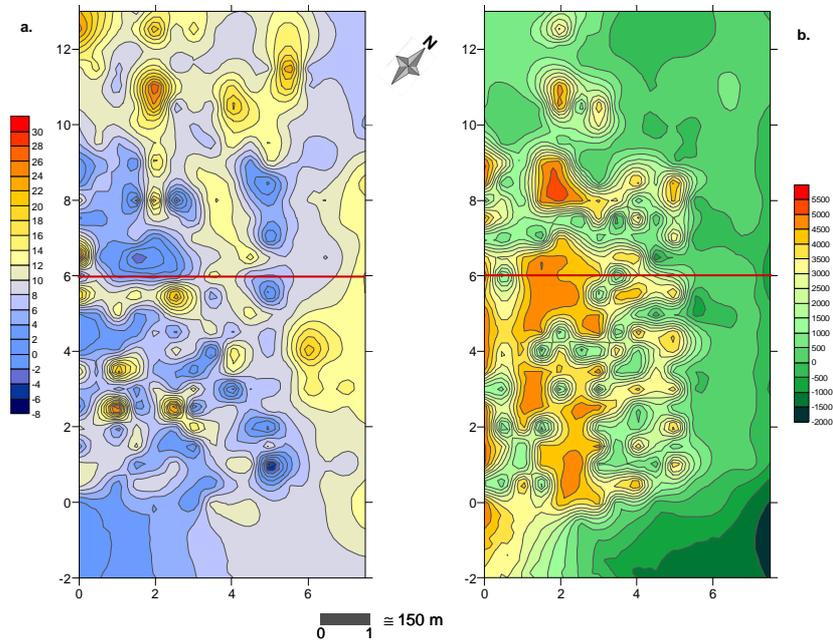


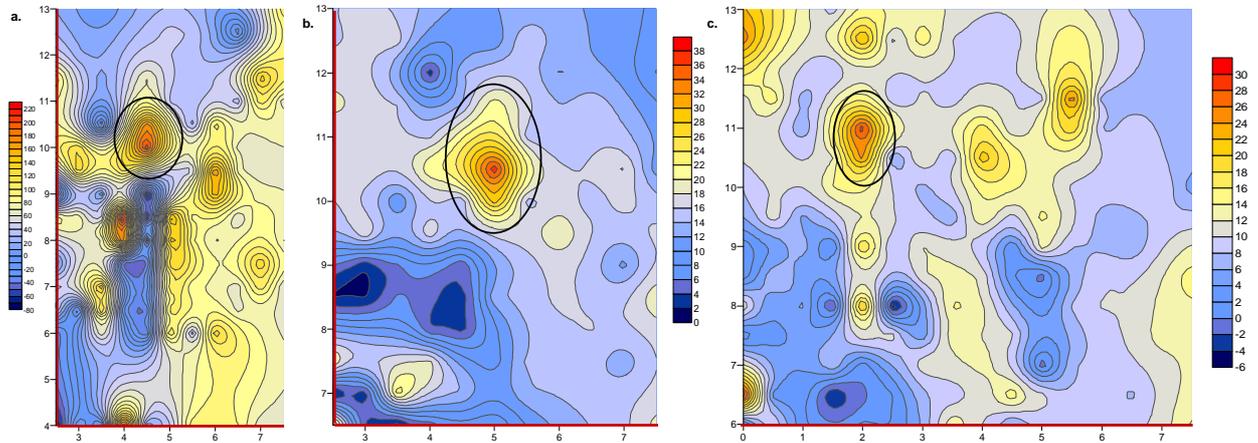
Figura 3.6 a. Mapa de conductividad a 14 KHz, b. Mapa de susceptibilidad a 14 KHz.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se seleccionó el sector del mapa de conductividad que presenta anomalías positivas contrastantes con el medio de baja conductividad y la región correspondiente del mapa de susceptibilidad para posterior análisis.

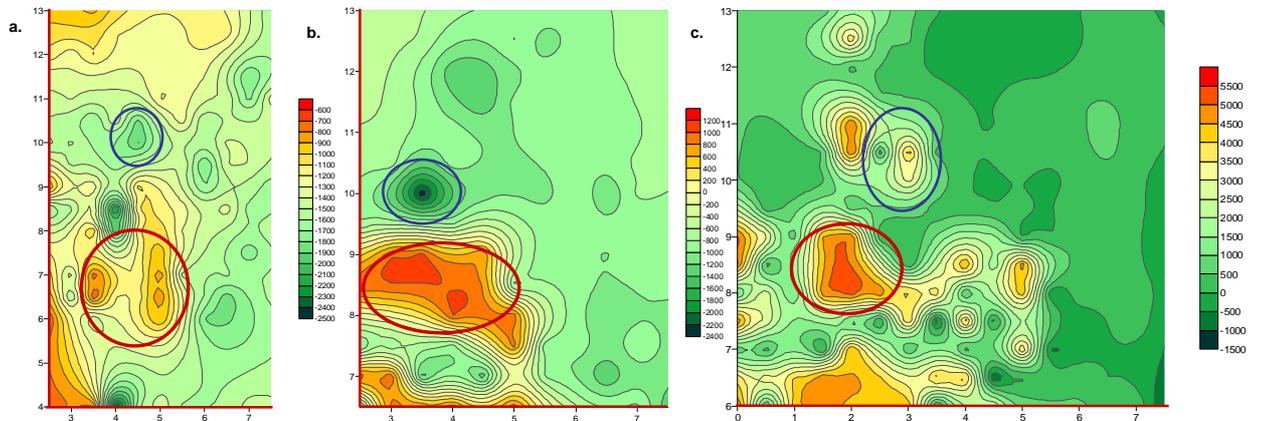
### **3.3.2 Mapas de conductividad y susceptibilidad por frecuencia de los cuadrantes seleccionados.**

En la Figura 3.9 se presenta la ampliación de las secciones seleccionadas, resaltando la continuidad de la anomalía positiva de conductividad aparente, los valores corresponden a diferencias relativas de la zona anómala con el entorno y de ninguna manera valores absolutos de conductividad y resistividad. Esto obedece al principio mismo de la medición, que se realiza a partir de la relación entre las componentes eléctrica y magnética del campo primario y el campo observado en partes por millón y teniendo en cuenta las características del sistema de adquisición establecidas por el fabricante, el sistema entrega las variables de interés conductividad y susceptibilidad aparentes, cuyo significado corresponde a asumir la respuesta del terreno como una unidad electromagnética.

En las Figuras 3.7 y 3.8 se muestran los tres mapas de conductividad y susceptibilidad correspondientes a las frecuencias y cuadrantes seleccionados, en los que se destacan las respectivas anomalías. En los correspondientes a la susceptibilidad se señalan tanto las positivas como las negativas considerando el carácter bipolar de las respuestas magnéticas.



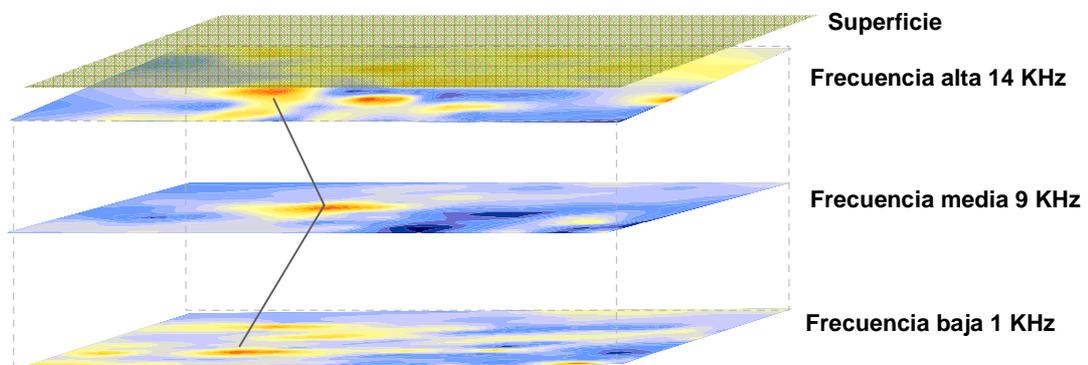
**Figura 3.7** Mapas de conductividad, para las frecuencias y cuadrantes seleccionados para análisis detallado, los círculos indican el centro de la anomalía asociada con la reserva arqueológica de interés **a.** 1KHz, **b.** 9 KHz y **c.** 14 KHz.



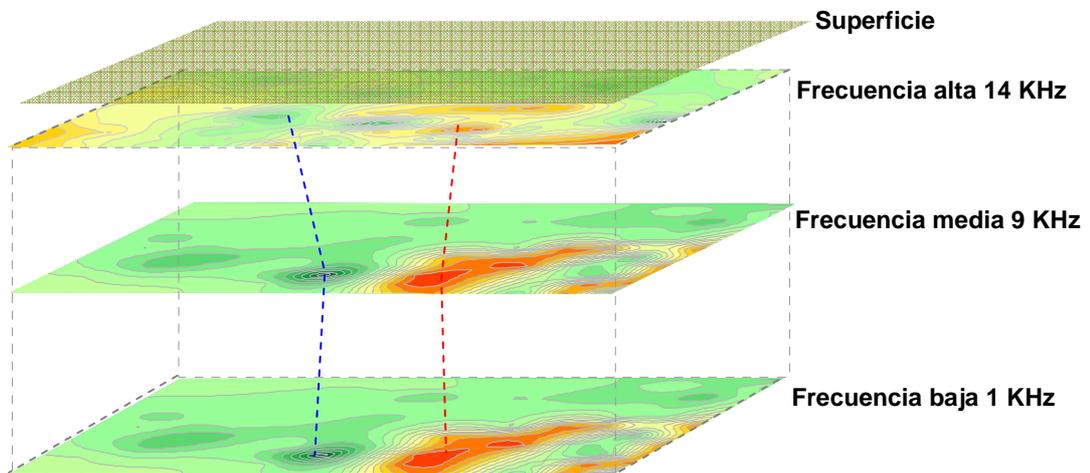
**Figura 3.8** Mapas de susceptibilidad, para las frecuencias y cuadrantes seleccionadas para análisis detallado, los círculos indican el centro de la anomalía positiva (círculo rojo) y negativa (círculo azul) que pueden ser asociadas con la reserva arqueológica de interés **a.** 1KHz, **b.** 9 KHz y **c.** 14 KHz.

Conviene destacar que del análisis preliminar de los mapas a todas las frecuencias y de todas las secciones o zonas del levantamiento, se seleccionaron las presentadas tal como lo exige la aplicación del método. Esta selección cuando la información es adquirida en el dominio del espacio corresponde a la descomposición espectral, a partir de la cual se seleccionan las frecuencias predominantes y de ellas se infiere la profundidad de penetración.

En las Figuras 3.9 y 3.10 se presentan los mapas de conductividad y susceptibilidad superpuestos de las frecuencias seleccionadas asumiendo la relación de la frecuencia de adquisición con la profundidad de penetración, con el fin de ilustrar la continuidad de las anomalías en profundidad.



**Figura 3.9** Cortes transversales de los cuadrantes y frecuencias seleccionadas, la línea muestra la continuidad de la anomalía de conductividad positiva.



**Figura 3.10** Cortes transversales de los cuadrantes y frecuencias seleccionadas, las líneas punteadas muestran la continuidad de las anomalías relevantes de susceptibilidad, positivas (rojo) y negativas (azul).

Esta secuencia de mapas corresponde a la presentación de la información obtenida en el levantamiento electromagnético y un análisis preliminar de la misma, con el fin de organizar el volumen de información adquirida para su posterior análisis que se presenta en el siguiente capítulo.

Es conveniente anotar que aunque el seguimiento de la anomalía parece ambiguo, la razón de la relación se presenta mas adelante.

## **4. Análisis e interpretación**

En este capítulo, se presenta el análisis y la interpretación del levantamiento electromagnético, realizado con base en los que le anteceden, los fundamentos teóricos que sustentan la aplicación de los métodos electromagnéticos y su aplicabilidad al objeto de estudio, la descripción detallada del levantamiento de la información y la elaboración de los mapas correspondientes.

El proceso descrito corresponde a la metodología de trabajo, que por su carácter no responde a un protocolo establecido y en consecuencia constituye en sí un aporte para abordar estudios geofísicos aplicables a una gran diversidad de problemas.

### **4.1 Análisis de la información**

La confiabilidad en la información primaria depende de varios factores, entre ellos resulta relevante para la adquisición 2D (trazo de grilla en superficie) tener en cuenta que no es suficiente tener un gran volumen de datos, sino una distribución aceptable, que evita aproximaciones computacionales no controlables. Atendiendo este criterio, del volumen original de información tomada se seleccionaron los que aseguraron fiabilidad en cuanto a localización, coherencia con los datos de GPS, de los cual resultaron tres zonas de recorrido que se muestran en la figura 3.3.

Entre otros factores algunos de carácter técnico como la precisión, la exactitud y el estado de funcionamiento de los sistemas de adquisición, factores que en algunos casos y particularmente en éste no resultan ser controlables. Al respecto, el criterio adoptado para filtrar la información básica fue la estabilidad de las mediciones, es de anotar que por cada punto de observación se tomaron al menos tres datos y del análisis de una muestra representativa de las variaciones se aprecia una tendencia a disminuir la dispersión, lo que corresponde a lograr estabilidad entre las tres unidades electromagnética el emisor, generador de los campos primarios, la tierra, generadora de los campos secundarios y el receptor, campo observado, superposición de los campos primario y secundario.

## **4.2 Análisis de mapas.**

A partir de la selección de la información útil para el propósito del trabajo se elaboraron mapas independientes por frecuencia, que corresponde al levantamiento de cortes transversales del volumen de la información

### **4.2.1 Análisis de mapas por frecuencia**

El mapa elaborado a la mayor frecuencia 15KHz (Figura 4.1) y asociado a la superficie, resulta ser de conductividad baja y relativamente homogénea, lo que constituye una cobertera resistiva del área de estudio, sin presencia de heterogeneidades conductoras que podrían constituirse en fuentes inductoras adicionales e incontrolables, generadoras de ruido, que como se menciona en el Capítulo 2, numeral 2.2.3 resulta propicia para la aproximación casi-estacionaria y

de fuente controlada, condiciones inherentes al principio de operación del sistema del adquisición.

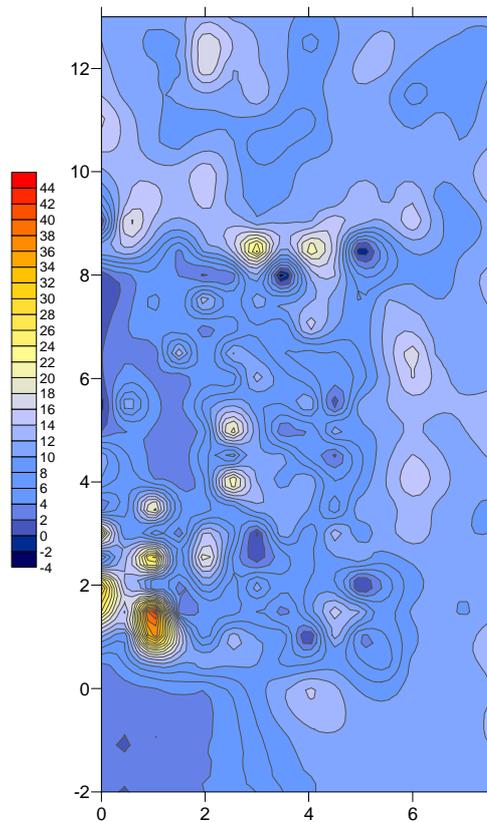


Figura 4.1 Mapa de conductividad a 15 KHz

Del análisis de los mapas de los catorce cortes restantes, se seleccionaron los correspondientes a tres frecuencias de 14KHz, 9KHz, y 1KHz consideradas representativas de la extensión en profundidad de la zona anómala, por que

presentan mayor nitidez para la delimitación de la fuente de las anomalías, ver mapas de Figuras 3.4 3.5 y 3.6.

Teniendo en cuenta que los mapas de conductividad y susceptibilidad por frecuencia, presentan tanto anomalías positivas, como negativas, se asumieron como reveladoras de la presencia de la fuente de anomalía, las positivas de mayor intensidad de contrastes conductivos, atendiendo básicamente los siguientes criterios:

- La remoción de material en profundidad por la acción antrópica, la posible presencia de residuos de construcciones antiguas y/o objetos, la acción de la concentración de materia orgánica proveniente posiblemente del cementerio subterráneo, generan condiciones anómalas de concentración de fluidos y oxidación, que favorecen la conducción eléctrica.
- La presencia y nitidez de la anomalía positiva de conductividad es más intensa en los tres cortes transversales.
- El carácter mono polar que generan las anomalías conductivas, contrario al bipolar de las correspondientes a las anomalías de susceptibilidad lo que facilita su seguimiento en profundidad.

#### **4.2.2 Análisis de mapas de cuadrantes, por frecuencia.**

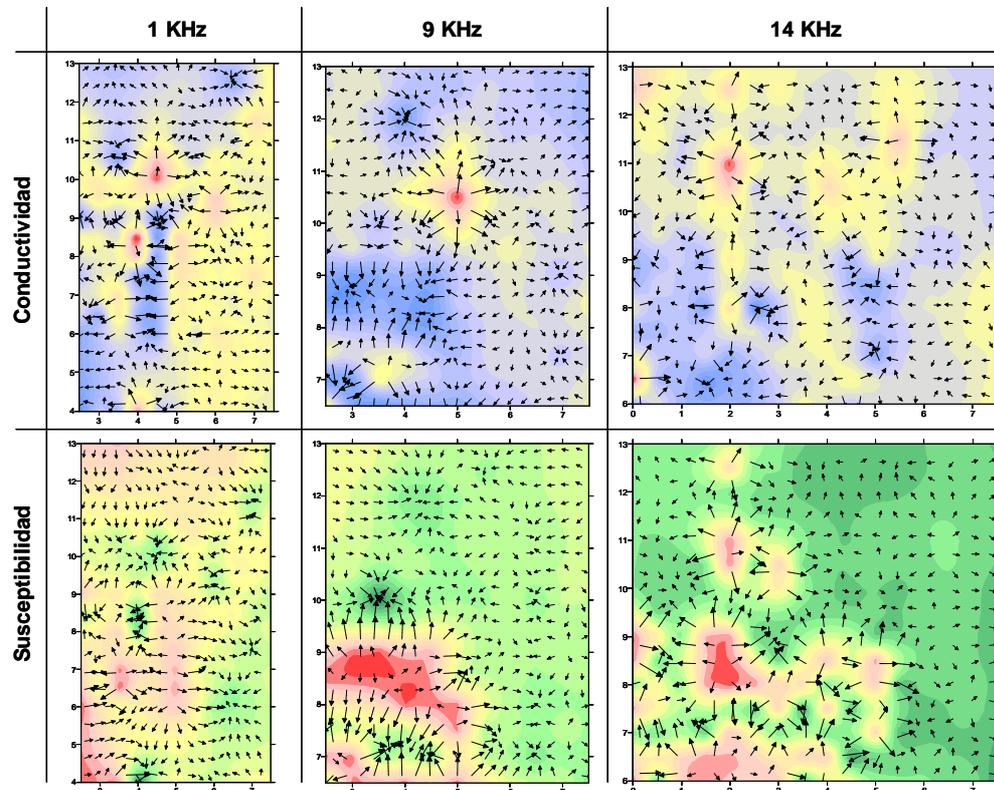
Atendiendo los criterios antes establecidos, se seleccionaron para cada frecuencia, secciones o cuadrantes que muestran continuidad de la anomalía

conductiva y las correspondientes de susceptibilidad, de éstas se elaboraron los respectivos mapas ampliados.

Del análisis de los mapas de los sectores por frecuencia (Figuras 3.7 y 3.8) se destacan los siguientes aspectos:

- Zonas de anomalía bien definidas en los tres cortes transversales tanto para las anomalías conductivas como de susceptibilidad.
- Mayor intensidad de las anomalías de conductividad y susceptibilidad a la frecuencia de 9HZ, de donde se infiere que a la profundidad asociada corresponde el centro de la fuente anómala.
- Del diagrama de los cortes transversales (Figuras 3.9 y 3.10) superpuestos, se infieren dos posibles trayectorias de seguimiento en profundidad del centro de la anomalía conductiva y un alineamiento de las correspondientes de susceptibilidad.

Para vislumbrar la tendencia direccional de las zonas anómalas, se presentan los mapas de vectores para la conductividad y la susceptibilidad a las frecuencias seleccionadas, representados en la Figura 4.2.



**Figura 4.2** Mapas vectoriales de conductividad y susceptibilidad a las tres frecuencias

Como puede observarse, la tendencia vectorial no muestra una orientación regular que permita sacar conclusiones contundentes, sin embargo, los mapas vectoriales constituyen una buena herramienta para resolver el problema de la dualidad de trayectorias de la anomalía conductiva, que corresponde efectivamente a la inferida antes en el diagrama representado en la Figura 3.9.

Del análisis expuesto, se concluye que el centro de la región anómala se ubica en el corte transversal correspondiente a 9 KHz, lo que permite inferir que la fuente

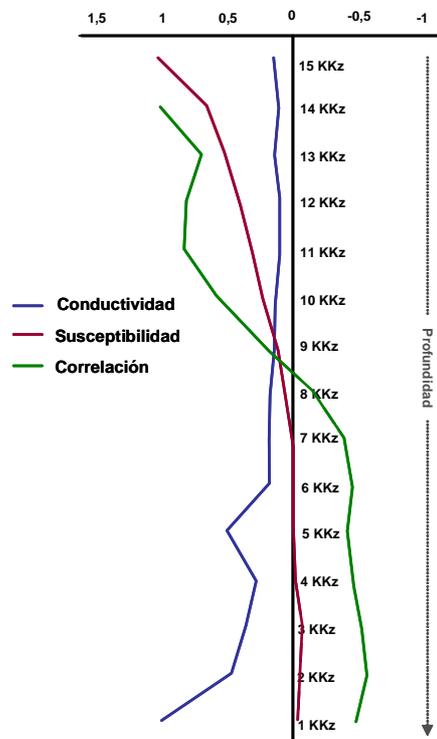
de la anomalía se origina en profundidad y se difunde hacia superficie (presencia en el corte a 14 KHz) y hacia abajo (presencia a 1 KHz). En consecuencia, se procedió a realizar un análisis unidimensional detallado alrededor del centro inferido de la anomalía que se presenta a continuación.

### **4.3 Análisis detallado unidimensional**

Atendiendo a los criterios antes mencionados para la selección de las anomalías de conductividad y susceptibilidad positivas, como posible fuente representativa del objeto de interés, se tomaron los valores más altos tanto de conductividad como de susceptibilidad para identificar el centro de la anomalía en cada una de las frecuencias de adquisición y se determinó el factor de correlación para las dos variables normalizadas.

#### **4.3.1 Correlación conductividad-susceptibilidad en profundidad**

De la correlación en profundidad (Tomando las 15 frecuencias correspondientes), como se muestra en la Figura 4.3, las dos variables electromagnéticas convergen a frecuencias medias (9KHz), mostrando a partir del punto de corte dos secciones bien identificadas, correlación positiva hacia la superficie y negativa a profundidad, con tendencia a cero en el punto de corte, lo que indica que a frecuencias medias las dos variables son independientes, situación que contrasta con los extremos, frecuencias 1 y 15 KHz de factor de correlación máximo.



**Figura 4.3** Correlación en profundidad de la conductividad y susceptibilidad magnética.

Como resultado de la correlación se decidió asumir como criterio para afianzar la determinación del punto central de la anomalía conductiva, realizar un calicatero electromagnético resistivo, con susceptibilidad constante, cuyos resultados se presentan a continuación.

### 4.3.2 Calicateo electromagnético

Atendiendo a los resultados de la correlación, de lo que se deduce la independencia de las variables a 9 KHz, se elaboró un calicateo electromagnético a esta frecuencia en dirección y localización mostradas en la Figura 4.4.

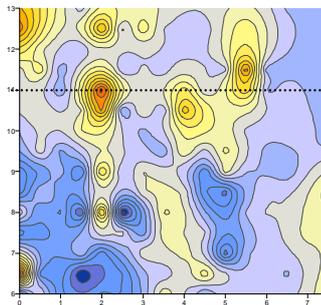


Figura 4.4 Sondeo electromagnético para calicateo resistivo

Tomando los valores de resistividad aparente (inverso conductividad), de la grilla generada por Surfer, se procedió a la realización del calicateo conformado por cinco sondeos simétricos alrededor del punto identificado como centro de la anomalía, obteniendo la seudo-sección presentada en la Figura 4.5.

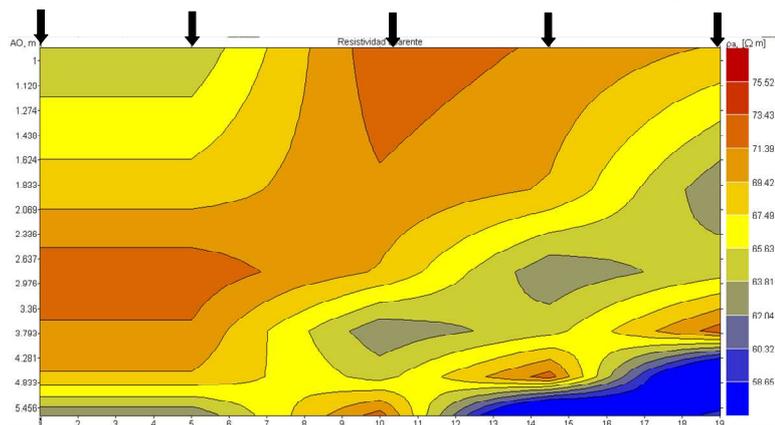
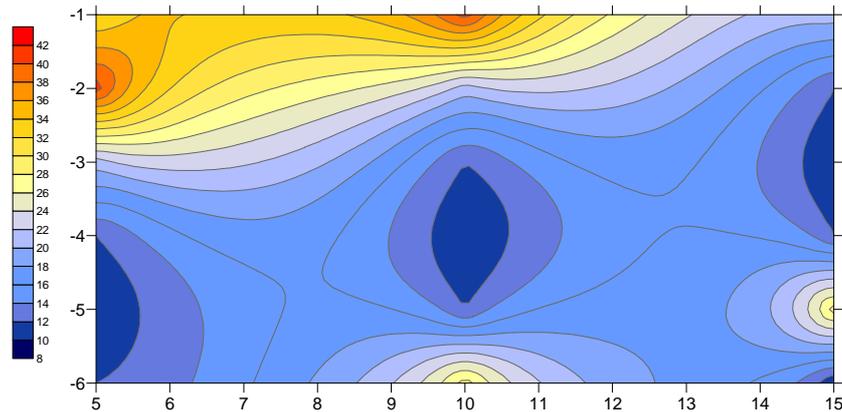


Figura 4.5 Seudo-sección electromagnética de resistividad aparente y susceptibilidad constante, obtenida con el software de uso libre IP2Win (MT) v.2.0.

De esta seudo-sección exportada a Surfer se obtiene el mapa de seudo-resistividad, presentado en Figura 4.6.



**Figura 4.6** Mapa de resistividad aparente a frecuencia de 9KHz.

De la seudo-sección y el mapa de resistividad aparente se obtiene que el centro de la anomalía, que está localizado a una profundidad aproximada de 3.4 metros desde la superficie.

Con el fin de ubicar espacialmente el centro de la anomalía, se procedió en igual forma que para ubicar geográficamente el área de estudio con la ayuda del programa *Google Earth*, utilizando las coordenadas identificadas como el centro de la anomalía, obteniendo el resultado que se muestra en la Figura 4.7. que corresponde a las coordenadas  $5^{\circ} 42' 31.35''$  Latitud Norte y  $72^{\circ} 55' 23.23''$  Latitud Este.



**Figura 4.7** Ubicación geográfica aproximada del centro de la anomalía.

#### 4.4 Síntesis del proceso de análisis e interpretación del levantamiento electromagnético.

El proceso descrito corresponde a la metodología de trabajo, que por su carácter no responde a un protocolo establecido y en consecuencia constituye en sí un aporte para abordar estudios geofísicos aplicables a una gran diversidad de problemas, en el siguiente diagrama, se sintetiza el proceso.

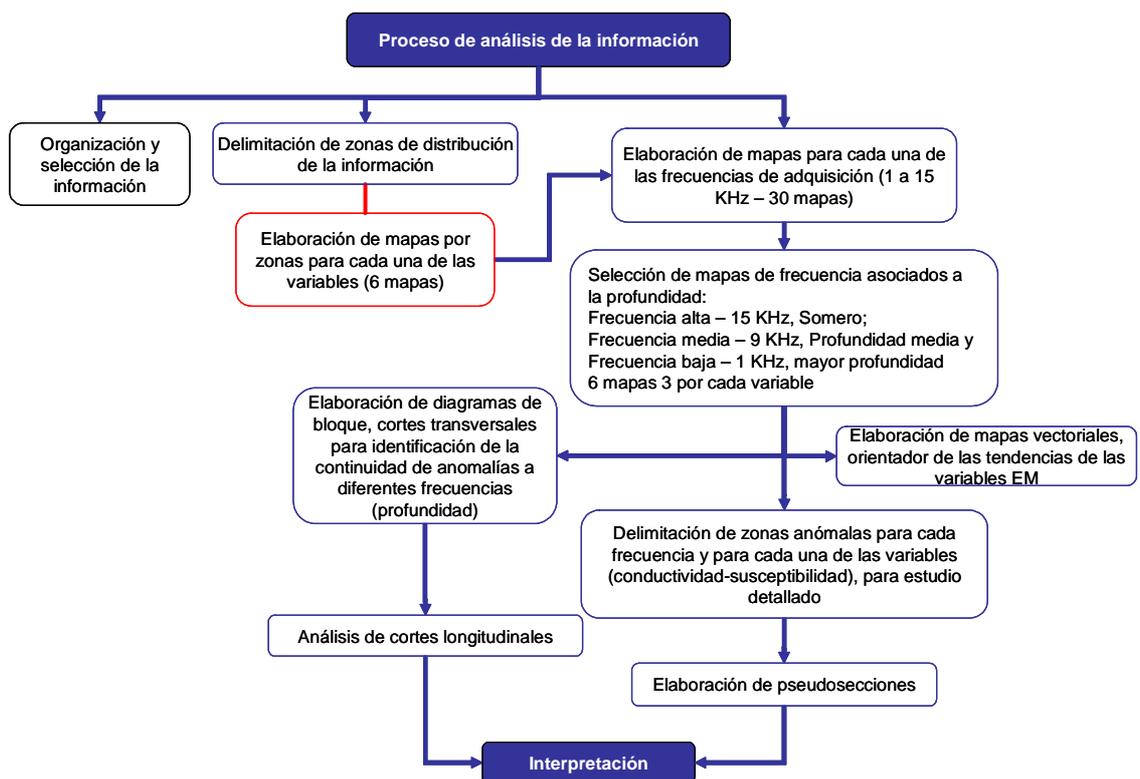


Figura 4.8 Síntesis del proceso de análisis de la información.

## 5. CONCLUSIONES

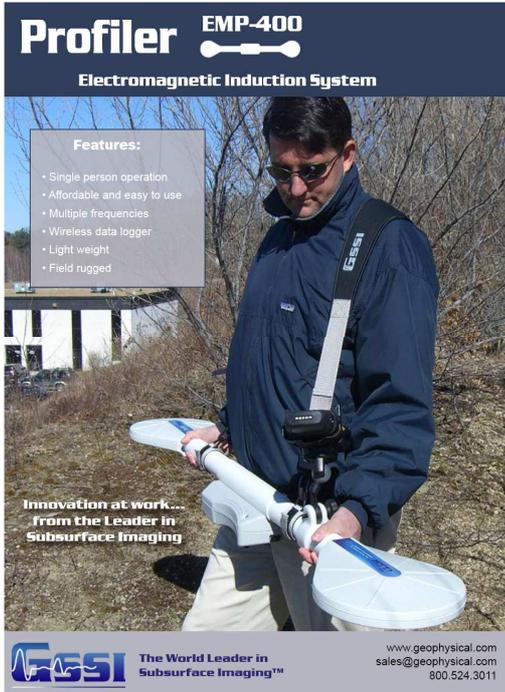
- Se logró diseñar, ejecutar y presentar una propuesta metodológica completa para la prospección electromagnética somera, con sistemas de adquisición de fuente controlada en el dominio de la frecuencia, que operan aplicando el modelo tipo Slingram.

La propuesta va desde la organización y selección de la información, hasta su análisis e interpretación. La importancia de ésta radica en que la mayoría de los trabajos reportados en la bibliografía, al menos los revisados, corresponden a la solución del problema directo en geofísica, determinando respuestas de cuerpos conductivos de geometría simple, que exigen un alto grado de rigor matemático pero excluyen los efectos del medio, entre estos se menciona la propuesta de D.Derman, 2005 que consiste en adecuar el método de continuaciones analíticas empleado en campos de potencial, para determinación de la profundidad de la fuente de la anomalía obteniendo excelentes resultados para modelos unidimensionales hipotéticos; igualmente se menciona el trabajo de Pratap y Mogi, 2003 quienes determinan la profundidad de penetración *skin*, para distintas frecuencias.

- Se logró realizar el análisis conjunto de las dos variables electromagnéticas, identificando la coherencia de la respuesta del medio a la acción de campo externo, se logró integrar modelos unidimensionales y bidimensionales y éstas con estrategias estadísticas y geodésicas para inferir el centro de la anomalía de fuente difusa.
- Se logró identificar la fuente de anomalía electromagnética y caracterizarla como una fuente difusa o región alterada, que se extiende desde su centro hasta la superficie.
- Se logró determinar espacialmente el centro de la anomalía, coordenadas y profundidad.

# A. Anexo 1: Especificaciones técnicas del Equipo de adquisición

## Profiler EMP 400



**Profiler EMP-400**  
Electromagnetic Induction System

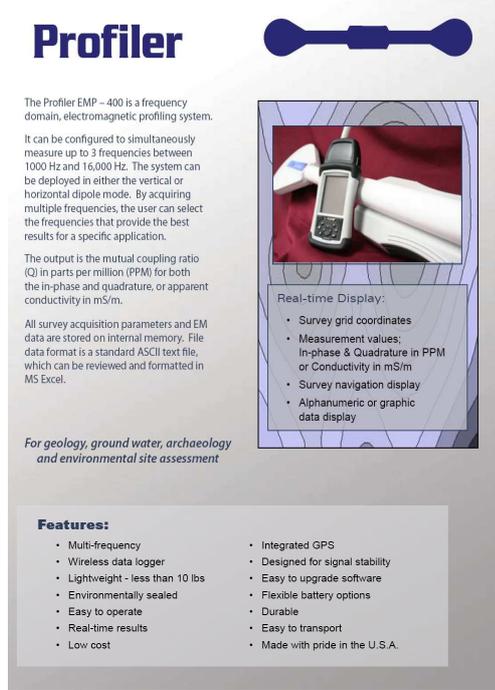
**Features:**

- Single person operation
- Affordable and easy to use
- Multiple frequencies
- Wireless data logger
- Light weight
- Field rugged

*Innovation at work... from the Leader in Subsurface Imaging*

**www.geophysical.com**  
sales@geophysical.com  
800.524.3011

**GS SI** The World Leader in Subsurface Imaging™



**Profiler**

The Profiler EMP - 400 is a frequency domain, electromagnetic profiling system.

It can be configured to simultaneously measure up to 3 frequencies between 1000 Hz and 16,000 Hz. The system can be deployed in either the vertical or horizontal dipole mode. By acquiring multiple frequencies, the user can select the frequencies that provide the best results for a specific application.

The output is the mutual coupling ratio (Q) in parts per million (PPM) for both the in-phase and quadrature, or apparent conductivity in mS/m.

All survey acquisition parameters and EM data are stored on internal memory. File data format is a standard ASCII text file, which can be reviewed and formatted in MS Excel.

*For geology, ground water, archaeology and environmental site assessment*

**Real-time Display:**

- Survey grid coordinates
- Measurement values; In-phase & Quadrature in PPM or Conductivity in mS/m
- Survey navigation display
- Alphanumeric or graphic data display

**Features:**

- Multi-frequency
- Wireless data logger
- Lightweight - less than 10 lbs
- Environmentally sealed
- Easy to operate
- Real-time results
- Low cost
- Integrated GPS
- Designed for signal stability
- Easy to upgrade software
- Flexible battery options
- Durable
- Easy to transport
- Made with pride in the U.S.A.

### Profiler EMP-400 Specifications

**Coil Spacing:** 4 feet (1.219 m)  
**Operational Bandwidth:** 1 kHz to 16 kHz  
**Records from 1 to 3 frequencies**  
**Measurement Values:**

- In-phase - PPM
- Quadrature - PPM
- Conductivity - mS/m

**Memory:** 248.5 MB  
 180,000 continuous data points  
 360,000 discrete data points

**Power:** re-chargeable Lithium Ion battery or 8 (eight) AA batteries

**Data Transfer:** Via MicroSoft® Active Sync

**Display:** 2.2" x 2.9" color screen (5.58 x 7.36 cm)

**Physical Dimensions:**

**Length:** ~57.5 inches (1.46 m)  
**Max. Width:** ~ 9.5 inches (24 cm)  
**Max. Height:** ~ 4.9 inches (12.4 cm)  
**Weight:** ~ 10 pounds (4,535 kg)



**Profiler System Includes:**

- Profiler EM system with wireless, handheld computer
- 12-channel WAAS GPS (can also be integrated with external GPS)
- 2 batteries
- Battery charger
- Carrying strap
- Rugged transit case
- Instruction manual
- 2 year warranty



**System Options:**

- Ground-level carry handle

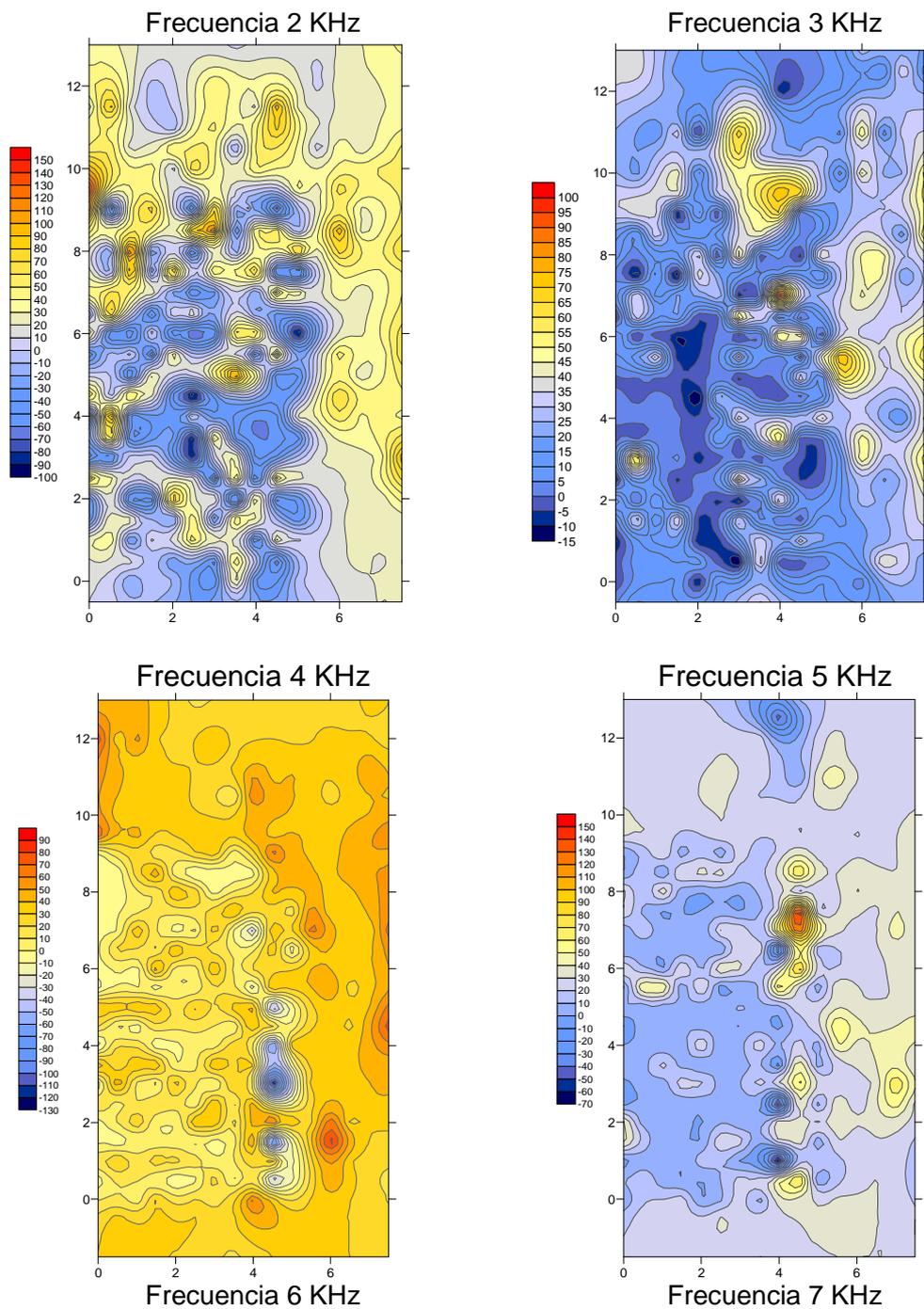
**GS SI** The World Leader in Subsurface Imaging™

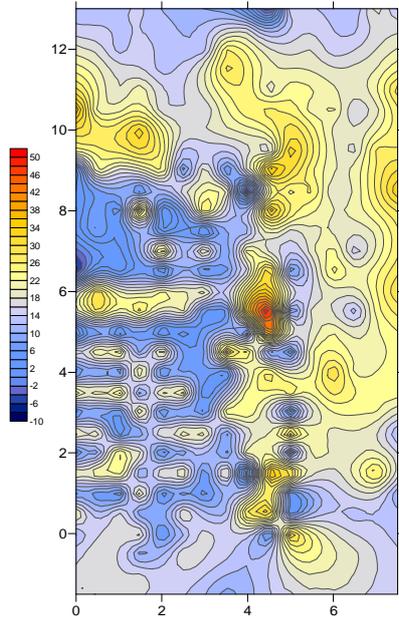
Geophysical Survey Systems, Inc.  
www.geophysical.com

12 Industrial Way  
Salmon, NE 03078-4843  
Tel: (603) 893-1109 Fax: (603) 898-3964  
sales@geophysical.com

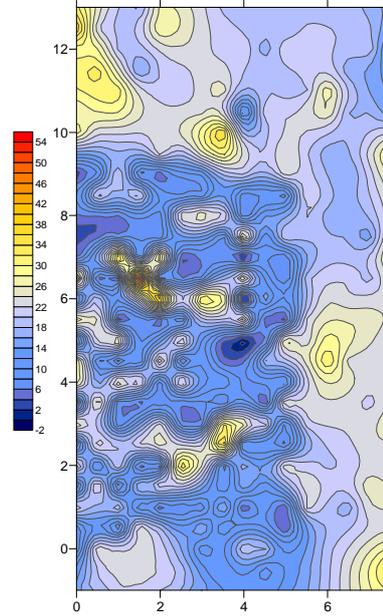
Copyright © 2006 Geophysical Survey Systems, Inc.  
All Rights Reserved March, 2006

## B. Anexo 2: Mapas de conductividad asociados a las 15 frecuencias de adquisición

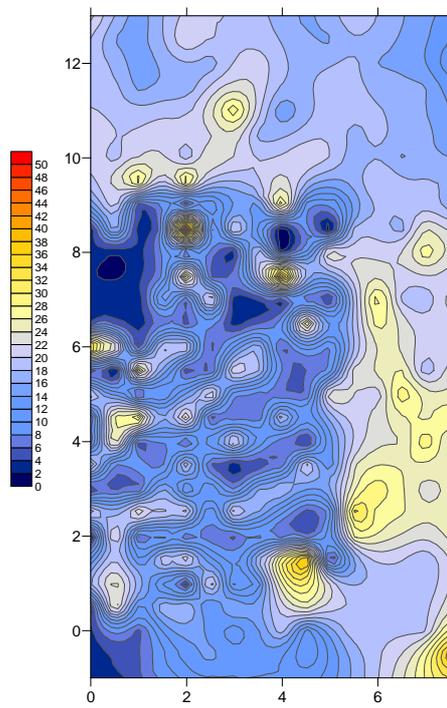




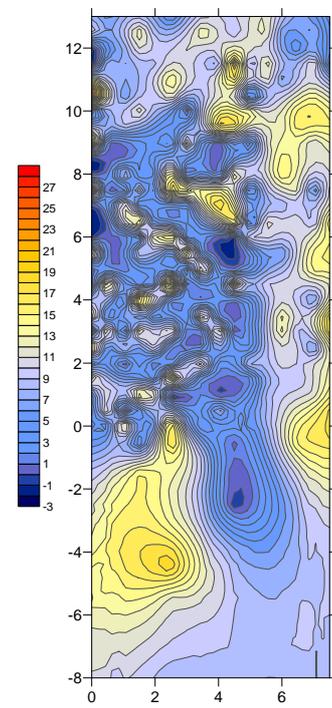
Frecuencia 8 KHz



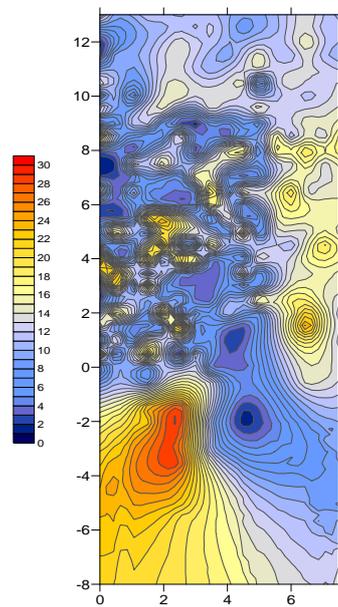
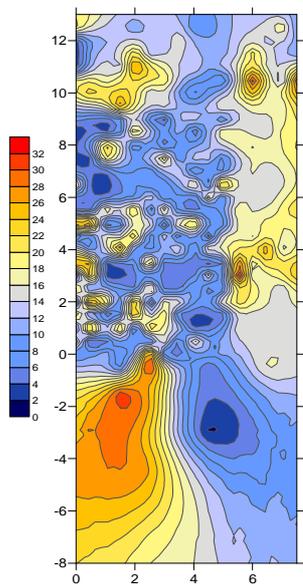
Frecuencia 10 KHz



Frecuencia 11 KHz

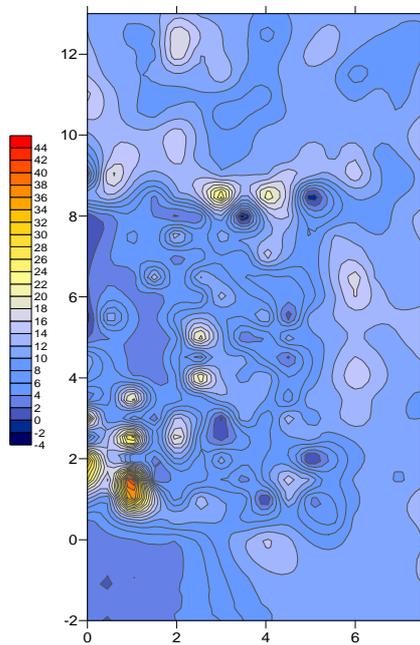
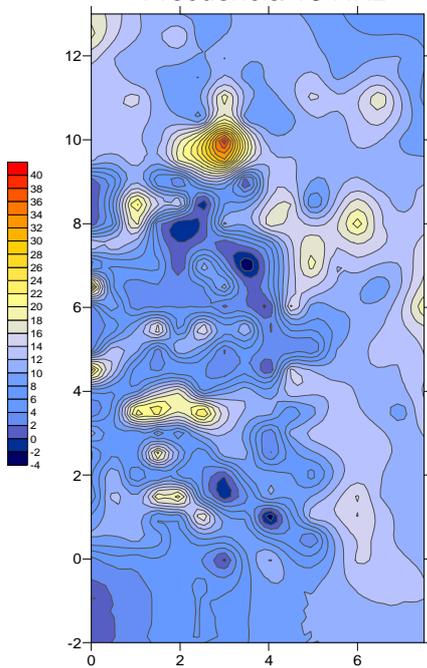


Frecuencia 12 KHz

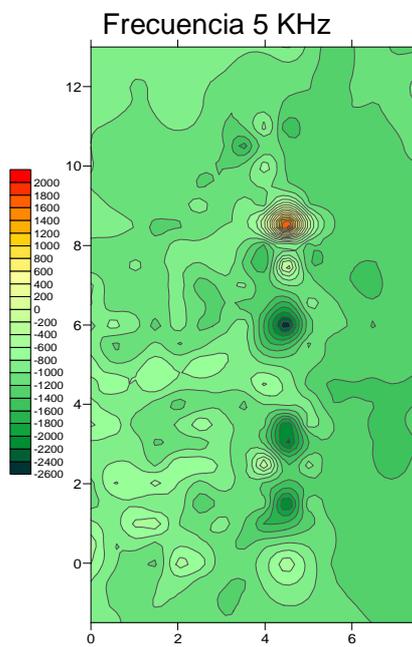
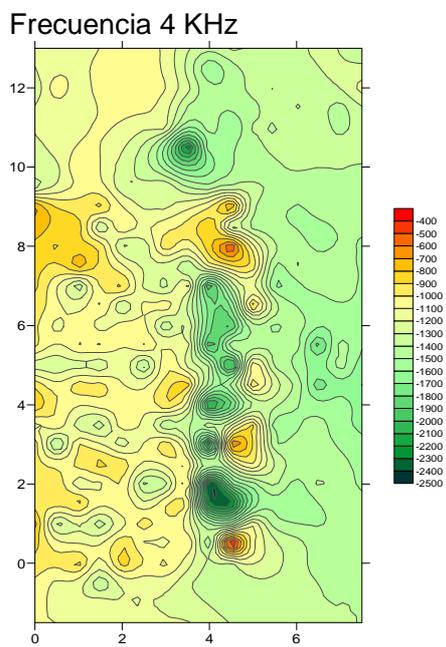
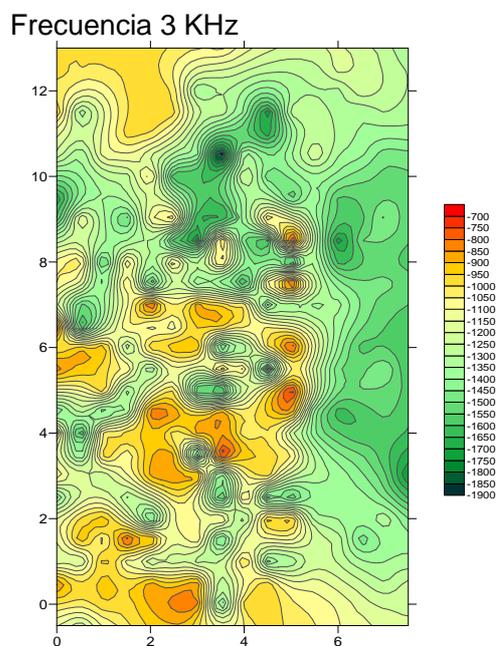
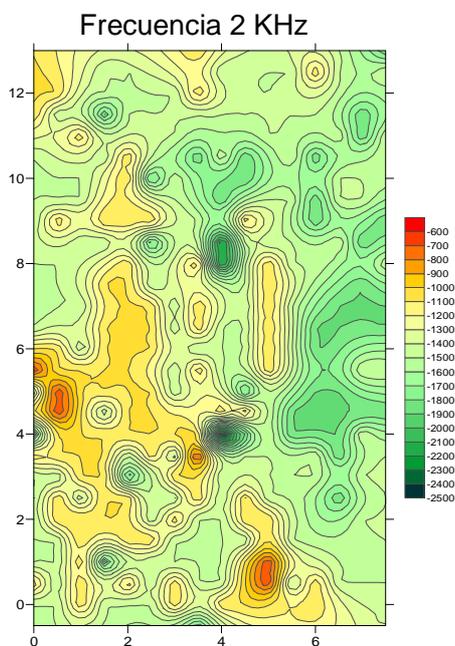


Frecuencia 13 HKz

Frecuencia 15 KHz

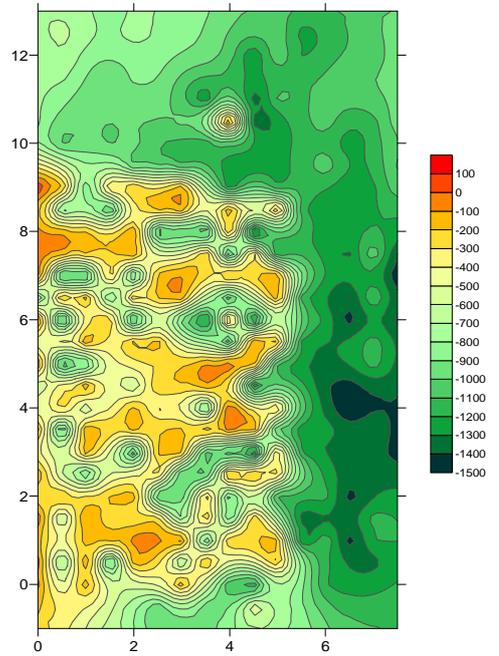
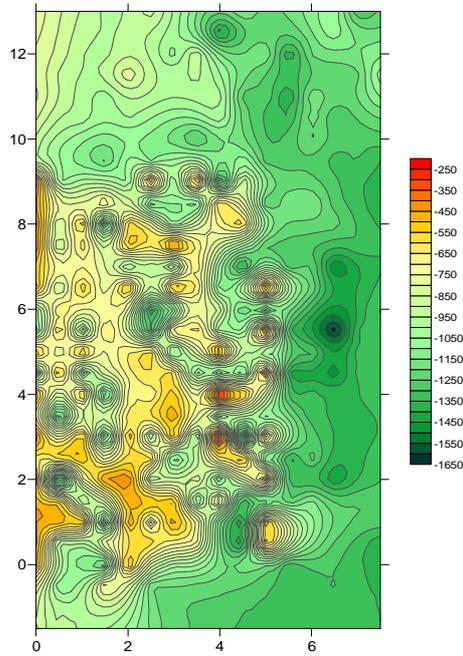


### C. Anexo 3: Mapas de Susceptibilidad asociados a las 15 frecuencias de adquisición

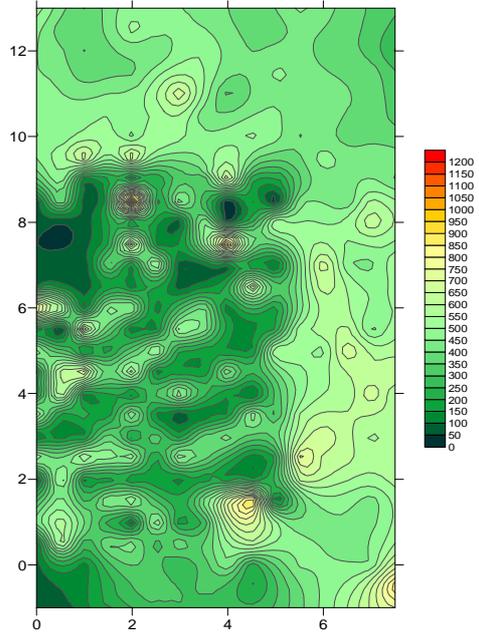


Frecuencia 6 KHz

Frecuencia 7 KHz

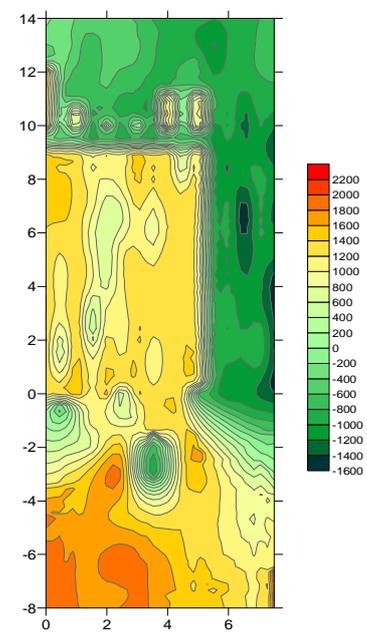


Frecuencia 8 KHz

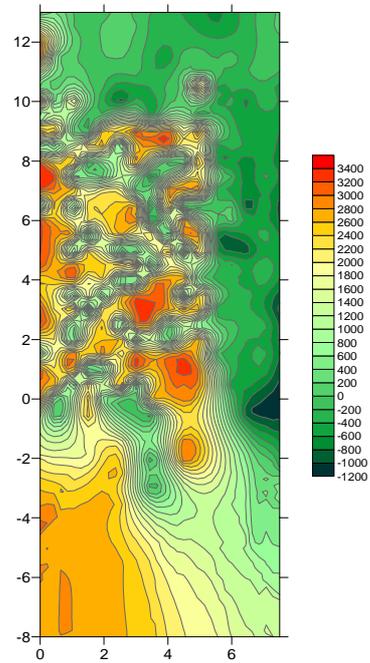
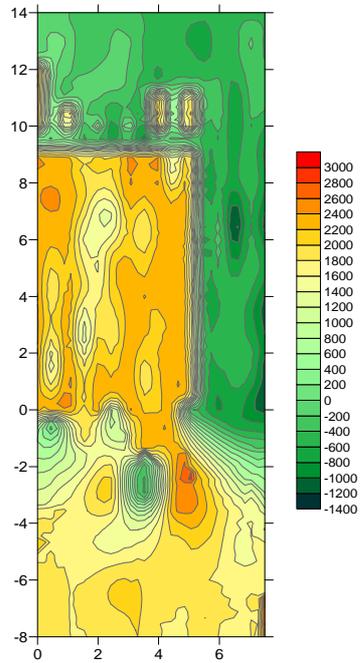


Frecuencia 11 KHz

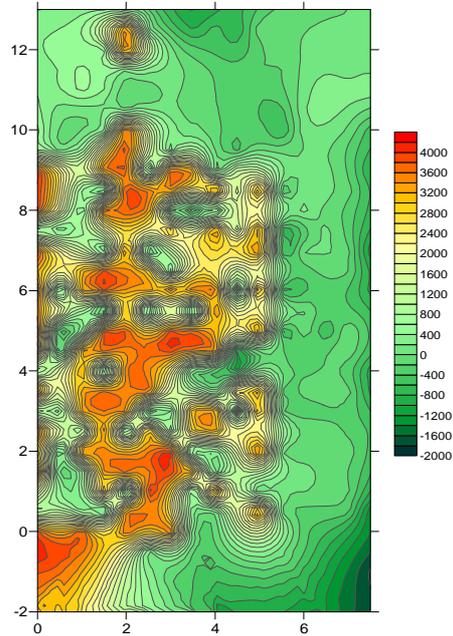
Frecuencia 10 KHz



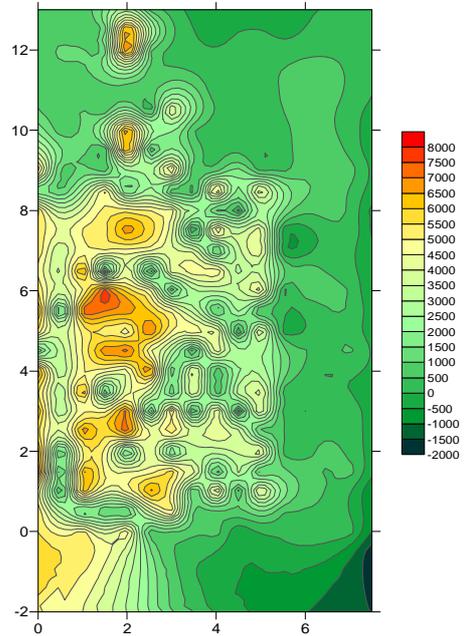
Frecuencia 12 KHz



Frecuencia 13 KHz



Frecuencia 15 KHz



## **Bibliografía citada y consultada**

**BLAKELY, R. J.** Potencial theory in gravity and magnetic applications.1995. Cambridge University Press

**BOBACHEV, A. IPI2Win (MT) v. 2.0** Magnetoteluric sounding interpretation, software. Moscow State University. Geoscan Ltda. 2002

**BRITTO-SCHIMEL, P y CARRERAS, C.** Aplicación de métodos geofísicos en arqueología: Una recopilación sobre el estado actual de la cuestión en España. Scientific Heritage. Vol 0 No. 1 (2005)

**CALLEGARY, J.;** FERRE, P.A Y GROOM, R.W. Vertical Spatial Sensitivity and Exploration Depth of Low-Induction-Number Electromagnetic-Induction Instruments 2007. Vadose Zone Journal 6:158–167 (2007).

**CHELOTTI, L., ACOSTA, N., FOSTER, M.,** Métodos eletromagnéticos de polarización inducida. Cátedra de geofísica aplicada. Universidad Nacional de Patagonia san Juan Bosco, Argentina 2009. [www.unp.edu.ar](http://www.unp.edu.ar)

**DONDURUR, D.** Depth estimates for Slingram electromagnetic Anomalies from dipping sheet-like bodies by the normalized full gradient method. Pure and applied geophysics. 162 (2005)2179-2195

**FERNÁNDEZ, J.C.,** Electromagnetismo 2004, Capítulo 9-Ondas-Guiadas, Departamento de Física, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires. En [www.fi.uba.ar](http://www.fi.uba.ar)

**FIGUEROLA, J.C.,** Tratado de geofísica aplicada, 3ra. Edición 1987 Librería de ciencia e industria

**FEYMAN, R.** Física Volumen II. Capitulo 42. Electromagnetismo y materia. Addison-Wesley Iberoamerica, 1971.

**GARCIA, M.M.** Prospección geofísica aplicada a la arqueología. 1997. Escuela Universitaria Politecnica de Merida. Revista Internacional de Ciencias de la Tierra. [www.mappinginteractivo.com](http://www.mappinginteractivo.com)

**GEOPHYSICAL SURVEY SYSTEMS**, GSS Inc., Profiler EMP-400 User's Manual , 2007

**GÓMEZ, E.** Imágenes electromagnéticas del interior de la Tierra: Parte VI. GEOS. Unión Geofísica Mexicana, 2002. p 459 - 461

**HITTEN, D.G.A.** y **BROOKS, J.R.V.** Diccionario de Geología. 1972. Ed. Cast.: Alianza Editorial, S.A., Madrid

**KAUFMAN, A. A.,** Y **KELLER, G. V.,** *The magnetotelluric sounding method.* Elsevier Sci. Publ. Co. Inc., 1981.

**MARTINELLI, P.** y **OSELLA, A.** El método de inducción electromagnética 1993. [www.gaia.df.uba.ar](http://www.gaia.df.uba.ar)

**McNEILL, J.D.** Electromagnetic terrain conductivity measurement at low induction number. Society of Exploration Geophysicists Geonics Limited Technical Note NT-6 (1980)

**MERRIAM, D.F.,** Quantitative comparison of contour maps, Journal of Geophysics Research 71(4), 1966.1105-1115 p

**PRATAP, N.** y **MOGUI, T.** Effective skin depth of EM fields due to large circular loop and electric dipole sources. Earth planets space, 55, 301-313. 2003

**ORELLANA, E.** Prospección geoelectrica por campos variables. 1973. Biblioteca Técnica Phillips, Paraninfo, Madrid

**ORTEGA, J.** Métodos geofísicos para la conservación del patrimonio arqueológico e histórico. [www.ciencias.jornada.com.mx](http://www.ciencias.jornada.com.mx)

**REYNOLDS, J. M.,** An Introduction to applied and Environmental Geophysics John Wiley & Sons Ltd. 1997. British Library

**RODRIGUEZ, C.A.;** **ZUÑIGA, O** y **CUERO, G.R.** La utilización de métodos geofísicos en la prospección de un poblado prehispánico Quimbaya Tardío I en Ginebra (Valle del Cauca, Colombia)". *Boletín de Antropología* Universidad de Antioquia, Vol. 22 N.º39, pp. 295-313

**SINGH N. P.** y **MOGI T.**, Effective skin depth of EM fields due to large circular loop and electric dipole sources, *Earth Planets Space*, **55**, 301–313, 2003

**TABBAGH, A.** Aplicaciones and advantage of the Sligram electromagnetic method for archeological prospecting, 1986 *Geophysics* Vol. 51, No. 3

**TELFORD, W. GERALD, L.**; y **SHERIFF, R.** Applied geophysics, Cambridge University Press. 1900

**UNSWORTH, M.** Electromagnetical an potential field methods, *Geophysics* 424. 2009. [www.phys.ualberta.co](http://www.phys.ualberta.co)

**WEST, G. F.** y **MACNAE, J.C.** Physics of the electromagnetic induction exploration method. 1991, in Nabighian, M.N. (Editor). *Electromagnetic methos in applied geophysics*, Vol. 2A Society of Exploration Geophysics.

**WHITTEN, D.G.A.** y **BROOKS, J.R.V.** Diccionario de Geología. 1972. Ed. Cast.: Alianza Editorial, S.A., Madrid.

**WONG, I.J.** **KREISWETTER, D.** **FIELDS, G.R.A.,.**; **SUTTON, L.** 1966 GEM-2 a new multifrecuency electromagnetic sensor. *Journal of environmental and engineering geophysics* Vol 1 Issue (2), p 129-137

