



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

División de Ciencias de la Tierra

Estudio Magnetotelúrico para la evaluación estructural de un túnel de conducción de agua para el proyecto Arcediano (Jalisco)

TESIS PROFESIONAL

Para obtener el título de

Ingeniera Geofísica

PRESENTA

JANET ANABEL GARCÍA LÓPEZ

DIRECTORA DE TESIS

DRA. CLAUDIA ARANGO GALVÁN





Comisión Estatal del Agua



Guadalajara, Jalisco; a 18 de Agosto de 2010.

DUEAS-370/2010

**PAS.JANET ANABEL GARCÍA LÓPEZ
COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD.
P R E S E N T E.**

En atención a su oficio S/N de fecha 28 de Junio del año en curso donde solicita la autorización para utilizar información Geofísica - Geológica obtenida con el método de Magnetotelúrico (MT) sobre el trazo de la línea de alta presión del sistema de bombeo Purgatorio-Arcediano información obtenida por la Comisión Federal de Electricidad dentro de los trabajos que al amparo del convenio número **CEA- CFE-01- GEOL-GEOT 01/2009**, se están llevando a cabo para esta Comisión Estatal de Agua y que de acuerdo con su solicitud será utilizada para la elaboración de su tesis profesional para obtener el título en la carrera de Ingeniería Geofísica.

Al respecto comunico a Usted que no existe inconveniente por parte de esta Institución para que la información mencionada se utilice exclusivamente para los fines y términos que expresa en su solicitud.

Sin otro particular de momento, le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE

**"2010, AÑO DEL BICENTENARIO DEL INICIO DEL MOVIMIENTO DE LA
INDEPENDENCIA NACIONAL Y DEL CENTENARIO DEL INICIO DE LA
REVOLUCIÓN MEXICANA".**

**RICARDO ROBLES VARELA
DIRECTOR DE LA UNIDAD EJECUTORA DE
ABASTECIMIENTO Y SANEAMIENTO**

C.c.p. Ing Jorge Cacique Vázquez.- Superintendente de Estudios Z.P.N. (C.F.E.)
José Octavio Ortíz Moreno.- Encargado del Proyecto Arcediano (C.F.E.)
Jorge Lara Valenzuela.-Superintendente de Abastecimiento (U.E.A.S.)
Archivo

RRV/JLV/HMHT/zcl



DEDICATORIA

A mi madre Raquel, quien conoce bien la definición de amor y perdón y cuya fortaleza
incomparable me ha guiado.

A mi padre Efraín de quien he aprendido tantas cosas aún en la distancia.

A mi hermano Miguel, que me heredó su música para disfrutar de la vida.

A mis hermanos Omar, Margarita, Mary y Gaby que me han fortalecido.

A Lupita, tan incondicional

A mi esposo Julio, compañero y amor de mi vida

A Camila y Rut, inocencia absoluta

A los que aún no están, pero esperamos



AGRADECIMIENTOS

Principalmente a Dios que me ha permitido conocer su grandeza y complejidad a través de mi trabajo, en el contacto con la Tierra y al observar tan indescritibles paisajes, para darme cuenta de que somos una minúscula parte de su gran obra.

A cada uno de los Doctores, Maestros e Ingenieros que le dan vida a la Facultad de Ingeniería de la UNAM de quienes recibí clases, por permitirme ser parte de los Profesionistas que han formado, dentro de un ambiente lleno de conocimiento e historia.

Agradezco a la Dra. Claudia Arango quien tuvo la disponibilidad de darle seguimiento a este trabajo aún en sus días de descanso, por la paciencia que me tuvo.

A la Comisión Estatal del Agua de Jalisco quien a través de la comisión Federal de Electricidad me permitió hacer uso de los datos sin mayor complicación.

A mis amigos Pedro Salas y Luis Bautista por compartir conmigo sus conocimientos.

A la esc. Perla S. Buck y su Congregación que a través de su carisma me enseñaron a realizar mis actividades con interés, trabajo y honradez.

Y en donde se encuentre, agradezco al profesor Atenco Sangrador.

Agradezco a mi esposo Julio César por ser impulso, comprensión y fuerza en mi vida, por ser la descripción más cercana, humana y tangible del sentimiento más poderoso, por ser amor.

Agradezco infinitamente a mi madre por estar al pie del cañón, a mi padre por esa valentía que lo caracteriza y que me contagio, a Omar por tomar la batuta de la orquesta e impulsarme, a mis hermanas y sobrina por ser mis mejores amigas, guías y apoyo, por ser mi ejemplo de fortaleza.



INDICE GENERAL

1	RESUMEN	7
2	INTRODUCCIÓN	8
2.1	OBJETIVOS	11
2.2	METODOLOGÍA	11
3	FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO	12
3.1	CONTEXTO GENERAL DE LOS MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS	12
3.2	CAMPOS DE ORIGEN INDUCTIVO Y GALVÁNICO.....	13
3.3	VARIANTES DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO.....	14
	<i>FUENTE NATURAL</i>	<i>14</i>
	<i>FUENTE CONTROLADA.....</i>	<i>15</i>
3.4	FUNDAMENTOS DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO	16
	<i>PRINCIPIOS DEL METODO</i>	<i>16</i>
3.5	ECUACIONES DE MAXWELL	18
3.6	RELACIONES CONSTITUTIVAS.....	19
3.7	ECUACIONES DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO	21
	<i>CONSTANTES DE PROPAGACIÓN, ATENUACIÓN Y FASE</i>	<i>23</i>
	<i>PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN O SKIN DEPTH</i>	<i>24</i>
	<i>IMPEDANCIA Y RESISTIVIDAD APARENTE</i>	<i>26</i>
	<i>TIPPER</i>	<i>28</i>
	<i>MODOS DE POLARIZACIÓN</i>	<i>28</i>
	<i>DISTORSIÓN ELECTROMAGNÉTICA</i>	<i>29</i>
4	ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO	30
4.1	ASPECTOS GENERALES	30
4.2	HIDROLOGÍA.....	30
4.3	GEOLOGÍA REGIONAL.....	32
4.4	GEOLOGÍA DE LA ZONA	35
	<i>LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....</i>	<i>35</i>
	<i>DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA</i>	<i>35</i>
	<i>ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS</i>	<i>40</i>
	<i>BARRENACIÓN DEL SITIO</i>	<i>42</i>
5.	IMPLEMENTACIÓN DE CAMPO Y ADQUISICIÓN DE DATOS.....	43
5.1	EQUIPO DE TRABAJO	43
5.2	GENERALIDADES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL EQUIPO.....	45
5.3	IMPLEMENTACIÓN DEL EQUIPO EN LA ZONA DE ESTUDIO.....	46
6.	ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS	49



6.1	DIMENSIONALIDAD DEL MEDIO	53
	SKEW.....	55
	DIAGRAMAS POLARES.....	55
6.2	MAPAS DE RESISTIVIDAD APARENTE Y PSEUDOSECCIONES DEL MODO DE POLARIZACIÓN TM.....	56
6.3	INVERSIÓN DE DATOS.....	60
	INVERSIÓN BIDIMENSIONAL	60
7.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	62
7.1	CORRELACIÓN GEOLÓGICO-GEOFÍSICA.....	62
8.	CONCLUSIONES	66
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1</i>	<i>Distribución de la población de los años 1940 a 2005 en el estado de Jalisco (CONAGUA, 2011)</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2. a)</i>	<i>Incidencia de la onda electromagnética sobre la superficie de la Tierra, b) modos de polarización TE y TM (Fernández et al., 1987).....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 3</i>	<i>Estado de Jalisco (INEGI, 2011).....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 4</i>	<i>Regiones hidrológicas del estado de Jalisco y sus principales ríos (CEA Jalisco, 2011)</i>	<i>32</i>
<i>Figura 5</i>	<i>Fisiografía del Estado de Jalisco (INEGI, 2012)</i>	<i>34</i>
<i>Figura 6</i>	<i>Localización de la zona de estudio.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 7</i>	<i>Columna litológica del área de estudio (CFE, 2010)</i>	<i>37</i>
<i>Figura 8.</i>	<i>Falla II, falla Sonorita y fallas inferidas que afectan la línea de conducción de alta presión. Barrenación del sitio (CFE, 2010)</i>	<i>42</i>
<i>Figura 9</i>	<i>Esquema del equipo de campo y su configuración típica (Geometrics, 2007).....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 10</i>	<i>Localización de las secciones MT y sondeos realizados</i>	<i>47</i>
<i>Figura 11</i>	<i>Implementación del equipo en campo. a) Consola Stratagem, b) Antena tipo domo, c)Equipo receptor AFE, d)Nivelación de bobinas magnéticas</i>	<i>48</i>
<i>Figura 12</i>	<i>Localización de SMT en el software Winglink.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 13</i>	<i>Resistividad, fase y diagramas polares del SMT 25</i>	<i>50</i>
<i>Figura 14</i>	<i>SEV 8.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 15</i>	<i>SEV 17</i>	<i>52</i>
<i>Figura 16</i>	<i>Corrección del Static Shift del SMT 17</i>	<i>52</i>
<i>Figura 17</i>	<i>Diagramas polares a una frecuencia de 1000 Hz para los 13 SMT de la líneas MT-2</i>	<i>56</i>
<i>Figura 18</i>	<i>Mapa de resistividad aparente a 10 000 Hz en la línea MT-2</i>	<i>57</i>
<i>Figura 19</i>	<i>Mapa de resistividad aparente a 1 000 Hz en la línea MT-2</i>	<i>57</i>
<i>Figura 20</i>	<i>Mapa de resistividad a 100 Hz en la línea MT-2.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 21</i>	<i>Mapa de resistividad aparente a 20 Hz en la línea MT-2</i>	<i>58</i>
<i>Figura 22</i>	<i>Pseudosección del modo TM de la línea MT-2.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 23</i>	<i>Inversión bidimensional de la línea MT-2, en el eje de las ordenadas se tiene la profundidad de estudio y en el eje de las abscisas la distancia entre cada SMT.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 24</i>	<i>Ajuste de curvas observadas y calculadas.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 25</i>	<i>Sección Geológico-estructural</i>	<i>64</i>
<i>Figura 26</i>	<i>Sección Geofísica bidimensional del modo de polarización TM.....</i>	<i>65</i>



1 RESUMEN

La importancia de abastecer de agua a la población así como llevar a cabo programas de saneamiento en el estado de Jalisco, son el objetivo final de los estudios del presente trabajo. La población se concentra en ciertas zonas en las que las demandas de todos los servicios aumentan y el estado de Jalisco representa un claro ejemplo del crecimiento urbano.

Por lo tanto se pretende aprovechar los caudales de los ríos Santiago y Verde que se encuentran en las inmediaciones de los municipios de Tonalá y Zapotlanejo, para la construcción de una presa.

En este caso, uno de los métodos geofísicos aplicados fue el método magnetotelúrico en su variante de fuente controlada, utilizado para obtener información estructural en la línea de conducción de alta presión cuya parte superior se encuentra en la cota de elevación 1630 msnm desde los 980 msnm en la parte más baja, el objetivo es profundizar hasta la cota 1040 en la que se excava un socavón de prueba en el que se tienen filtraciones de agua.

El método es aplicado en la modalidad de alta frecuencia con fuente controlada y se realizaron 13 sondeos (SMT) con una distancia aproximada de 100 m según lo permitía la topografía del sitio a lo largo de la línea de conducción abarcando una longitud de 1 km. En la zona más alta se realizaron dos sondeos eléctricos verticales (SEV) con los cuales se corrige el static shift de los primeros sondeos y para los posteriores sondeos la corrección se realiza con base en la similitud entre las curvas de resistividad aparente de los sondeos realizados sobre la misma litología.

Dada la complejidad geoelectrica de los datos, en el análisis dimensional se determinó utilizar el modo de polarización TM para la generación del modelo 2D, debido a que es el que mejor se ajusta a los cuerpos resistivos y se ve menos afectado por el static shift.

Considerando una dimensionalidad del medio 2D, los contrastes resistivos se traducen en lineamientos estructurales como la razón principal de la infiltración de agua en el socavón, razón por la cual no se encuentra agua en las zonas altas para las norias que ha requerido construir la población puesto que la roca se encuentra fracturada.



2 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se inicia a raíz de la problemática de la escasez de agua en la ciudad de Guadalajara, en cuya conurbación se pretende construir una presa para abastecer a la población del vital líquido.

Del total disponible de agua en el planeta, el 97% del volumen existente es agua salada, así que para consumo humano se reduce al 3%, que es agua dulce o de baja salinidad. Se estima que un volumen de 38 millones de km^3 del total de agua dulce se concentra en los glaciares y casquetes polares representando el 75%; el 21% se encuentra en las aguas subterráneas y el 4% restante se concentra en los ríos y lagos, a nivel mundial.

En México, las aguas subterráneas se encuentran en mayor cantidad que el agua superficial y proporcionan el 37% del volumen total concesionado para consumo. El agua subterránea a la que se tiene acceso se almacena y transita en los primeros 1,000 m a partir de la superficie del terreno; una de las ventajas que tiene sobre las aguas superficiales es que su exposición a la contaminación es menor, en cambio; el agua superficial se está contaminando rápidamente y es uno de los principales problemas que se padece actualmente.

Con base en la red hidrográfica de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de 633,000 km, se consideran 50 ríos principales a los que se adjudica el 87% del escurrimiento superficial y cuyas cuencas cubren el 65% de la superficie nacional; de los cuales, las cuencas del Grijalva-Usumacinta, Papaloapan, Coatzacoalcos, Balsas, Pánuco, Santiago y Tonalá cubren el 22% del territorio nacional y representan dos terceras partes del escurrimiento superficial.

Como se sabe, las aguas superficiales se utilizan para riego, agua potable, generación de energía eléctrica, etcétera y su disponibilidad, para los diferentes usos depende de la calidad de la misma y está relacionada de igual manera con la distribución de la población.

A mediados del siglo XX, la población se empezó a concentrar en zonas urbanas, de 1950 a 2005 la población de las zonas rurales disminuyó y aumentó en las zonas urbanas representando el 76.5% de la población. Un ejemplo de este suceso es el crecimiento de la Zona Metropolitana de



Guadalajara que en 1940 representaba el 19% del total de la población de todo el estado y para el 2005 ya representaba el 61% (CONAGUA, 2011).

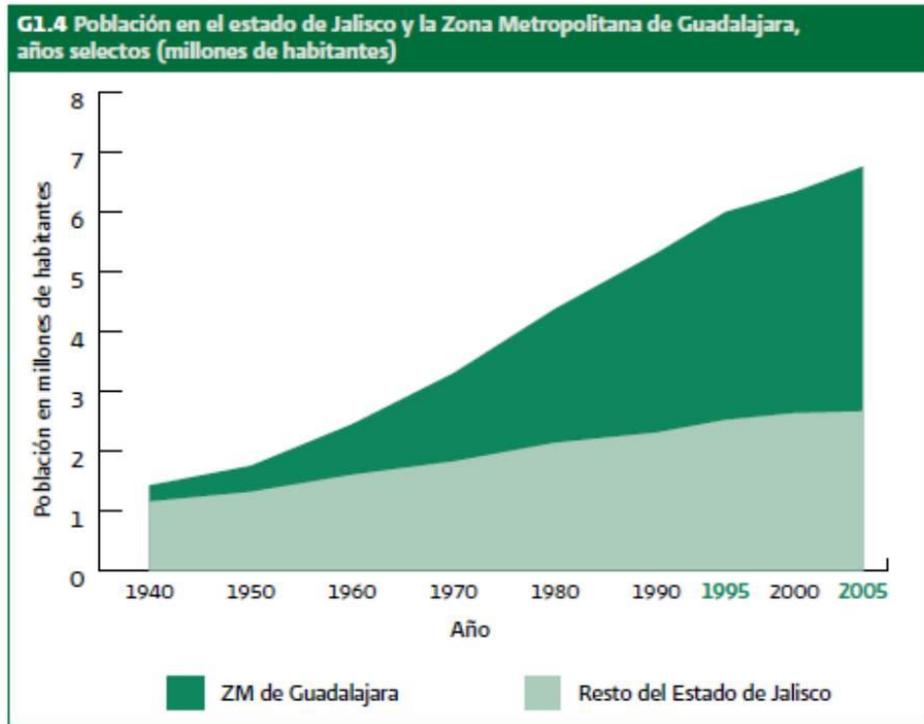


Figura 1 Distribución de la población de los años 1940 a 2005 en el estado de Jalisco (CONAGUA, 2011)

Analizando la disponibilidad de agua en el Estado de Jalisco, hasta el momento, el lago de Chapala, es la principal fuente de abastecimiento para la conurbación de Guadalajara, la cual tiene una capacidad total aproximada de 8,000 millones de metros cúbicos (Mm^3), con una superficie total de 114,659 hectáreas (ha), de las cuales Jalisco ocupa el 86% y Michoacán el 14%, aportando el 60% del agua que llega a la ciudad de Guadalajara (CEA Jalisco, 2011).

Se cuenta también con 64 acuíferos en 28 zonas geohidrológicas, con una recarga anual de 4,852 Mm^3 al año y se estima una extracción de 1,165 Mm^3 anualmente de los cuales, sólo se utiliza el 24% del agua a través de 9,163 aprovechamientos subterráneos.

Y las principales zonas con disponibilidad de agua superficial y subterránea en el Estado de Jalisco se ubican en: Ciudad Guzmán, Región Ameca, Mascota, Tequila, Lagos de Moreno,



Altos de Jalisco, Teocaltiche, Puerto Vallarta, La Huerta, Tomatlán, Mixtlán, Talpa de Allende, Tala, Norte de Jalisco, entre otras (CEA Jalisco, 2011).

El proyecto Arcediano en el Río Grande de Santiago es parte de los programas de saneamiento y abastecimiento de agua potable a la población a corto, mediano y largo plazo, para el municipio de Guadalajara, porciones urbanas de Zapopan, Tlaquepaque, Tonalá, El Salto y Tlajomulco de Zúñiga, cuya población actual es de 4,380,600 habitantes (INEGI, 2011).

En el programa de saneamiento se consideró la construcción de plantas de tratamiento, túnel colector, plantas de bombeo, redes de alcantarillado, etcétera. Mientras que para el abastecimiento se considera la construcción de una presa con la finalidad de cubrir la demanda actual y futura hasta el año 2030, además de contribuir a la recuperación y conservación del Lago de Chapala.

Para lo cual, la Comisión Estatal del Agua del Estado de Jalisco (CEA) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE) a través de la Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil (GEIC), llevan a cabo los estudios de prefactibilidad de la obra mediante levantamientos topográficos, exploración geológica, barrenación y exploración geofísica con sondeos eléctricos verticales (SEV), tendidos de refracción sísmica (TRS) y sondeos magnetoteléxicos (SMT).

La zona de estudio abarca aproximadamente 190 hectáreas y se ubica entre el río Grande de Santiago y el río Verde, al este de la ciudad de Guadalajara. Es en las inmediaciones de éste último en donde se llevarán a cabo parte de las obras civiles para la presa (obra de toma, casa de máquinas, túnel de acceso y el túnel de conducción de alta presión).

Como parte de los estudios de prefactibilidad, en la margen izquierda del río Verde se realizó un socavón de prueba en la cota 1037.019 m que presenta filtraciones de agua en su interior. Este socavón se localiza bajo la propuesta de construcción de la línea de conducción de alta presión que tendrá una longitud de 1941.21 m desde la zona de casa de máquinas a una elevación de 980 msnm hasta la cota 1630 msnm; a lo largo de este trazo se realizaron un total de 13 sondeos magnetoteléxicos (SMT) en la modalidad de alta frecuencia, que se emplearon para definir la estructura del basamento rocoso e identificar el origen de las filtraciones de agua en el socavón.



En este caso, se hace énfasis en la versatilidad del método magnetoteléurico, ya que su implementación en campo, no requiere de grandes áreas, por lo que se puede trabajar fácilmente en zonas de topografía abrupta y la profundidad de investigación sólo depende de la frecuencia en la que se trabaje. Por lo que se implementó el método MT en la línea de conducción, ya que la necesidad de profundización era de 500 m aproximadamente.

2.1 OBJETIVOS

Definir, mediante el Método Magnetoteléurico, el comportamiento geoléurico del sitio en donde se pretende construir un túnel de conducción de agua, caracterizar las posibles estructuras geológicas y determinar el origen de las filtraciones de agua en el socavón.

2.2 METODOLOGÍA

- Reconocimiento de la zona de estudio para la realización del método magnetoteléurico.
- Revisión de estudios previos en la zona.
- Recopilación de información topográfica y geológica.
- Realización de los sondeos magnetoteléuricos (SMT) en la modalidad de alta frecuencia.
- Procesamiento de los datos obtenidos.
- Interpretación de los sondeos adquiridos y la realización de un modelo 2D.
- Integración de la información geológica y geofísica para la generación del perfil, definiendo las estructuras de las capas geoléuricas obtenidas con el método magnetoteléurico.
- Determinar el posible origen de las filtraciones en el socavón de prueba.



3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL MÉTODO

3.1 CONTEXTO GENERAL DE LOS MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS

El método magnetotelúrico (MT) es una técnica electromagnética que involucra fluctuaciones en los campos eléctrico E y magnético H , en dirección ortogonal sobre la superficie de la Tierra, como el medio para determinar la conductividad de las estructuras de la Tierra, los espectros de estas variaciones cubren rangos de periodos que abarcan segundos hasta días de medición, con una profundidad de estudio desde algunas decenas de metros hasta varios cientos de kilómetros (Simpson y Bahr, 2005).

Las fuentes de las variaciones magnetotelúricas sobre la superficie de la Tierra y en el espacio cercano a la Tierra son corrientes ionosféricas y magnetosféricas que se derivan de la interacción solar con el campo geomagnético. Debido a que la fuente se encuentra lo suficientemente lejos, el comportamiento de la señal se considera como el de una onda plana.

Se debe tomar en cuenta que la Tierra es un medio pasivo, ya que al no generar energía sólo funge como un medio disipativo. El objetivo es conocer la distribución de la conductividad y así definir las variaciones litológicas.

El método consiste en medir simultáneamente el campo eléctrico y el campo magnético, es decir; se obtienen 2 componentes eléctricas y 2 magnéticas que son las componentes del campo, con el fin de relacionarlas linealmente y esa relación lineal, llamada impedancia (Z), permite conocer las variaciones de conductividad eléctrica en el subsuelo.

Para la implementación del equipo en campo se deben tomar en cuenta algunas consideraciones como son la horizontalidad de las bobinas magnéticas y de los electrodos, así como evitar el ruido ambiental en la zona de estudio como motores en funcionamiento, líneas de alta tensión, mallas eléctricas, tránsito de vehículos y cualquier actividad que ocasione perturbaciones en la toma de datos.

En el momento de la adquisición de los datos, las variaciones MT, están acompañadas por ruido instrumental y ruido industrial. Éste último es causado por inducción de plantas eléctricas, líneas de transmisión eléctricas, líneas de telégrafos, dispositivos de radio localización, etcétera. El



radio de afectación puede alcanzar varias decenas de kilómetros. El ruido instrumental es ocasionado por el equipo de grabación, ruido de los amplificadores, el rumbo de los sensores, el proceso electroquímico en los electrodos, así como también el movimiento de los cables del campo geomagnético ocasionado por el viento.

3.2 CAMPOS DE ORIGEN INDUCTIVO Y GALVÁNICO

El campo MT está conformado por el efecto de inducción de corrientes ionosféricas-magnetosféricas y en menor proporción por las corrientes galvánicas de la ionósfera. Los campos de origen inductivo y galvánico difieren en sus propiedades, principalmente a bajas frecuencias (Berdichevsky y Dmitriev, 2002).

La tierra está rodeada por la atmósfera que funciona como un aislante. En la superficie de la tierra la conductividad eléctrica del aire es de 10^{-14} S/m y la conductividad de la atmósfera cercana a la tierra es de $2 * 10^{-14}$ S/m a una frecuencia de 1/3600 Hz. Al mismo tiempo, la conductividad eléctrica de la región Este de la ionósfera tiene rangos que van desde 10^{-3} a 10^{-4} S/m. Así, las corrientes primarias inducidas a bajas frecuencias por las variaciones magnetoteléuricas, se centran alrededor de la ionósfera y no más de un millón de corrientes ionosféricas penetran en la atmósfera por conducción y fluyen en la Tierra. Ésta cantidad se considera poca, por lo que se asume que las corrientes telúricas que fluyen en la Tierra son de origen inductivo y los mecanismos galvánicos relacionados con la conducción atmosférica no son importantes.

De acuerdo a las investigaciones realizadas sobre las variaciones magnetoteléuricas, se considera a la atmósfera como un aislante entre la tierra y la ionósfera y las corrientes telúricas se deben a la inducción electromagnética.

Así, se puede omitir la relación galvánica entre la ionósfera y la Tierra y asumir que la conductividad eléctrica del aire es cero; reduciendo la teoría del campo magnetoteléurico al estudio de la inducción electromagnética en la Tierra, con la finalidad de analizar la interacción de los campos eléctrico y magnético sobre la tierra y obtener las propiedades eléctricas del subsuelo (Berdichevsky y Dmitriev, 2002).



3.3 VARIANTES DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

Las variantes del método magnetotelúrico se basan en el tipo de fuente que utiliza y la frecuencia con la que trabaja.

METODO	FUENTE	FRECUENCIA	PROFUNDIDAD DE ESTUDIO
MT (Magnetotelúrico)	Natural	10^{-4} Hz- 10Hz	1-250 km
AMT (Audio magnetotelúrico)	Natural	10 Hz – 10 kHz	0.1 – 5 km
CSAMT (Audio magnetotelúrico de fuente controlada)	Artificial	10 Hz – 100 kHz	10 m – 1.5 km
RMT (Radio magnetotelluric)	Artificial (radiotransmisores)	100 KHz – 1MHz	Cientos de m
LMT (Long Period magnetotellurics)	natural	días	Miles de Km

Tabla1. Variantes del método magnetotelúrico

FUENTE NATURAL

Se refiere al campo electromagnético naturalmente inducido en la Tierra y se considera como una técnica electromagnética pasiva, los periodos de onda en los que trabaja van de 10^{-3} a 10^5 s, con una capacidad de penetración de aproximadamente 160 m hasta más de 500 km (Simpson y Bahr, 2005); por el contrario, en los métodos de fuente controlada la profundidad de estudio depende de la magnitud de la fuente disponible y la configuración del receptor.

El campo electromagnético es generado por actividades meteorológicas, tales como tormentas eléctricas con frecuencias mayores a 1 Hz (periodos menores a 1s), mientras que la interacción entre el viento solar, la magnetósfera y la ionosfera de la Tierra generan fluctuaciones electromagnéticas con frecuencias menores a 1 Hz (periodos mayores a 1 s).

Se debe tomar en cuenta que existe una banda de frecuencias entre los fenómenos meteorológicos (Tierra-ionósfera) y la interacción Viento solar-magnetósfera que va de 0.5 a 5 Hz en la que las curvas de los sondeos magnetotelúricos (MT) presentan una reducción en la



calidad de los datos, a esta banda de frecuencias se le llama “banda muerta” con señales de baja amplitud que se atribuye a mecanismos de fuente inductiva (alrededor de 1 Hz).

El campo eléctrico se genera por el continuo viento solar que es un flujo de plasma compuesto por protones y electrones provenientes del Sol; que al encontrarse con el campo magnético terrestre (en la magnetopausa), los protones y electrones se deflecan en dirección opuesta.

Las grandes variaciones del campo geomagnético (arriba del orden de algunos cientos de nT) ocurren durante las tormentas magnéticas, las cuales ocurren debido al incremento esporádico de la cantidad de plasma solar; estas tormentas pueden durar hasta varios días y en las regiones polares se puede observar las auroras boreales (Simpson y Bahr, 2005).

FUENTE CONTROLADA

Son propiamente técnicas activas de inducción EM, en la cual, la fuente del campo electromagnético es generado por el hombre y cuyo rango de profundización, comparado con la técnica de inducción EM pasiva, es limitado, ya que en teoría se puede generar un campo artificial con un periodo de varios días pero finalmente no es tan poderoso como el campo generado por una tormenta magnética. Esta técnica se puede utilizar para mejorar la calidad de los datos en el rango de frecuencias de la “banda muerta”.

El proceso físico que involucra la fuente controlada es la conducción, la cual no depende del tiempo de medición, y se considera como un método potencial y como tal, la principal limitación es la profundización de estudio (Simpson y Bahr, 2005).

Como es el caso del Audio Magnetotelégrafo de Fuente Controlada (CSAMT) que trabaja en el dominio de las frecuencias, es similar a las técnicas de fuente natural de MT y AMT pero la principal diferencia es la utilización de una fuente de señal artificial a una distancia finita siendo éste un dipolo fijo aterrizado o un “loop” horizontal. Debido a que la fuente se puede controlar, como su nombre lo dice, resulta más económica que las técnicas de fuente natural en el mismo rango de frecuencias, la fuente es estable y segura, sin embargo; puede provocar disturbios en los datos debido a los efectos de la fuente complicando la interpretación, estos inconvenientes no son serios si se trabaja en situaciones ideales de campo como son de topografía suavizada,



alejados de la zona de tránsito de vehículos, líneas de corriente, cercas electrificadas, etcétera; obteniendo buenos resultados en mapeos arriba de 2 a 3 km de la corteza terrestre.

La posición de la fuente para evitar una saturación de la señal se considera en términos de la distancia del área en donde se realizará el sondeo, esta distancia se relaciona con el skin depth que es la profundidad de estudio y se utiliza para evaluar la atenuación de la onda (que se definirá más adelante), lo ideal es colocar la fuente, por lo menos a cuatro skin depth ($4\delta = 2012\sqrt{\rho/f}$ (m) donde ρ es la resistividad y f es la frecuencia de la señal). Las mediciones son hechas dentro de la banda de frecuencias de 0.1 Hz a 10 kHz.

De manera general, la profundidad de investigación del CSAMT es aproximadamente igual a $\delta/\sqrt{2}$ (m), cuando se respeta la distancia ideal entre el receptor y el transmisor (4δ), mientras que la resolución lateral es controlada por la longitud de los dipolos del campo eléctrico, el cual es normalmente entre los 10 y los 200 m y resolución vertical es 0.5 % a 20 % de la profundidad de penetración dependiendo de los contrastes de resistividad (Nabighian, 1991).

Cabe mencionar que la distancia entre el transmisor y el receptor se debe mantener lo suficientemente lejos, a lo que se le llama zona lejana (por lo menos a 4δ), para conservar las condiciones del frente de onda plana. Cuando no se respeta esta distancia, es decir, se trabaja dentro de lo que se conoce como zona cercana, la onda ya no se considera plana y los datos obtenidos se contaminan ya que reflejan el efecto de la fuente y la respuesta del terreno en cuestión.

3.4 FUNDAMENTOS DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

PRINCIPIOS DEL METODO

Para realizar una buena adquisición, procesamiento, así como la obtención de buenos resultados en la interpretación de los datos magnetotelúricos, se deben tomar en cuenta las asunciones que se describen a continuación ya que tienen como objetivo simplificar el tratamiento de la inducción electromagnética en la Tierra (Simpson y Bahr, 2005).

- El método se basa principalmente en las ecuaciones generales de Maxwell.



- La energía electromagnética, sólo es disipada o absorbida por la Tierra ya que no es capaz de generar dicha energía.
- Todos los campos son tratados como conservativos y analíticos lejos de su fuente.
- La fuente natural del campo EM generado por corrientes ionosféricas, se considera lo suficientemente lejos de la superficie de la Tierra por lo que las ondas que inciden en la superficie son tratadas como ondas planas y su propagación es vertical. Aunque esta asunción puede variar en las regiones polares y ecuatoriales
- En el subsuelo no se acumulan cargas, es decir; $q = 0$. En un modelo de Tierra multi-dimensional, las cargas pueden acumularse a lo largo de las discontinuidades. Esto genera un fenómeno no inductivo denominado *static shift*.

- La carga se conserva y la Tierra se comporta como un conductor óhmico o lineal.

$$j = \sigma E$$

Donde j es la densidad de corriente eléctrica ($A \cdot m^{-2}$), σ es la conductividad del medio (S/m) y E es el campo eléctrico (V/m).

- El campo de desplazamiento eléctrico es cuasi-estático para los periodos de los sondeos MT. Por lo tanto, las variaciones en el tiempo de las corrientes de desplazamiento (originadas por efectos de polarización) son mínimas comparadas con la variación en el tiempo de las corrientes de conducción, las cuales promueven el tratamiento de la inducción electromagnética en la Tierra como un proceso de difusión, es decir;

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j}$$

- De las propiedades del subsuelo, la permitividad dieléctrica (ϵ) así como la permeabilidad magnética (μ) tienen una variación mínima comparada con la variación de la conductividad (σ): $\frac{\Delta\sigma}{\sigma} \gg \frac{\Delta\mu}{\mu}, \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon}$



3.5 ECUACIONES DE MAXWELL

Las Ecuaciones de Maxwell, describen las variaciones del campo electromagnético en tiempo y espacio. Estas ecuaciones son la conjunción de las leyes de Faraday, Gauss y Ampere las cuales describen el comportamiento del campo electromagnético a cualquier frecuencia para un medio magnetizable y polarizable, como sigue;

$$\text{Ley de Faraday } \nabla \times \vec{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad 3.1$$

$$\text{Ley de Ampere } \nabla \times \vec{H}(\mathbf{r}, t) = \vec{J}(\mathbf{r}, t) + \frac{\partial \vec{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} \quad 3.2$$

$$\text{Ley de Gauss magnética } \nabla \cdot \vec{B}(\mathbf{r}, t) = 0 \quad 3.3$$

$$\text{Ley de Gauss } \nabla \cdot \vec{D}(\mathbf{r}, t) = q \quad 3.4$$

En donde:

\vec{E} Campo eléctrico [V/m].

\vec{B} Vector de inducción magnética [Wb/m²].

\vec{D} Vector de desplazamiento eléctrico [C/m²].

\vec{H} Campo magnético [A/m].

q Densidad de carga eléctrica [C/m³].

\vec{J} Densidad de corriente eléctrica [A/m²].

La Ley de Faraday (ec. 3.1) describe que se puede generar corriente eléctrica cuando existe una variación de inducción magnética a través del tiempo.

La Ley de Ampere (ec. 3.2) expresa que para cualquier loop cerrado donde circule corriente eléctrica se tiene un campo magnético asociado, de magnitud proporcional al total del flujo de corriente. Describe los dos tipos de corriente eléctrica que existen, las corrientes de



desplazamiento $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ que sufren variaciones en el tiempo y que son insignificantes; y la corriente galvánica definida por \vec{J} que fluye libremente. Con base en esto, la ley de Ampere se reduce a:

$$\nabla \times \vec{H}(r, t) = \vec{J}(r, t) \quad 3.5$$

En la Ley de Gauss magnética (ec. 3.3) se describe la inexistencia del monopolo magnético.

Finalmente, la Ley de Gauss relacionada con la carga eléctrica (ec. 3.4) describe el comportamiento de ésta sobre una superficie cerrada y la carga eléctrica encerrada en dicha superficie.

3.6 RELACIONES CONSTITUTIVAS

Las ecuaciones de Maxwell por si solas describen el campo electromagnético, pero para que puedan ser utilizadas como una herramienta en la descripción del medio en el que incide dicho campo, es necesario utilizar otras expresiones que involucren las propiedades eléctricas y magnéticas del medio. Estas expresiones se llaman leyes o relaciones constitutivas.

La primera expresión relaciona linealmente la densidad de corriente eléctrica con la intensidad del campo eléctrico que son dos cantidades vectoriales y la conductividad eléctrica que es un tensor. Esta expresión se conoce como la Ley de Ohm.

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad 3.6$$

Donde:

σ = conductividad eléctrica medida en Siemens/ metro [S/m].

$\rho = 1/\sigma$ resistividad eléctrica en Ohm/metro [$\Omega * m$].



$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad 3.7$$

σ es el tensor que depende de la dirección y de la posición cuando el medio es anisótropo y heterogéneo. Para el caso en el que el medio es isótropo y homogéneo, el tensor se convierte en un escalar cuya solución es mucho más sencilla. Sin embargo, para el tensor (3.7), la dirección y la posición del medio solo influyen en la diagonal principal de manera que:

$$\sigma_{xx} \neq \sigma_{yy} \neq \sigma_{zz} \text{ para un medio anisótropo}$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_{zz} \text{ para un medio isótropo}$$

La segunda relación constitutiva involucra a los vectores de inducción de campo magnético y la intensidad del campo magnético relacionados linealmente por el tensor de la permeabilidad magnética

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad 3.8$$

Donde:

μ es la permeabilidad magnética medida en $[H/m]$, y se define en términos de la permeabilidad magnética del vacío μ_0 y la permeabilidad magnética relativa μ_r

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

$$\mu_r = 1$$

Para la mayoría de los materiales que conforman el subsuelo, se conserva esta expresión; a excepción de los materiales que son altamente magnéticos, por lo tanto se asume la siguiente expresión:

$$\mu \approx \mu_0$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} [H/m]$$



La *tercera* relación constitutiva está definida por el vector de desplazamiento eléctrico que es directamente proporcional al campo eléctrico, relacionados por el tensor de la permitividad dieléctrica.

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad 3.9$$

Donde:

ε es la permitividad dieléctrica medida en $[F/m]$ y también es definida en términos de la permitividad del vacío

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$$

Al igual que la permeabilidad magnética relativa, ε_r se acerca a la unidad excepto para los materiales altamente magnéticos.

$$\varepsilon_r = 1$$

$$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} [F/m].$$

3.7 ECUACIONES DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

La aproximación cuasiestacionaria hace referencia a las corrientes que varían en el tiempo y en esta aproximación se desarrollan las ecuaciones de Maxwell para obtener las respuestas del método MT. Analizando la ecuación de continuidad en el dominio de las frecuencias donde $\omega = 2\pi f$ y f es la frecuencia en Hz de la corriente

$$\nabla \cdot J + \frac{\partial q}{\partial t} = 0 \Rightarrow \nabla \cdot J + Re\{i\omega q\} = 0 \quad 3.10$$

Se observa que a frecuencias bajas, el segundo término de la ecuación 3.10 es insignificante por lo que se reduce a

$$\nabla \cdot J = 0 \quad 3.11$$

Y las corrientes se comportan como cuasi-estacionarias, no son corriente continua porque dependen del tiempo pero aproximadamente se comportan como tales.



Esto significa que las corrientes de conducción deberán dominar sobre las corrientes de desplazamiento, por lo tanto el medio es conductor (Berdichevsky y Dmitriev, 2002).

$$|J_c| \gg |J_D|$$

Una vez definidas las ecuaciones de Maxwell, así como las relaciones constitutivas y con base a las asunciones del método MT (ec 3.5, ec 3.6, ec 3.8 y 3.9) se describen las ecuaciones de Maxwell.

$$\nabla \times E = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad 3.12$$

$$\nabla \times B = \mu_0 \sigma E \quad 3.13$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad 3.14$$

$$\nabla \cdot E = 0 \quad 3.15$$

Haciendo el producto cruz de la ec 3.12, sustituyendo la ec 3.13 y asumiendo un modelo de Tierra en la que solamente se toma en cuenta el campo eléctrico horizontal para el cual $\nabla \cdot E = 0$:

$$\therefore \nabla^2 E = \mu_0 \sigma \frac{\partial E}{\partial t} \quad 3.16$$

Esta última toma la forma de una ecuación de difusión, es decir, se refiere a la propagación del campo electromagnético y a la atenuación del mismo. Se considera un plano de onda con amplitud E_0 y una dependencia de tiempo armónico de la forma $e^{-i\omega t}$, por lo que la ecuación 3.16 queda

$$\nabla^2 E = i\omega \mu_0 \sigma E \quad 3.17$$

De la misma forma para el campo magnético

$$\nabla^2 B = \mu_0 \sigma \frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\nabla^2 B = i\omega \mu_0 \sigma B \quad 3.18$$



Las ecuaciones 3.17 y 3.18 que representan la ecuación de difusión, nos indican que el campo electromagnético se debe disipar a través de la Tierra y de manera exponencial, ya que en el aire, que es la capa entre la ionósfera y la superficie de la Tierra, la conductividad tiende a cero ($\sigma \rightarrow 0$) y dicho campo no es atenuado significativamente (Simpson y Bahr, 2005).

CONSTANTES DE PROPAGACIÓN, ATENUACIÓN Y FASE

De las ecuaciones 3.17 y 3.18, los campos E y H satisfacen las siguientes ecuaciones diferenciales

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad 3.19$$

$$\nabla^2 H + k^2 H = 0 \quad 3.20$$

De las cuales se obtiene la *constante de propagación o número de onda k* definida por

$$k^2 = \mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega = \mu\omega(\epsilon\omega - i\sigma) \quad \text{Re}(k) > 0 \quad 3.21$$

$$k^2 = -\gamma^2 = -i\mu\omega(\sigma + i\omega\epsilon) \quad \text{Im}(k) < 0 \quad 3.22$$

El término $(\epsilon\omega)$ hace referencia a un medio no conductivo y domina la relación de las altas frecuencias, mientras que (σ) es el término de conducción el cual domina cuando se trabaja a bajas frecuencias y el medio es relativamente conductivo.

La constante de propagación en su forma compleja (Ward y Hohmann, 1988) queda como sigue:

$$k = \alpha - i\beta = [-i\omega\mu(\sigma + i\omega\epsilon)]^{1/2} \quad 3.23$$

De la ecuación 3.23 la *constante de fase α* está dada por

$$\alpha = \omega \left[\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right) \right]^{1/2} \quad 3.24$$

Y la *constante de atenuación β*



$$\beta = \omega \left[\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} - 1 \right) \right]^{1/2} \quad 3.25$$

Como parte de la solución de la ecuación de onda para un modelo de Tierra homogéneo, es necesario considerar el límite cuasi-estático, en donde las corrientes de conducción predominan sobre las corrientes de desplazamiento ($\sigma \gg \epsilon\omega$)

Para este caso se tiene

$$\alpha = \beta = \sqrt{\frac{\mu\omega\sigma}{2}} \quad 3.26$$

Y la constante de propagación se simplifica a

$$k = (1 - i) \sqrt{\frac{\mu\omega\sigma}{2}} \quad 3.27$$

μ se toma igual a μ_0 excepto para materiales altamente magnéticos (Nabighian, 1991).

PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN O SKIN DEPTH

La propagación de la onda en un plano horizontal en un terreno homogéneo, es descendente a lo largo del eje Z, en donde la solución a la ecuación de onda 3.17 y 3.18 es

$$E = E_0 e^{-\alpha z} e^{-\beta z} e^{i\omega t} \quad 3.28a$$

$$H = H_0 e^{-\alpha z} e^{-\beta z} e^{i\omega t} \quad 3.28b$$

En donde E_0 y H_0 representan la intensidad del campo eléctrico y magnético respectivamente y se observa que el decaimiento de la amplitud en medios conductores depende de la constante de atenuación β . Para la componente horizontal del campo eléctrico E_x con dependencia de tiempo armónico $e^{i\omega t}$ se tiene

$$E_x = E_{0x} e^{-\alpha z} e^{-\beta z} \quad 3.29$$



De igual forma para la componente horizontal del campo magnético

$$H_X = H_{0X} e^{-i\alpha Z} e^{-\beta Z} \quad 3.30$$

Tomando en cuenta la ec 3.26, se puede escribir la ecuación 3.29

$$E_X = E_{0X} e^{-i\sqrt{\mu\sigma\omega/2Z}} e^{-\sqrt{\mu\sigma\omega/2Z}} \quad 3.31$$

El Skin depth o penetración, se refiere a la atenuación de la onda electromagnética en el subsuelo y está relacionado directamente con la constante de atenuación definida por:

$$\delta = 1/\beta \quad 3.32$$

Por lo tanto, la ec. 3.31 se puede escribir como sigue

$$E_X = E_{0X} e^{-iz/\delta} e^{-z/\delta} \quad 3.33$$

A una profundidad igual al skin depth ($z = \delta$) la ecuación 3.33 se reduce

$$E_X = E_{0X} e^{-i} e^{-1} \quad 3.34$$

De esta ecuación se observa que la parte real del campo eléctrico es atenuado por 1/e o un porcentaje del 63% de la intensidad inicial del campo eléctrico, este procedimiento es el mismo para el campo magnético (Nabighian, 1991).

De esta forma, la profundidad de penetración o *skin depth* representada en la ecuación 3.32 en un medio cuasiestático, se define como

$$\delta = \sqrt{2/\sigma\omega\mu_0} \quad [\text{m}] \quad 3.35$$

Con $\mu_0 = 1.256 * 10^{-6}$ [H/m] la ec 3.34 se escribe en términos de la resistividad del medio

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad [\text{m}] \quad 3.36$$

En esta ecuación se observa que la profundidad de investigación del campo electromagnético depende de los parámetros de la resistividad de los materiales que conforman el subsuelo y de la



frecuencia de la señal que está siendo utilizada; por lo tanto, la penetración o skin depth aumenta cuando se trabaja sobre material resistivo y la frecuencia de la señal disminuye, de igual forma al trabajar en un rango de altas frecuencias, se tendrá una profundidad de investigación menor.

IMPEDANCIA Y RESISTIVIDAD APARENTE

El método magnetoteléurico (MT) asume una relación lineal entre los campos naturales eléctrico y magnético en la superficie de la Tierra. Originalmente fue propuesto por Cagniard (1953) para un modelo de tierra estratificada horizontalmente, para lo cual solamente se relacionan la componente horizontal del vector campo magnético y el campo eléctrico en dirección perpendicular por la ecuación

$$E_x(\omega) = z(\omega)H_y(\omega) \quad 3.37$$

Donde la impedancia Z es un escalar complejo que relaciona la amplitud y la fase entre los dos campos.

Cantwell (1960) extendió el método para inhomogeneidades laterales relacionando las componentes de los campos a través de un par de ecuaciones lineales.

$$E_x = Z_{xx}H_x + Z_{xy}H_y \quad 3.38$$

$$E_y = Z_{yx}H_x + Z_{yy}H_y \quad 3.39$$

En notación matricial se expresa

$$E = ZH$$

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \quad 3.40$$

Donde Z se denomina tensor de impedancia.

Es la relación lineal que existe entre el campo eléctrico y magnético en la superficie y la definimos en base a la ecuación de ampere.



$$-\frac{\partial H_y}{\partial z} = \sigma E_y \quad 3.41$$

Sustituyendo las ecuaciones 3.29 y 3.30

$$-(-b + ia)H_y e^{(-b+ia)z} = \sigma E_x e^{(-b+ia)z}$$

$$(b - ia)H_y = \sigma E_x$$

$$\frac{E_x}{H_y} = \frac{(b - ia)}{\sigma}$$

$$\left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 = \left| \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} (1 - i) \right|^2 = \frac{\omega\mu}{\sigma} \quad 3.42$$

La resistividad de un semiespacio se define por la ecuación

$$\rho_{xy} = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad 3.43$$

$$\left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 = |Z_{xy}|^2 = \frac{\mu\omega}{\sigma} \quad 3.44$$

Donde ρ_{xy} se obtiene de los campos E y H y es llamada **resistividad aparente** ρ_a

Considerando una frecuencia angular ω definida, la resistividad aparente es la resistividad de un semiespacio homogéneo que daría como resultado un valor de la impedancia igual al obtenido con un modelo real (Vozzof, 1972).

En su forma compleja, la impedancia se puede escribir de la siguiente forma:

$$Z = |Z|e^{i\phi} = \left| \frac{E_x}{H_y} \right| e^{i\phi_{xy}} \quad 3.45$$

Donde ϕ es la fase de Z definida por la diferencia entre la fase de E y la fase de H.

$$\phi_{xy} = (\phi_{E_x} - \phi_{H_y}) = \tan^{-1} \left[\frac{ImZ}{ReZ} \right] \quad 3.46$$



Para el caso que se describe: un semiespacio homogéneo, $\phi = -\pi/4 + \pi$ (Fernández, Martínez y Romo, 1987).

La resistividad aparente $\rho_a(T)$ y la fase en función del periodo $\phi(T)$ son los parámetros más importantes en la interpretación de datos magnetotelúricos para definir el comportamiento de geologías complejas, tales como fallamiento o variaciones laterales de la conductividad.

TIPPER

Es un indicador de la variación lateral de la conductividad y sólo relaciona el campo magnético vertical y horizontal, se denomina *función de transferencia geomagnética* (Parkinson y Weise, 1962).

$$H_z = T_x H_x + T_y H_y$$

$$H_z = [T_x \quad T_y] \cdot \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}$$

$$H_z = T \cdot H \tag{3.47}$$

Esta función también se puede rotar como el tensor de impedancias, hasta que T_x sea mínimo cuya dirección será perpendicular a la estructura geológica.

MODOS DE POLARIZACIÓN

Ya que la ρ_a a cada frecuencia varía con la dirección, se asume que existe una estructura geológica con una alineación denominada *strike* cuya dirección es desconocida, para un caso ideal 2D, se descomponen los vectores del campo electromagnético obteniendo dos modos de polarización independientes. Cuando el campo eléctrico es paralelo a la dirección del strike, se induce un campo magnético perpendicular al strike y en un plano vertical, siendo éste el modo de polarización TE o transversal eléctrico (figura 2.a); cuando el campo eléctrico es perpendicular al strike se define una polarización TM o transversal magnético (Fig 2.b) (Simpson y Bahr, 2005).

El principio físico que gobierna la inducción en una discontinuidad, es la conservación de la corriente, por lo tanto, a través del contacto con diferente conductividad la componente E_y del

campo eléctrico deberá ser discontinua, sin embargo, el modo TM no muestra estas variaciones en el campo magnético horizontal y la densidad de corriente es continua (Berbesi, 2005).

DISTORSIÓN ELECTROMAGNÉTICA

La principal dificultad en la interpretación magnetotelúrica son las inhomogeneidades en las capas más superficiales que pueden distorsionar las curvas magnetotelúricas.

Principalmente se mencionan la distorsión galvánica o corrimiento estático relacionado con la acumulación de carga en la parte superficial del terreno lo que hace que la curva de resistividad aparente se desplace verticalmente y se puede identificar fácilmente entre sondeos realizados dentro de la misma zona o sobre la misma litología al observar una diferencia de resistividades entre ellos, sin embargo; esto no afecta las fases por lo que se recomienda generar una pseudosección de fase al momento de interpretar los datos obtenidos (Jones, 1988) Esto debido a

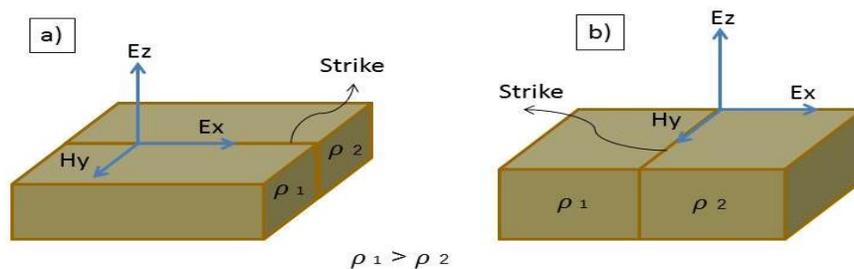


Figura 2. a) Modo de polarización TE o transverso eléctrico, b) Modos de polarización TM o transverso magnético. (Berbesi, 2005).

que el comportamiento de la fase (ϕ) en un semiespacio homogéneo que es mayor a 45° diagnostica un substrato cuya resistividad disminuye con la profundidad, mientras que para las fases menores a 45° , la resistividad de la capa va en aumento conforme se profundiza (Simpson y Bahr, 2005). La manera de corregir la distorsión galvánica o *static shift* es identificando un nivel de resistividad común en los sondeos obtenidos bajo las mismas características litológicas, ajustando las curvas a dicho valor de resistividad. Otra manera de corrección del static shift es utilizando otro método que nos proporcione información de la resistividad de las unidades



geológicas de la zona utilizando estos datos para la corrección de las curvas, pudiendo utilizar un sondeo eléctrico vertical (SEV) para tal fin (Sternberg, Washburne y Pellerin, 1988)

4 ANTECEDENTES DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.1 ASPECTOS GENERALES

La entidad federativa de Jalisco tiene una extensión territorial de 78,599.16 km², colinda al norte con los estados de Nayarit, Zacatecas y Aguascalientes, al sur con Colima y Michoacán, al este con el estado de Guanajuato y al oeste con el Océano Pacífico. Tiene una ubicación geográfica favorable (latitud 22° 45' - 18° 55' N, longitud 101°28' - 105°42' O) ya que cuenta con vías de comunicación para toda la República y el extranjero, su población total es de 7, 350,682. Sus recursos hidráulicos se derivan del sistema montañoso del occidente del país, tiene una extensión de 250 Km de litoral en el océano Pacífico que aprovecha para la actividad portuaria y cuenta con un clima semicálido lo que favorece a una variada vegetación.

El estado de Jalisco, cuyo nombre significa “lugar arenoso” en su lengua aborigen, tiene como capital a la ciudad de Guadalajara que es una de las más importantes de toda la República Mexicana y se encuentra a 536 km de la ciudad de México D.F (Fig. 3) (INEGI, 2011).

4.2 HIDROLOGÍA

El sistema hidrológico del estado de Jalisco se divide en 7 regiones; la región hidrológica central es la de Lerma-Chapala-Santiago que es la más importante, le sigue la de Armería-Coahuayana en la región sur, en la región central-noroeste la de Ameca, en la región sureste la del Alto Río Balsas, en el oriente la de Huicicila y al noreste la del Salado.

De la región central, el lago más importante es el de Chapala además de ser el más grande del País, le sigue la laguna de Zapotlán, la de Guadalupe y unas lagunas menores como son Juanacatlán, Unión de Tula, Mascota, Magdalena, Cajititlán, Terronate, San Marcos, Sayula,



Zacoalco y Atotonilco. Es en la región del Lerma-Chapala-Santiago en donde se pretende desarrollar el proyecto Arcediano que es en donde convergen los ríos Santiago y Verde (Fig. 4).



Figura 3 Estado de Jalisco (INEGI, 2011)

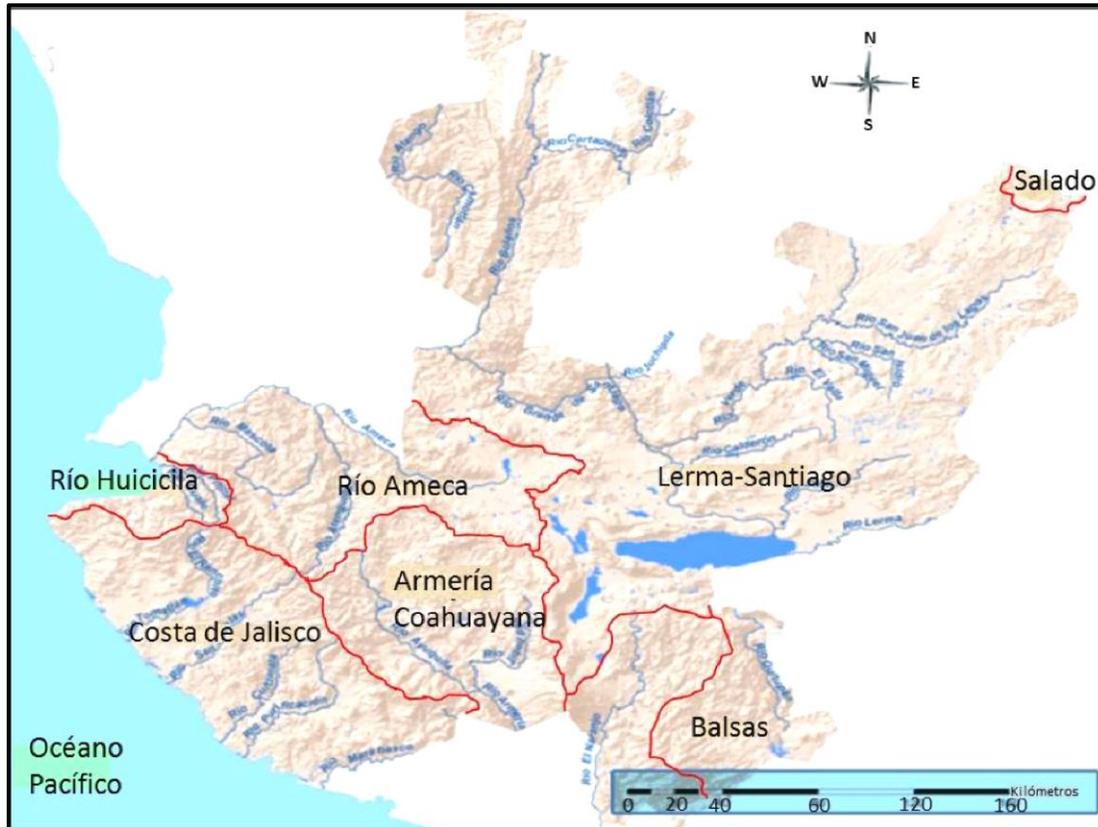


Figura 4 Regiones hidrológicas del estado de Jalisco y sus principales ríos (CEA Jalisco, 2011)

4.3 GEOLOGÍA REGIONAL

Las principales estructuras geológicas de la entidad son los aparatos volcánicos, coladas de lava, fracturas y fallas normales que originan los valles y es, en las cuencas cerradas en donde se encuentran lagos como el de Chapala.

La entidad está constituida por rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas cuya edad va desde el Triásico hasta el Cuaternario reciente; las rocas metamórficas encontradas (esquistos) son las más antiguas y son del Triásico y Jurásico pero los afloramientos de esta unidad son pocos, predominando las rocas ígneas extrusivas del Terciario.



La fisiografía del estado de Jalisco se debe a cuatro provincias geológicas conformadas por la Sierra Madre occidental, la Mesa Central, el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre del Sur (Fig. 5) (COREMI, 1992).

Provincia Sierra Madre Occidental

La Sierra Madre Occidental se caracteriza por profundos cañones y mesetas escalonadas y se encuentra en la zona norte del estado limitándola el Eje Neovolcánico al sur y al este.

Las rocas más antiguas son del cretácico superior, representadas por calizas interestratificadas por lutitas. En el Terciario se distinguen las rocas ígneas extrusivas como riolitas, tobas y basalto; y rocas extrusivas, además de rocas sedimentarias como conglomerados. Finalmente en el Cuaternario con depósitos más jóvenes están los suelos aluviales.

Provincia Mesa del Centro

La Mesa Central se encuentra al noreste del estado y se caracteriza por llanuras interrumpidas por sierras.

Los esquistos del Triásico son los afloramientos más antiguos de esta provincia, localizados al este de Lagos de Moreno, del Cretácico superior se encuentran las calizas y lutitas de origen marino. Posteriormente, del Terciario se encuentran las rocas ígneas extrusivas (riolitas y tobas riolíticas), rocas ígneas intrusivas y rocas sedimentarias de origen continental (areniscas y conglomerados). Al Cuaternario pertenecen los suelos aluviales que rellenan los valles de la provincia.

Provincia del Eje Neovolcánico

El eje neovolcánico se encuentra en la parte central del estado, constituida por sierras de origen volcánico, depósitos de arena y ceniza volcánica. Al norte limita con la Sierra Madre Occidental, al noreste con la Mesa del Centro, al oeste y sur con la Sierra Madre del Sur.

En esta provincia se encuentran rocas sedimentarias de origen marino y rocas extrusivas del Cretácico, cubiertas por material volcánico y piroclástico del terciario, al que pertenecen también



los cuerpos intrusivos y las rocas sedimentarias de origen continental. Al cuaternario pertenecen las areniscas, conglomerados y depósitos aluviales de basalto.

Provincia Madre del Sur

La Sierra Madre del Sur es caracterizada por cordilleras costeras y por la depresión de Tepalcatepec, abarca la parte occidental del estado, limitando al norte y al este con el Eje Neovolcánico y al oeste con el Océano Pacífico.

En esta provincia se encuentran las rocas más antiguas del estado, que pertenecen al Jurásico aflorando al sur de puerto Vallarta, noreste de Massacota, oeste de Talpa de Allende y noreste de Tecatitlán.

Durante el Cretácico superior, un cuerpo intrusivo de roca ígnea (batolito) deformó las rocas más recientes. Es en el Terciario en donde los depósitos de origen volcánico cubren la mayor parte del área y se forman los depósitos de rocas sedimentarias continentales. Finalmente en el Cuaternario se forman los depósitos de suelos de los litorales y las costas (COREMI, 1992).

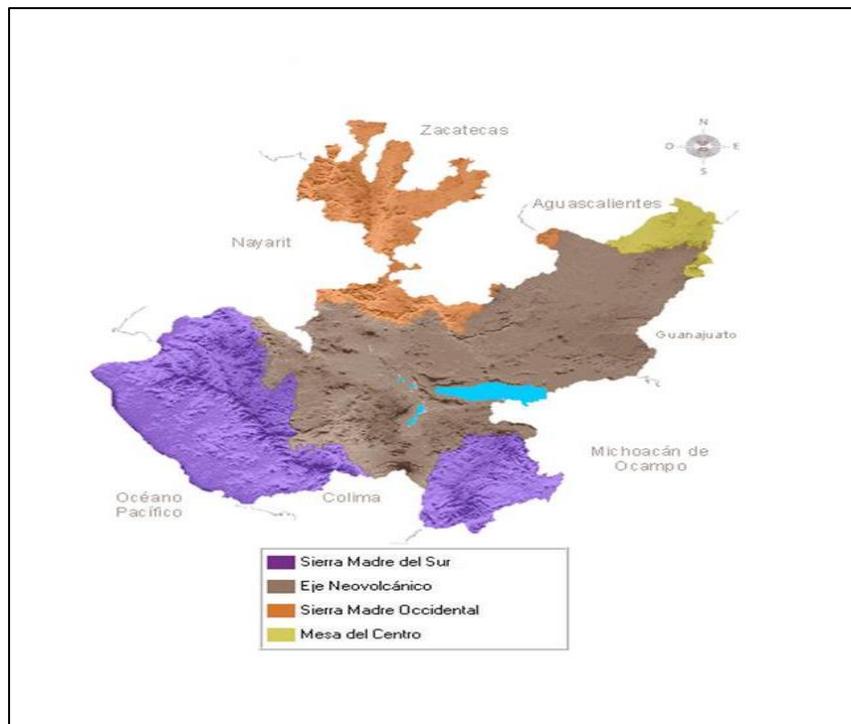


Figura 5 Fisiografía del Estado de Jalisco (INEGI, 2012)

4.4 GEOLOGÍA DE LA ZONA

LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en Guadalajara, Jalisco; abarca los municipios de Tonalá y Zapotlanejo, en las inmediaciones del poblado El Aguacate al este de la ciudad, entre el río Verde y el río Grande de Santiago.

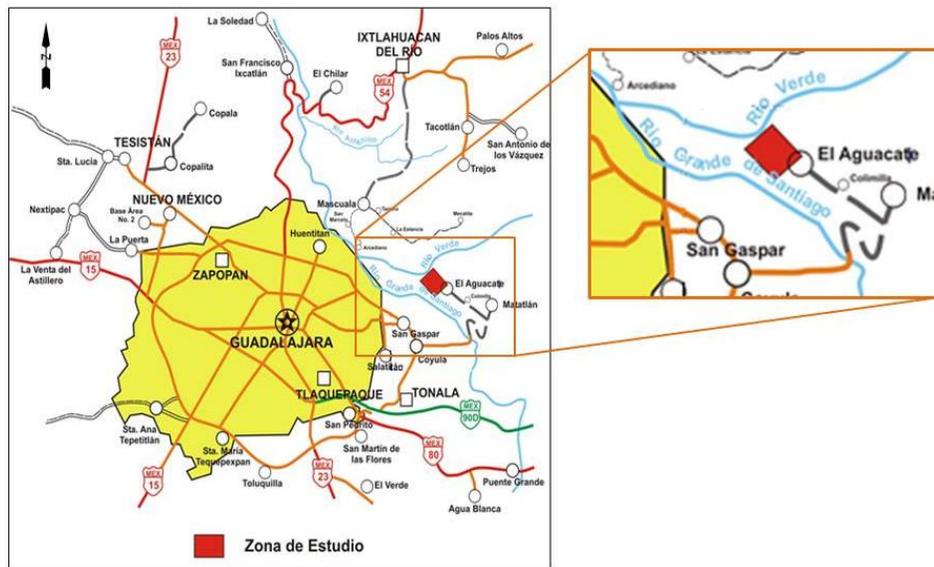


Figura 6 Localización de la zona de estudio

DESCRIPCIÓN LITOLÓGICA

De manera general, la zona de interés está constituida por material de las provincias geológicas que se mencionaron, específicamente son el Eje Neovolcánico y la Sierra Madre Occidental a las que se relaciona la litología y la morfología de la zona de estudio (COREMI, 1992)

Las rocas que conforman el área de estudio pertenecen al Cenozoico, el basamento rocoso lo constituye la unidad basáltica y sobre ésta se encuentra la unidad riolítica y andesítica del Terciario. La unidad basáltica (Tba) está constituida por intercalaciones de toba lítica y pumicítica (Tbatlp), toba vitrolítica y lítica (Tbatl), brecha basáltica (Tbabr) y presenta una



estructura vesicular y masiva (Tba). En la unidad riolítica (Tri) se distingue toba lítica y lapillítica de composición ácida a intermedia (Tritl), con intercalaciones de brecha volcánica (Tribvr) y la unidad riolítica con base vítrea y brechoide (Tri). Estas unidades se ubican tentativamente en el Oligoceno-Mioceno, mientras que la unidad andesítica (Tan) que sobreyace a las anteriores se ubica en el Plioceno y está constituida por derrames andesíticos, dacíticos y riolíticos de textura porfídica y fluidal; la base de ésta unidad está conformada por derrames riolíticos de textura fluidal (Tan r) y tobas líticas de textura piroclástica (Tan tl).

Al Cuaternario pertenece la unidad basáltica (Qba) que hace contacto con la Tan. La Qba está constituida por derrames, brechas y tobas de composición basáltica, tobas lapillíticas, pumicíticas y líticas; ignimbritas de textura piroclástica (Qbaig), tobas de cenizas finas y gruesas (Qbatfpl) y en la base, aglomerados de composición basáltica (Qbaag) y brechas volcánicas de composición basáltica (Qbabr).

Las unidades mencionadas son afectadas por un dique dolerítico de textura piroclástica (Qdo), como techo de la columna litológica se tienen depósitos piroclásticos de composición ácida (Qdpa), depósitos de talud (Qdt), suelo residual (Qre) y depósitos de aluvión (Qal) (CFE, 2010).

A continuación se describirán las unidades litológicas, iniciando de la unidad más antigua a la más reciente.

Unidad basáltica Tba

En algunas zonas, los derrames basálticos deben su color rojizo a la alteración supergénica e hidrotermal, esta unidad presenta una estructura masiva y compacta, de textura afanítica a porfídica de textura amigdaloides.

Los horizontes de Tba (br) en ocasiones se observan como lentes en los derrames de basalto, presentan hematización y tienen estructura semicompacta a compacta

La secuencia piroclástica Tba (tlp) y los horizontes de toba Tba (tl), presentan hematización y alteración hidrotermal que se distingue en sus colores rojizo y verdoso, tienen textura piroclástica y estructura moderadamente compacta. Las secuencias de Tba (tlp) y Tba (tl) fueron cortadas por barrenos hechos en estudios de campañas anteriores, cuyos espesores son de 13 a 26 m y de



5 a 7 m respectivamente. El espesor de la Tba se estima de 160 m aproximadamente (CFE, 2010).

ERA	PERIODO	ÉPOCA	NOMENCLATURA			LITOLOGÍA		
			Qdt	Qal	Qre			
C E N O Z O I C O	CUATERNARIO	HOLOCENO	Qdt	Qal	Qre	Qdt.- Depósitos de talud. Qal.- Depósitos de aluvión. Qre.- Suelos residuales.		
			Qdpa	Qdpa.- Depósitos piroclásticos de caída libre, color beige con tonalidad rojiza y pardo claro, muy deleznales y de composición ácida.				
			Qba	Qba.- Unidad basáltica; constituida por derrames, brechas y tobas de composición basáltica; así como la intercalación de horizontes de tobas lapillíticas, pumicíticas y líticas.				
	Qba (ig).- Ignimbritas de color pardo a marrón, de textura piroclástica y en la base tobas líticas de color gris-pardo.							
	Qba (tfl).- Tobas de cenizas finas y gruesas; así como la intercalación de tobas lapillíticas, pumicíticas y líticas de color gris claro a rosado.							
	Qba (ag).- Aglomerados de composición basáltica de color rojizo a gris.							
	Qba (br).- Brechas volcánicas de composición basáltica de color gris oscuro a rojizo.							
	TERCIARIO	PLIOCENO	Tan	Tan.- Unidad andesítica; constituida por derrames andesíticos, dacíticos y riolíticos de color gris y rosa con tonalidad rojiza, textura porfídica y en ocasiones fluidal; así como líticas de composición ácida a intermedia y la intercalación de brecha volcánica y tobas líticas.				
				Tan (r).- Derrames riolíticos de color rosa con tonalidad gris y textura fluidal.				
		MIOCENO	Tri	Tan (tl).- Tobas líticas de color pardo con tonalidad beige y rosada, de textura piroclástica.				
				Tri.- Unidad riolítica; compuesta por derrames riolíticos de color rosa a gris claro, textura porfídica y fluidal; con base vítrea y brechoide y una toba lítica de composición ácida.				
				Tri (bvr).- Brecha volcánica de color rosa a gris oscuro, textura piroclástica; constituida por fragmentos de vidrio.				
		OLIGOCENO	Tba	Tri (tl).- Toba lítica y lapillítica de color rojizo a rosado, textura piroclástica, constituida por fragmentos de composición ácida a intermedia, de tamaño variable de 0,5 a 5,0 cm en una matriz fina.				
				Tba.- Unidad basáltica; constituida por derrames de color gris oscuro, estructura vesicular y masiva, así como la intercalación de brechas y horizontes tobaceos.				
	Tba (br).- Horizontes o lentes de brecha basáltica de color gris a rojizo, constituidos por fragmentos subangulosos.							
	Tba (tl).- Intercalación de horizontes de toba vitrolítica y lítica, de color pardo con tonalidad rosada.							
					Tba (tlp).- Intercalación de horizontes de toba lítica y pumicítica de color rojizo, gris claro y blanco.			

Qddo.-Dique dolerítico de color gris oscuro a negro, de textura porfídica.

Figura 7 Columna litológica del área de estudio (CFE, 2010)



Unidad riolítica Tri

En esta unidad se encuentran horizontes de toba lítica Tri (tl) con alteración supergénica (hematización) y alteración hidrotermal (propilitización), en algunas zonas se presenta muy deleznable, de estructura semicompacta a compacta, de textura piroclástica.

Dentro de esta misma unidad se encuentra una brecha volcánica Tri (bvr) constituida por fragmentos de vidrio y riolita; de textura piroclástica, fluidal y vesicular de estructura compacta. Presenta un espesor de aproximadamente 1 a 5 m.

Al final de la unidad se encuentran los derrames riolíticos Tri, de estructura compacta y se observan vesículas rellenas parcialmente de arcilla, calcita y sílice botroidal. Su espesor se estima de 20 a 200 m con base en la barrenación de la zona de estudio. Esta unidad se observa en ambos márgenes del río Verde, formando estructuras prismáticas de cuatro a cinco lados (CFE, 2010).

Unidad andesítica Tan

Presenta una estructura compacta, de textura afanítica a porfídica, observándose fenocristales de plagioclasa, anfíbol, piroxeno y líticos de composición ácida a intermedia. Los cambios texturales y mineralógicos se presentan tanto vertical como horizontalmente. También se observan intercalaciones de derrames riolíticos Tan (r) de estructura masiva y compacta, de textura afanítica pudiéndose observar cristales de cuarzo, feldespatos y biotita. Se observan horizontes de brecha volcánica silicificada, además de esporádicas amígdalas rellenas de calcita o sílice. La toba lítica Tan (tl) tiene textura piroclástica, estructura masiva y compacta y en algunas zonas se presenta deleznable. Se estima un espesor para esta toba de 44 m. En general, para la unidad Tan se determinó un espesor de 130 a 165 m por los barrenos exploratorios, además de formar grandes cantiles en el área (CFE, 2010).

Unidad basáltica Qba

Los derrames basálticos Qba se ven afectados por hematización y alteración hidrotermal. Tiene estructura masiva y compacta, de textura afanítica a porfídica. Se observan fenocristales de plagioclasas y piroxenos; se observan también vesículas parcialmente rellenas de arcilla, epidota



y calcita. En algunos afloramientos se tiene intemperismo esferoidal causado por intemperismo mecánico y por los sistemas de fractura.

La brecha volcánica Qba (br) también se ve afectada por hematización, tiene estructura masiva y compacta; conformada por roca y bloques de basalto con dimensiones de 5 a 25 cm, su máximo espesor encontrado es de 16 m.

Esta unidad está conformada por aglomerados Qba (ag) afectados por hematización y alteración hidrotermal, con estructura compacta y baja densidad, textura piroclástica con fragmentos líticos de basalto y fragmentos de roca de composición intermedia. Con base en la barrenación de la zona se estima su espesor en 38 m.

La secuencia piroclástica Qba (tfpl) se ve afectada por alteración supergénica y es poco resistente, de composición piroclástica con un espesor de 1 m aproximadamente, con horizontes de tobas lapillíticas de textura piroclástica y alteración supergénica, tobas pumicíticas compuestas por fragmentos de pómez y líticos de composición básica a intermedia de estructura semicompacta y en algunas zonas deleznable y tobas líticas que presentan hematización, de estructura compacta y textura piroclástica. Su espesor se estima en 42 m, pero es variable ya que sus contactos inferior y superior son irregulares, adelgazándose hasta los 2.5 m.

Dentro de la unidad Qba también se observan horizontes de ignimbrita Qba (ig), con alteración supergénica, estructura compacta y masiva, de textura piroclástica con líticos de composición intermedia y fenocristales de feldespatos; en algunas zonas tiene apariencia de una toba vitrolítica y se encuentra cubierta por depósitos de cobertura, pero se estima un espesor de 10 m (CFE, 2010).

Diques doleríticos Qddo

Este dique intrusivo afecta a las unidades Qba, Tan y Tri de manera discordante; tiene una estructura tabular, masiva y densa, tiene un color oscuro de tonalidad verdosa que es producto de la alteración. De textura porfídica con fenocristales de plagioclasas y piroxenos, en las zonas de contacto presenta hematita, epidota y líticos de composición ácida a intermedia.



Depósitos de caída libre Qdpa

Se encuentra sobre la unidad Qba en contacto concordante, constituidos por material piroclástico con presencia de hematización, con horizontes de cenizas finas y gruesas, lapilli y pómez; estructura laminar y masiva, deleznable en algunas zonas, de poco consolidados a no consolidados. Su espesor se estima de 10 a 15 m y aflora en las inmediaciones de los poblados de Matatlán, Colimilla y el Aguacate y desaparece en dirección hacia el río Verde. Esta unidad se utiliza como bancos de arena y son explotados por la población por lo que cerca del proyecto ya no se ven afloramientos.

Depósitos aluviales Qal

Está conformado por cantos rodados y bloques redondeados a semiredondeados, con una variedad de tamaños que van desde 0.20 a 10 m soportados por arena de grano grueso a medio, también se conforma por material de erosión, de composición areno-limosa.

Depósitos de suelo residual Qre

De composición arcillo-limosa y en algunas zonas areno-limosas, su espesor varía de 0.30 a 0.60 m y se forma por la intemperización de las rocas preexistentes, en este material se desarrolla la ganadería y agricultura.

Depósitos de talud Qdt

Conformado por bloques, producto de la litología del área de estudio (basalto, andesita, dacita, riolita, toba) soportado en un suelo areno-limoso, su espesor se estimó por barrenación de 1 a 14 m (CFE, 2010).

ESTRUCTURAS GEOLÓGICAS

FALLAS

Se refieren a las discontinuidades más evidentes en el área de estudio y presentan evidencia de movimiento como las estrías de falla, material de relleno o intrusión de diques. Las fallas más



importantes en el área de estudio son la falla Sonorita y la Falla II que afectan a la línea de conducción de alta presión (CFE, 2010).

FALLA SONORITA

Tiene un rumbo E-W y un buzamiento de 72° Na 630 m al sur de la obra de toma y al oeste presenta un rumbo NW 15° SE. Tiene una longitud aproximada de 700 m y afecta a la unidad riolítica (Tri), al derrame andesítico (Tan) y a la unidad basáltica (Qba). En superficie, sobre la línea de conducción, se infiere en el cadenamiento 0+745.

FALLA II

Tiene una longitud aproximada de 140 m con rumbo NE 65° SW y buzamiento de 83° SE; se encuentra a 40,00 m al Oeste de la entrada del socavón Obra de Toma; así como en el interior del mismo a 16,00 m de la entrada con un rumbo NE 83° SW y un buzamiento de 65° SE, presenta impregnaciones de calcita y en ocasiones psilomelano y tiene un desplazamiento vertical de 0.80 m aproximadamente. La falla afecta a la unidad basáltica (Tba) y al derrame riolítico (Tri) en los alrededores del cadenamiento 0+100 de la obra de toma. La línea de conducción también se ve afectada por fallamiento secundario, además de fracturas.

FRACTURAS

El interés de estas estructuras se deriva de su capacidad de permeabilidad como porosidad secundaria en los macizos rocosos, por lo que se deben ubicar y orientar para la evaluación geotectónica del área de estudio.

Tiene orientaciones de semivertical a vertical y semihorizontal a horizontal, en las rocas afectadas se observan fracturas que forman paredes con alturas desde 20 a 30 m. En algunas zonas, las fracturas tienen aberturas de hasta 10 cm que se van cerrando a profundidad y en otras se encuentran cerradas por contacto roca a roca. Los planos de las fracturas, en algunos casos presentan delgadas películas de calcita, hematita, arcilla o dendritas de pirolusita y psilomelano. Principalmente afectan a la unidad andesítica (**Tan**), los derrames basálticos (**Qba**) y en menor grado a la unidad riolítica (**Tri**) (CFE, 2010).

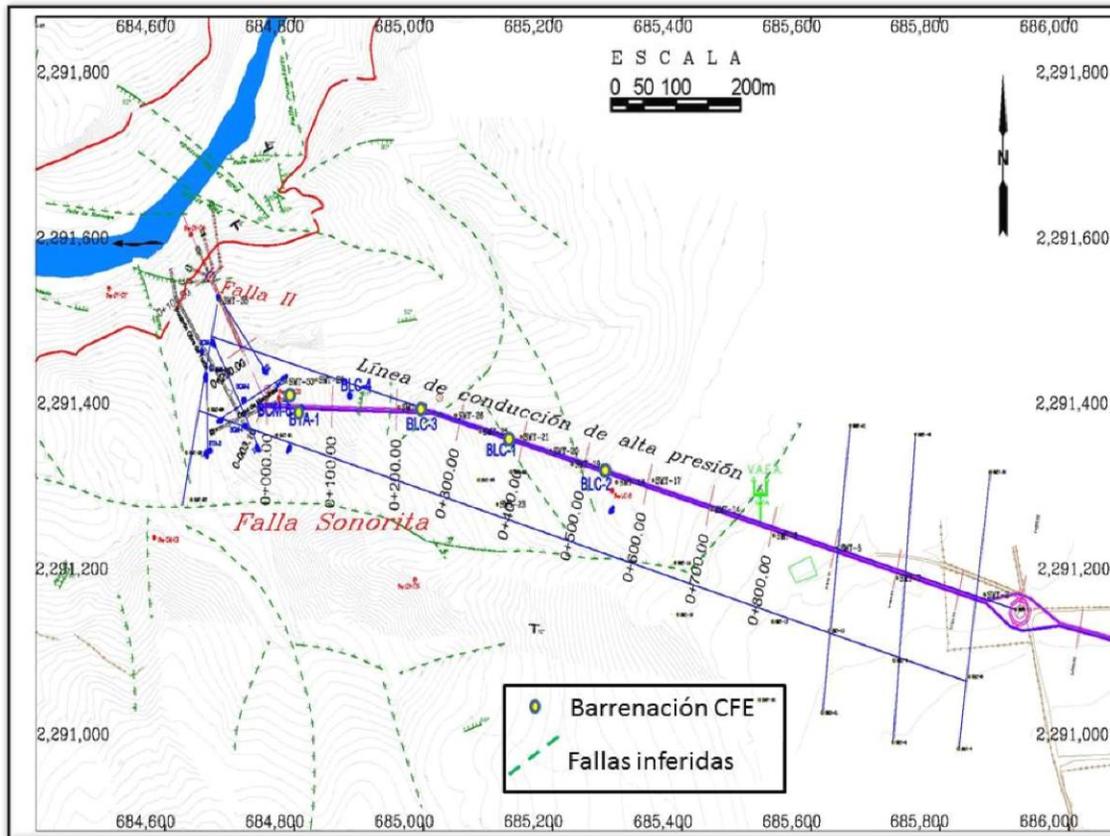


Figura 8. Falla II, falla Sonorita y fallas inferidas que afectan la línea de conducción de alta presión. Barrenación del sitio (CFE, 2010)

BARRENACIÓN DEL SITIO

Los barrenos que se describen a continuación, fueron hechos sobre la línea de conducción de alta presión.

El **BLC-1** se localiza en el cadenamiento 0+373 en la elevación 1440.978, con inclinación de 90° y una profundidad de 50 m. Este barreno describe la unidad basáltica (Qba) compuesta por derrames y brechas, los primeros 6 m presentan hematización y su fragmentación se debe a la alteración sufrida por su cercanía con la superficie. Para los siguientes tramos, se define como macizo rocoso duro, sin embargo, presenta algunas zonas que se disgregan debido a la alteración, en los últimos tramos se tiene la presencia de calcita en las fracturas y vesículas



El barreno **BLC-2** que se encuentra en el cadenamamiento 0+535, tiene inclinación de 90° y una profundidad de estudio de 50.25 m. Describe a la unidad basáltica (Qba) que en los primeros 26 m se observa muy fracturada, sin embargo es compacta y resistente, posteriormente se observa la brecha basáltica con un espesor aproximado de 5.9 m. De 39,80 a 43,15 m se observa la toba Qba (tfpl) de color gris a tonalidades rosáceas, de baja compacidad, con fragmentos de basalto vesicular. Finalmente, hasta los 50.25 m se encuentra basalto de textura afanítica a porfídica, se observan fracturas con contenido de arcilla y amígdalas con calcita.

El barreno **BLC-3** se localiza en el cadenamamiento 0+241 de la sección, con inclinación de 90° y una profundidad de estudio de 50 m, a una elevación de 1383.771, cortó 50,00 m de basalto vesicular (**Qba**) de color gris con tonalidad rojiza.

En el cadenamamiento 0+053 se localiza el barreno **BTA-1**, el cual alcanzó una profundidad total de 250,00 m, cortó 50,00 m de la unidad basáltica (**Qba**) y un horizonte de toba lapillítica **Qba (tfpl)** de 3,70 m de espesor, así como 164,65 m del derrame andesítico (**Tan**) que se considera una roca que va de impermeable a poco permeable, de la unidad riolítica (**Tri**) se definen 18,60 m y conforme a las pruebas de permeabilidad se determina como una roca impermeable. Los últimos 16,75 m corresponden a la unidad basáltica (**Tba**) que se comporta como una roca impermeable (CFE, 2010).

5. IMPLEMENTACIÓN DE CAMPO Y ADQUISICIÓN DE DATOS

5.1 EQUIPO DE TRABAJO

El equipo de trabajo consta de la siguiente instrumentación

EQUIPO TRANSMISOR

- Antena de espira dual (dual-loop)
- Transmisor y controlador
- Batería de 12 VCD y cable para la alimentación del transmisor
- Electrodo para la conexión a tierra del transmisor

EQUIPO RECEPTOR

- Analog Front End (AFE) en donde se filtran y amplifican las señales y se transmiten a la consola.
- 4 electrodos para medir la diferencia de potencial del campo eléctrico: Ex1, Ex0, Ey1, Ey0.
- 2 bobinas para medir el campo magnético: Hx y Hy
- 4 cables de conexión para los electrodos
- 2 cables de conexión para las bobinas
- Stratagem que es la consola para la conversión analógica – digital y proceso digital de la señal.
- Batería de 12 VCD y cable para la alimentación de la consola Stratagem.
- Cable de comunicación entre el Stratagem y el AFE.

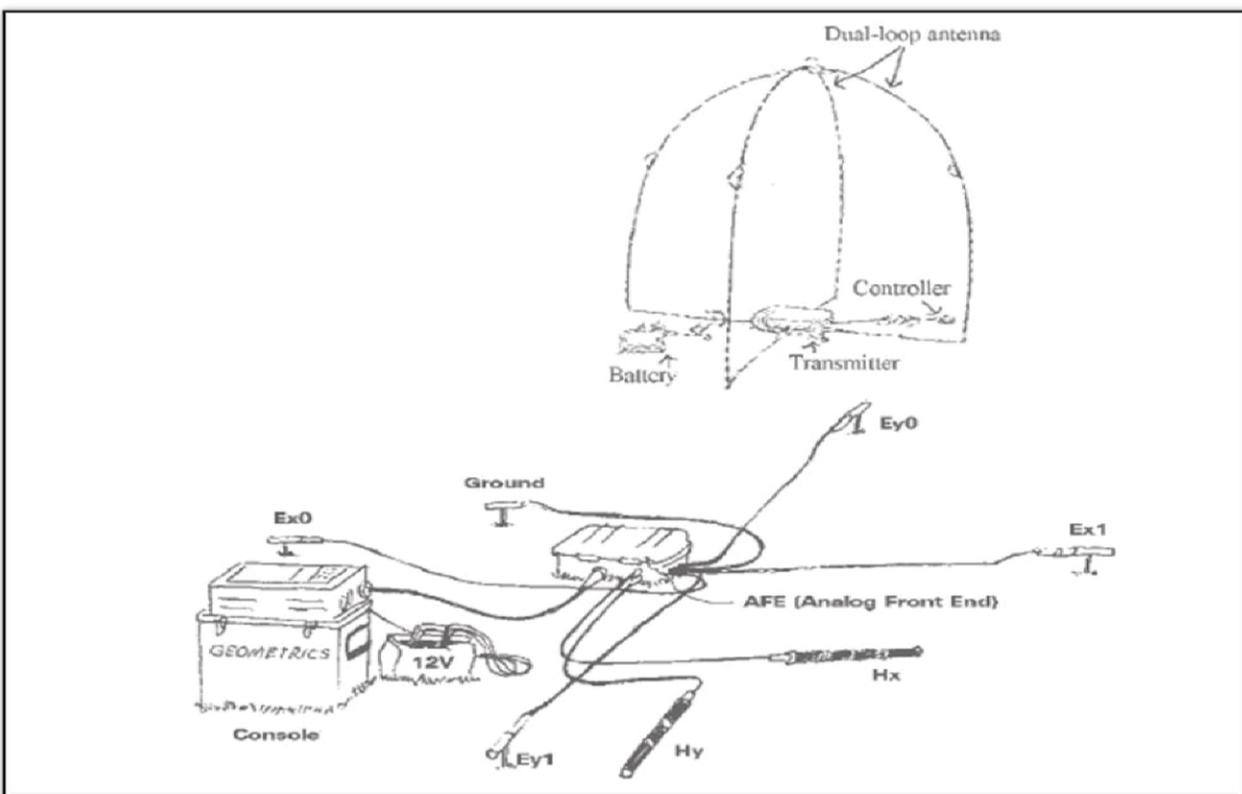


Figura 9 Esquema del equipo de campo y su configuración típica (Geometrics, 2007)



EQUIPO COMPLEMENTARIO

- Brújula
- Nivel de mano

5.2 GENERALIDADES PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL EQUIPO

Para la implementación del método en campo, se requiere una planeación detallada, tomando en cuenta desde los costos para la realización del estudio, hasta la sensibilidad del método; ya que éste es altamente vulnerable a los disturbios del sitio.

Se colocan dos pares de electrodos en ángulo recto, los cuales deben tener baja resistencia de contacto, las conexiones con la tierra disminuyen el ruido del campo eléctrico. La entrada a cada canal de la señal eléctrica es la diferencia de potencial entre un par de electrodos (usualmente se piensa que la tierra tiene potencial cero, la diferencia de voltaje deberá existir si fluyen las corrientes telúricas debido a que la tierra tiene una resistividad finita y $j=E\sigma$). Se recomienda colocar los electrodos lo más separado posible entre ellos además de considerar otros factores tales como obstrucciones, límites de propiedades, el tiempo necesario para realizar las conexiones y el espaciamiento mínimo tolerable entre los sitios de medición; por rutinas de operación, es recomendable usar longitudes fijas para los cables, una vez colocados no se deben mover.

Los dos pares de electrodos miden las dos componentes perpendiculares de un vector del campo eléctrico el cual existe en cada sitio. Sin embargo, es posible que el campo eléctrico varíe su intensidad en ambas direcciones sobre la superficie en distancias muy cortas, debido a los grandes cambios laterales de resistividad cerca de la superficie. Es importante, que los dos pares de electrodos estén colocados de manera que formen una L o una T de tal forma que la longitud entre los electrodos sea igual y que las bobinas (que miden campo magnético) estén cerca del centro.



Los rasgos topográficos pueden causar distorsiones similares a las causadas por heterogeneidades resistivas. Aunque éstas pueden ser modeladas, es mejor evitarlo si es posible; especialmente si el relieve es mayor al 10 por ciento del espaciamiento entre los electrodos.

Las bobinas son muy sensibles al movimiento de las conexiones de los cables de los electrodos. Para prevenir el movimiento o vibración debido al viento, las dos bobinas horizontales se pueden enterrar a poca profundidad (3 a 4.5m) y deben ser orientadas al norte magnético y el azimut horizontal es ajustado por un simple tránsito o nivel de mano.

Debido al núcleo permeable de las bobinas, éstas deben estar separadas varias veces su longitud cuando se hayan colocado para evitar los efectos de distorsión del campo local.

Los sitios deben ser elegidos con cuidado para evitar posibles fuentes de disturbios tales como circuitos de protección catódica, vallas y líneas de poder, así como tráfico de vehículos.

Con estas consideraciones se pueden obtener una eficiente operación de campo, creando un mallado bien coordinado para la obtención de datos y la colocación de los sensores. Una vez que se ha reconocido el sitio de trabajo, se puede evitar el ruido anticipadamente.

Habitualmente, se deben tomar varias grabaciones en cada banda de frecuencia, porque el ruido y la señal son variables y muchas veces impredecibles.

5.3 IMPLEMENTACIÓN DEL EQUIPO EN LA ZONA DE ESTUDIO.

Los sondeos magnetoteléuricos (SMT) realizados en la margen izquierda del río Verde, se iniciaron en la coordenada UTM X: 685869.5154 y Y: 2291168.3270, con dirección NW siguiendo el trazo de la línea de alta presión y sus alrededores. La separación entre cada sondeo es de aproximadamente 100 m formando así un mallado de 200 * 300 m con un total de 12 SMT para la primera parte. Los sondeos realizados en esta zona se ven influenciados por una línea de alta tensión que se localiza a 200 m de distancia observándose señales de ruido en las series de tiempo.



La segunda parte de los sondeos fueron realizados a lo largo de la línea de conducción a partir del SMT-9 con coordenadas X: 685542.3036 y Y: 2291239.7620, a una elevación de 1,560.3244 msnm; en donde la influencia de ruido causado por la línea de alta tensión va disminuyendo. En esta parte, la distancia entre los sondeos varía de entre 70 y 40 m dependiendo del acceso en el terreno.

En la zona de lo que sería casa de máquinas se trazaron las secciones MT-6 y MT-7 en las que se incluyen 7 SMT.

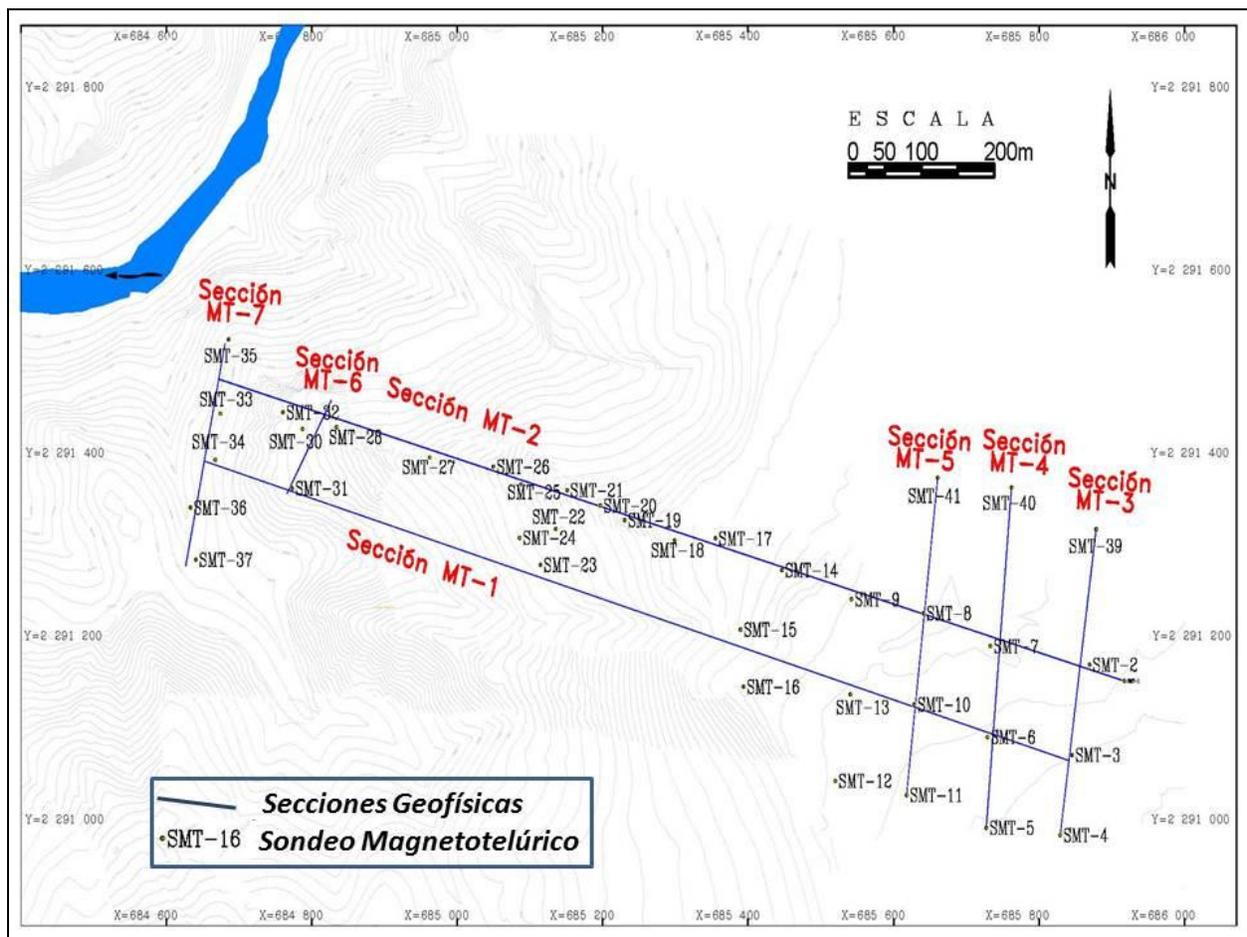


Figura 10 Localización de las secciones MT y sondeos realizados (CFE,2010).

Se trabajó en la modalidad de alta frecuencia, colocando la antena a 200 metros de distancia de la toma de datos.

Se colocaron los electrodos a 10 m de distancia entre ellos, de igual forma las bobinas magnéticas orientadas al norte magnético y se enterraron a poca profundidad según lo permitía el terreno, tomando en cuenta que en la zona más alta abunda el material de *jal* de composición areno-limosa y arcillo-limosa con un espesor de 0,40 a 0,60 m y conforme se avanza en dirección al río Verde se encuentra material de talud (Qdt) con diferentes espesores.

Con los SMT realizados, se trazaron 7 líneas (MT-1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7); en el presente trabajo se analizará el proceso de la sección MT-2 por cuestiones prácticas.



Figura 11 Implementación del equipo en campo. a) Consola Stratagem, b) Antena tipo domo, c)Equipo receptor AFE, d)Nivelación de bobinas magnéticas (Imágenes tomadas durante la adquisición en campo).



Una vez instalado el equipo (figura 11), se procede a hacer una toma de datos con la señal MT natural en las bandas de frecuencia 1(10-1KHz) y 4 (500-3 KHz) y posteriormente se hace la toma de datos con la banda de frecuencia 7(750-92KHz) para fuente controlada con el uso de la antena. La toma de datos se lleva un tiempo aproximado de 30 minutos.

Con el arreglo de campo se obtienen dos componentes horizontales del campo magnético (H_x y H_y) y las dos componentes horizontales del campo eléctrico (E_x y E_y). Una vez obtenidos los datos que se almacenan en la consola del Stratagem, se transfieren a una computadora para su análisis y procesamiento.

6. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Se transfieren los datos obtenidos en cada uno de los sondeos a una computadora para el análisis de las series de tiempo; los archivos que arroja el equipo Stratagem son los X, Y y Z.

Los archivos Y contienen las series temporales medidas en cada banda de frecuencia y en cada canal tanto eléctrico como magnético (E_x , E_y , H_x y H_y). Los archivos X pertenecen al dominio espectral y son la correlación cruzada para estimar la impedancia. Finalmente, los archivos Z son el tensor de impedancia para cada frecuencia.

Para la visualización y edición de estos archivos se utiliza el software del fabricante que es el Imagem de la compañía Geometrics que además proporciona las características de calibración de las bobinas utilizadas, lo cual sirve para la eliminación de los efectos de ruido del equipo.

Es importante la edición de los archivos (productos cruzados) de cada uno de los sondeos y para cada frecuencia; ya que, al momento de la adquisición se presentan periodos con ruido alterando la calidad de la señal.

Una vez editados los sondeos de campo se importan al software Winglink® para el procesamiento de los mismos.

La localización de los mismos y un ejemplo de los sondeos obtenidos se muestra a continuación.

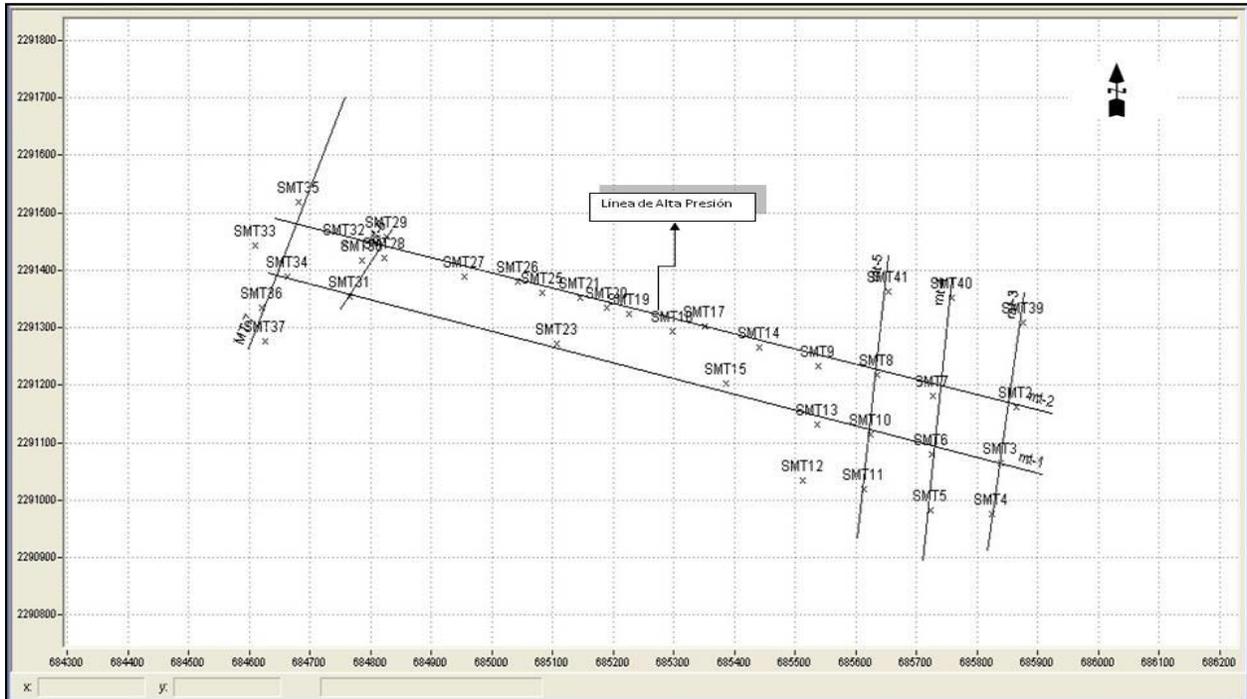


Figura 12 Localización de SMT en el software Winglink

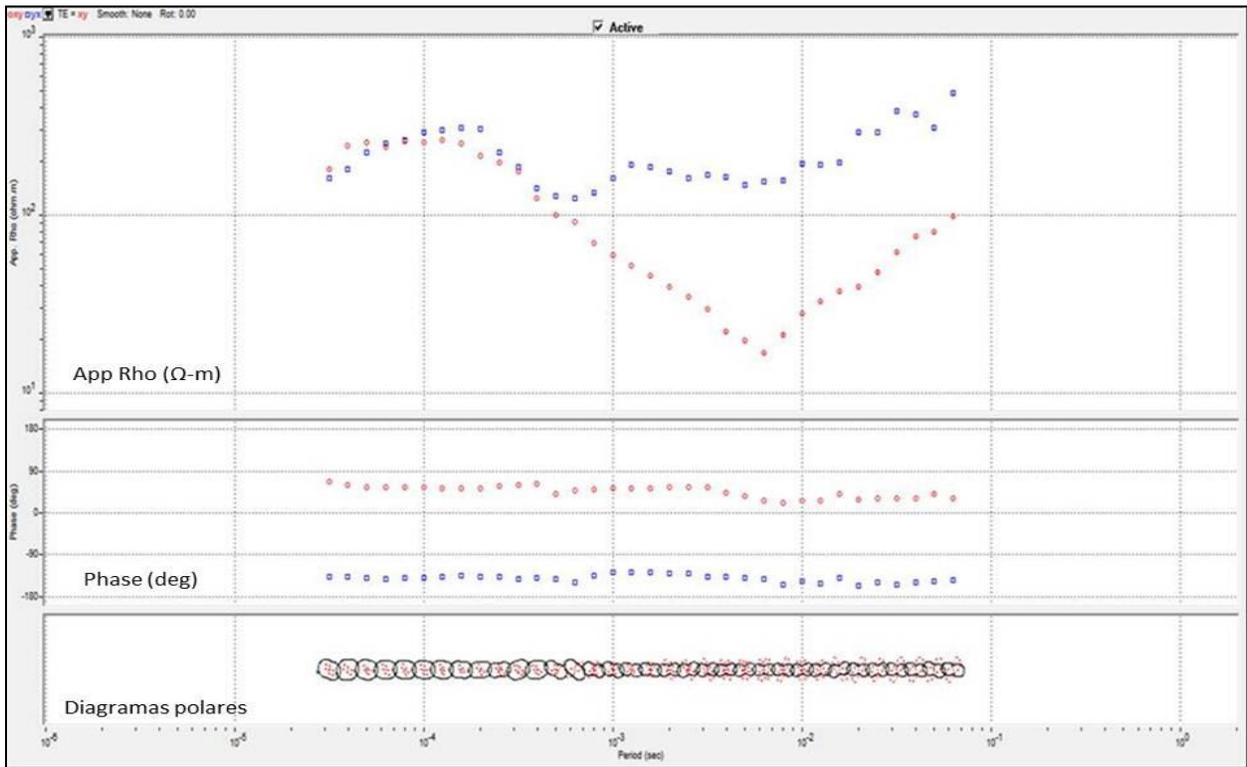


Figura 13 Resistividad, fase y diagramas polares del SMT 25



Las curvas que se observan en la figura 13 del SMT 25, son las de resistividad en la parte superior y las de fase en la parte inferior, estas resultan de las impedancias de los ejes principales (Z_{xy} y Z_{yx}) entre las componentes $H_x - E_y$ y $H_y - E_x$; en donde la línea roja es la componente XY y la azul es la componente YX.

Estas curvas de resistividad y fase corresponden a la dirección de la estructura principal o perpendicular a ella.

Utilizando ambos recursos (resistividad y fase) se obtiene un modelo más preciso de las características geoelectricas del subsuelo. Como parte del procesado se realiza la corrección por el corrimiento estático o static shift que afecta únicamente a la resistividad de las capas sin influir en el espesor de las mismas.

Para tal fin se realizaron dos Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) en los cadenamamientos 0+911 para el SEV 8 (figura 14) y en el 0+616 para el SEV 17 (figura 15) mismos que se utilizaron para la corrección del static Shift de los primeros SMT (figura 16).

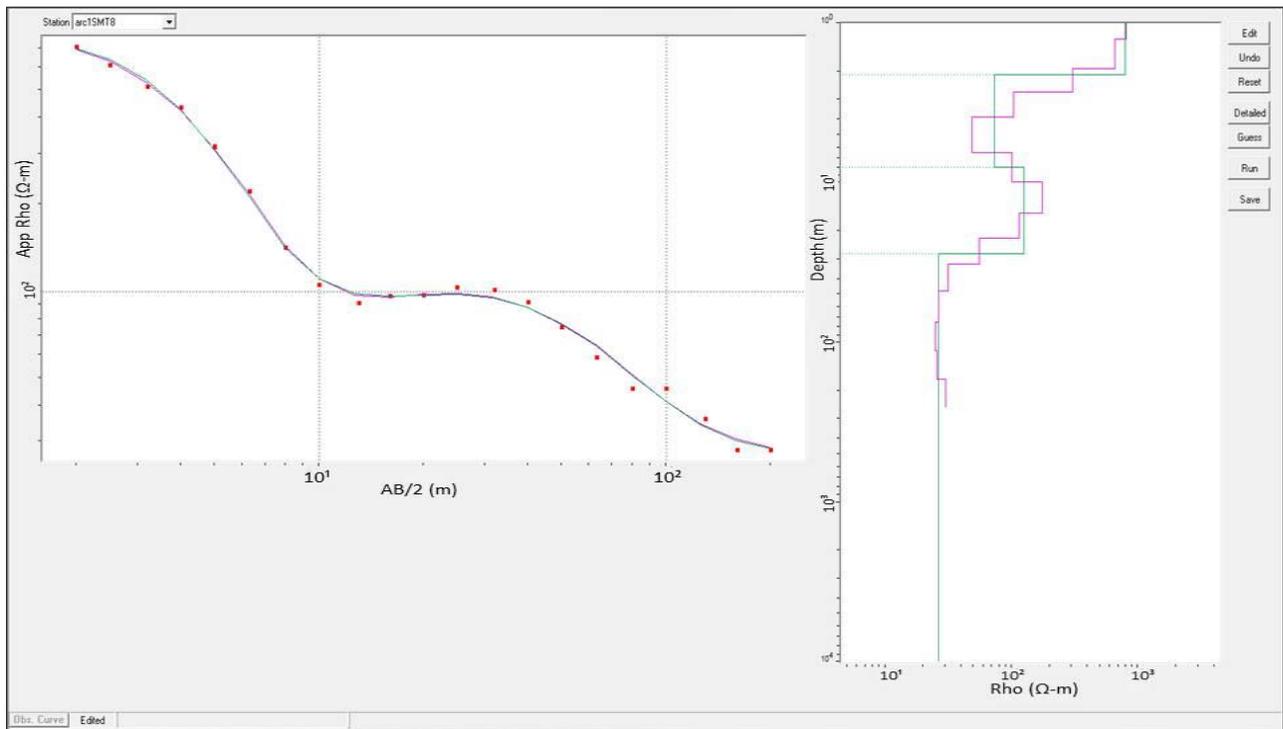


Figura 14 SEV 8

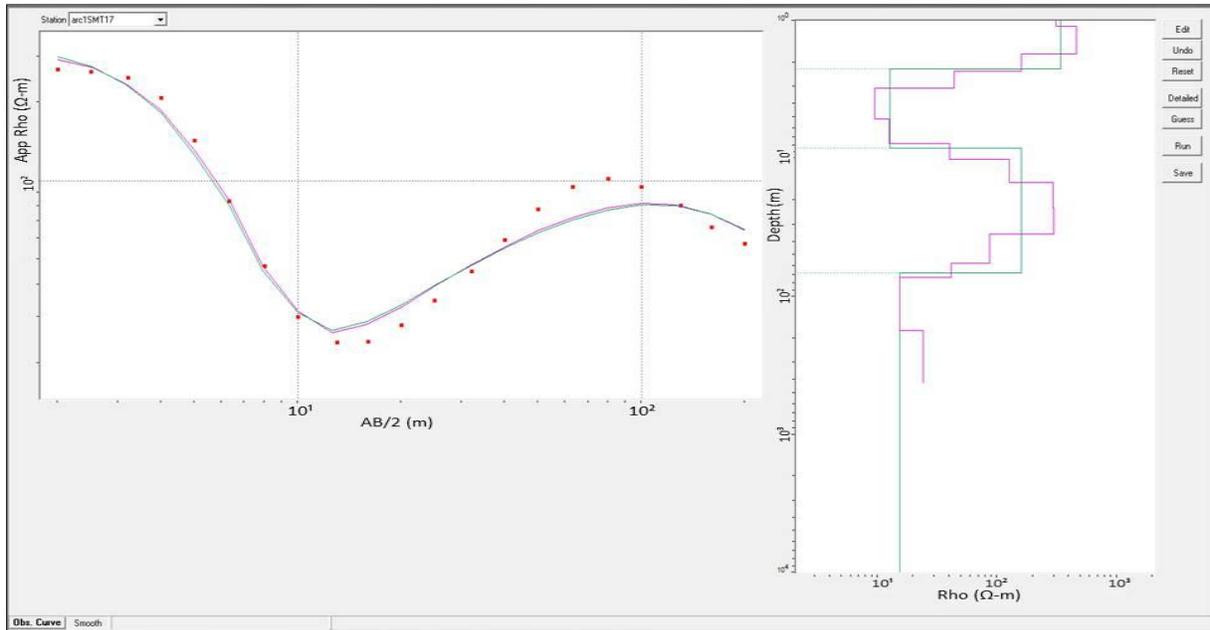


Figura 15 SEV 17

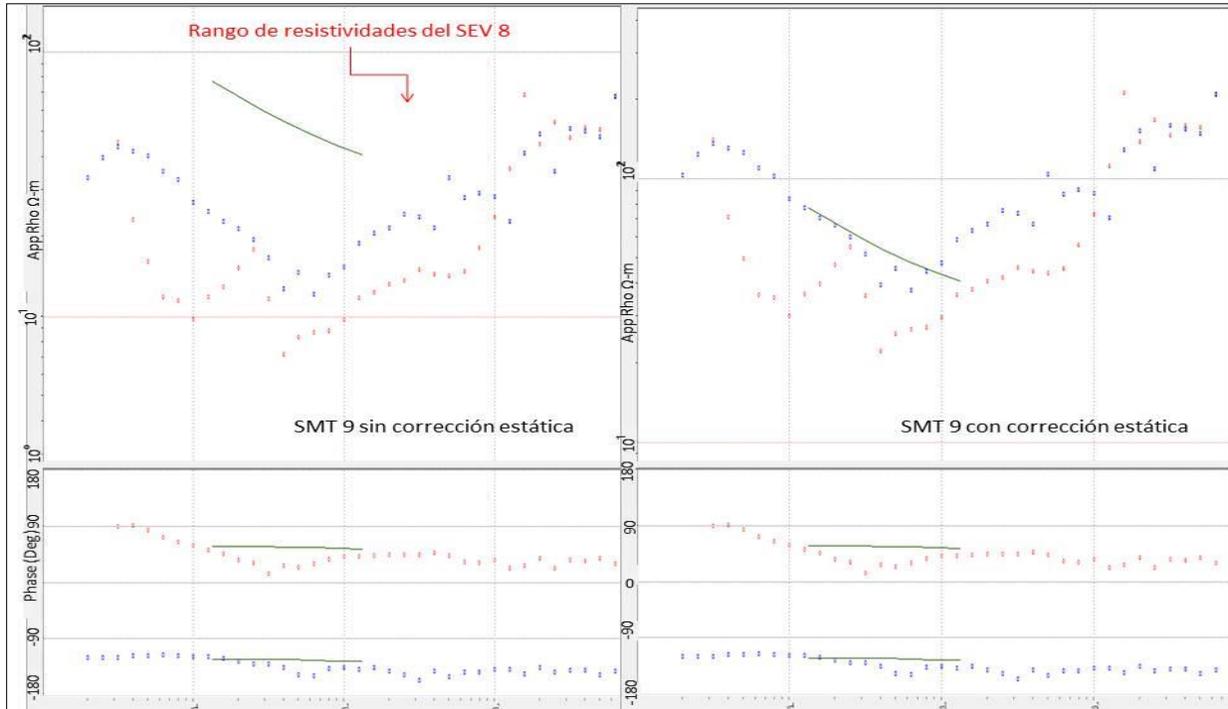


Figura 16 Corrección del Static Shift del SMT 17



Para el resto de los SMT, el método de corrección del static shift fue el de similitud entre las curvas de resistividad aparente de los sondeos realizados sobre la misma litología, para encontrar el valor común de resistividad para las primeras capas.

El análisis del tensor de impedancia involucra su transformación a la resistividad aparente. Todo esto con el objetivo de establecer la estructura geoelectrica de la región, evaluar el grado de horizontalidad de la inhomogeneidad, determinar el nivel de ruido causado por inhomogeneidades locales cercanas a la superficie, detectar las estructuras conductivas y resistivas y definir su dimensionalidad, analizar la curva de resistividad aparente y sus distorsiones, crear los mapas y las secciones para caracterizar la forma, la orientación y la localización probable de un cuerpo identificable geoelectricamente, construir un modelo geoelectrico cualitativo con información geológica y geofísica previa.

6.1 DIMENSIONALIDAD DEL MEDIO

Con base en la conductividad que es función de X, Y, Z, y el tensor de impedancias (ec 3.40) podemos identificar los siguientes casos con respecto a la dimensión del medio en el que se trabaja.

Para un medio *unidimensional*, en el que las capas son horizontales, el tensor de impedancias tiene el siguiente comportamiento:

$$[Z_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & Z \\ -Z & 0 \end{bmatrix}$$

$$Z_{xx} = Z_{yy} = 0$$

$$Z_{xy} = -Z_{yx}$$

En donde E_x y E_y dependen exclusivamente de H_y y H_x respectivamente.

$$E_x = Z_{xy}H_y$$

$$E_y = -Z_{yx}H_x$$



Para el caso *bidimensional*, en el que alguno de los ejes se encuentra alineado con el strike, el tensor de impedancias se comporta como sigue:

$$[Z_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{bmatrix}$$

$$Z_{xx} = Z_{yy} = 0$$

$$Z_{xy} \neq Z_{yx}$$

Para el caso en el que Z no se alinea con ninguna estructura, ninguno de sus elementos será cero.

$$[Z_{ij}] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}$$

$$Z_{xx} \neq Z_{yy} \neq Z_{xy} \neq Z_{yx}$$

Sin embargo, una forma de encontrar la dirección de la estructura es rotar el tensor Z con respecto al eje z, para encontrar el ángulo en donde los valores de la diagonal sean mínimos.

$$Z_{2D} = RZR^T$$

Donde R es la matriz de rotación

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

En donde θ es el ángulo que forma el eje de la estructura con el norte.

Para un medio *tridimensional*, es decir, cuando la conductividad varía en cualquier dirección, las componentes de Z serán siempre diferentes

$$[Z_{ij}] = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}$$

$$Z_{xx} \neq Z_{yy} \neq Z_{xy} \neq Z_{yx}$$



Sin embargo existe la posibilidad de rotar el tensor de impedancias hasta conseguir una aproximación bidimensional (Fernández et al., 1987).

SKEW

Otra manera de definir si el medio es tridimensional es con el Skew

$$W = \frac{|Z_{xx}+Z_{yy}|}{|Z_{xy}+Z_{yx}|} \quad 6.50$$

En la práctica se ha observado que cuando $W > 0.3$, el medio es tridimensional; en cambio, cuando se trata de un medio bidimensional $W=0$ (Fernández et al., 1987).

DIAGRAMAS POLARES

El análisis de estos diagramas es otra forma de obtener la dimensionalidad del medio a diferentes frecuencias y se representan de manera gráfica en forma de elipses. Matemáticamente representan el módulo de la impedancia en función del ángulo de rotación.

Para un medio 1D, los diagramas polares se representan como círculos ya que el valor de la diagonal principal de la impedancia Z_{xx} y Z_{yy} es cero y se representan en un punto mientras que los valores de la diagonal secundaria de la matriz impedancia Z_{xy} y Z_{yx} tienen el mismo valor y se representan en círculos.

En un medio 2D y 3D, las componentes Z_{xx} y Z_{yy} forman tréboles, mientras que las componentes de la diagonal secundaria Z_{xy} y Z_{yx} se deforman según la anisotropía del lugar formando elipses cuya dirección de ejes indica la posible dirección de la anisotropía en cuestión.

En la figura 17 se muestran los diagramas polares a una frecuencia de 1000 Hz, en la que se observa que el comportamiento del medio es 2D o 3D. El análisis de los diagramas polares no resultó concluyente dada la complejidad geoelectrica de los datos. En este sentido se decidió asumir la direccionalidad de aquellos sitios que manifestaron un comportamiento 2D, que fue preferencialmente NS en los primeros sondeos, hasta el smt-20.



Figura 17 Diagramas polares a una frecuencia de 1000 Hz para los 13 SMT de la líneas MT-2

6.2 MAPAS DE RESISTIVIDAD APARENTE Y PSEUDOSECCIONES DEL MODO DE POLARIZACIÓN TM.

Como parte del análisis preliminar de datos, se realizan los mapas de resistividad aparente, llamados así debido a que la resistividad aparente está en función de la frecuencia. En las figuras 18, 19, 20 y 21 se observan los pseudomapas a 10 000, 1 000, 100 y 20 Hz respectivamente, de los sondeos que corresponden a la línea MT-2.

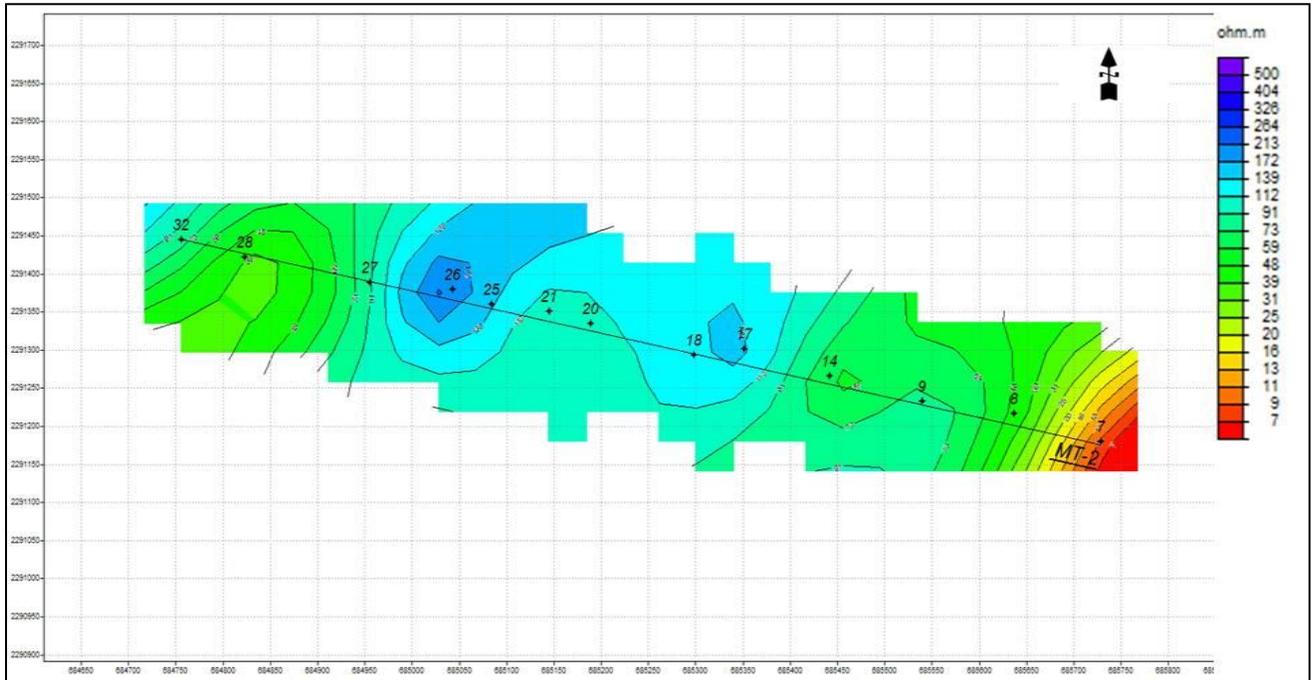


Figura 18 Mapa de resistividad aparente a 10 000 Hz en la línea MT-2

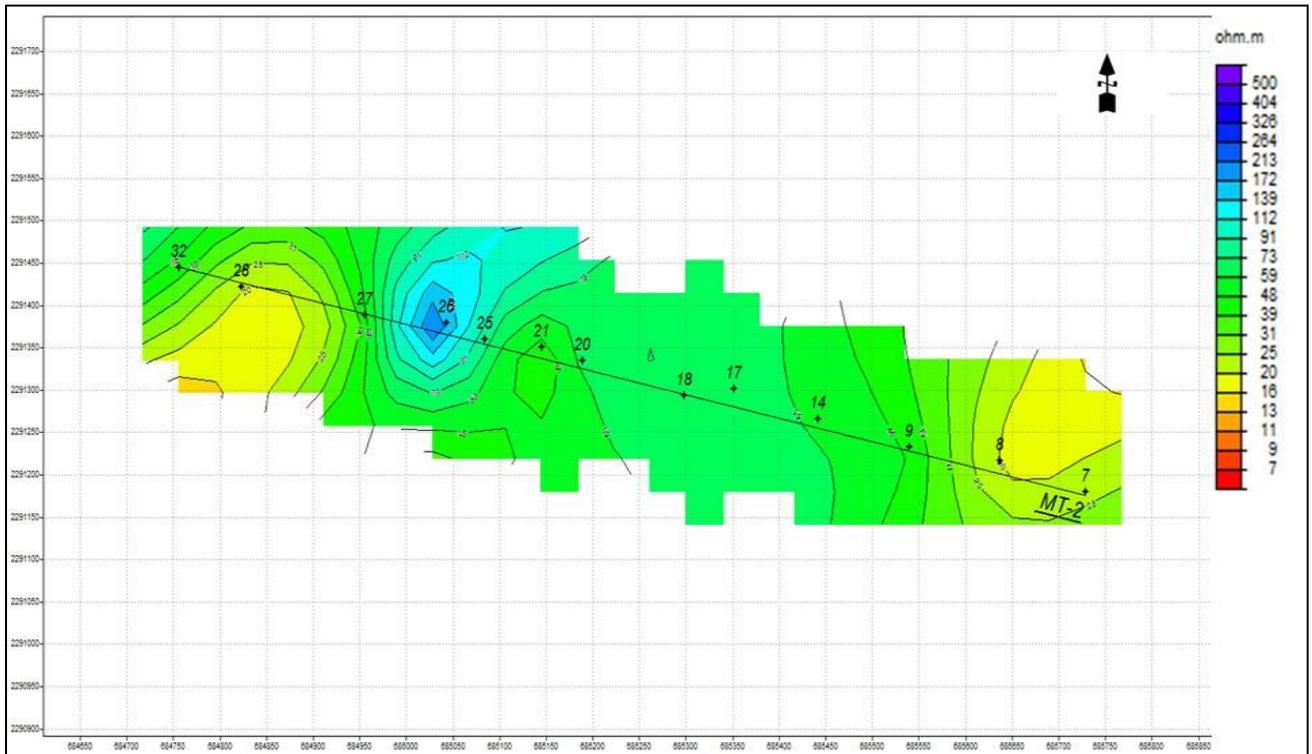


Figura 19 Mapa de resistividad aparente a 1 000 Hz en la línea MT-2

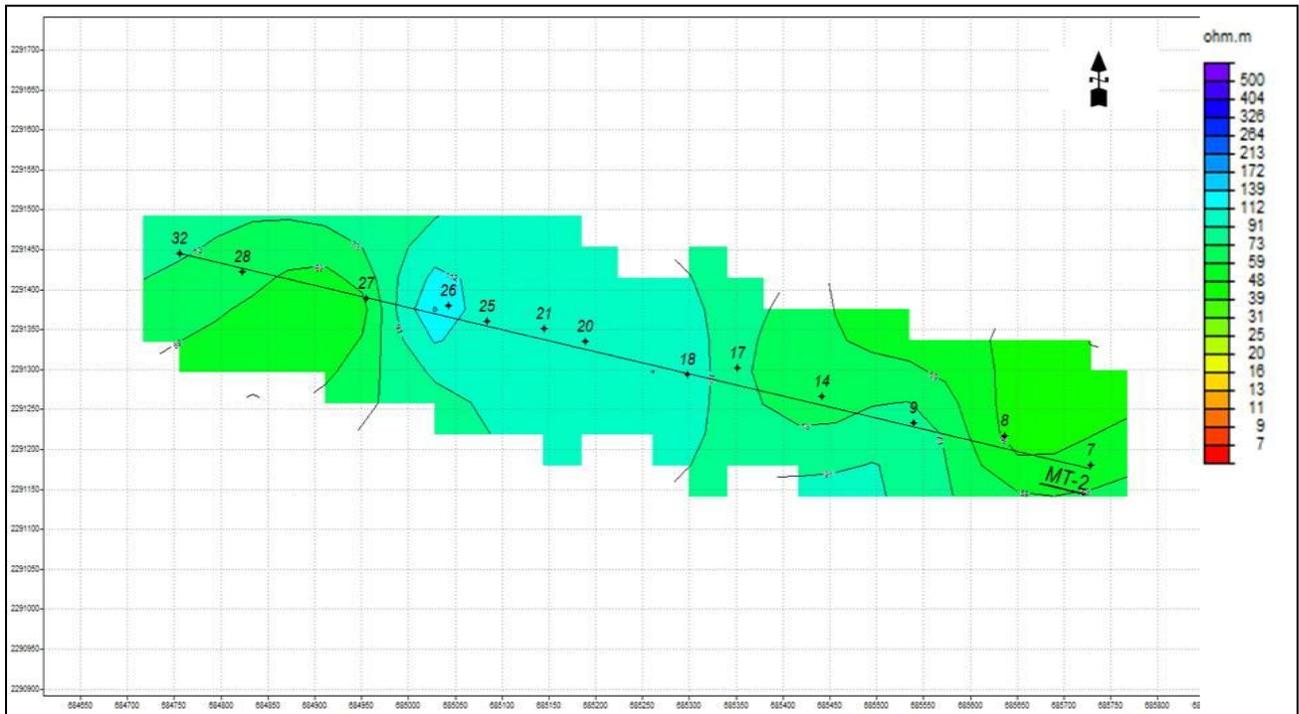


Figura 20 Mapa de resistividad a 100 Hz en la línea MT-2

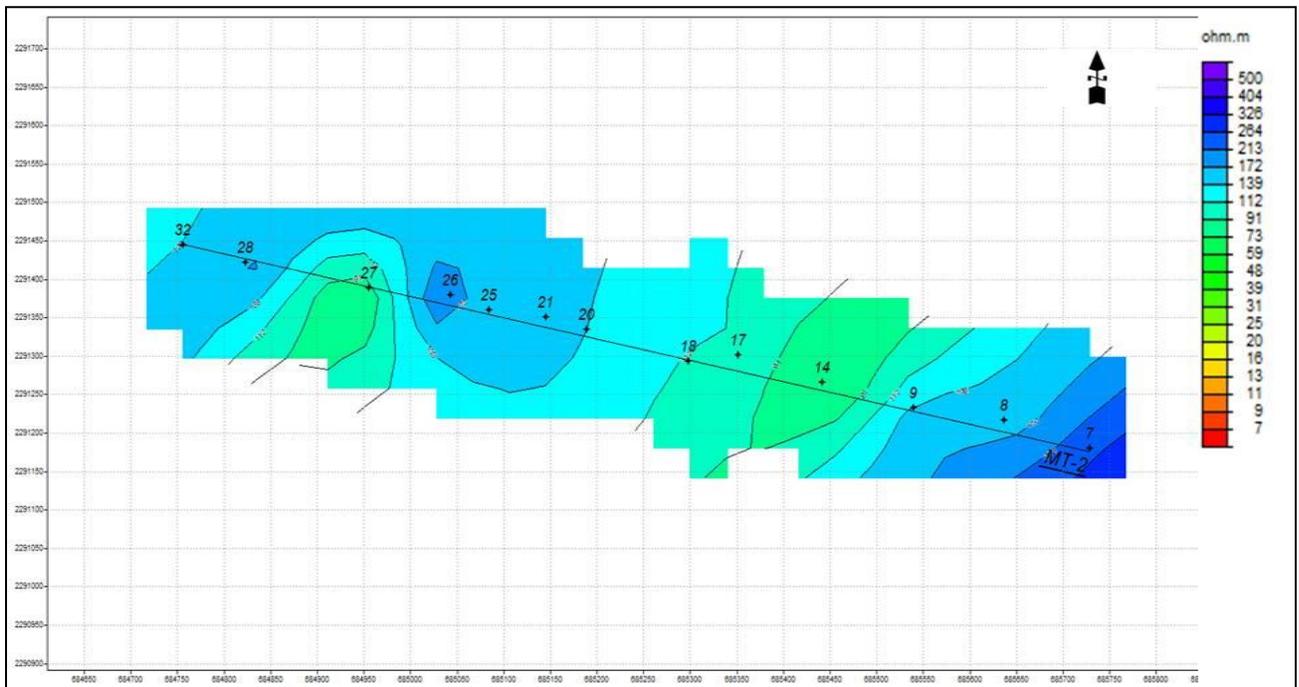


Figura 21 Mapa de resistividad aparente a 20 Hz en la línea MT-2



Para las frecuencias de 10 000 Hz se observan intercalaciones de material resistivo y conductor, es decir, el comportamiento no es uniforme, debido a que se trata de la capa superficial expuesta al intemperismo y su composición se debe al aporte de diversos materiales; para las frecuencias alrededor de 1 000 Hz el comportamiento es conductor en la mayoría de la sección, mientras a frecuencias de 100 Hz, es decir; a mayor profundidad se observa una tendencia resistiva entre los sondeos 18 al 26 y hacia los extremos de la sección se mantienen valores conductores. Finalmente a mayor profundidad a una frecuencia de 20 Hz el medio se comporta resistivo.

Otra herramienta en el análisis de datos y de dimensionalidad del medio, son las pseudosecciones de los modos de polarización transversal eléctrico TE y transversal magnético TM. En este trabajo solo se muestra el modo TM que fue el utilizado para hacer la inversión según la recomendación de algunos autores (Wannamaker, Hohmann y Ward, 1984). En la figura 22 se observa el modo TM para la línea MT-2 con el período en segundos en el eje de las ordenadas y la distancia entre cada sondeo en el eje de las abscisas.

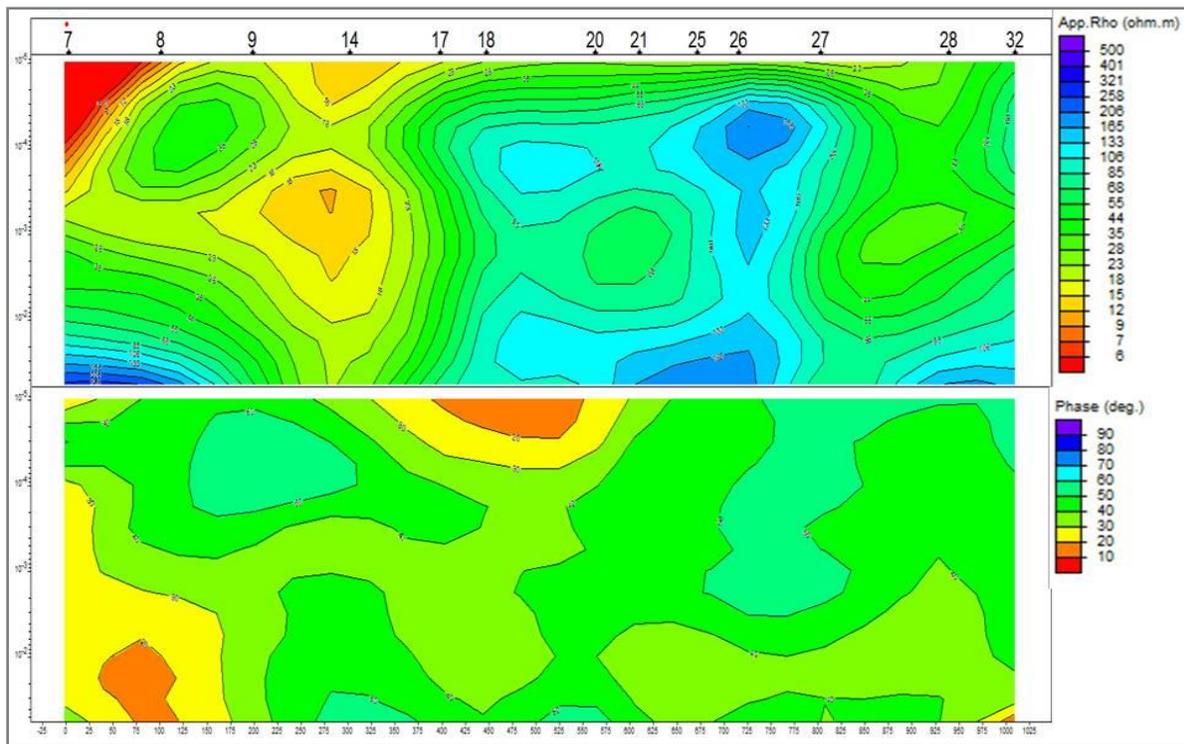


Figura 22 Pseudosección del modo TM de la línea MT-2

6.3 INVERSIÓN DE DATOS

INVERSIÓN BIDIMENSIONAL

Una vez hecho el análisis de los datos obtenidos en campo, se realiza la inversión bidimensional del modo de polarización TM de la sección MT-2.

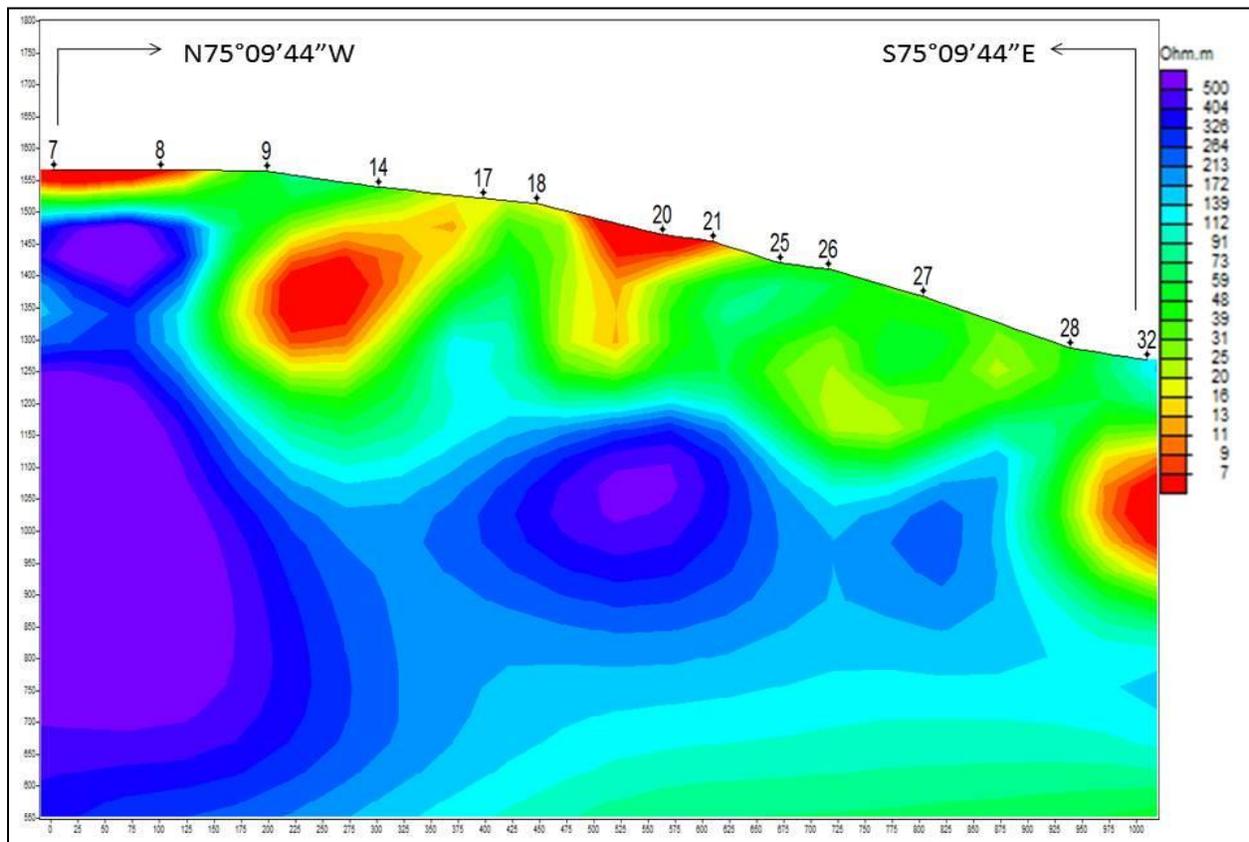


Figura 23 Inversión bidimensional de la línea MT-2, en el eje de las ordenadas se tiene la profundidad de estudio y en el eje de las abscisas la distancia entre cada SMT.

Como se observó en el análisis de datos, se determinó un medio 2D. En este modelo se observa la distribución de cuerpos conductores desde la parte superficial, hasta una profundidad aproximada de 300 m, sin embargo, en el inicio de la sección entre los sondeos SMT 7 y SMT 8 a 80 m de profundidad se observa un cuerpo resistivo que se extiende a profundidad y hacia el



centro de la zona de estudio, el contacto lateral entre valores altos y bajos de resistividad se asocian a los lineamientos superficiales.

Una vez hecha la inversión bidimensional se genera una comparación del ajuste de las curvas (figura 24) originales y calculadas, tanto de resistividad aparente para los dos primeros recuadros, como de fases observadas y calculadas del modo TM que es el que mejor se ajusta a los cuerpos resistivos.

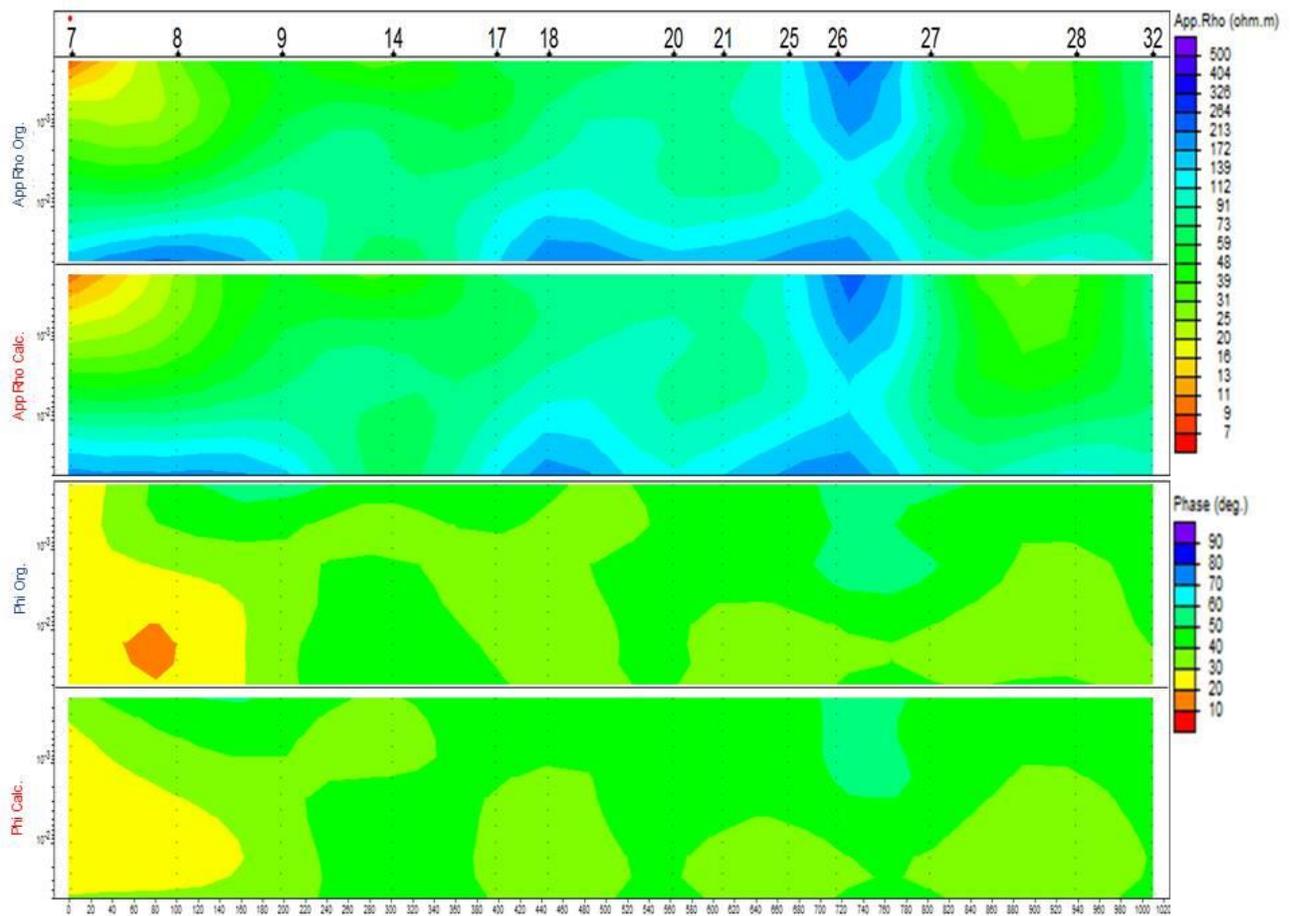


Figura 24 Ajuste de curvas observadas y calculadas.



7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Una vez obtenido el modelo geoelectrico de la sección *MT-2*, se correlaciona con la información geológica disponible de la zona, en este caso, se cuenta con la información de los levantamientos de campo hechos en superficie y los barrenos ejecutados que son el **BLC-1**, **BLC-2** y **BLC-3** que alcanzan profundidades no mayores a 50 m y el barreno **BTA-1** con una profundidad de 250 m, los barrenos proyectados no se toman en cuenta para este análisis.

7.1 CORRELACIÓN GEOLÓGICO-GEOFÍSICA

El modelo bidimensional del modo de polarización TM, define de forma clara el cuerpo resistivo, así como la zona conductora en la parte superior de la sección. En los sondeos 7 y 8 se observa el cuerpo conductor hasta una profundidad de 70 m en donde le subyace el cuerpo resistivo más grande en toda la sección con resistividades desde 70 a 500 $\Omega \cdot m$. Entre el sondeo 8 y 9 se observa en contacto lateral la zona resistiva y conductora, a partir de este contacto la respuesta geoelectrica de material es conductora, dicho comportamiento se extiende a lo largo de toda la sección, sin embargo; en los sondeos 17, 21 y 28 se observa el cuerpo resistivo en menor proporción que define los contactos laterales. En base a los levantamientos geológicos, la sección de estudio se ve afectada por fallas que son inferidas en los cadenamientos 0+144, 0+266, 0+374, 0+488 y 0+756 de la sección geológica (Figura 25) que se asocian a los contactos laterales del modelo bidimensional; mientras que los barrenos BLC-1, BLC-2 y BLC-3 que alcanzan una profundidad no mayor a los 50 m describe la unidad Qba alterada y fracturada, a estas condiciones se relaciona la respuesta conductora de la zona superior de la sección en estudio (Figura 26).

El barreno BTA-1 que alcanza una profundidad total de 250 m, define la unidad Qba con horizontes de material alterado y fracturado, el derrame andesítico como impermeable a poco permeable y le subyace la unidad riolítica (Tri) a partir de la cota 1064, descrita como impermeable con un espesor aproximado de 23 m y finalmente se tiene a la unidad basáltica del terciario (Tba) como base de la sección. Es en la unidad riolítica (Tri) en donde se encuentra perforada la última parte del socavón de obra de toma que inicia en la unidad basáltica (Tba) en la cota 1040 (figura 26), con una longitud total de 230.38 m cuyas alteraciones en los diferentes



cadenciamientos del mismo se deben a la infiltración de agua. Conforme se avanza hacia el fondo del socavón se observa presencia de humedad y ligeros goteos, sin embargo es en el ramal izquierdo en donde la salida de agua es constante y abundante. En la sección geofísica, la zona de infiltración de agua se identifica en colores rojos, naranjas y amarillos, marcados por contactos laterales asociados a porosidad secundaria por donde viaja el agua, en este caso a fracturas y fallamiento, ya que el contenido de fluidos del material arroja una respuesta conductora.

Las estructuras descritas en las secciones tanto geológica como geofísica forman parte de las zonas de recarga del río Verde.

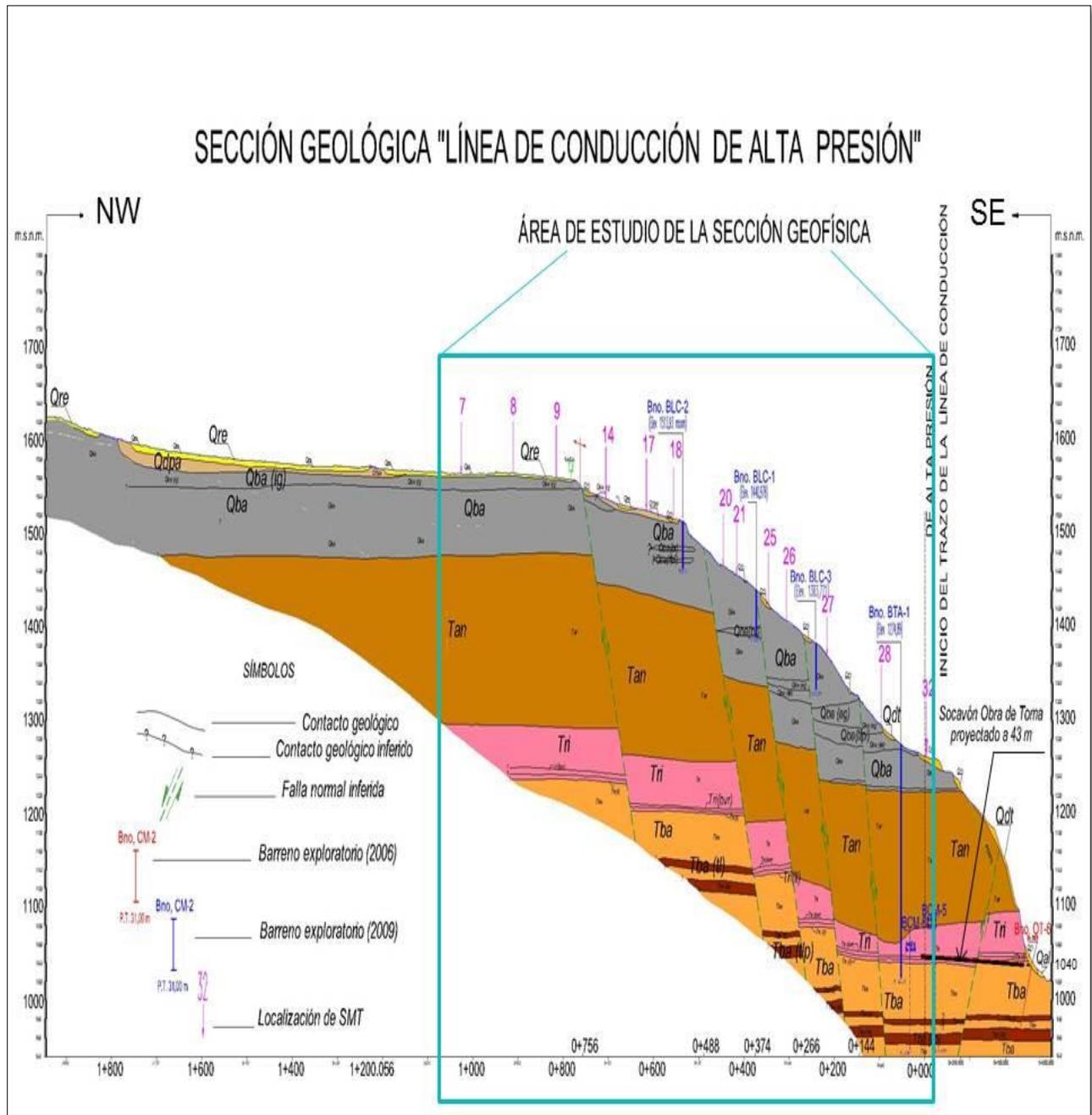


Figura 25 Sección Geológico-estructural (Imagen tomada y editada de CFE,2010).

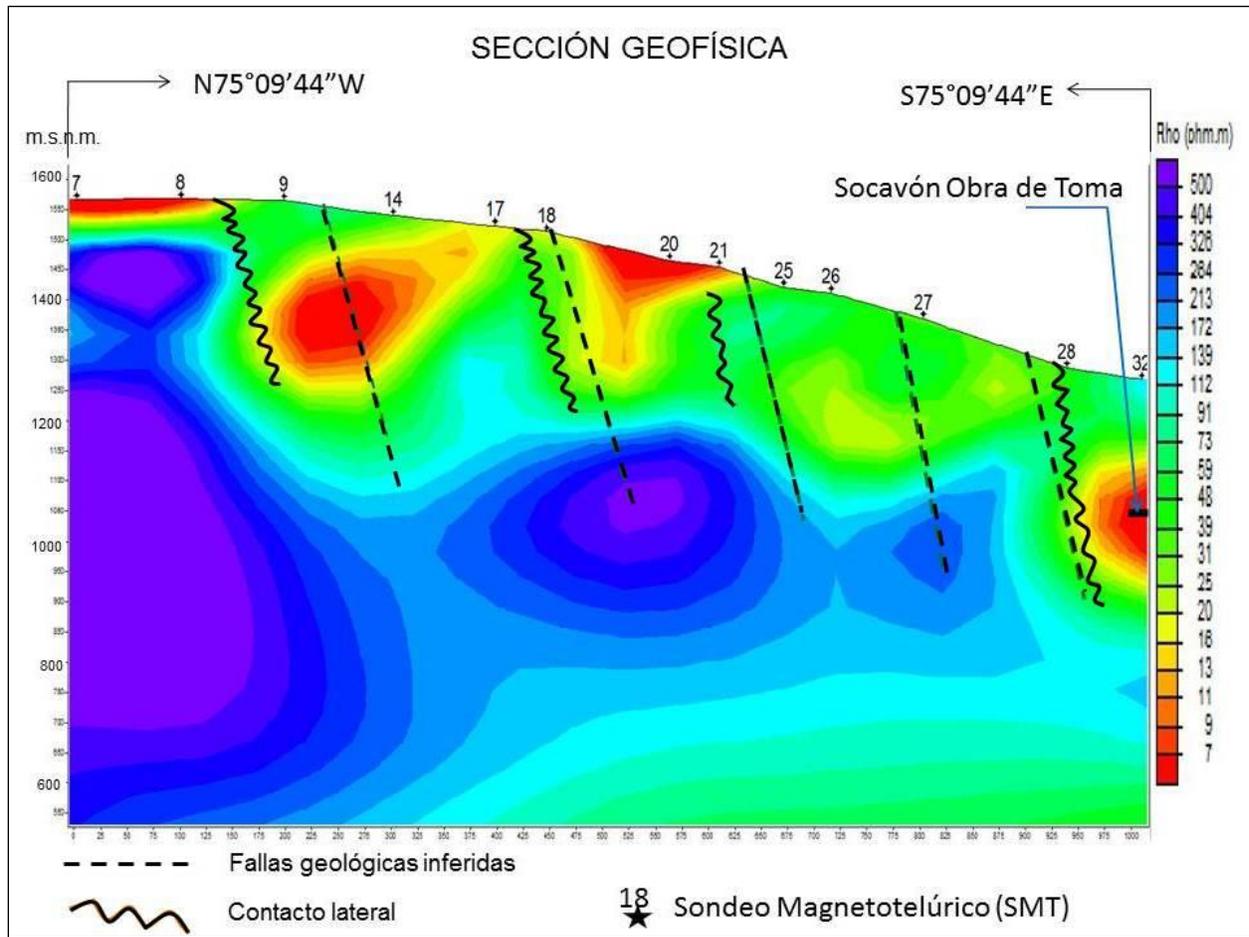


Figura 26 Sección Geofísica bidimensional del modo de polarización TM



8. CONCLUSIONES

La profundidad de investigación del método magnetotélúrico es una ventaja sobre otros métodos geofísicos; como se mencionaba, la implementación en campo también se facilita aun cuando se trabaje en zonas de topografía abrupta, como lo fue en este caso. Tomando en cuenta las asunciones del método y condiciones de campo, los resultados son favorables.

Para este estudio, en el análisis de datos se define el medio como 2D, por lo que se esperaba encontrar estructuras internas.

El modelo se visualiza de forma satisfactoria. En este modelo, la zona conductora se encuentra en un rango de entre 7 a 60 $\Omega \cdot m$, al inicio de la sección, entre los sondeos 7 y 8 con una profundidad de 70 m aproximadamente, mientras que del sondeo 9 hasta el 32 se identifica un espesor de hasta 300 m con intercalaciones de zonas resistivas que van marcando los contactos laterales hasta alcanzar la cota de elevación a la que se encuentra el socavón que es la 1040 msnm. Este comportamiento conductor de las unidades litológicas y la identificación de los contactos laterales se asocia a las fallas y fracturas por donde se infiltra el agua debido a que el contenido de los fluidos disminuye la resistividad de la roca. Esta asunción se comprueba en el socavón en el que se tienen desde goteo moderado hasta escurrimientos constantes y abundantes de agua.

Además de considerar los estudios de permeabilidad que se aplicaron en los barrenos en donde se describe a la roca como impermeable a poco permeable, por lo que se concluye que la infiltración de agua en el socavón se debe a la porosidad secundaria.

Cabe mencionar que dichas fallas y contactos geofísicos no son puntuales, ya que son el producto de toda una zona de influencia pudiendo asociarles familias de fallas y fracturas

De esta forma se contribuye en la generación del modelo estructural por medio de una integración geológico-geofísica en donde se definen los cadenamientos de las fallas encontradas, o en este caso inferidas.



En cuanto a la definición de las capas litológicas que conforman el subsuelo (Tan, Tri y Tba), éstas presentan resistividades similares por lo que no se identifican individualmente, solamente son diferenciadas las alteraciones de la roca ocasionadas por la presencia de agua.

Los métodos electromagnéticos se recomiendan en distintas áreas de exploración, sobre todo en aquellas que requieren de una profundidad de exploración de cientos a miles de metros, pero haremos énfasis en el área de geotecnia cuyo interés radica, en la mayoría de los casos, en decenas de metros pero se puede considerar la opción de fuente controlada además de considerar la sensibilidad del método a los cambios resistivos.

Los proyectos para generación de energía, como los hidroeléctricos, termoeléctricos y carboeléctricos se realizan en zonas con características estructurales complejas cuyas condiciones generan el ambiente necesario para contener a la fuente que se utilizará como generadora de energía limpia, para lo cual este método proporciona información de dichas estructuras al no limitar el campo electromagnético a un solo punto, sino que genera una respuesta con base en la influencia del medio que lo propaga.

Para cualquiera de los casos, la respuesta del método se integra con los resultados de la exploración directa que se lleva a cabo en todos los estudios de prefactibilidad del proyecto (barrenación, socavones y levantamiento geológico) pudiendo calibrar el método en cualquiera de los puntos en donde estos se realizaron.



9. BIBLIOGRAFÍA

- Arango, C. (2005). *Estudio magnetotélurico de la zona de Llucmajor (Mallorca): avance en el proceso de datos y modelo tridimensional*. Barcelona: Departamento de geodinámica y geofísica, Universidad de Barcelona.
- Berbesi, A. (2005). *Comparación entre inversión SB e inversión REBOCC para una medición 2-D RMT+CSTMT en Skendiga, Suecia*. Tesis de Licenciatura, Universidad Simón Bolívar. Sertenejas.
- Berdichevsky, M. N., & Dmitriev, V. I. (2002). *Magnetotellurics in the context of the theory of III-Posed Problems*. Tulsa, Oklahoma, U.S.A: Society of Exploration Geophysicists.
- CEA Jalisco. (2011). *SIAEJ, Sistema de Información del Agua*. Recuperado el 5 de marzo de 2011, de <http://www.ceajalisco.gob.mx>
- CFE. (2010). *Estudios Geofísicos en la zona de boquilla, obra de toma, casa de máquinas y conducción de alta y baja presión, proyecto Arcediano, Jal.* CFE. Guadalajara, Jalisco: CFE.
- CONAGUA. (2011). *Contexto geográfico y socioeconómico*. Recuperado el 28 de mayo de 2011, de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Contexto1.pdf>
- CONAGUA. (2011). *Situación de los recursos hídricos*. Recuperado el 28 de mayo de 2011, de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/Situación2.pdf>
- Corbo, F. (2006). *Modelo Geofísico del acuífero Guaraní: zona comprendida entre Uruguay y Argentina*. Juriquilla, Querétaro: UNAM.
- COREMI. (1992). *Monografía geológico-minera del estado de Jalisco*. COREMI. Pachuca, Hidalgo: Secretaría de energía, minas e industria paraestatal, subsecretaría de minas e industria básica.
- Fernández, R., Martínez, M., & Romo, J. M. (1987). Teoría electromagnética en la exploración del subsuelo y un ejemplo de su aplicación en México. *Revista Mexicana de Física*, 33(3), 438-466.
- Geometrics. (2007). *Operation manual for Stratagem systems running imagem*. CA: Electromagnetic Instrumens, Inc.



- INEGI. (2011). *Aspectos geográficos de Jalisco*. Recuperado el 05 de marzo de 2011, de http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/español/estados/jal/ubic_geo.cfm
- INEGI. (2011). *México en cifras*. Recuperado el 29 de mayo de 2011, de <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/>
- Jones, A. G. (1988). Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment. *Geophysics*, 53(7), 967-978.
- Kaufman, A. A., & Keller, G. V. (1981). The magnetotelluric sounding method. *Methods in Geochemistry and Geophysics*, 15.
- Nabighian, M. N. (1991). Electromagnetic methods in applied geophysics. *Investigations in Geophysics*, 2(3).
- Rodi, W., & Mackie, R. (2001). Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, Vol 66, No. 1, 174-187.
- Simpson, F., & Bahr, K. (2005). *Practical Magnetotelluric*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sternberg, B. K., Washburne, J. C., & Pellerin, L. (1988). Correction for static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic sounding. *Geophysics*(53), 1459-1468.
- Vozzof, K. (1972). The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins. *Geophysics*, 98-141.
- Wannamaker, P. E., Hohmann, G. W., & Ward, S. H. (1984). *Magnetotelluric Responses of three-dimensional bodies in layered earths*. Geophysics.
- Ward, S., & Hohmann, G. (1988). Electromagnetic theory for geophysical applications. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*, 1.