



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA  
Facultad de Ingeniería

Colegio de Ingeniería Geofísica

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL  
GEOTÉRMICO EN SAN AGUSTÍN DEL  
MAÍZ Y SAN JUAN TARARAMEO,  
MICHOACÁN MEDIANTE EL USO DEL  
MÉTODO TRANSITORIO  
ELECTROMAGNÉTICO**

TESIS

Para obtener el título de:

**LICENCIADO EN INGENIERÍA GEOFÍSICA**

Presentada por:

**KEVIN ALEXIS ALMORA FONSECA**

*DIRECTOR INTERNO:*

*Mtro. Julio César González Hernández*

*COORDIRECTOR:*

*Mtro. José Luis González Guevara*

*ASESORES EXTERNOS:*

*Ing. Mario Benhumea León*

*Ing. Fidel Cedillo Rodríguez*

Noviembre, 2019

# ÍNDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	10
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	11
1.3 OBJETIVO GENERAL.....	12
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
1.5 HIPÓTESIS .....	12
1.6 ANTECEDENTES .....	12
<b>CAPÍTULO 2. MARCO GEOLÓGICO .....</b>	<b>14</b>
2.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	14
2.2 GEOLOGÍA .....	15
2.2.1 Cinturón Volcánico Transmexicano .....	15
2.2.2 Geología local: San Agustín del Maíz y San Juan Tarameo.....	17
2.3 GEOHIDROLOGÍA.....	19
2.3.1 Unidad geohidrológica andesítica .....	20
2.3.2 Unidad geohidrológica piroclástica .....	20
2.3.3 Unidad geohidrológica terrígena .....	21
2.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	22
2.4.1 Geología estructural de la Cuenca de Cuitzeo.....	22
2.4.2 Geología estructural local: San Agustín del Maíz y San Juan Tarameo .....	24
2.5 RECONOCIMIENTO DE CAMPO .....	25
<b>CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>28</b>
3.1 FUNDAMENTOS DE TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA.....	28
3.1.1 Ecuaciones de Maxwell .....	28
3.1.1.1 Ley de Gauss para campo eléctrico.....	29
3.1.1.2 Ley de Gauss para campo magnético .....	29
3.1.1.3 Ley de Faraday .....	30
3.1.1.4 Ley de Ampere.....	30
3.1.2 Relaciones constitutivas .....	30

3.1.4 Ecuación de onda .....	31
3.1.5 Solución de la ecuación de onda.....	35
3.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LAS ROCAS .....	37
3.3 MÉTODO TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO (TEM).....	42
3.3.1 Respuesta de una bobina horizontal .....	45
3.3.2 Etapas de la respuesta transitoria del voltaje.....	47
3.3.3 Teoría de Inversión para el procesado de datos .....	48
<b>CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA: ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....</b>	<b>49</b>
4.1 ADQUISICIÓN DE DATOS.....	49
4.2 PROCESAMIENTO DE DATOS.....	51
4.2.1 Pre-procesado de datos.....	51
4.2.2 Procesado de datos.....	53
4.3 Modelo Digital de Elevaciones .....	55
4.4 Distribución de los sondeos y perfiles trazados .....	57
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS .....</b>	<b>58</b>
5.1 PERFILES GEOELÉCTRICOS DE LOS SONDEOS TEM.....	58
5.1.1 Perfiles Geoeléctricos N-S. ....	58
5.1.2 Perfiles Geoeléctricos NE-SW .....	67
5.1.3 Perfiles Geoeléctricos NW-SE .....	72
5.1.4 Visualización 3D de las secciones de resistividad.....	77
5.2 CONFIGURACIONES EN PLANTA .....	80
5.2.1 Visualización 3D de secciones en planta.....	84
5.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	85
5.3.1 Interpretación de los perfiles geoeletricos.....	90
5.3.2 Fallas inferidas y zonas potenciales .....	113
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>114</b>
6.1 Conclusiones.....	114
6.2 Recomendaciones.....	116
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>118</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>123</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Recursos Geotérmicos de México.....	10
Figura 2.1. Localización de la zona de estudio en carta topográfica Cuitzeo E14A13. ...	14
Figura 2.2. CVTM mostrando las placas, sus límites y su movimiento absoluto.....	16
Figura 2.3. Principales sistemas de fallas Mioceno-Holoceno del CVTM y distribución volcanes poligenéticos.....	17
Figura 2.4: Geología local de San Agustín del Maíz y San Juan Tarameo según el Servicio Geológico Mexicano. ....	17
Figura 2.5: Geología local de San Agustín del Maíz y San Juan Tarameo según la Comisión Federal de Electricidad.....	18
Figura 2.6. Parteaguas de la Subcuenca de San Agustín del Maíz.. ....	19
Figura 2.7. Unidades Geohidrológicas de la región Quinceo-Falla la Paloma y la variación del nivel freático.....	21
Figura 2.8. Geología estructural de la Cuenca de Cuitzeo.. ....	22
Figura 2.9: Afloramiento de rocas volcánicas: Ignimbritas y riolitas. ....	25
Figura 2.10: Afloramiento de flujos piroclásticos. ....	26
Figura 2.11: Andesitas intemperizadas.....	26
Figura 2.12: Estratos de materiales terrígenos con basculamiento hacia el sur.....	27
Figura 2.13: Falla Chehuayo y una falla escalonada.....	27
Figura 3.1. Material al cual es aplicado una corriente eléctrica.. ....	38
Figura 3.2. Esquema del fenómeno de inducción por el método transitorio electromagnético.....	43
Figura 3.3: Respuestas de impulso en voltaje.....	44
Figura 3.4. Tipos de señales para Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo.....	45
Figura 3.5. Etapas de la respuesta transitoria del voltaje en un medio de dos capas... ..	47
Figura 4.1: Equipo SIROTEM modelo Mark III.. ....	49
Figura 4.2: Distribución de los sondeos TEM en el área de estudio.....	51
Figura 4.3. Selección y carga de los datos para cada uno de los sondeos.....	51

Figura 4.4 y 4.5. Curvas de decaimiento de voltaje para cada una de las corridas del sondeo TEM/Elección del tipo de arreglo utilizado para el sondeo TEM.....	52
Figura 4.6. Datos particulares para cada sondeo.....	52
Figura 4.7. Modelo de capas de acuerdo con la geología de la zona. ....	53
Figura 4.8. Curva de resistividad con ajustada de acuerdo con el modelo de capas. ...	53
Figura 4.9. TEMs realizados sobre el plano de la geología local de la zona de estudio.. .....	54
Figura 4.10. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 1. ....	55
Figura 4.11: Modelo Digital de Elevaciones del estado de Michoacán.....	56
Figura 4.12: Modelo Digital de Elevaciones de la zona de estudio. ....	56
Figura 4.13. Distribución de los sondeos TEMs y perfiles trazados en la zona de estudio sobre el DEM importado en WingLink (TM). ....	57
Figura 5.1: Perfil Geoeléctrico 1 .....	58
Figura 5.2: Perfil Geoeléctrico 2 .....	59
Figura 5.3: Perfil Geoeléctrico 3 .....	60
Figura 5.4: Perfil Geoeléctrico 4 .....	61
Figura 5.5: Perfil Geoeléctrico 5 .....	63
Figura 5.6: Perfil Geoeléctrico 6 .....	64
Figura 5.7: Perfil Geoeléctrico 7 .....	65
Figura 5.8: Perfil Geoeléctrico 8 .....	66
Figura 5.9: Perfil Geoeléctrico 9 .....	67
Figura 5.10: Perfil Geoeléctrico 10 .....	68
Figura 5.11: Perfil Geoeléctrico 11 .....	69
Figura 5.12: Perfil geoelectrico 12.....	70
Figura 5.13: Perfil geoelectrico 13.....	71
Figura 5.14: Perfil Geoeléctrico 14 .....	72
Figura 5.15: Perfil geoelectrico 15.....	73
Figura 5.16: Perfil geoelectrico 16.....	74

Figura 5.17: Perfil geoelectrico 17 .....	75
Figura 5.18: Perfil geoelectrico 18.....	76
Figura 5.19: Visualización 3D de las secciones de resistividad.....	77
Figura 5.20: Secciones de resistividad N-S vistos desde una dirección suroeste. ....	78
Figura 5.21: Secciones de resistividad NE-SW vistos desde una dirección sureste. ....	79
Figura 5.22: Secciones de resistividad NW-SE vistos desde una dirección Oeste.....	79
Figura 5.23: Sección de resistividad en planta a 100 m de profundidad .....	80
Figura 5.24: Sección de resistividad en planta a 200 m de profundidad .....	80
Figura 5.25: Sección de resistividad en planta a 300 m de profundidad .....	81
Figura 5.26: Sección de resistividad en planta a 400 m de profundidad .....	81
Figura 5.27: Sección de resistividad en planta a 500 m de profundidad .....	82
Figura 5.28: Sección de resistividad en planta a 600 m de profundidad .....	83
Figura 5.29: Sección de resistividad en planta a 700 m de profundidad .....	83
Figura 5.30: Visualización 3D de secciones en planta visto desde el sur. ....	84
Figura 5.31: Mapa de sondeos TEM con el paso de la Falla Chehuayo. ....	85
Figura 5.32: Distribución de los perfiles de elevación que cruzan la Falla Chehuayo. ..	86
Figura 5.33: Perfiles de elevación que muestran el sistema oculto de fallas escalonadas. .....	87
Figura 5.34: Modelo Geológico Conceptual del área de estudio. ....	89
Figura 5.35: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 1.....	90
Figura 5.36: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 2.....	91
Figura 5.37: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 3.....	93
Figura 5.38: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 4.....	95
Figura 5.39: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 5.....	96
Figura 5.40: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 6.....	97
Figura 5.41: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 7.....	98
Figura 5.42: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 8.....	99

Figura 5.43: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 9.....	100
Figura 5.44: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 10.....	102
Figura 5.45: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 11.....	103
Figura 5.46: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 12.....	104
Figura 5.47: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 13.....	106
Figura 5.48: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 14.....	107
Figura 5.50: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 16.....	110
Figura 5.51: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 17.....	111
Figura 5.52: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 18.....	112
Figura 5.53. Fallas geológicas del sistema oculto de fallas escalonado y zonas con potencial geotérmico. ....	113

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Coordenadas de la zona de estudio. ....	14
Tabla 3.1. Valores de parámetros a y m para la ecuación de Archie según las propiedades de las rocas. ....	42
Tabla 4.1 Relación de ganancias y apilamientos ocupadas en las mediciones. ....	50
Tabla 5.1: Unidades geoelectricas asociadas con la geología de la zona. ....	88

## RESUMEN

La Geotermia en México tiene un menor desarrollo en comparación con otros tipos de energía, actualmente existen 5 campos geotérmicos en nuestro territorio. En los últimos años se han llevado a cabo proyectos de exploración para la determinación de nuevas zonas geotérmicas. Uno de los prospectos es la zona ubicada en las localidades de San Agustín del Maíz y San Juan Tarameo, pertenecientes a los municipios de Copándaro y Cuitzeo, Michoacán, respectivamente. La presente tesis tiene como objetivo determinar el potencial geotérmico en San Agustín del Maíz y San Juan Tarameo mediante la aplicación del método Transitorio Electromagnético (TEM), con el fin de obtener la secuencia electro-estratigráfica que caracterice a la zona de estudio y así proponer las zonas con las características idóneas para la construcción de pozos exploratorios. Los datos de campo que sustentan esta tesis se obtuvieron en el año 2017 por medio de una empresa privada. Se describen las bases físicas y matemáticas del método TEM, las propiedades eléctricas de las rocas, además de las características geológicas, estructurales e hidrogeológicas de la zona de estudio. Se muestra el procesado de los datos de campo mediante el uso de los softwares especializados, para obtener las secciones de resistividad que se interpretaron a partir de un modelo geológico conceptual realizado de acuerdo a la información recabada y el reconocimiento geológico llevado a cabo, y así obtener un modelo geotérmico de la zona de estudio. Los perfiles resultantes mostraron paquetes de resistividad que se asociaron a 5 unidades distintas del modelo geológico conceptual propuesto. Además, se infirió un sistema oculto de fallas escalonadas, el cual sería de suma importancia, ya que actuaría como sistema de recarga y descarga para el reservorio geotérmico. Las unidades más importantes desde el punto de vista geotérmico, son la U2, asociada a materiales alterados hidrotermalmente, dichos materiales actuarían como capa sello (también conocida como “*Claycap*”), manteniendo confinado al reservorio geotérmico, y la U5, posiblemente asociada a andesitas fracturadas, esta unidad contendría los fluidos hidrotermales que le confieren el potencial geotérmico a la zona de estudio en sus porciones sur, suroeste, noreste y este, en dónde sería recomendable realizar estudios de exploración complementarias para determinar con mayor precisión las zonas favorables para la explotación del recurso geotérmico mediante la perforación de pozos.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La energía geotérmica está basada en las anomalías del gradiente geotérmico, es decir, “la diferencia de temperatura entre la masa rocosa y agua del subsuelo y la masa de agua o aire existente en la superficie de la tierra” (Torres et al., 1993, p.6). De acuerdo con Edgar Santoyo y Rosa Barragán “este calor interno proviene básicamente del colapso gravitatorio que formó a la Tierra y de la desintegración radioactiva de elementos radioactivos como los isótopos de uranio, torio y potasio en la corteza terrestre” (Santoyo y Barragán, 2010, p.42). La diferencia de temperaturas antes mencionada es la que permite la producción de energía geotérmica, la cual puede ser usada directa o indirectamente (Torres et al., 1993, p.6).

El uso más conocido de la energía geotérmica es la generación de energía eléctrica mediante la utilización del vapor de agua y una turbina-generator (Torres et al., 1993, p.8). Actualmente esta energía está cobrando más importancia alrededor del mundo, y la situación a punta a que “a mediano plazo, la generación geotermoeléctrica se convertirá en una pieza clave dentro del abanico energético mundial” (Santoyo y Barragán, 2010, p.40).

En diversos países, además de la producción de energía eléctrica a través de la explotación de yacimientos geotérmicos de alta entalpía, los yacimientos de baja y mediana entalpía se han aprovechado con diversos fines, como calefacción, calentamiento de invernaderos y procesos industriales, mientras que en México “sus usos directo se ha limitado a balneología y tratamientos terapéuticos” (Santoyo y Barragán, 2010, p.48). Aunque actualmente se está ampliando su uso, por ejemplo, en el secado de madera, visión de que debería continuar y ampliarse, ya que los usos directos logran ahorros de 30 hasta 60% de energía con respecto a sistemas convencionales.

Actualmente México cuenta con una capacidad geotermoeléctrica instalada de 965 megawatts, los cuales provienen de 5 campos geotérmicos: Cerro Prieto, Baja California; Los Azufres, Michoacán; Los Humeros, Puebla; y Las Tres Vírgenes, Baja California Sur y Domo San Pedro, Nayarit (Figura 1.1). Esto coloca a nuestro país en el 4º lugar en producción de este tipo de energía (Santoyo y Barragán, 2010, p.47). Adicional a esto, en México están registradas más de 1300 anomalías geotérmicas (Torres et al., 1993,

p.110) distribuidas en todo el territorio, las cuales podrían ser estudiadas con más detalle para evaluar su potencial, ya sea de alta, media o baja entalpía; su viabilidad de explotación y así aumentar el uso de esta energía, ya sea directa o indirectamente, con la finalidad de beneficiar a la sociedad y el medio ambiente.



Figura 1.1. Recursos Geotérmicos de México. Fuente: Santoyo y Barragán (2010), p.48.

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años han surgido proyectos de investigación y exploración por empresas privadas y públicas como CFE (2011), para determinar zonas con potencial geotérmico que sea aprovechable para la población. Una de ellas es la porción sur de la cuenca del Lago de Cuitzeo, específicamente en las localidades de San Agustín del Maíz y San Juan Tarameo, los cuales presentan manifestaciones hidrotermales que podrían ser explotadas de distintas formas, siendo prioritario su aprovechamiento para la generación

de energía eléctrica, pero sin perder de vista que el recurso podría ser empleado para otros fines. Sin embargo, no existe la certeza sobre la capacidad del potencial geotérmico existente en las localidades antes mencionadas.

## 1.2 JUSTIFICACIÓN

Cuando se trata de exploración del subsuelo, los métodos de prospección geofísica son herramientas indispensables para la búsqueda de recursos naturales. Según sea el objetivo de estudio, se elige el método más adecuado. En el caso de la búsqueda de zonas con potencial geotérmico, los métodos electromagnéticos son los más indicados para realizar los estudios pertinentes, debido a que la propiedad que evalúan -la resistividad- nos indica las zonas en donde sería posible encontrar el acuífero confinado con altas temperaturas, la *claycap*, así como el sistema de fallas y/o fracturas que pueden servir como sistema de recarga y descarga del mismo. Así mismo, estos métodos son eficaces por la profundidad que llegan a alcanzar, y su relativa facilidad de operación en campo. Por esta razón se consideraron los estudios realizados en la zona de interés mediante el método Transitorio Electromagnético (TEM) para la presente tesis; así como su procesamiento, análisis e interpretación, correlación con estudios realizados, información geológica, estructural e hidrogeológica, con lo que se pretende proponer las zonas con las características idóneas para la construcción de pozos exploratorios.

El método Transitorio Electromagnético (TEM), suele tener una profundidad de penetración que depende del tamaño del loop realizado en campo, así como de las condiciones geológicas del área de estudio; por otro lado, se sabe que los yacimientos geotérmicos pueden llegar a encontrarse más allá de esas profundidades, lo cual podría ser una limitación. En el presente caso se espera que el recurso geotérmico, o algún indicio de él, llegue a ser detectado dentro de los primeros 1000 m de profundidad. Por otro lado, no existen pozos exploratorios en la zona de estudio que ayuden a calibrar las secciones de resistividad obtenidas por los TEMs, los datos se procesarán de acuerdo a la geología consultada a través de las diversas fuentes bibliográficas y lo observado en el recorrido de campo.

### 1.3 OBJETIVO GENERAL

Determinar el potencial geotérmico en San Agustín del Maíz y San Juan Tarameo mediante la aplicación del método Transitorio Electromagnético (TEM), con el fin de obtener la secuencia electro-estratigráfica que caracterice a la zona de estudio y así proponer las zonas con las características idóneas para la construcción de pozos exploratorios.

### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Procesar datos de campo de Transitorio Electromagnético mediante el uso de software especializado (Temixs ®, WingLink (TM)), para obtener modelos de capas asociados a la estratigrafía del subsuelo.
- Obtener secciones de resistividad y así determinar las diferentes zonas geoelectricas en el subsuelo, así como las zonas de fallamiento, que pudieran ser indicativas de actividad geotérmica, a través de la observación de las variaciones de la resistividad tanto vertical como horizontalmente.
- Interpretar las secciones de resistividad asociándolas a la geología de la zona de estudio con la finalidad de proponer las zonas con mayor potencial geotérmico del área ubicada entre los municipios de San Agustín del Maíz y San Juan Tarameo.

### 1.5 HIPÓTESIS

La zona localizada entre las localidades de San Agustín del Maíz y San Juan Tarameo cuenta con el potencial geotérmico para ser explotado debido a que presenta características geofísicas, geológicas, hidrogeológicas y estructurales favorables para el emplazamiento de un yacimiento hidrotermal.

### 1.6 ANTECEDENTES

Las zonas termales ubicadas al sur del lago de Cuitzeo, son sitios de particular interés para la comunidad científica, así como para la industria, debido a que cuentan con

características geotérmicas. En dichas zonas se han presentado manifestaciones hidrotermales, como en el caso de San Agustín del Maíz, en dónde de acuerdo con una entrevista realizada al Ing. Mario Benhumea, menciona que, en 2017 una perforación de un pozo para extracción de agua generó la expulsión de vapores a muy altas temperaturas, descontrolándose hasta el punto de formar un socavón (Benhumea, comunicación personal, 2019). No obstante, desde años anteriores en zonas aledañas se han realizado estudios y perforaciones exploratorias, entre ellos se encuentran los que se enuncian en los siguientes párrafos y que sirvieron como antecedentes para la presente tesis.

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) en el año 2011 realizó un informe preventivo, el cual tuvo como objetivo la planeación de un proyecto de perforación exploratoria en la zona centro-sur del lago de Cuitzeo, específicamente en las localidades de San Agustín del Maíz (SAM) y San Juan Tarameo (SJT). En el informe, se pueden encontrar las características de la zona de estudio tales como: ubicación, clima, tipo de suelo, aspectos demográficos, además de las etapas técnicas de perforación de pozos y evaluación de los mismos. El informe, caracteriza al sitio considerando la geología en donde predominan las rocas volcánicas (andesitas, ignimbritas y basaltos), además de depósitos lacustres, en adición a esto se ubica al sitio de perforación dentro del sistema de fallas Morelia-Acambay. Estos rasgos les infieren a las zonas de SAM y SJT un potencial geotérmico explotable.

El sector académico, ha realizado diversos estudios, siendo uno de los más destacados la tesis titulada *“Estudios geofísicos y geológicos para la elaboración del modelo conceptual del yacimiento geotérmico de San Agustín del Maíz, Michoacán, México”* elaborada por Guevara Alday (2016). El objetivo de dicho trabajo fue elaborar un modelo conceptual del sistema geotérmico ubicado en San Agustín del Maíz, para lo que se realizaron estudios: magnéticos, gravimétricos y eléctricos, además de cartografía geológica. Los resultados de la prospección magnética identificaron una anomalía positiva que se asoció a un cuerpo plutónico de composición intermedia, que intrusionó a las andesitas que conforman el basamento de la zona. Las anomalías gravimétricas mostraron un cuerpo de baja densidad con dirección N-S. Se clasificó al sistema geotérmico como tipo mixto-convectivo, siendo un yacimiento en un dominio extensional (hospedado en un semigraben) con la intrusión de cuerpos plutónicos.

## CAPÍTULO 2. MARCO GEOLÓGICO

### 2.1 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se localiza en la parte centro-sur del lago de Cuitzeo entre las localidades colindantes de San Agustín del Maíz y San Juan Tarameo (San Juan Benito Juárez), perteneciente a Copándaro y Cuitzeo en el estado de Michoacán (Figura 2.1) y tiene un área de aproximadamente 45 km<sup>2</sup>.

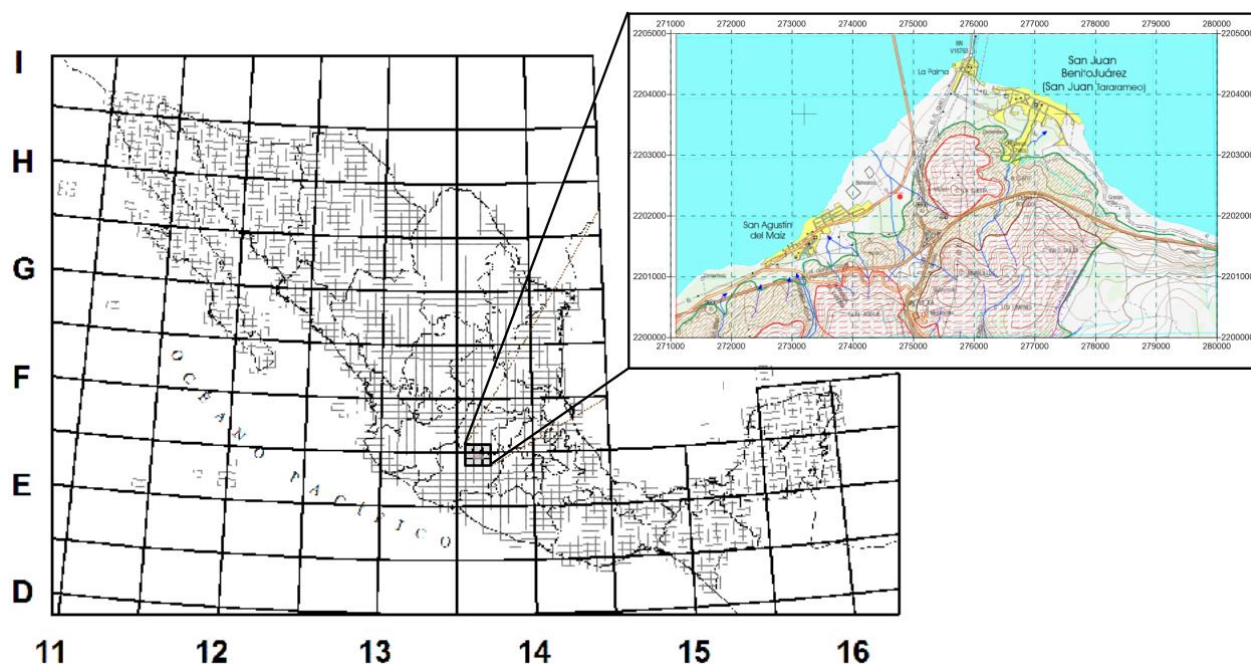


Figura 2.1. Localización de la zona de estudio en carta topográfica Cuitzeo E14A13.  
Fuente: INEGI (2014), recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/>.

Las coordenadas en donde se localizan dichas poblaciones son las siguientes:

Tabla 2.1 Coordenadas de la zona de estudio.

San Agustín del Maíz	San Juan Tarameo
273166 mE	277208.7 mE
2201506.6 mN	2203669.7 mN
1840 msnm	1840 msnm

El área mencionada se encuentra al sur del lago de Cuitzeo, dentro de una subcuenca que lleva el mismo nombre, y a su vez, dentro de la provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM).

## 2.2 GEOLOGÍA

### 2.2.1 Cinturón Volcánico Transmexicano

El Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) es el arco volcánico que atraviesa la parte central de México (Figura 2.2), en él se localizan aproximadamente el 79% de las anomalías termales de todo el país (Torres et al., 1993, p.106), porcentaje que ha variado a lo largo de los años con el descubrimiento de más anomalías en el territorio mexicano.

De acuerdo con Luca Ferrari:

El CVTM tiene aproximadamente 1,000 km de longitud y un ancho variable entre 80 y 230 km, y se distribuye con una dirección preferencial E-O (...) Se encuentra construido sobre la parte sur de la placa de Norteamérica, la cual es subducida por la parte occidental de la placa de Cocos y la microplaca de Rivera (2014, p.2).

Esta es una de las características que le infieren un potencial geotérmico mayor sobre las demás provincias geológicas del país.

El CVTM “es uno de los arcos volcánicos de margen continental más complejos y variados del mundo” (Aguirre et al., 1998, p.1); Ferrari (2000, p.85) menciona que una de las características del CVTM es “la gran variabilidad del estilo volcánico y composición química a lo largo del arco”, además de otras peculiaridades como la oblicuidad de su parte central y oriental con la trinchera, así como la notable variación en su ancho a lo largo de su extensión (Ferrari, 2000, p.86).

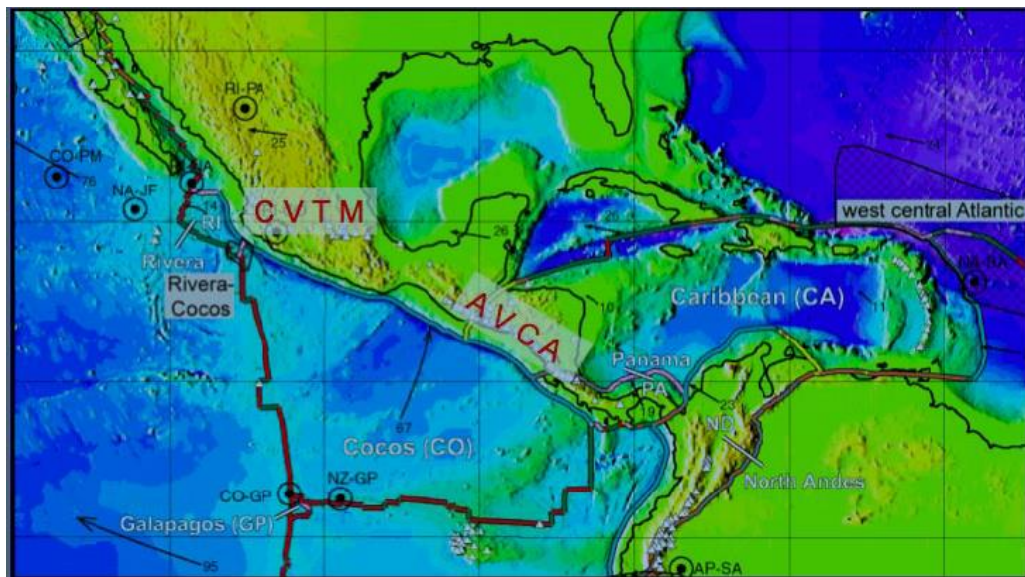


Figura 2.2. CVTM mostrando las placas, sus límites y su movimiento absoluto (flechas negras).  
Fuente: Ferrari (2014), p.1

La zona de estudio de esta tesis, se localiza en la parte central del CVTM, en donde se ubica el campo volcánico Michoacán-Guanajuato, que “incluye más de 1,000 conos monogenéticos y más de 400 centros poligenéticos (...) y que continúa activo hasta la actualidad como lo atestiguan las erupciones históricas de los volcanes Jorullo y Parícutin” (Ferrari, 2014, p.10).

Al paso de los años algunos autores han considerado que el CVTM representa un rift continental activo, debido a que las lavas presentes en él se asemejan a las emplazadas en las zonas de rift continental, sin embargo, su tasa de extensión es mucho menor a la que se presenta en un rift continental (Ferrari, 2014, p.10).

El CVTM consta de un sistema de fallas extensionales (Figura 2.3) que “provocan fosas tectónicas rellenas por productos volcánicos” (Ferrari, 2014, p.10), dichas fallas se presentan en la parte centro y occidente del mismo. En la figura 2.3 se puede apreciar de manera general el sistema de fallas Morelia-Acambay, el cual es de suma importancia para la zona de estudio.

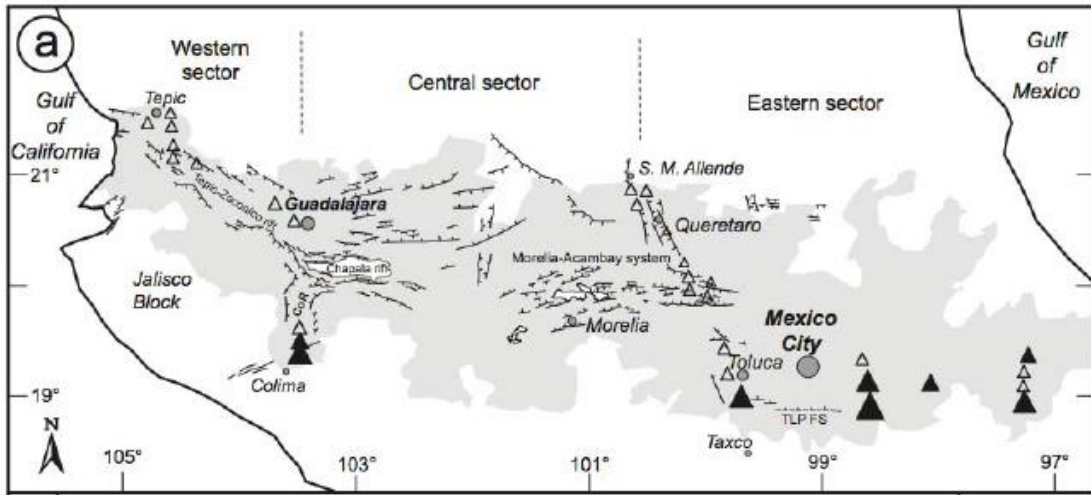


Figura 2.3. Principales sistemas de fallas Mioceno-Holoceno del CVTM y distribución volcanes poligenéticos.  
 Fuente: Ferrari (2014) p.11.

### 2.2.2 Geología local: San Agustín del Maíz y San Juan Tarameo.

De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (SGM) en la carta Geológica *Morelia E14-1* la geología local que está presente en la zona de estudio está compuesta de manera general por Andesitas, Ignimbritas y Riolitas pertenecientes al Terciario, además de Basaltos del Cuaternario, como se observa en la siguiente figura:

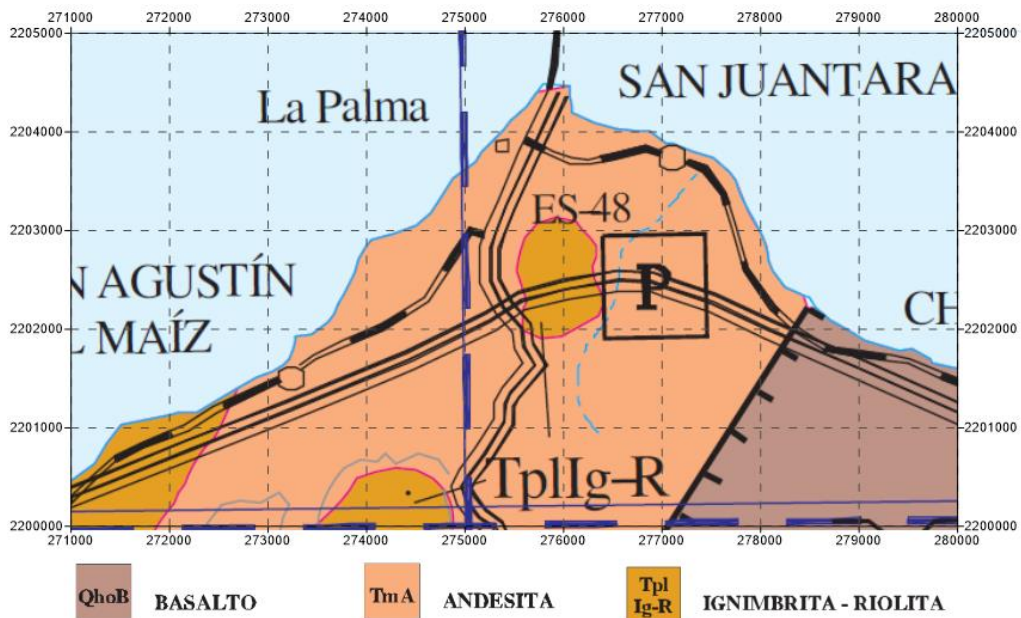


Figura 2.4: Geología local de San Agustín del Maíz y San Juan Tarameo según el Servicio Geológico Mexicano. Fuente: SGM (1998), recuperado de [http://www.sgm.gob.mx/cartas/Cartas\\_Ed.jsp](http://www.sgm.gob.mx/cartas/Cartas_Ed.jsp)

En el año 2011, la CFE presentó un mapa de geología regional de la zona de estudio en su informe preventivo. Este se encuentra conformada por 6 unidades geológicas que se muestran en la figura 2.5 y se enuncian a continuación:

- Andesitas y Basaltos de Tarímbaro, fechadas en el Mioceno tardío (7.8 m.a.), ubicados en la parte sur y suroeste de la zona. (Ta-b)
- Ignimbritas del Lago de Cuitzeo, del Pleistoceno tardío (2.8 m.a.), ubicadas en la parte centro y sur. (Tig)
- Basaltos del Lago de Cuitzeo, del Pleistoceno medio (0.87-0.75 m.a.), que se encuentran en la parte occidental. (Qba)
- Depósitos superficiales al noroeste. (Qds)
- Depósitos lacustres al noreste. (Qdl)
- Depósitos piroclásticos al centro y suroeste. (Qdp)

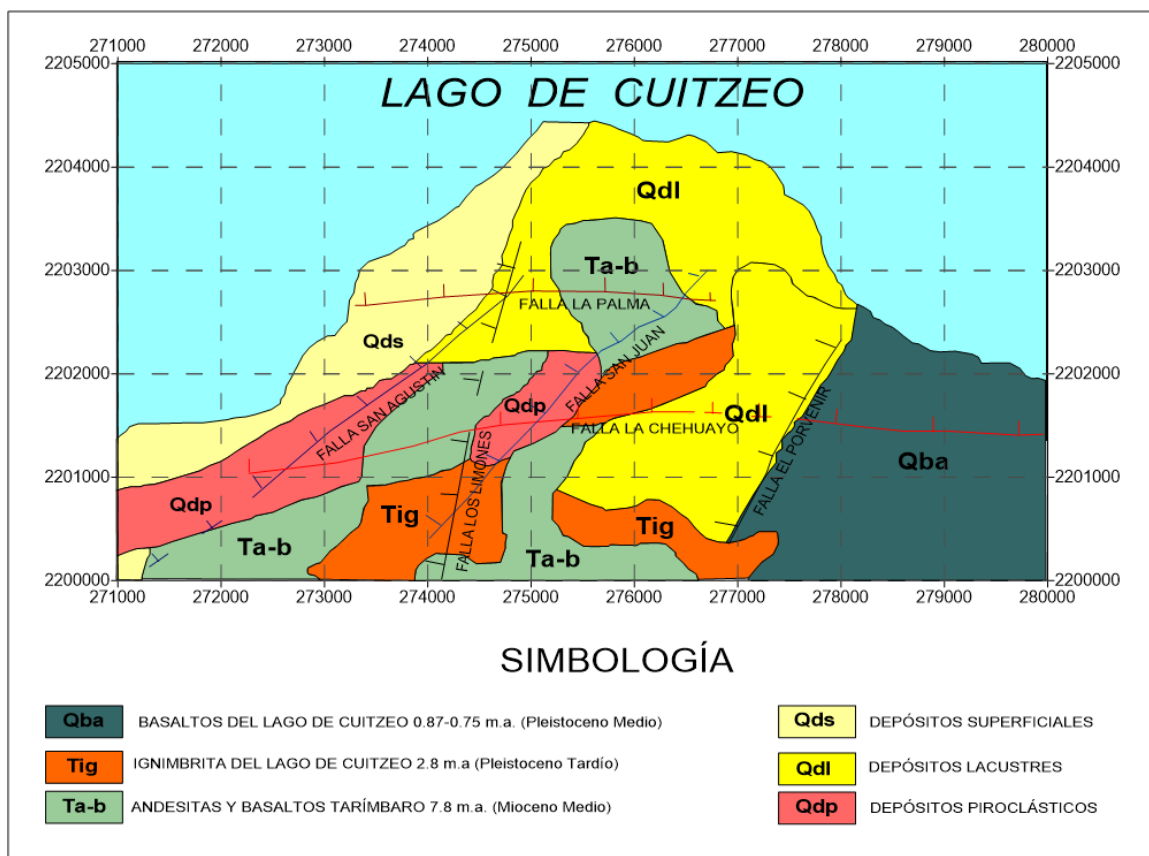


Figura 2.5: Geología local de San Agustín del Maíz y San Juan Tarameo según la Comisión Federal de Electricidad.

Fuente: CFE (2011), recuperado de <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/mich/estudios/2011/16MI2011E0013.pdf>

## 2.3 GEOHIDROLOGÍA

Moncayo et al. señalan que la región Morelia-Cuitzeo “forma parte de una de las subcuencas del Lerma y fisiográficamente se integra en el medio Lerma (Citado en Hernández y Ávila, 2010, p.64). A su vez la conocida como cuenca de Cuitzeo puede dividirse en 3 subcuencas: subcuenca del Valle de Morelia-Charo, subcuenca de Tarímbaro y la subcuenca de San Agustín del Maíz (Cedillo, 2019). La zona de estudio pertenece a la subcuenca de San Agustín del Maíz, cuyo parteaguas (Figura 2.5) se encuentra ubicado al sur del municipio del mismo nombre.

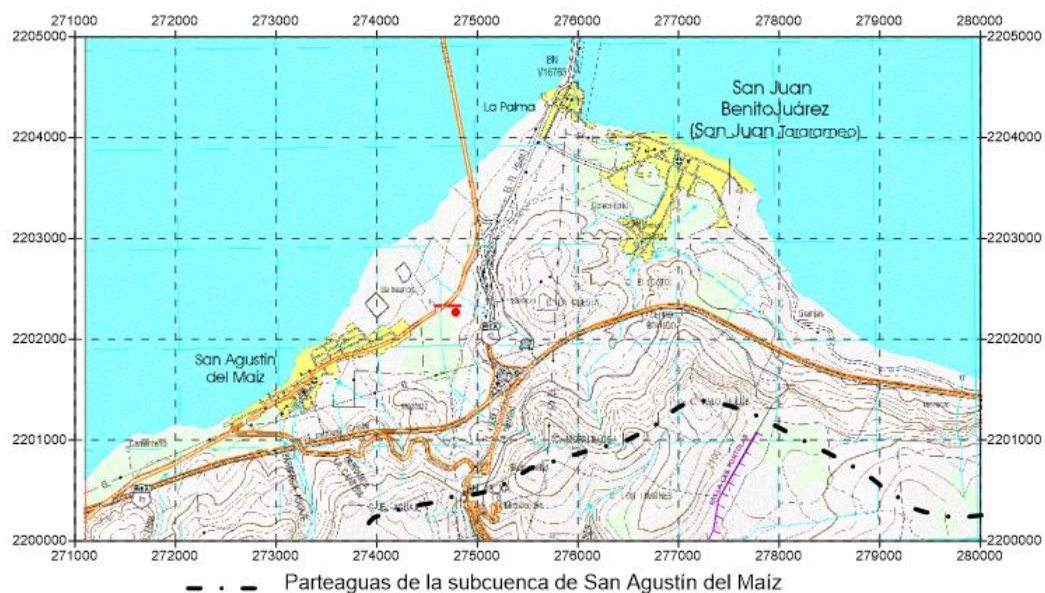


Figura 2.6. Parteaguas de la Subcuenca de San Agustín del Maíz. Modificado de: Carta topográfica Cuitzeo E14A13. Fuente: INEGI (2014) recuperado de <https://www.inegi.org.mx/temas/topografia/>.

Con base en un estudio geohidrológico realizado por la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) que se muestra en el informe preventivo publicado en 2011, e información adicional, se reconocen en esta región 3 unidades geohidrológicas en la zona, las cuales han sido clasificadas de acuerdo a sus características litológicas como lo son porosidad, permeabilidad y transmisibilidad (Hernández y Ávila, 2010, p.64). La presencia de estas 3 unidades es un factor importante desde el punto de vista geotérmico, debido a que para un potencial geotérmico rentable se necesitan mantos acuíferos que alimenten al sistema hidrotermal, fundamentalmente.

### 2.3.1 Unidad geohidrológica andesítica

Pasquarè *et al.*, (1991) indica que esta unidad “se trata de una secuencia volcánica de carácter andesítico, que está compuesta por derrames de lava muy fracturados” (Citados en Hernández y Ávila, 2010, p.65). Las andesitas se encuentran intercaladas con brechas, flujos piroclásticos, escorias y depósitos de caída, lo que le aporta una excelente permeabilidad secundaria. Esta unidad está mejor representada en la Sierra de Mil Cumbres, en el campo Geotérmico de los Azufres, así como en la región de Cuitzeo-Morelia, las cuales conforman el acuífero más importante de la zona (Hernández y Ávila, 2010, p.65). Las rocas volcánicas “son excelentes zonas de recarga para el acuífero de la región debido a su morfología, su grado de fracturamiento y a la configuración de la red hidrográfica (...) En el subsuelo de la región Morelia-Cuitzeo, este acuífero ha permitido el desarrollo de muchas obras de extracción” (Hernández y Ávila, 2010, p.65). Posiblemente en esta unidad andesítica pueda localizarse el yacimiento geotérmico de San Agustín del Maíz.

### 2.3.2 Unidad geohidrológica piroclástica

Esta unidad consta de una baja permeabilidad debido a la alteración hidrotermal de sus componentes. Citando a Víctor Hernández y Jorge Ávila:

Conforma una secuencia de flujos piroclásticos provenientes de las calderas localizadas en la sierra de Mil Cumbres (...) además de otras fuentes aún no reconocidas en el sector de Cuitzeo (...) Está compuesta de flujos de pómez y ceniza, ceniza y líticos. Toda la unidad es de composición riolítica, contando con una baja permeabilidad. El fracturamiento es menor que la unidad anterior (2010, p.65).

Su permeabilidad se ve afectada también porque en los flujos piroclásticos no soldados y de pómez, la alteración de las plagioclasas, genera la formación de arcillas que impiden la circulación libre de fluidos. Estas rocas constituyen un acuífero de tránsito, que no es considerado con las características idóneas para alimentar un sistema hidrotermal (Hernández y Ávila, 2010, p.65). Esta unidad podría actuar como capa confinante (Claycap) del acuífero andesítico.

### 2.3.3 Unidad geohidrológica terrígena

En la zona de valles la unidad terrígena está compuesta por 60 m de alternancia de conglomerados, limos, arcillas y arenas. Estos materiales tienen eventuales intercalaciones de lavas y productos volcánicos explosivos, es por esta razón, que aquí se localizan los acuitardos, observándose dentro de ella fallas con orientación NW-SE, E-W y NE-SW. La permeabilidad de esta unidad depende la litología, siendo los niveles más granulares los más idóneos para la explotación del acuífero superficial. (Hernández y Ávila, 2010, p. 66)

En la figura 2.8 se pueden observar las distintas unidades geohidrológicas del valle de Morelia, su distribución en el subsuelo, así como las variaciones que ha sufrido el nivel freático a través de los años, ilustrándose 1990, 2000 y 2007.

Refiriéndose a los niveles de agua freática Isabel Israde et al. señalan que:

En cotas menores a 1,830 m, los niveles estáticos de los acuíferos se encuentran a ~15 m de profundidad, principalmente al sur del lago de Cuitzeo. En éste, el acuífero más somero se encuentra albergado por materiales granulares (fluviolacustres), y presenta espesores promedio de 35 m. (2009, p.205)

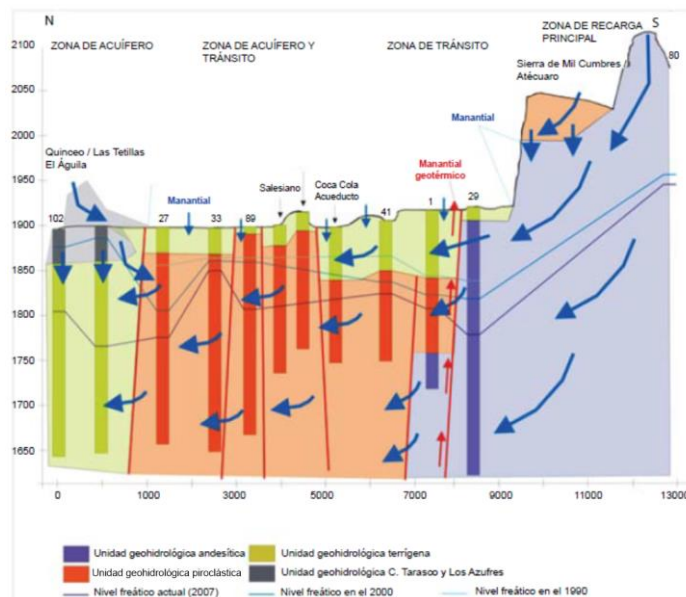


Figura 2.7. Unidades Geohidrológicas de la región Quinceo-Falla la Paloma y la variación del nivel freático. Fuente: Atlas del Lago de Cuitzeo. Fuente: Hernández y Ávila (2010), p.67.

## 2.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

### 2.4.1 Geología estructural de la Cuenca de Cuitzeo

De acuerdo con Isabel Israde y Víctor Garduño en la cuenca de Cuitzeo se pueden distinguir 4 estilos definidos (Figura 2.9) desde el punto de vista estructural:

1. En la parte oriente se define un graben casi simétrico en la zona de Zinapécuaro.
2. Al poniente un semigraben con bloques basculados hacia el sur en la zona de Morelia Cuitzeo.
3. La falla Tzitzio-Valle Santiago, que separa las dos estructuras anteriores.
4. Y, por último, las estructuras más evidentes, son las fallas que forman parte del sistema Morelia-Acambay (2010, p.31).

Estructuralmente, la Falla de Tzitzio – Valle de Santiago tiene suma importancia, debido a que en ella se observa un desplazamiento lateral derecho en los sectores oriente y poniente del Lago de Cuitzeo. Al oriente, se conforma por el graben simétrico, mientras que al oeste conforma un semigraben con bloques basculados hacia el sur (Istrade, et al., 2009, p.205). Dicha falla “produce dentro de la cuenca el alargamiento del Lago de Cuitzeo” (Istrade y Garduño, 2010, p.31).

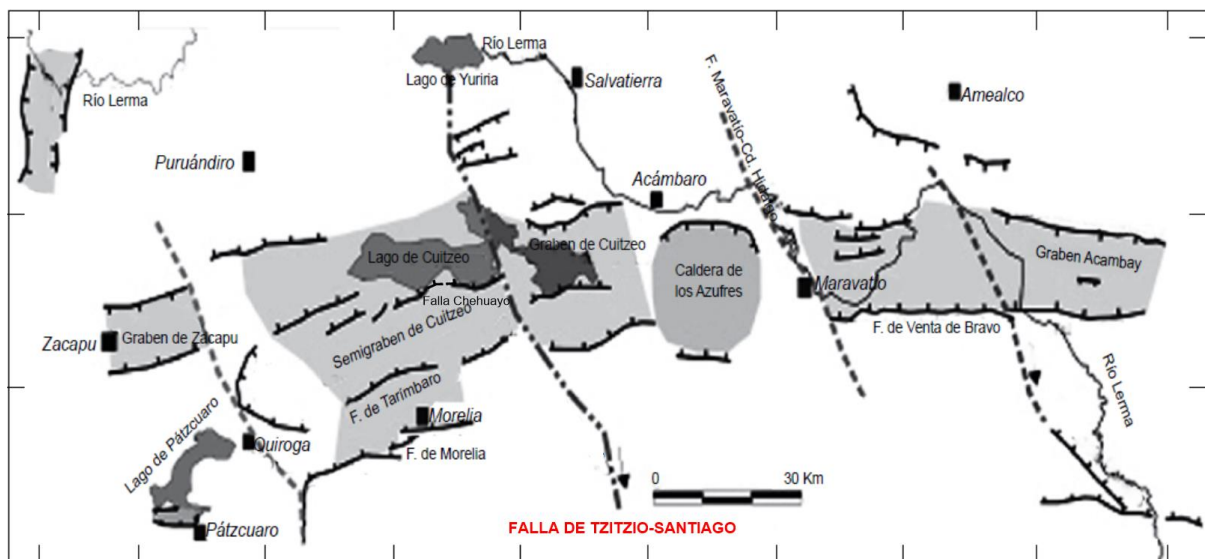


Figura 2.8. Geología estructural de la Cuenca de Cuitzeo, en ella se distinguen los 4 rasgos más importantes de la zona.

Fuente: Israde y Garduño (2010), p. 26.

## La Cuenca del Lago de Cuitzeo:

Forma parte de un conjunto de depresiones lacustres que se encuentran a lo largo de una franja E-W del centro de México y que están infrayacidas por la sucesión oligo-miocénica de la Sierra Mil Cumbres, y cubiertas por el vulcanismo del Cinturón Volcánico Transmexicano (Israde, et al., 2009, p.204).

Dentro de la cuenca y en la zona de estudio se observa una serie de lomas alargadas que pertenecen al sistema de fallas Morelia-Acambay con orientación E-W. Estas lomas “presentan un hundimiento hacia el norte y un basculamiento de 5° a 30° hacia el sur (...)” (Israde, et al., 2009, p.205), esto a su vez “produce desniveles en rocas tanto del Mio-Pliocuaternario como del Holoceno; estos desplazamientos van desde unos centímetros hasta 200 m de desnivel; el más evidente es el de la falla La Paloma en la ciudad de Morelia” (Israde y Garduño, 2010, p.31), y la falla Chehuayo en la zona de estudio.

De acuerdo con Hernández y Ávila, el sistema de fallas y/o las fracturas:

Puede llegar a tener un papel de planos permeables o planos impermeables; es decir, si desarrollan espesores importantes de milonitas con minerales arcillosos serán fronteras impermeables, pero si en el movimiento de bloque se generan brechas con matriz granular, entonces serán fronteras permeables (...) Asimismo el movimiento de bloques podría ocasionar que las estructuras cambien el tránsito de los fluidos; por ejemplo, poniendo en contacto dos unidades permeables (...) o bien, jugar el papel de límite sello (2010, p.67).

Las fallas y fracturas “también juegan el papel de conductos de aguas termales, que probablemente conectan yacimientos geotérmicos con la superficie, produciendo las familias químicas observadas en los distintos manantiales (...) y en el entorno del lago Cuitzeo (Hernández y Ávila, 2010, p.67)

## 2.4.2 Geología estructural local: San Agustín del Maíz y San Juan Tarameo

En la zona de San Agustín del Maíz (SAM) existe un sistema de fallas NE-SW, el cual es conductor de temperatura y fluidos hidrotermales. De acuerdo con la CFE, el área de estudio cuenta con cuatro sistemas estructurales (Figura 2.9) de interés desde el punto de vista geotérmico:

- 1) El primero de ellos es el conformado por la Falla la Palma y la Falla Chehuayo, que presentan una orientación E-W, este sistema es el más importante puesto que presenta alteraciones hidrotermales además de precipitación de calcita, sílice y epidota, es conductor de fluidos hidrotermales y se encuentra tectónicamente activo. La primera falla mencionada no se observa de manera superficial, mientras que la segunda presenta una escarpa sinuosa.
- 2) El segundo sistema estructural de importancia es el conformado por la Falla San Juan y la Falla San Agustín. Dicho sistema tiene una orientación NE-SW, presenta paleotermalismo, precipitación de óxidos, sílice, calcita y arcillas, lo cual es un indicativo de que a través del sistema hubo ascenso de fluidos y que actualmente está sellado en superficie por dichos minerales. En San Agustín del Maíz, el fracturamiento de este sistema es conductor de fluidos hidrotermales con temperaturas similares al primero.
- 3) El tercer sistema se localiza en la zona termal de San Juan Tarameo. Presenta una orientación NE-SW, presenta paleotermalismo y se encuentra parcialmente sellado por la precipitación de sílice, calcita y epidota.
- 4) El último sistema estructural de importancia es el relacionado con la Falla Los Limones, el cual presenta una orientación N-S.
- 5) La falla El Porvenir cartografiada por SGM y CFE, muestra diferente buzamiento, y después de un análisis de la geología local se podría considerar que no se trata de una falla si no de un contacto geológico (2011, p.41).

El primer sistema estructural representa una parte muy importante del sistema geotérmico propuesto en la presente tesis, en particular la falla Chehuayo, ya que actuaría como sistema de recarga y descarga de dicho sistema. Se le puede observar con mayor detalle en el anaglifo incluido en el Anexo D.

## 2.5 RECONOCIMIENTO DE CAMPO

Durante los días 5, 6 y 7 de noviembre del año 2019 se realizó una visita a la zona de estudio y sus alrededores, visitando las localidades de San Agustín del Maíz, San Juan Tarameo, bordeando la parte sur del lago de Cuitzeo hasta la ciudad de Morelia, Michoacán. Este recorrido sirvió para realizar una verificación de la geología, observando sus principales afloramientos se pudo reafirmar la litología superficial que cubre la zona además de alguna de las fallas que existen en esa área. También se pudieron reconocer las zonas en dónde se realizó la adquisición de datos de los TEMs en el año 2017.

Respecto a la geología superficial, se observaron afloramientos que indican que la mayor parte de está compuesta por rocas volcánicas; por ejemplo, en la figura 2.11 se observa un afloramiento que está localizado unos metros arriba de la carretera que está compuesto por ignimbritas y riolitas, se aprecia que estas rocas se encuentran en un complejo que muestra una distribución caótica que existe en esta zona. Este afloramiento se encuentra localizado en las coordenadas 275380 mE, 2202572 mN a una altura de 1928 m.



Figura 2.9: Afloramiento de rocas volcánicas: Ignimbritas y riolitas.

También se pueden observar pequeños afloramiento de alternancias de lavas y piroclastos (Figura 2.12). Dichas rocas son evidencia de actividad volcánica cercana a la zona. El afloramiento mostrado en la fotografía se encuentra ubicado en las coordenadas 275906 mE y 2203468 mN a una altura de 1893 m.



Figura 2.10: Afloramiento de flujos piroclásticos.

Al pie de la carretera se pueden observar afloramientos de rocas volcánicas que muestran rasgos de intemperismo, como el que se muestra en la figura 2.13, ubicado en las coordenadas 275070 mE y 2200723 mN a 1973 m de altura, y corresponde a andesitas intemperizadas.



Figura 2.11: Andesitas intemperizadas.

En otras zonas se logran observar afloramientos de terrígenos que presentan un basculamiento en sus estratos con dirección al sur, dicho basculamiento también afectaría a las rocas volcánicas presentes en la zona de estudio.



Figura 2.12: Estratos de materiales terrígenos con basculamiento hacia el sur.

Durante el reconocimiento geológico también se identificaron rasgos estructurales, entre los que destaca el escarpe de la falla Chehuayo, al sur de la zona de estudio; además de esto se observó la presencia de un sistema de fallas escalonadas, siendo la falla Chehuayo considerada como la falla maestra, y las subsiguientes pudiendo ser un sistema de fallas ocultas.



Figura 2.13: Falla Chehuayo y una falla escalonada.

## CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

### 3.1 FUNDAMENTOS DE TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA

La Teoría Electromagnética es la base que rige los métodos electromagnéticos de prospección geofísica, es por eso que para entender el funcionamiento del Transitorio Electromagnético (TEM) es necesario comprender los fundamentos teóricos que lo soportan.

#### 3.1.1 Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell son fundamentales para el entendimiento de la teoría electromagnética, ya que expresan de manera matemática el comportamiento de los campos eléctricos, magnéticos y sus fuentes materiales, tales como cargas eléctricas, corriente eléctrica, polarización eléctrica y polarización magnética (Maza, 2015, p.21), así como su interacción entre sí y la influencia que tiene el medio en ellos. Con la ayuda de estas ecuaciones es posible modelar a tamaño macroscópico las interacciones de la Tierra con los campos electromagnéticos que la rodean y así poder estudiar las estructuras contenidas en ella (González, 2015, p.4). Estas ecuaciones “pueden expresarse de forma diferencial o de forma integral” (Sánchez, 2018, p.24), tanto en el dominio del tiempo, como en el dominio de la frecuencia, a través de la transformada de Fourier.

De acuerdo con Serway, las ecuaciones de Maxwell están dadas de la siguiente manera (Citado en González, 2015, p.3):

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (3.2)$$

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.3)$$

$$\nabla \times \bar{H} = J_c + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.4)$$

En dónde:

“ $\bar{H}$ ” Intensidad de Campo magnético  $[\frac{A}{m}]$

“ $\bar{E}$ ” Intensidad de Campo eléctrico  $[\frac{V}{m}]$

“ $\bar{B}$ ” Vector de Inducción magnética [T] o  $[\frac{Wb}{m^2}]$

“ $\bar{D}$ ” Vector de desplazamiento eléctrico  $[\frac{C}{m^2}]$

“ $\bar{Jc}$ ” Densidad de Corriente  $[\frac{A}{m^2}]$

#### 3.1.1.1 Ley de Gauss para campo eléctrico

De acuerdo con Ida y Bastos en la ecuación 3.1 podemos observar que “la divergencia de  $\bar{D}$  no es igual a cero, lo que significa que el flujo del vector de desplazamiento eléctrico no es conservativo” (Citados en Sánchez, 2018, p.25). La ecuación establece que el flujo eléctrico total a través de cualquier superficie cerrada es igual a la carga neta encerrada por la superficie dividida entre  $\epsilon_0$  (permitividad en el vacío), por lo que las líneas de campo eléctrico se originan en cargas positivas y terminan en cargas negativas (Maza, 2015, p.22).

#### 3.1.1.2 Ley de Gauss para campo magnético

Ida y Bastos mencionan que esta ecuación (3.2) “corresponde a la condición que permite comprender el comportamiento del campo que sirve, en varios casos, como un medio para determinar la intensidad del campo magnético” (Citados en Sánchez, 2018, pp.25-26). Para esta ecuación el flujo magnético a través de una superficie cerrada es cero, es decir, el número de líneas de campo magnético que entran a la superficie es igual al número de líneas que salen (Maza, 2015, p.22). Esto significa que en la naturaleza no existen monopolos magnéticos, sólo existen dipolos magnéticos.

### 3.1.1.3 Ley de Faraday

La Ley de Faraday explica cómo un flujo de campo magnético variable en el tiempo puede inducir en un circuito una corriente eléctrica. Según mencionan con Simpson y Bahr la ecuación 3.3 establece que “las variaciones temporales en el campo magnético inducen fluctuaciones espaciales en el campo eléctrico, en un flujo cerrado cuyo eje está orientado en la dirección del campo inducido” (Citados en Sánchez, 2018, p.25).

### 3.1.1.4 Ley de Ampere

Como afirman Simpson y Bahr la ecuación 3.4 establece que “cualquier flujo cerrado de una corriente eléctrica tendrá asociado un campo magnético de magnitud proporcional al flujo total de la corriente” (Citados en Sánchez, 2018, p.25), además de que este campo magnético resultante será perpendicular a la dirección del flujo de la corriente. Si se ve la ecuación en el segundo elemento de la igualdad, el primer factor representa la corriente de conducción, mientras que el segundo factor representa la corriente de desplazamiento lo que indica que toda variación de flujo eléctrico implica una corriente de desplazamiento  $J_c$  que representa la densidad de corriente de conducción (Maza, 2015, p.22).

### 3.1.2 Relaciones constitutivas

Zhdanov menciona que “el comportamiento de los campos electromagnéticos está controlado por 3 propiedades primarias del medio: conductividad eléctrica, permitividad eléctrica y la permeabilidad magnética” (Citado en Maza, 2015, p.23). De estas propiedades se derivan las relaciones constitutivas, que de acuerdo a Keller “son ecuaciones generales que relacionan el comportamiento de los campos electromagnéticos con la estructura bajo la superficie de la Tierra (...)” (Citado en Maza, 2015, p.23).

Ward y Hohmann mencionan qué, en términos generales, las propiedades electromagnéticas se representan mediante tensores que dependen de su ubicación en el espacio. Dichos tensores, son de orden mayor si el medio es anisotrópico, en cambio, si el medio es isotrópico los tensores se considerarán como escalares

Según Ward y Hohmann, si se asume que cada uno de los tensores de las relaciones constitutivas considera un medio homogéneo, lineal e isotrópico (Citados por Sánchez, 2018, p. 26) y además tienen características independientes de la temperatura, del tiempo y la presión, las relaciones constitutivas se describen de la siguiente manera:

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E} \quad (3.5)$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H} \quad (3.6)$$

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} \quad (3.7)$$

En dónde:

$\epsilon$ = Permitividad eléctrica

$\mu$ = Permeabilidad magnética

$\sigma$ = Conductividad eléctrica

Estas propiedades físicas de las rocas, suelos y fluidos controlan la velocidad de propagación y amplitudes de la onda electromagnética.

#### 3.1.4 Ecuación de onda

Una onda electromagnética “es uno de varios fenómenos físicos que pueden describirse mediante las matemáticas del movimiento ondulatorio (...)” (Escobar y Cortés, 2000, p.92). Después de proponer sus ecuaciones, Maxwell demostró que estas podían combinarse y en 1864 presentó: “*Una teoría dinámica del campo electromagnético*” (Pérez, 2004, p.5). Aquí explicó que las ecuaciones que rigen el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos predecían una generación de ondas en el espacio cuando ambos campos interactuaban entre sí.

Para la ecuación de onda electromagnética se considera un espacio libre, es decir, un espacio con condiciones homogéneas, lineales e isotrópicas, en dónde el medio carece de fuente ( $J=0$ ), entonces las ecuaciones de Maxwell se reescriben de la siguiente manera:

$$\nabla \cdot D = 0 \quad (3.8)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3.9)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.10)$$

$$\nabla \times H = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.11)$$

Ward y Hohmann mencionan que, para obtener las ecuaciones de onda en el dominio del tiempo, se calcula el rotacional a las ecuaciones de la Ley de Ampere (3.4) y Ley de Faraday (3.3) (Citados en Sánchez, 2018, p.27), y se obtiene:

$$\nabla \times (\nabla \times E) + \nabla \left( \frac{\partial B}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.12)$$

$$\nabla \times (\nabla \times H) - \nabla \left( \frac{\partial D}{\partial t} \right) = \nabla \times J \quad (3.13)$$

Se aplican las relaciones constitutivas para un medio no dispersivo (3.5-3.7) a las dos ecuaciones anteriores:

$$\nabla \times (\nabla \times E) + \nabla \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\mu H) \right] = 0 \quad (3.14)$$

$$\nabla \times (\nabla \times H) - \nabla \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon E) \right] = \nabla \times (\sigma E) \quad (3.15)$$

Se reducen a:

$$\nabla \times \nabla \times E + \mu \nabla \times \left( \frac{\partial H}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.16)$$

$$\nabla \times \nabla \times H - \varepsilon \nabla \times \left( \frac{\partial E}{\partial t} \right) = \sigma \nabla \times E \quad (3.17)$$

Asumiendo que los campos eléctricos y magnéticos son continuos a intervalos, y que poseen tanto primera como segunda derivada (Sánchez, 2018, p.27), se llega a lo siguiente:

$$\nabla \times \nabla \times E + \mu \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times H) = 0 \quad (3.18)$$

$$\nabla \times \nabla \times H - \varepsilon \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times E) = \sigma \nabla \times E \quad (3.19)$$

Tanto  $\nabla \times E$  como  $\nabla \times H$  están definidas por las ecuaciones de Faraday (3.3) y Ampere (3.4), por lo que se reescriben las ecuaciones anteriores y se obtiene:

$$\nabla \times \nabla \times E + \mu \varepsilon \left( \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right) + \mu \sigma \left( \frac{\partial E}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.20)$$

$$\nabla \times \nabla \times H + \mu \varepsilon \left( \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \right) + \mu \sigma \left( \frac{\partial H}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.21)$$

Se aplica el rotacional de funciones vectoriales, se considera que en una región homogénea  $\nabla \times E = 0$  y  $\nabla \times H = 0$  y así se obtienen las ecuaciones para los campos eléctrico y magnético en el dominio del tiempo:

$$\nabla^2 E - \mu\varepsilon \left( \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right) - \mu\sigma \left( \frac{\partial E}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.22)$$

$$\nabla^2 H - \mu\varepsilon \left( \frac{\partial^2 H}{\partial t^2} \right) - \mu\sigma \left( \frac{\partial H}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.23)$$

“El análisis se simplifica en el dominio de la frecuencia ya que se asume que los campos tienen una variación armónica en el tiempo” (Maza, 2015, p.29). Mediante la transformada de Fourier se obtienen las ecuaciones en el dominio de la frecuencia, también conocidas como ecuaciones de Helmholtz en  $E$  y  $H$ :

$$\nabla^2 E + (\mu\varepsilon\omega^2 + i\mu\varepsilon\omega)E = 0 \quad (3.24)$$

$$\nabla^2 H + (\mu\varepsilon\omega^2 + i\mu\varepsilon\omega)H = 0 \quad (3.25)$$

Si se utiliza la constante de propagación:

$$k^2 = \mu\varepsilon\omega^2 + i\mu\varepsilon\omega \quad (3.26)$$

Las ecuaciones resultantes son:

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0 \quad (3.27)$$

$$\nabla^2 H + k^2 H = 0 \quad (3.28)$$

En las ecuaciones 3.24-3.28 las variables  $\mu$ ,  $\varepsilon$  y  $\omega$  se encuentran en función de la frecuencia.

Cuando se trata de frecuencias bajas ( $<10^5$  Hz), los campos varían muy poco en el tiempo, entonces  $\mu\epsilon\omega^2 \ll i\mu\epsilon\omega$  y las corrientes de desplazamiento son mucho más pequeñas que las corrientes de conducción para materiales en el subsuelo. Se asume que se encuentra en un modelo cuasi-estacionario y la parte real de  $k^2$  carece de relevancia, por lo que las ecuaciones se pueden reescribir de la siguiente forma (Sánchez, 2018, pp.28-29):

En el dominio de la frecuencia:

$$\nabla^2 E + i\mu\epsilon\omega E = 0 \quad (3.29)$$

$$\nabla^2 H + i\mu\epsilon\omega H = 0 \quad (3.30)$$

Y en el dominio del tiempo:

$$\nabla^2 E - \mu\sigma \left( \frac{\partial E}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.31)$$

$$\nabla^2 H - \mu\sigma \left( \frac{\partial H}{\partial t} \right) = 0 \quad (3.32)$$

En dónde  $k = (i\mu\epsilon\omega E)^{\frac{1}{2}}$  es la constante de propagación. (3.33)

La importancia de las ecuaciones 3.29-3.33 está en que el comportamiento que describen es característico en la mayoría de las técnicas geoelectricas de exploración, y ayudan a entender la falta de resolución de los métodos electromagnéticos.

### 3.1.5 Solución de la ecuación de onda

De acuerdo con Sommerfeld y Weyl, para lograr entender la propagación de las ondas electromagnéticas es útil considerar a las ondas como ondas planas, lo cual simplifica los cálculos en la teoría asintótica de los rayos (citados en Maza, 2015, pp.31-32).

Para lograr encontrar la solución a las ondas de difusión, se considera una onda plana que viaja a través de un medio homogéneo con una dirección positiva en z, sin tomar en cuenta sus fuentes (Maza, 2015, p.32). Existen dos soluciones para la ecuación de onda, en este caso sólo se tomará la primera, en donde se considera a “una onda plana con dependencia sinusoidal en el tiempo, es decir, se presenta una variación armónica  $e^{-i\omega t}$ ” (Sánchez, 2018, p.29). Zhdanov establece que las ecuaciones 3.31 y 3.32 son ecuaciones diferenciales de segundo orden cuyas soluciones, para los campos eléctrico y magnético, son (Citado en Maza, 2015, p.32):

$$E = E_0 e^{i\gamma z} e^{-i(\omega t - \gamma z)} \quad (3.34)$$

$$H = H_0 e^{i\gamma z} e^{-i(\omega t - \gamma z)} \quad (3.35)$$

$\gamma$  es un número complejo:

$$\gamma = \alpha - \beta i \quad (3.36)$$

En el modelo cuasi-estacionario se asumen que  $\alpha$  y  $\beta$  son iguales, y quedan definidas como (Maza, 2015, p.32):

$$\alpha = \beta = \left(\frac{\omega\mu\sigma}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.37)$$

Se considera que el decaimiento con respecto al eje Z en las ecuaciones 3.34 y 3.35 representa una atenuación en la amplitud de la onda electromagnética con una relación 1/e, a la cual se le conoce, de acuerdo con Ward y Hohmann, como penetración nominal o skin depth (Citados en Sánchez, 2018, p.30):

$$\delta = \left(\frac{2}{\omega\mu\sigma}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.38)$$

### 3.2 PROPIEDADES ELÉCTRICAS DE LAS ROCAS

Orellana menciona que es importante saber que el comportamiento eléctrico de las rocas depende tanto de las propiedades como del modo de agregación de sus minerales, la forma, volumen y relleno de los poros (Citado en Sánchez, 2018, p.39). El Colegio de Geofísicos apunta que:

Las variaciones verticales y horizontales en la resistividad de los materiales en el subsuelo producen a su vez variaciones en las relaciones entre la corriente aplicada y la distribución de potencial medida en superficie y en consecuencia la medición de estas revela información sobre la composición, extensión y propiedades físicas de las rocas (2018b, p.17).

Por esta razón es que se describirán las propiedades eléctricas de las rocas, ya que de ellas dependerá la interpretación geológica que se le dé a los resultados obtenidos.

Desde el punto de vista de Keller “el agua tiene un gran efecto en el comportamiento de la conductividad y la permitividad eléctrica en las rocas, aun en pequeñas cantidades” (Citado en Maza, 2015, p.26).

Las propiedades electromagnéticas principales que caracterizan a las rocas son: la permeabilidad magnética, permitividad eléctrica y la resistividad eléctrica (o su inverso la conductividad eléctrica). La resistividad eléctrica específica  $\rho$  es la propiedad que presenta cualquier material de oponerse al paso de una corriente eléctrica.

Según menciona Sánchez “en un material conductor considerándolo unidimensional, tal como un cable, la relación entre la corriente y la distribución del potencial es descrita por la Ley de Ohm” (2018, p.17):

$$R = -\frac{\Delta V}{I} \quad (3.39)$$

En dónde:

$R$  = Resistencia entre dos puntos con el mismo potencial

$\Delta V$  = Diferencia de potencial entre dos puntos

$I$  = Corriente eléctrica

La resistencia en el cable es expresada como:

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (3.40)$$

En donde:

$\rho$  = Resistividad eléctrica

$A$  = Área Transversal del material

$L$  = Largo del material

Por lo tanto, sustituyendo (3.39) en la ecuación (3.40) y despejando esta última, se obtiene que la resistividad eléctrica de un material viene dada por (Colegio de Geofísicos, 2018a, p. 19):

$$\rho = \frac{V}{I} \left( \frac{A}{L} \right) \quad (3.41)$$

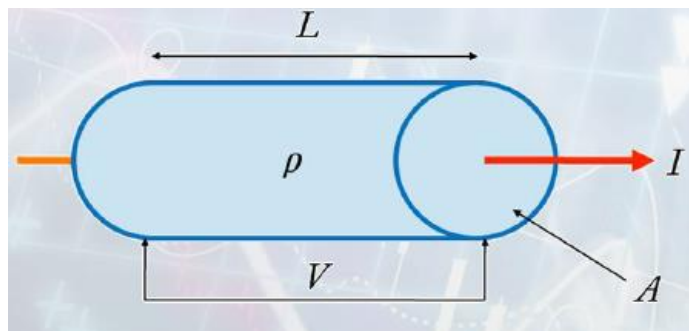


Figura 3.1. Material al cual es aplicado una corriente eléctrica. Fuente: Colegio de Geofísicos (2018a), p.19.

El Colegio de Geofísicos menciona que “la resistividad es una propiedad intrínseca de un material, en el mismo sentido que la densidad y los módulos elásticos son propiedades intrínsecas” (2014b, p.18). Las unidades de la resistividad en el sistema M.K.S. es Ohm-m ( $\Omega \cdot m$ ). La conductividad de un material está definida como el recíproco de su resistividad (Colegio de Geofísicos, 2014, p.18):

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.42)$$

Es necesario conocer que “existen diversos factores que intervienen en la variación de la resistividad. Gracias al conocimiento de estos factores es posible interpretar la variación de la resistividad en un medio estudiado con base en sus características” (Hernández, 2008, p.6):

- *Resistividad de los minerales que conforman la roca:*

La resistividad de los minerales por lo general es muy alta en comparación con la resistividad de las rocas que los contienen, esto debido a la influencia de la porosidad, la humedad y la resistividad de los fluidos que rellenan los poros, en la resistividad de la roca (Hernández, 2008, p.7).

- *Porosidad:*

Los poros son una serie de pequeños espacios ocupados por aire y/o fluidos, los cuales pueden o no estar conectados entre sí (...) Existe una relación inversamente proporcional entre la porosidad de la roca y la resistividad eléctrica de la misma, dado por la resistividad de los fluidos que rellenan los poros. Un aumento en la porosidad de una roca conlleva a una disminución de la resistividad eléctrica (Hernández, 2008, p.8).

- *Grado de humedad:*

Este factor juega un papel importante en la variación de la resistividad eléctrica, existiendo una relación inversamente proporcional entre el grado de humedad de la roca y su resistividad. Para un mismo tipo de roca, si se aumenta la humedad disminuye su resistividad, y viceversa (Hernández, 2008, p.10).

- *Resistividad de los fluidos contenidos en los poros de las rocas:*

Dentro de la teoría de electrolitos éstos son divididos en dos grupos: electrolitos fuertes y débiles, lo cual influye en la conductividad que presenta el fluido. Aquellos fluidos que contienen electrolitos fuertes son mejores conductores de la electricidad que los que contienen electrolitos débiles (...) La resistividad del agua contenida en los poros de la roca es inversamente proporcional a la concentración de sales disueltas (Hernández, 2008, pp.11-12).

- *Temperatura:*

La resistividad del fluido o electrólito contenido en la roca depende de la temperatura, es decir, a baja temperatura aumenta la resistividad del fluido y viceversa. Por ello, cuando se realizan mediciones de resistividad de agua a diferentes temperaturas, es necesario corregir los valores a una misma temperatura de referencia, obteniendo sólo las reacciones que se originan por las diferencias entre salinidad y no por temperatura (Hernández, 2008, p.15).

“En la mayoría de los materiales terrestres, la conducción de corriente eléctrica toma lugar enteramente en el agua que ocupa el espacio poroso, esto debido a que las rocas como agregados minerales en general son no conductores” (Colegio de Geofísicos, 2018b, p.18). El agua se transmite por los poros de la roca, es por esto que la forma de la estructura del poro saturado con agua determinará la conductividad de la roca. Keller menciona que “la estructura del poro es muy complicada, la expresión que mejor satisface la conductividad de una roca saturada con agua es la conocida como Ley de Archie” (Citado en Maza, 2015, p.27):

$$\sigma = a\sigma_w\phi^m \quad (3.43)$$

En dónde:

$\sigma$ = Conductividad total de la roca

$\sigma_w$ = Conductividad del electrolito en el poro

$\phi$ = Fracción de volumen de agua contenida en la roca

$a$  y  $m$ = Parámetros que dependen del tipo de roca

Si tomamos en cuenta la ecuación (3.42) se puede reescribir la ecuación (3.43) en términos de resistividad y se expresa de la siguiente manera (Colegio de Geofísicos, 2018a, pp.18-19):

$$\rho a = \rho_w \phi^{-m} \quad (3.44)$$

Siendo:

$\rho$ = Resistividad total de la roca

$\rho_w$ = Resistividad del electrolito en el poro

Keller expresa que, si espacios de los poros de la roca se encuentran ocupados por otros fluidos, la ecuación de Archie puede escribirse como (Citado en Maza, 2015, p.27):

$$\sigma = a \sigma_w S^n \phi^m \quad (3.45)$$

En dónde se añade el factor  $S$  que es la fracción del poro saturado con agua.

Los poros tienen estructuras que suelen “son complicadas en forma y difíciles de describir geoméricamente, sin embargo, se pueden reconocer tres geometrías diferentes” (Maza, 2015, p.27):

- Espacio intergranular en rocas sedimentarias.
- Fractura, diaclasa, microgrietas en rocas cristalinas.
- Estructuras poco interconectadas.

Como afirma Keller:

La porosidad en una fractura resultará en una conductividad mayor de las tres geometrías, debido a la forma simple de los espacios vacíos, mientras que las estructuras poco interconectadas resultarán en una conductividad baja debido a una mayor complejidad en los espacios vacíos (Citado en Maza, 2015, p.27).

En la tabla 3.1, se muestran de manera general los valores que adquieren los parámetros  $a$  y  $m$  en la ecuación de Archie, para diferentes tipos de rocas:

Tabla 3.1. Valores de parámetros  $a$  y  $m$  para la ecuación de Archie según las propiedades de las rocas.  
Fuente: Keller citado en Maza, 2015, p.28

<b>Tipo de roca</b>	<b>a</b>	<b>m</b>
Rocas detríticas pobremente cementadas, tales como arenas, areniscas y algunas lutitas. Con porosidad que varía de un 25% a un 45%, usualmente de edad Terciaria.	0.9	1.4
Rocas sedimentarias moderadamente bien cementadas, incluyendo areniscas y lutitas, con porosidad que varía de 18% a 35%, usualmente de edad Mesozoica.	0.6	1.7
Rocas sedimentarias bien cementadas con una porosidad que varía de 5% a 25%, usualmente de edad Paleozoica.	0.6	2
Rocas volcánicas altamente porosas, como tobas, con porosidad en rangos de 20% a 80%.	3.5	1.4
Rocas con porosidad menor a 4%, incluyendo rocas ígneas densas y rocas sedimentarias metamorfizadas.	1.4	1.6

### 3.3 MÉTODO TRANSITORIO ELECTROMAGNÉTICO (TEM)

A principios de 1980 se inicia el desarrollo del método conocido como sondeo Transitorio Electromagnético (TEM) o TDEM (Time Domain Electromagnetic) y adquiere relevancia rápidamente en el área de geofísica aplicada (Colegio de Geofísicos, 2018b, p.58).

Actualmente las técnicas de electromagnéticas de exploración geofísica son utilizadas con mayor frecuencia para la obtención de modelos de resistividades del subsuelo, constituyendo una alternativa a los métodos de corriente directa. Las técnicas electromagnéticas se dividen en dos grupos: en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia, siendo el método del sondeo electromagnético transitorio, parte del primer grupo.

Entre las ventajas del TEM, según McNeil “destacan la velocidad de operación y buena resolución lateral en capas conductoras. Se puede utilizar para mapear acuíferos, capas arcillosas que restringen el flujo de agua, lixiviado en aguas subterráneas, así como intrusiones salinas y profundidad de basamento” (Citado en Sánchez, 2018, p.30).

El método se basa en los principios físicos del decaimiento de un campo magnético secundario que es generado a partir del campo magnético inducido por los campos eléctricos primarios dentro del medio geológico. Cuando comienza la medición, un transmisor envía un pulso de corriente eléctrica cuadrada que se propaga a través del medio geológico. Cuando el pulso es interrumpido, su desplazamiento induce la aparición de un campo magnético; este último se propaga a través de los diferentes materiales presentes en el medio geológico y su variación da lugar a las corrientes conocidas como Corrientes de Eddy (figura 3.2); dichas corrientes se transmiten con una velocidad que es proporcional a la resistividad del medio.

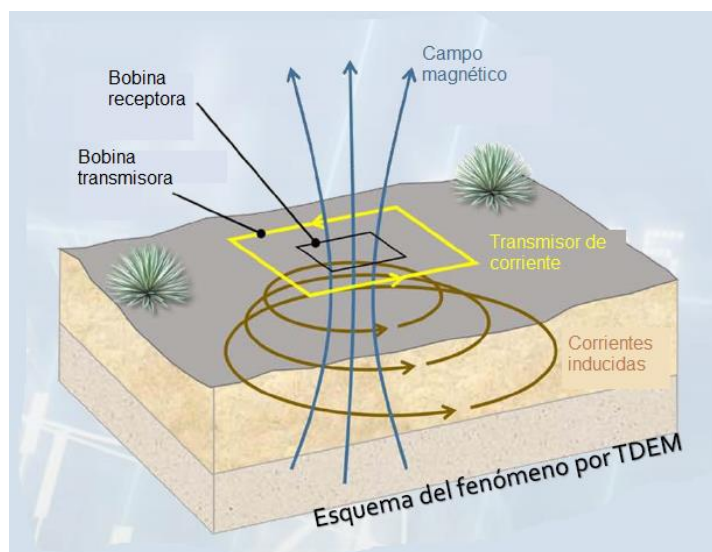


Figura 3.2. Esquema del fenómeno de inducción por el método transitorio electromagnético. Fuente: Colegio de Geofísicos (2018), p.25.

Con base en Nabighian las corrientes de Eddy migran a profundidad y lateralmente sobre las fronteras que delimitan cuerpos o materiales conductores en subsuelo, en respuesta se produce un campo magnético secundario, el cual a su vez da una respuesta de voltaje variable en el receptor, en donde la forma del decaimiento de este voltaje contiene información sobre la resistividad de los distintos materiales que se encuentran en el subsuelo. La forma en que las corrientes migran a profundidad se puede utilizar como un control a la profundidad: cuando se tienen voltajes de tiempos cortos quiere decir que corresponde a resistividades someras, mientras que los tiempos largos dan información de resistividades en zonas profundas (Citado en Sánchez, 2018, p.31).

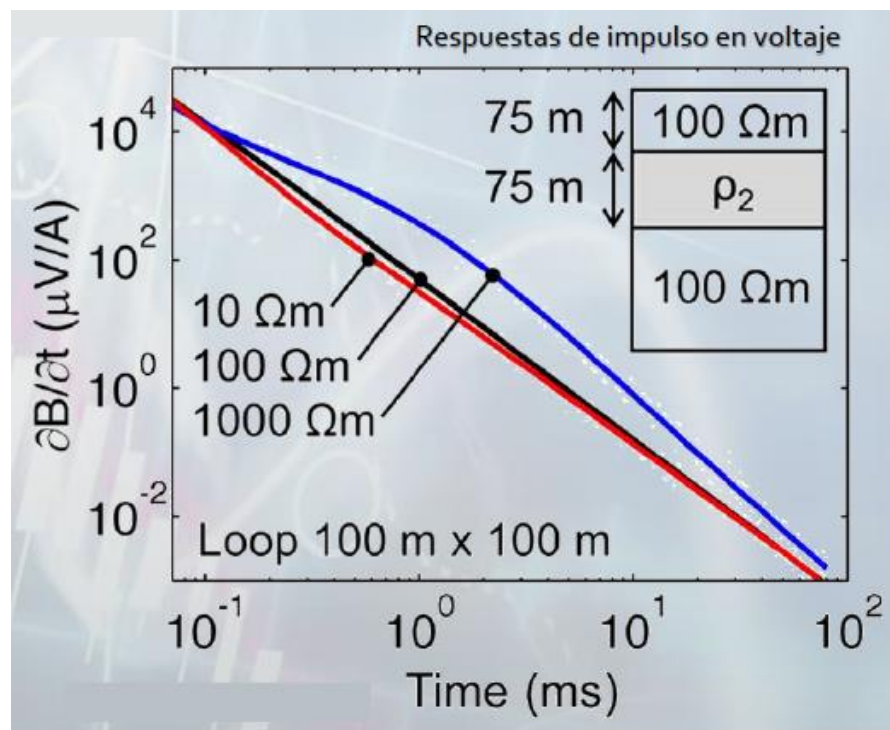


Figura 3.3: Respuestas de impulso en voltaje. Fuente: Bucker et al. citado en Colegio de Geofísicos (2018a), p.25.

Cuando se adquieren los datos en la superficie del terreno con una unidad receptor/transmisor la señal normalmente tiene una forma de escalón, esta consiste en una onda cuadrada, por la que circula de manera constante durante un tiempo definido, la que se corta abruptamente. Debe tomarse en cuenta el tiempo en que la señal circula antes de llegar a atenuarse por completo, lo que genera una forma en la señal de tipo

“rampa” en los extremos. Por último, se vuelve a introducir la misma corriente solo que con una polaridad invertida; esto es lo que forma la señal de tipo escalón (Figura 3.4).

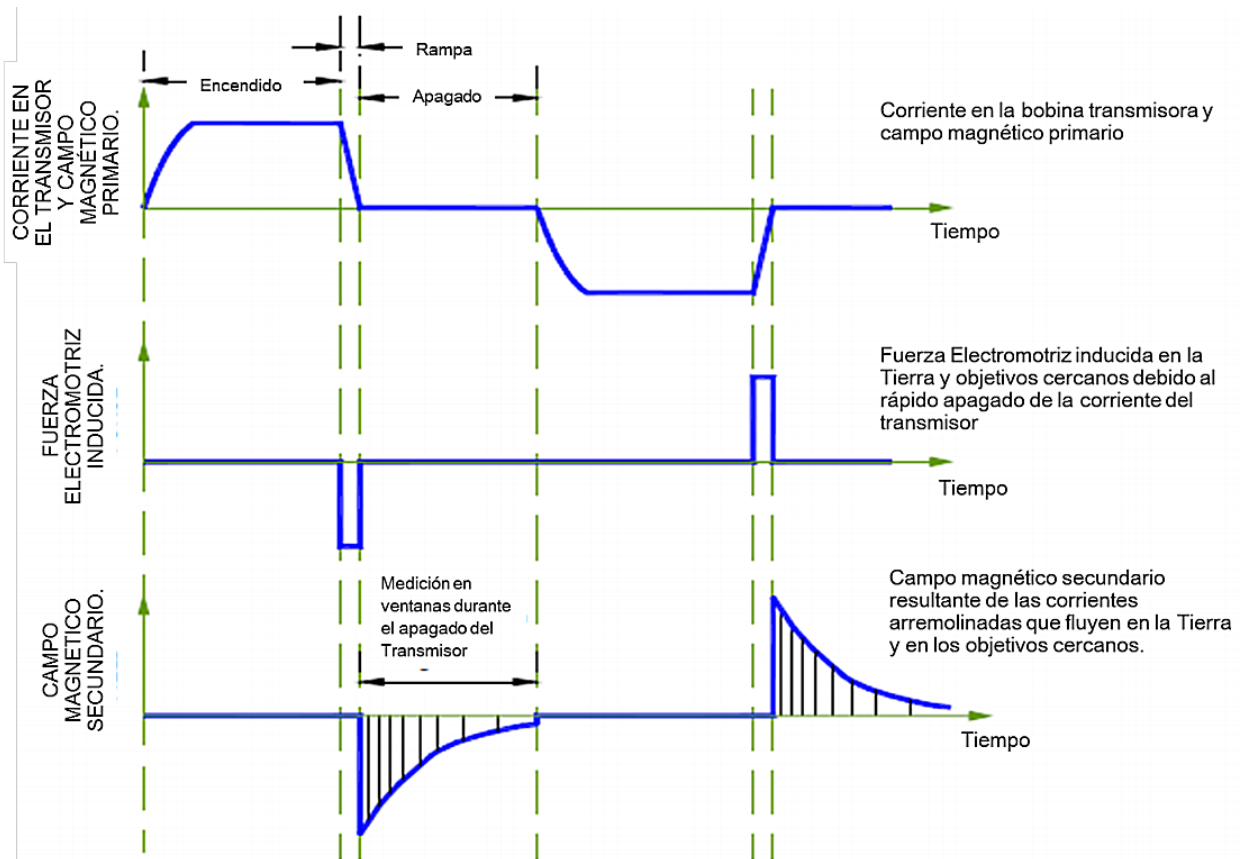


Figura 3.4. Tipos de señales para Transitorio Electromagnético en el Dominio del Tiempo.  
Fuente: Valencia (2012), p.15.

### 3.3.1 Respuesta de una bobina horizontal

De acuerdo con Ward y Hohmann “en el desarrollo de la teoría, se asume una bobina con forma circular para obtener la componente vertical del campo magnético, y para reducir los efectos de las heterogeneidades laterales” (Citados en Sánchez, 2018, p.33):

$$H_z = -\frac{I}{k^2 a^3} [3 - (3 + 3ika - k^2 a^2)e^{-ika}] \quad (3.46)$$

En dónde:

$a$  = Radio de la bobina

Para poder obtener la respuesta de una señal transitoria de tipo escalón, se procede a dividir la ecuación (3.46) entre  $i\omega$  y posteriormente se aplica la transformada inversa de Laplace.

Después de cortar la corriente de la bobina transmisora y considerando las ecuaciones anteriores, el campo magnético en el centro de la bobina se puede expresar de la siguiente manera:

$$H_z = -\frac{I}{2a} \left[ \frac{3}{\sqrt{\pi\theta a}} \right] e^{-\theta^2 a^2} + \left( 1 - \frac{3}{2\theta^2 a^2} \right) \text{erf}(\theta a) \quad (3.47)$$

En dónde  $\text{erf}$  es la función error, y junto con  $\theta$  se definen como:

$$\text{erf}(\theta a) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\theta a} e^{-t^2} dt \quad (3.48)$$

$$\theta = \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma}{4t}} \quad (3.49)$$

El término  $\frac{I}{2a}$  es representativo del campo magnético presente en el espacio libre antes de que se corte la corriente, el cual, al ser multiplicado por el segundo término de la ecuación (3.47) nos da como resultado el decaimiento del campo magnético. Así se puede obtener la derivada del campo magnético con respecto al tiempo, que se representa (Sánchez, 2018, p.33):

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{I}{\mu_0 \sigma a^3} \left[ 3 \text{erf}(\theta a) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \theta a (3 + 2\theta^2 a^2) e^{-\theta^2 a^2} \right] \quad (3.50)$$

Para tiempos de medición largos, el campo magnético, así como su derivada con respecto al tiempo se pueden aproximar de la manera siguiente:

$$H_z \approx \frac{I\mu_0^{\frac{3}{2}}\sigma^{\frac{3}{2}}a^2}{30\pi^{\frac{1}{2}}} t^{-\frac{3}{2}} \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} \approx -\frac{I\mu_0^{\frac{3}{2}}\sigma^{\frac{3}{2}}a^2}{20\pi^{\frac{1}{2}}} t^{-\frac{5}{2}} \quad (3.52)$$

### 3.3.2 Etapas de la respuesta transitoria del voltaje

Durante la interpretación de datos del TEM es necesario considerar 3 elementos importantes que se producen en la respuesta transitoria del método, estos elementos pueden dividirse en las siguientes etapas (figura 3.5):

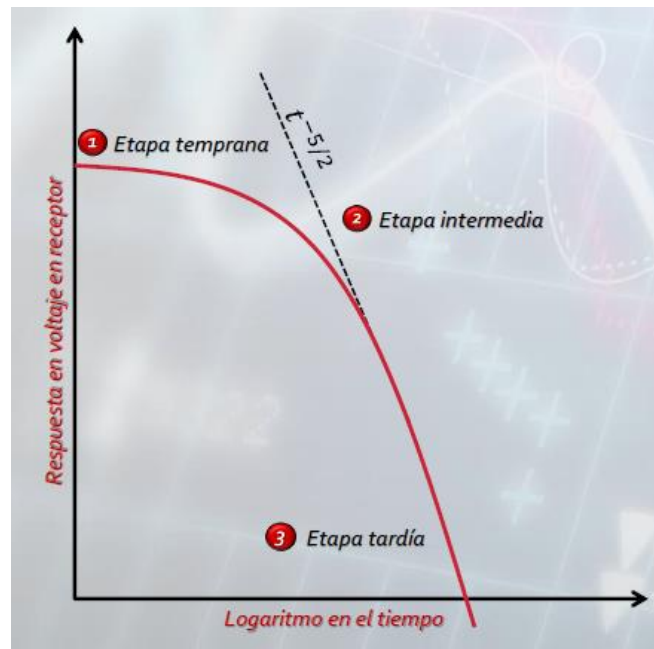


Figura 3.5. Etapas de la respuesta transitoria del voltaje en un medio de dos capas.  
Fuente: McNeil citado en Colegio de Geofísicos (2018a), p.27.

Las etapas anteriores indican que la amplitud de la corriente fluye como una función dependiente del tiempo, el cual mide el decaimiento del campo magnético, a través de la bobina receptora, obteniendo así un voltaje en tiempos sucesivos y así las resistividades

de los materiales presentes en el subsuelo a diferentes profundidades (Colegio de Geofísicos, 2018a, p.27).

### 3.3.3 Teoría de Inversión para el procesado de datos

Menke define a la teoría de inversión como “un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas que permiten obtener información útil del mundo real mediante inferencias realizadas a partir de datos obtenidos por medio de observaciones” (Citado en Zúñiga, 2011, p. 37).

De acuerdo con Tarantola para lograr el objetivo anterior es necesario aplicar métodos de inversión que darán como resultado un modelo el cual se ajuste de mejor manera a los datos observados (Citado en Zúñiga, 2011, p. 37). Esta teoría está basada en un modelo matemático que pueda describir el fenómeno con el cual se está trabajando, en este caso, un modelo geoelectrico. Con base en Tarantola el procedimiento científico para el estudio de un sistema físico puede ser dividido en tres etapas:

1. Sistema paramétrico: Obtener un conjunto “n” de parámetros que lo caractericen desde un determinado punto de vista.
2. Problema directo: Consiste en encontrar el conjunto de datos  $d$  dado un modelo  $m$ , en este problema es necesario calcular  $f(m)$  a través de ecuaciones diferenciales:

$$d = f(m) \quad (3.53)$$

3. Modelo inverso: Utiliza datos observables (adquiridos en campo),  $d$ , para inferir los valores reales del modelo  $m$  (Citado en Zúñiga, 2011, p. 37):

$$m = F(d) \quad (3.54)$$

Cuando se realiza una inversión mediante un modelo matemático es importante tener en cuenta los siguientes factores:

1. Por lo general no existe un modelo que ajuste perfectamente con los datos observados, debido a que el modelo es aproximado. Además, pueden existir datos que contengan ruido por lo que el modelo tiene que ser ajustado con aproximaciones justificadas (como el modelo directo).

2. Buscar un ajuste apropiado entre la respuesta observada y respuesta calculada que sea único para el conjunto dado de datos (Sánchez, 2018, p.46).

Para la presente tesis el algoritmo que fue utilizado fue el de Occam, el cual “(...) genera un modelo suave que se ajusta a un conjunto de datos con ciertas tolerancias, si bien un modelo suave quizás no constituya el mejor ajuste con los datos” (Schlumberger Oilfield Glossary, 2019, p.1).

## **CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA: ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS**

### **4.1 ADQUISICIÓN DE DATOS**

Los datos utilizados en esta tesis fueron adquiridos en el mes de marzo del año 2017, para la elaboración de un proyecto por parte de una empresa privada. El equipo utilizado fue el SIROTEM modelo Mark III (Figura 4.1), de fabricación australiana, acelerador de señal, batería Aerolyte con voltaje de 12.8 Volts y software integrado, versión 5.5. El equipo mencionado cuenta con su receptor y transmisor dentro de la consola. La interfaz es manejada mediante un teclado que el equipo tiene integrado.



Figura 4.1: Equipo SIROTEM modelo Mark III. Fuente: Bitácora de campo (2017).

Los sondeos TEM se llevaron a cabo con los siguientes parámetros:

1. Loop coincidente de 300 x 300 m.
2. Frecuencia base seleccionada de 50 Hz.
3. Intensidad de corriente de entre 5 y 7.5 A.
4. Tiempo de medición en función de las ganancias y apilamientos ocupadas.

Las ganancias empleadas y el número de apilamientos requeridos para cada curva se realizaron de acuerdo con la siguiente tabla.

Tabla 4.1 Relación de ganancias y apilamientos ocupadas en las mediciones.

GANANCIA	APILAMIENTOS
0.1	128
1	256
10	512
100	1024

Las ganancias hacen referencia a la ampliación (o disminución) de las mediciones, es decir, un multiplicador para los datos medidos; por otro lado, los apilamientos son el número de mediciones que se suman entre sí para obtener una sola medición promediada, cada una de estas mediciones es tomada por cada pulso de 2 s que es emitido por el equipo. La finalidad de seleccionar apilamientos mayores para las ganancias mayores fue el de mejorar la relación señal - ruido.

La distribución de los sondeos TEM realizados se puede observar en la figura s coordenadas de los centros de cada uno de los sondeos TEM realizados en esta campaña se encuentran en el anexo B. La separación promedio entre cada sondeo TEM fue de 300 m, aproximadamente.

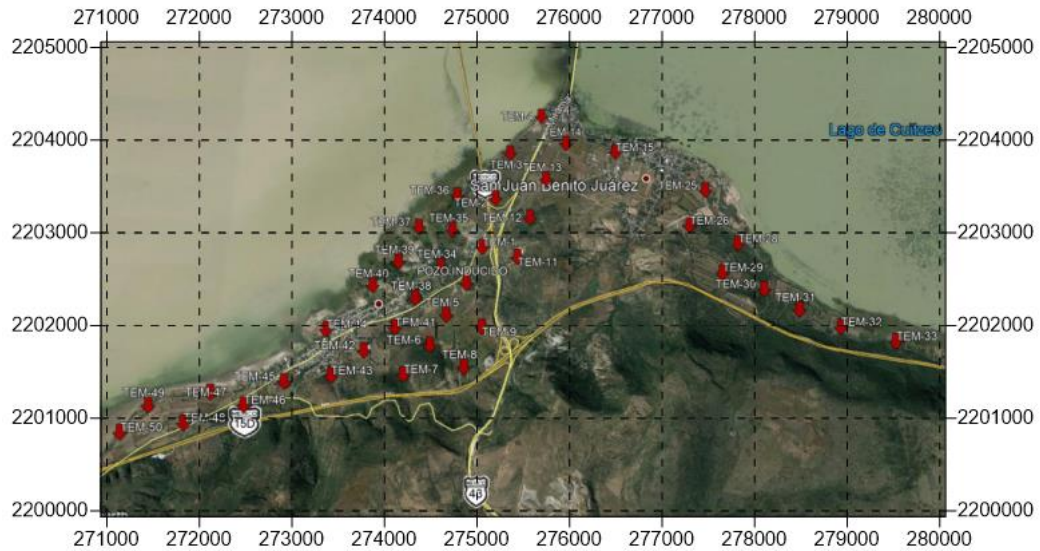


Figura 4.2: Distribución de los sondeos TEM en el área de estudio.

## 4.2 PROCESAMIENTO DE DATOS.

### 4.2.1 Pre-procesado de datos

El primer paso para el procesamiento de los datos adquiridos en campo fue ingresarlos al software Temixs®, en dónde se procedió a cargar cada uno de los sondeos. (Figura 4.3).

REC #	R	W1	WN	G	RUN	GRUP	COORD	COORD	TXAREA		
1	1	1	53	0	1	301	0	0	90000	51.27	38.34
2	1	1	53	0	2	301	0	0	90000	54.87	24.13
3	1	1	53	1	3	301	0	0	90000	46.94	18.94
4	1	1	53	1	4	301	0	0	90000	55.72	15.02
5	1	1	53	2	5	301	0	0	90000	51.54	8.438
6	1	1	53	2	6	301	0	0	90000	53.76	9.12
7	1	1	53	3	7	301	0	0	90000	45.37	9.017
8	1	1	53	3	8	301	0	0	90000	37.12	0.0476
										29.43	3.514
										29.31	1.221
										38.12	0.2194
										62.23	1.178
										46.64	1.821
										93.74	0.9822
										83.48	0.6524
										67.85	-0.0926
										40.34	1.118
										51.49	-0.06
										31.84	0.9502
										69.71	0.8764
										48.55	0.7645
										40.33	0.9338

8 SWEEPS LOADED  
 <Down> DATE/TM: 03-03-17 12:17 <PgDn>  
 Point mouse at record - click to select  
 <S>: Search <esc>: Abort <G>: Gather recs  
 <R>: Read record <+>: add record  
 <end> to end loading, cursor pad to move

Figura 4.3. Selección y carga de los datos para cada uno de los sondeos.

Posteriormente, los datos fueron depurados (figura 4.4), es decir, en las 8 curvas de decaimiento de voltaje, fueron enmascarados aquellos puntos que estuviera fuera de la tendencia y no cumplieran con la premisa de que el voltaje tiene que ser cada vez menor

a medida que el avanza el tiempo; se escalaron las curvas en caso de ser necesario para obtener como producto una curva promedio que caracterizara el decaimiento del voltaje para la medición realizada en ese punto. Una vez terminado este paso, se procedió a elegir el tipo de configuración de bobina que se utilizó para la toma de datos del sondeo TEM.

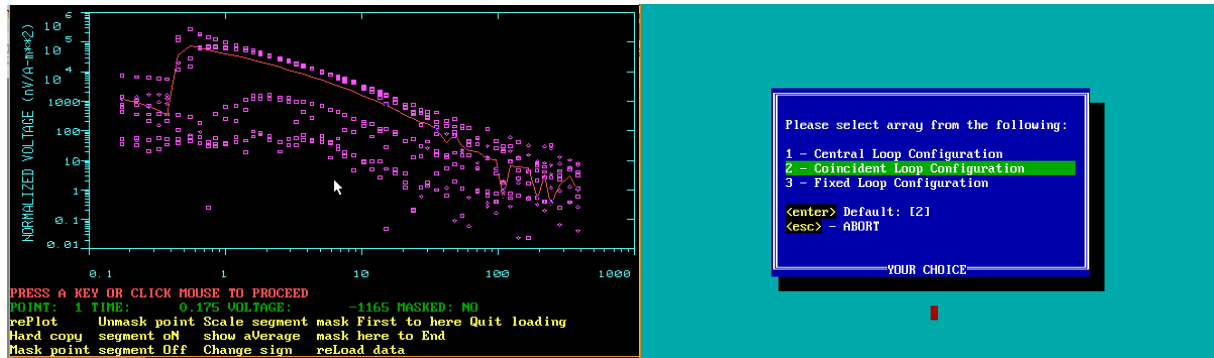


Figura 4.4 y 4.5. Curvas de decaimiento de voltaje para cada una de las corridas del sondeo TEM/Elección del tipo de arreglo utilizado para el sondeo TEM.

En el siguiente paso se ingresaron datos para cada uno de los sondeos, tales como: Nombre del archivo, fecha, localización, coordenadas, tamaño del loop, tal y como se puede observar en la figura 4.6.

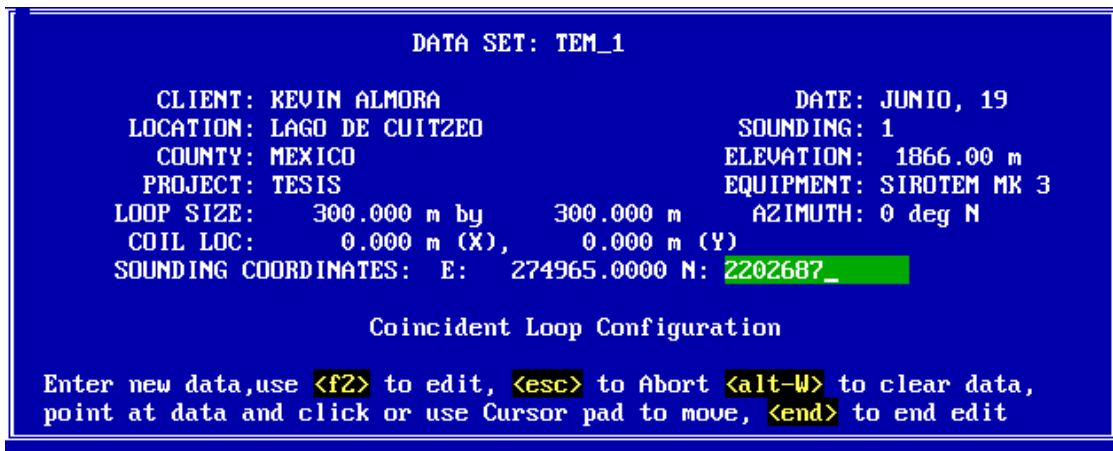


Figura 4.6. Datos particulares para cada sondeo.

Una vez configurados estos datos, se procedió a interpretar la curva de resistividad aparente contra tiempo, en dicha curva se asignaron capas con sus respectivas resistividades y profundidades (Figura 4.7), tomando en cuenta la geología de la zona y a manera de obtener el mejor ajuste de curvas con el menor error posible (Figura 4.8).

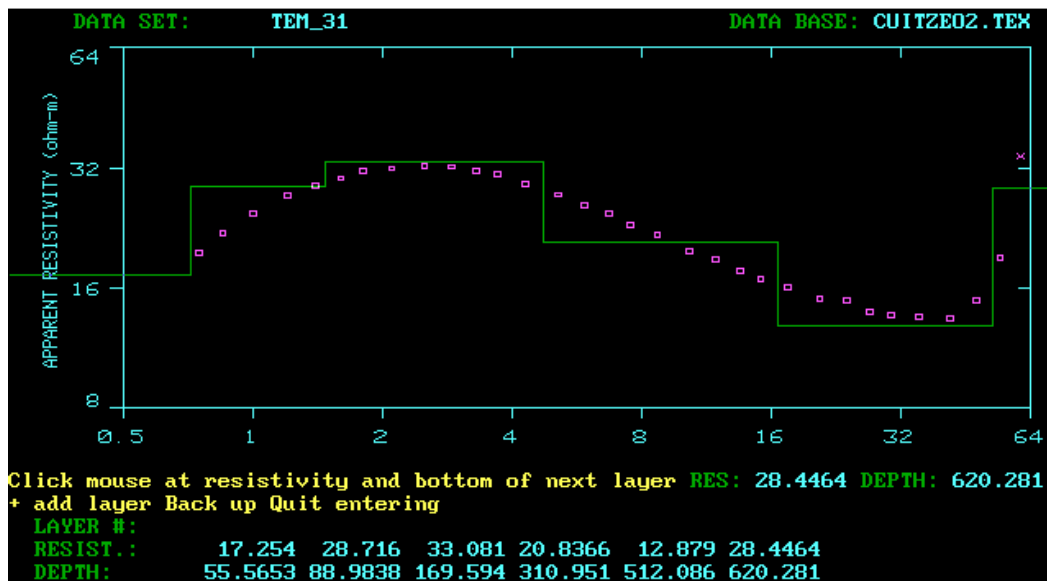


Figura 4.7. Modelo de capas de acuerdo con la geología de la zona.

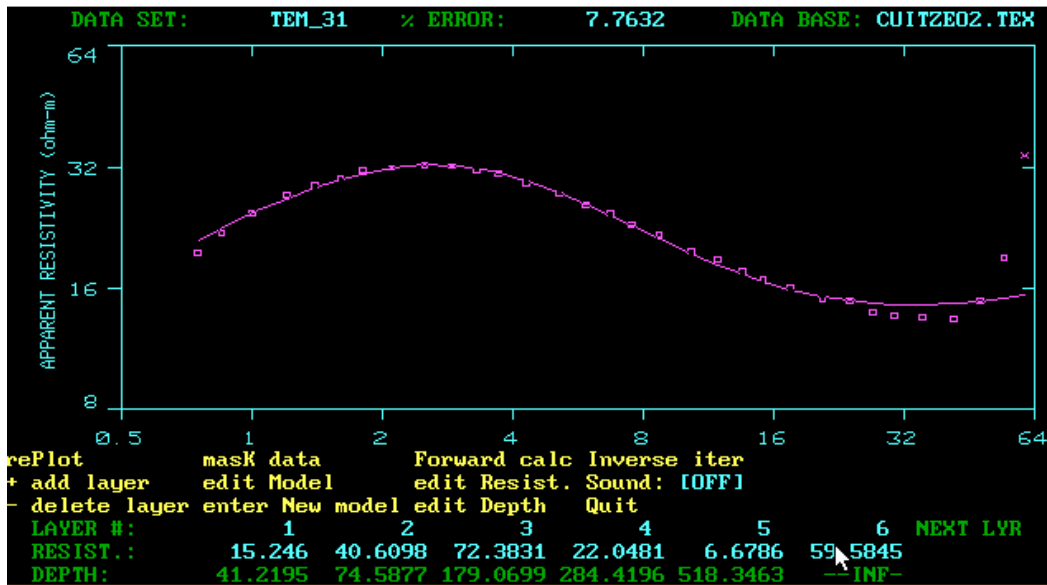


Figura 4.8. Curva de resistividad con ajustada de acuerdo con el modelo de capas.

#### 4.2.2 Procesado de datos

En el software de WingLink (TM) fueron recalibrados los modelos de capas previamente realizados en base a la litología de la zona de estudio. Se colocaron los TEMs sobre el plano litológico de la zona de estudio, para tener una mejor visualización de la litología que predomina en cada uno de los sondeos.

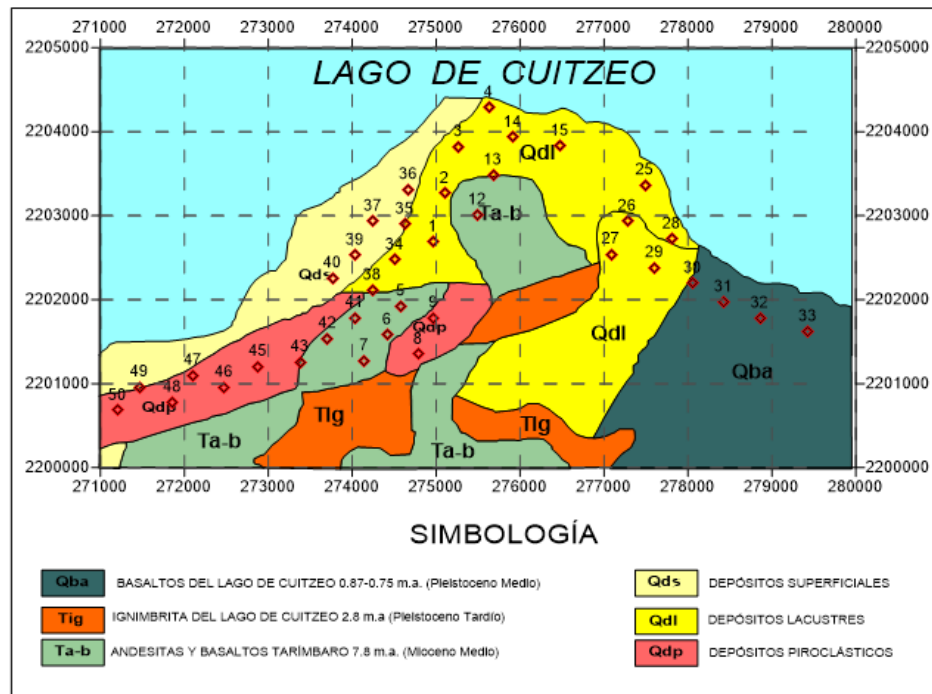


Figura 4.9. TEMs realizados sobre el plano de la geología local de la zona de estudio.  
Fuente: CFE (2011), p.42.

Para cada uno de los sondeos TEM se obtuvo un modelo suavizado utilizando la inversión de Occam, la cual busca generar un modelo que describa de la mejor manera posible los datos obtenidos en campo. Para generar dicho modelo se considera una profundidad mínima y una máxima que están basadas en los modelos de capas obtenidos previamente en TEMIXS. La resistividad inicial del modelo se introduce de acuerdo al comportamiento de la curva, mientras que el número de capas, el número de iteraciones y el error máximo nos proporcionan un modelo más cercano a los datos de campo.

A partir del modelo anterior se genera una curva de resistividad aparente contra tiempo que se ajustará de mejor manera a los puntos de los datos de campo y al comportamiento de las curvas, como se observa en la figura 4.10. Este ajuste se realiza de manera que las capas del modelo de los datos de campo muestren el mismo comportamiento que el modelo Occam en cuanto a resistividad y profundidad.

Las curvas y el modelo de capas correspondientes a cada sondeo TEM se pueden observar en el anexo C.

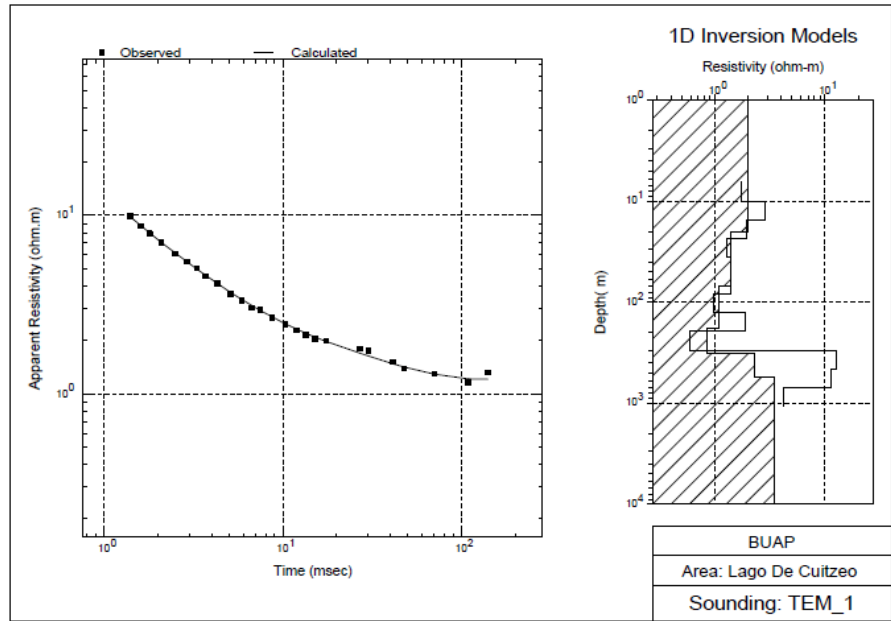


Figura 4.10. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 1.

Los resultados y procesos, así como las coordenadas y elevaciones de los centros de los loops, sirvieron para realizar los perfiles longitudinales y transversales, los cuales se trazaron de manera que cruzaran transversalmente a las fallas existentes en la zona de estudio. A partir de ellos se crearon las secciones de resistividad, las cuales tienen su fundamento en el hecho de que los sondeos TEMs muestran resistividades en profundidad, al agrupar varios de ellos se crea un mallado de datos, estos se interpolan, para así obtener la sección con resistividades que se muestran de manera continua horizontal y verticalmente.

#### 4.3 Modelo Digital de Elevaciones

Para obtener una mejor visualización de la topografía de la zona de estudio se descargó un Modelo Digital de Elevaciones (DEM por sus siglas en inglés) del estado de Michoacán (Figura 4.11) de la página web del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Dicho modelo fue adecuado a una nueva escala para la zona de estudio (Figura 4.12) en el software Global Mapper ©. Posteriormente este modelo fue exportado e importado a

WingLink (TM) para que así las secciones resultantes mostrarán una topografía más detallada.

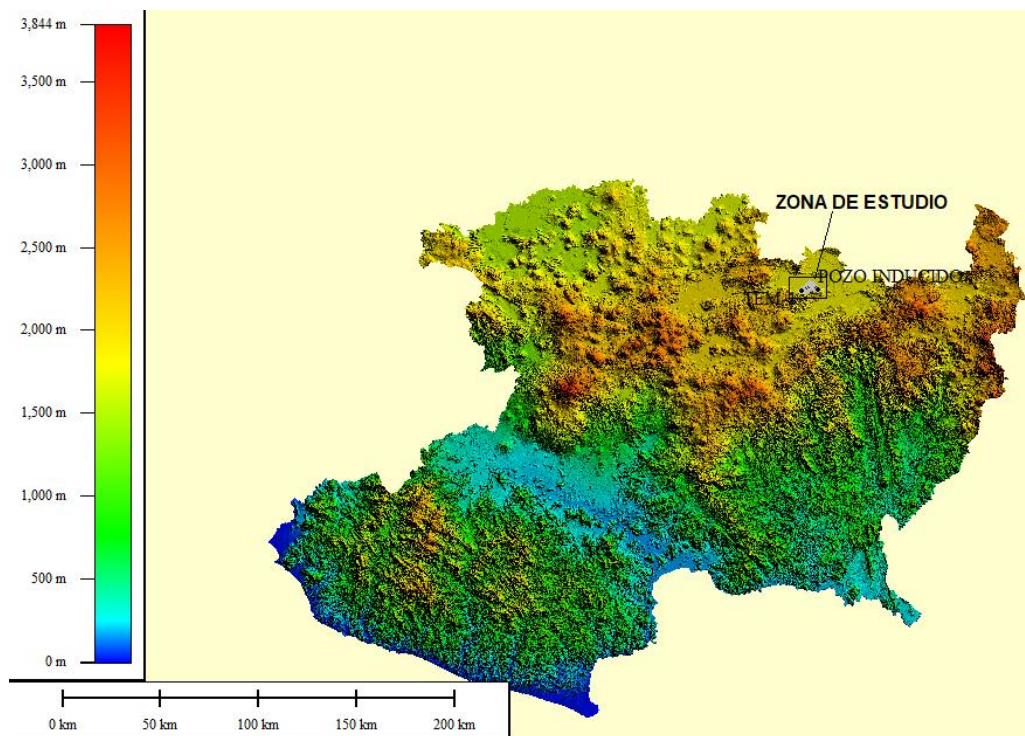


Figura 4.11: Modelo Digital de Elevaciones del estado de Michoacán.  
Fuente: INEGI (2014), recuperado de <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>

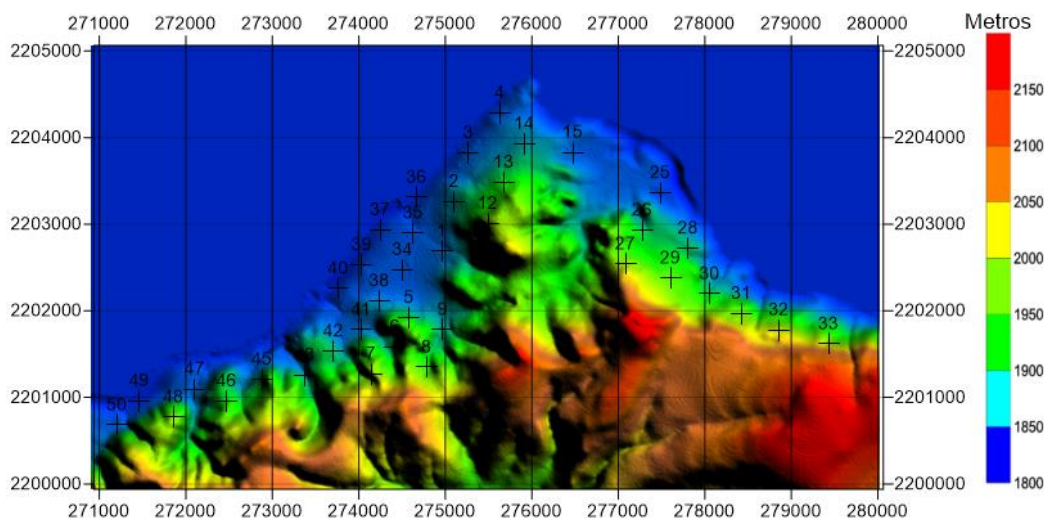


Figura 4.12: Modelo Digital de Elevaciones de la zona de estudio.

#### 4.4 Distribución de los sondeos y perfiles trazados

En la zona de estudio ubicada en las localidades de SAM y SJT se realizaron 38 TEM. Con dichos sondeos se trazaron 18 perfiles, de los cuales 8 tienen una orientación N-S, 5 son transversales atravesando la zona de estudio con dirección NE-SW, y los 5 restantes también transversales con dirección NW-SE.

La distribución de los sondeos y los perfiles trazados se muestran en el siguiente mapa que incluye el Modelo Digital de Elevaciones de la zona de estudio.

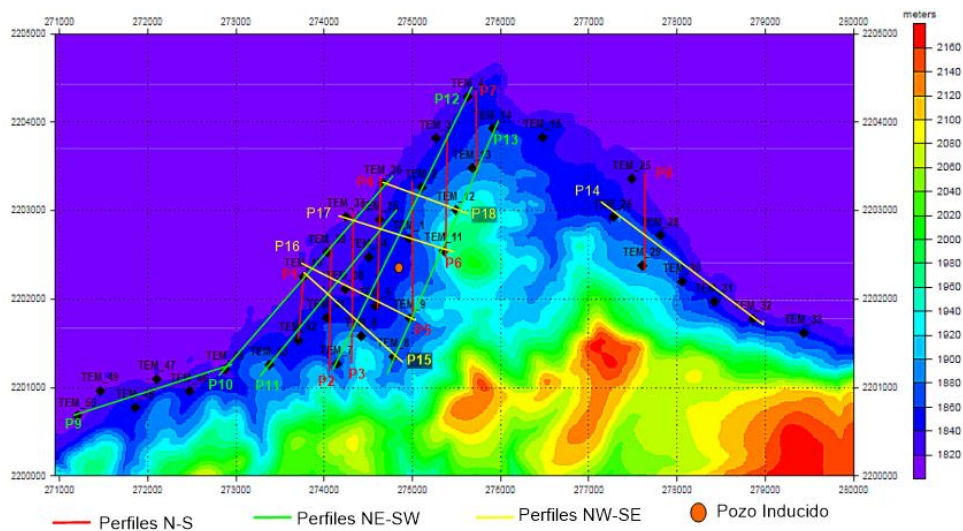


Figura 4.13. Distribución de los sondeos TEM y perfiles trazados en la zona de estudio sobre el DEM importado en WingLink (TM).

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS

### 5.1 PERFILES GEOELÉCTRICOS DE LOS SONDEOS TEM

Estos perfiles geoelectricos presentan una escala de resistividad que se normalizó de 0 a 700 Ohm-m, sin embargo, en las descripciones se mencionarán los rangos de resistividades que originalmente alcanzaron cada uno de estos perfiles.

#### 5.1.1 Perfiles Geoelectricos N-S.

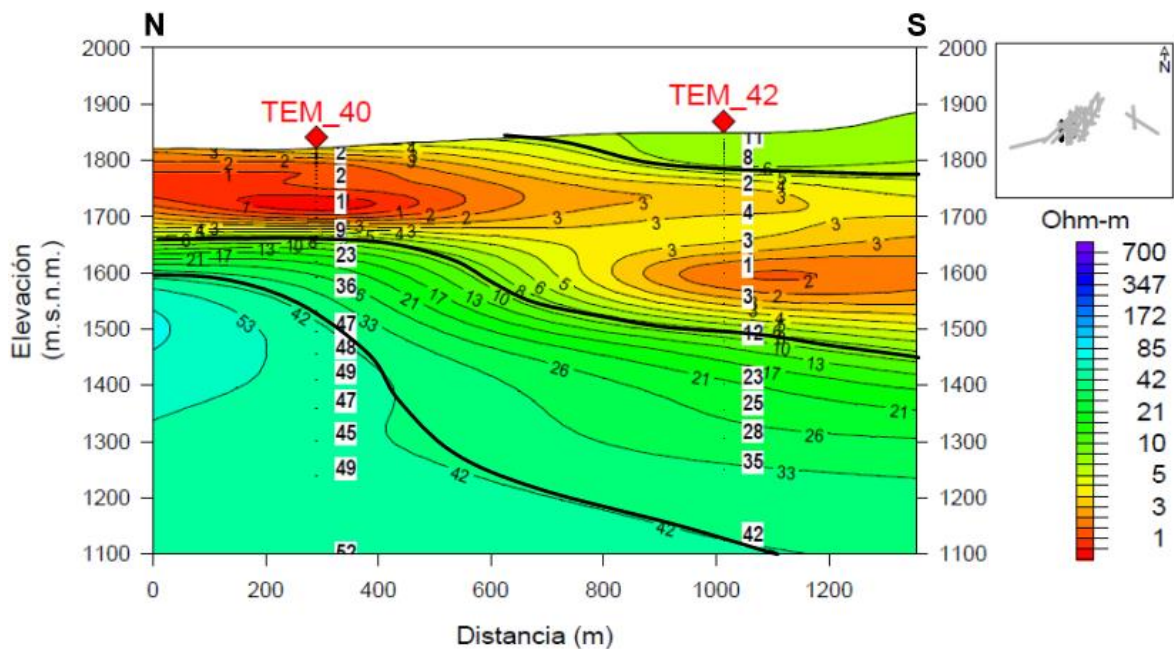


Figura 5.1: Perfil Geoelectrico 1

El perfil geoelectrico 1 está conformado por dos estaciones TEM (40 y 42), ubicado en la porción centro-oeste de la zona de estudio, una extensión lateral de poco más de 1.3 km y alcanza una profundidad de 700 m aproximadamente. Sus resistividades van de bajas a intermedias, siendo su mayor valor 52 Ohm-m.

En superficie existe un paquete con resistividades de 5 a 11 Ohm-m., ubicándose en la porción sur del perfil, con un espesor de apenas 100 m y una extensión lateral aproximada de 700 m.

Debajo del paquete anterior existe un paquete conductor, en colores rojo, naranja y amarillo, cuyas resistividades van de 1 a 10 Ohm-m, la cual se manifiesta en la porción

norte de manera superficial, con un espesor de 100 m se extiende hacia el sur mostrando un desnivel a lo largo de la sección y presentándose en la porción sur desde los 1700 msnm con una profundidad de 200 m profundidad.

Subyaciendo al paquete anterior se presenta un segundo paquete con resistividades bajas-intermedias de los 5-36 Ohm-m, se vuelve a observar debajo de las bajas resistividades alcanzando más de 300 m de espesor en su parte más ancha.

Por último se observa un paquete en azul claro con resistividades de 42 a 53 Ohm-m, el cual presenta un espesor de más de 400 m que se va reduciendo hacia el sur del perfil.

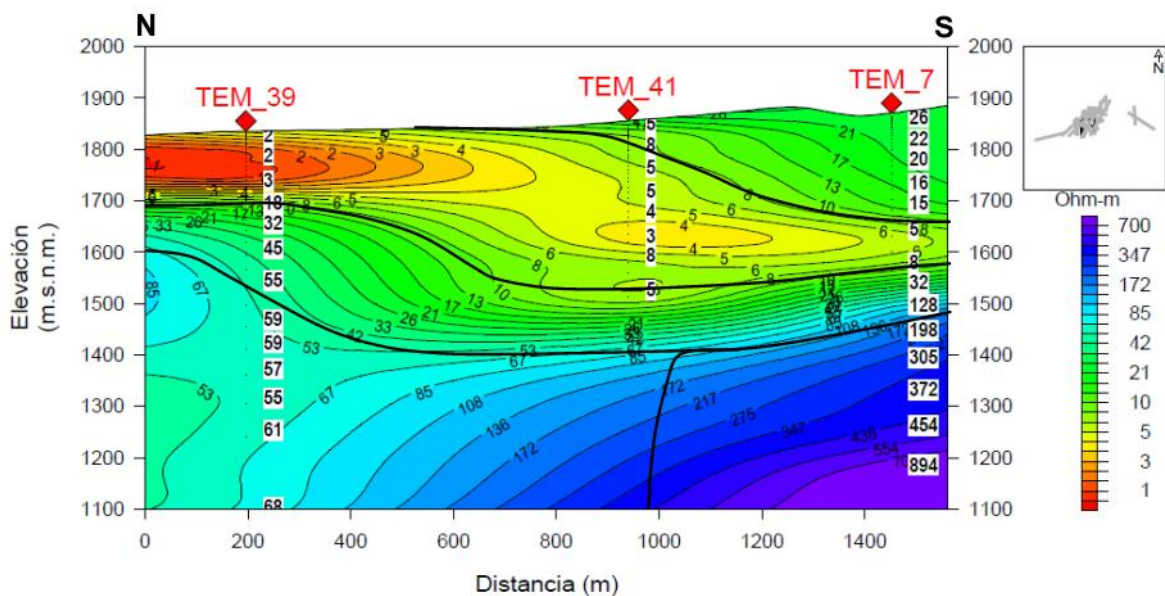


Figura 5.2: Perfil Geoeléctrico 2

El perfil 2, que se encuentra ubicado en la porción centro-oeste de la zona de estudio, está compuesto por 3 estaciones TEM (39, 41 y 7), una extensión de 1.5 km y un espesor promedio de 700 m. Presenta una resistividad máxima de 894 Ohm-m.

En superficie existe un paquete con resistividades de 8 a 26 Ohm-m., ubicándose en la porción sur del perfil, con un espesor de apenas 200 m y una extensión lateral aproximada de 900 m.

Subyaciendo al paquete anterior, está presente un paquete conductor representado en colores rojo, naranja y amarillo, que se puede observar al norte del perfil en su parte superficial con un espesor variable de 100 a 300 m, extendiéndose por 1.5 km, este paquete tiene resistividades que van de 1 a 10 Ohm-m.

Debajo del paquete anterior un segundo paquete que se observa tiene resistividades de 18-32 Ohm-m., en colores verde, está presente desde la porción norte a sur del perfil, con un espesor promedio de 100 m, y se extiende a lo largo de 1.5 km.

Subyaciendo a los paquetes anteriores, en colores azul claro, se encuentra un paquete con resistividades de 45 a 68 Ohm-m, con un espesor que va de 500 a 300 m de norte a sur y una extensión lateral de 1 km aproximadamente.

Adyaciendo al paquete anterior se encuentra un paquete con resistividades de 128 a 894 Ohm-m, en colores azul y morado, el cual muestra un espesor de entre 400 y 500 m y una extensión lateral de 500 m.

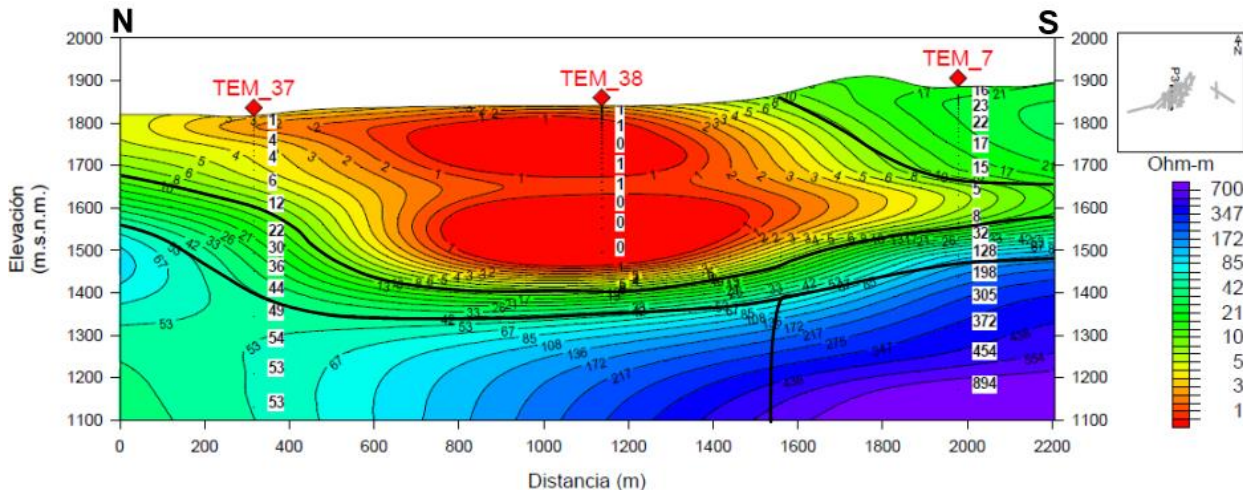


Figura 5.3: Perfil Geoelectrico 3

El perfil 3 está conformado por 3 estaciones, siendo los TEMs (37,38 y 7), ubicado en la porción centro-oeste de la zona de estudio, con una extensión de 2.2 km y una profundidad de 700 m, presenta un amplio rango de resistividades que van hasta los 894 Ohm-m.

En superficie existe un paquete con resistividades de 8 a 23 Ohm-m., ubicándose en la porción sur del perfil, con un espesor de apenas 200 m que se va reduciendo hacia el norte y una extensión lateral aproximada de 600 m.

Subyaciendo al paquete anterior, existe un paquete muy notorio con resistividades de 1-10 Ohm-m, observándose con colores rojo, naranja y amarillo, en la porción central del perfil, extendiéndose en menor medida hacia el norte y sur, logrando un espesor de 300 m en su parte más ancha, pero disminuyendo su extensión lateral conforme aumenta la profundidad.

Las resistividades medias (22-44 Ohm-m), están subyaciendo a los materiales anteriores con color verde, se encuentran bordeando al conductor desde la porción norte hasta la porción sur, con un espesor promedio de 100 m, y se extiende a lo largo de 2.2 km.

El paquete de resistividades de 49 a 54 Ohm-m, en color verde y azul claro se encuentra presente en profundidad desde la parte norte con una extensión lateral de poco más de 1.5 km y un espesor de 450 a 300 m.

Adyacente al paquete anterior, en color azul y morado, se encuentra el paquete de altas resistividades (128-894 Ohm-m), con una extensión lateral de 700 m y un espesor que va de los 300 a los 400 m de norte a sur.

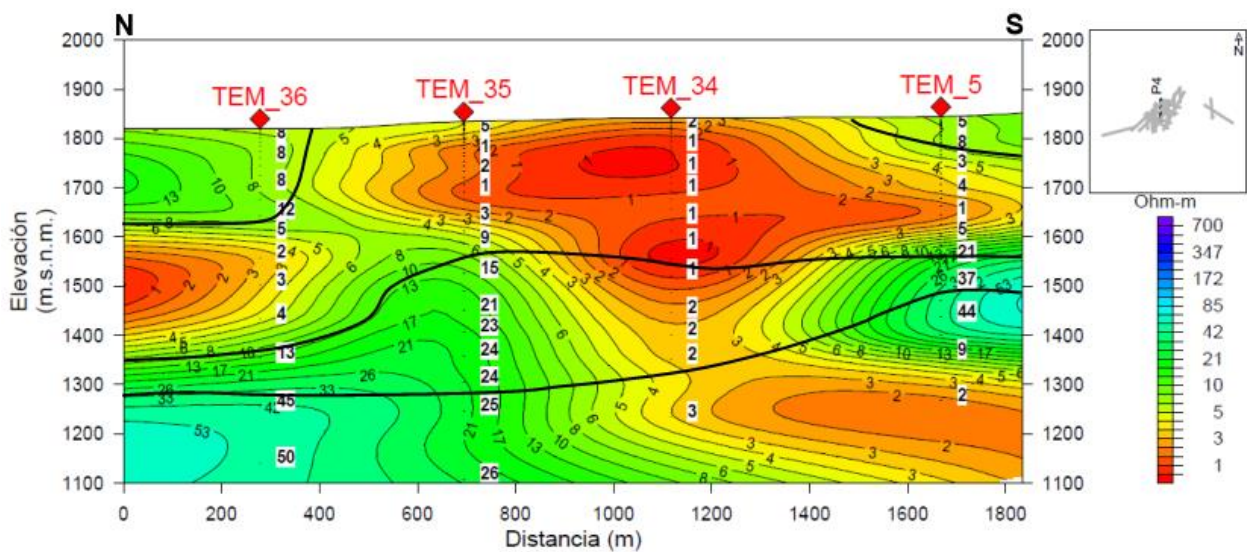


Figura 5.4: Perfil Geoelectrico 4

La sección correspondiente al perfil 4 se conforma por 4 sondeos TEM (36, 35, 34 y 5), está ubicada en el centro de la zona de estudio, tiene una orientación N-S, alcanzó una profundidad de 700 m aproximadamente y cuenta con una extensión de 1.8 km. Es importante mencionar que este perfil es uno de los que se encuentra más cercano al pozo inducido en donde sucedió la manifestación hidrotermal de la zona de estudio. Esta sección se caracterizó por ser baja en resistividades, originalmente siendo su máximo 50 Ohm-m.

En la parte superficial se pueden observar 2 paquetes cuyas resistividades van de 7 a 13 Ohm-m, representados en color verde; uno se encuentra en parte norte del perfil con 200 m de espesor y 400 de extensión lateral y el otro en la porción sur con menos de 100 m de espesor y 500 m de extensión lateral.

En la parte central se observa un paquete de bajas resistividades, de 1 a 10 Ohm-m, representado en colores rojo, naranja y amarillo, con un espesor de 250 m en promedio, extendiéndose hacia la porción sur en donde disminuye su espesor a 200 m, también se extiende hacia la parte norte, pero de menor manera.

Subyaciendo al paquete anterior se encuentra un paquete con resistividades de 10 a 24 Ohm-m, en color verde, con un espesor variable entre 100 y 250 m en su parte más ancha, se extiende a lo largo de 1.8 km.

Por último, un paquete en color verde y azul claro, que muestra resistividades de 25 a 50 Ohm.m, con un espesor que va de 180 a 400 m de norte a sur, y una extensión lateral de 1.8 km.

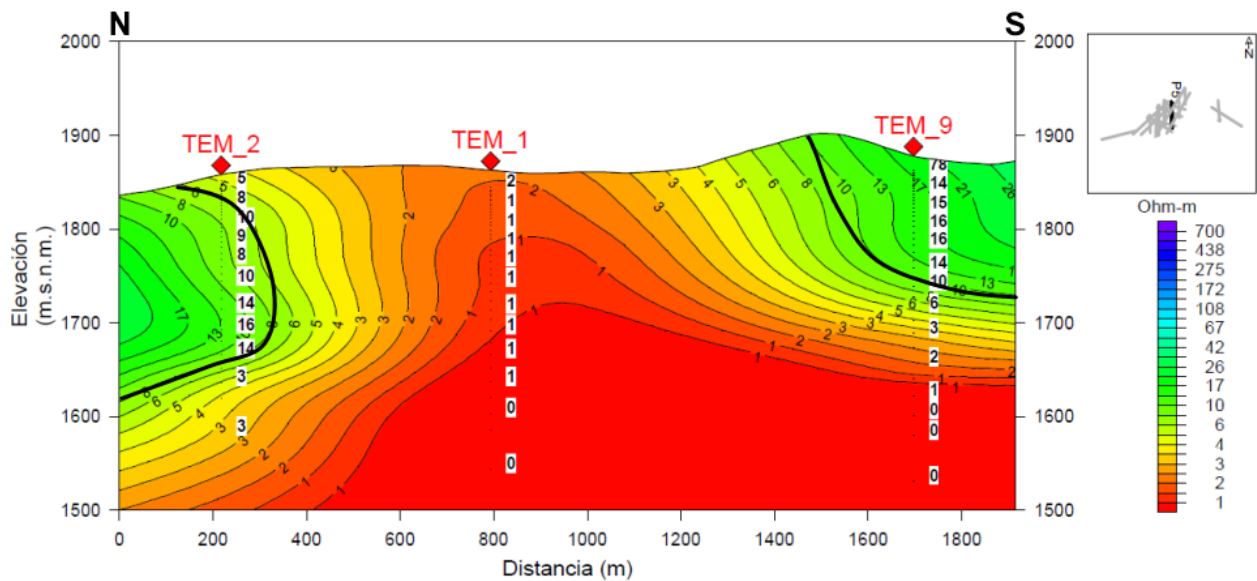


Figura 5.5: Perfil Geoeléctrico 5

La sección del perfil 5 es uno de los más cercanos al pozo inducido en dónde sucedió la manifestación hidrotermal. Se localiza en la parte central de la zona de estudio, está conformado por 3 sondeos TEM (2, 1 y 9), alcanzó apenas los 400 m de profundidad en promedio, y presenta una extensión 1.9 km aproximadamente. Al igual que la sección 4, se caracteriza por presentar bajas resistividades que van hasta los 16 Ohm-m como máximo.

En superficie se presentan dos paquetes con resistividades de 5 a 14 Ohm-m; uno en la porción norte del perfil con 200 m de espesor y 250 m de extensión lateral, y otro en la porción sur con 150 m de espesor aproximadamente y 400 m de extensión lateral.

Subyaciendo y adyaciendo a las unidades anteriores, se presenta un paquete con resistividades 1 a 10 Ohm-m, en color rojo, amarillo y naranja; dicho paquete se extiende desde el centro en superficie hasta 1500 msnm. El cuerpo conductor antes mencionado se extiende hacia los extremos de la sección, alcanzando en la porción norte un espesor de 100 m, en la parte central de hasta 380 m y en la porción sur 150 m.

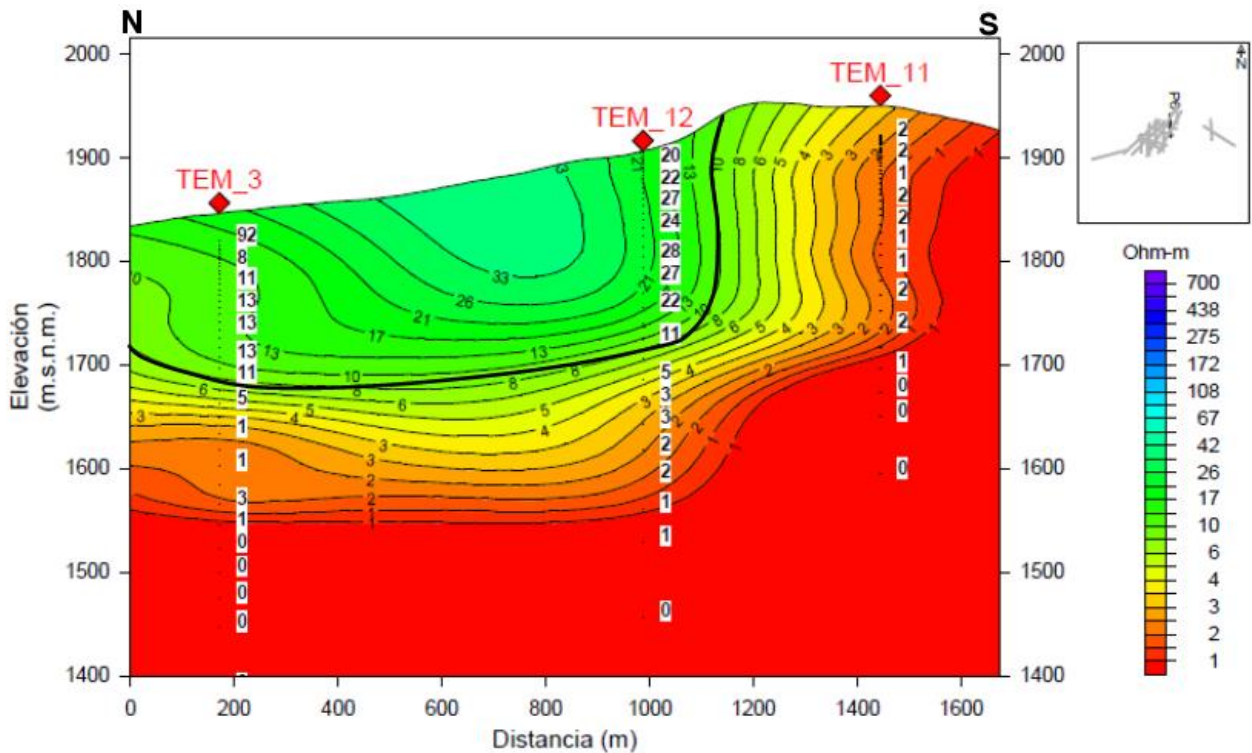


Figura 5.6: Perfil Geoeléctrico 6

Se encuentra al centro de la zona de estudio, alcanza una profundidad de 500 m desde su parte más alta y muestra una extensión lateral de poco más de 1.6 km. Está compuesta por 3 sondeos TEM (3, 12 y 11). Sus resistividades son en general bajas, siendo el máximo 92 Ohm-m.

El primer paquete que se presenta en superficie es de resistividades de 10-28 Ohm-m, en color verde, en el norte del perfil con una extensión de poco más de 1.2 km y un espesor menor a 200 m, extendiéndose hacia el sur y conservando su espesor.

Debajo del paquete anterior se presenta claramente un cuerpo conductor (1-10 Ohm-m) en colores amarillo, naranja y rojo, que se extiende de manera lateral de norte a sur, abarcando la mayor parte del área. En la porción norte se presenta a partir de los 1650 m.s.n.m., mientras que en la porción sur está presente desde la superficie. Es decir, en la parte norte se muestra un espesor de 250 m mientras que en la sur se alcanzan los 500 m.

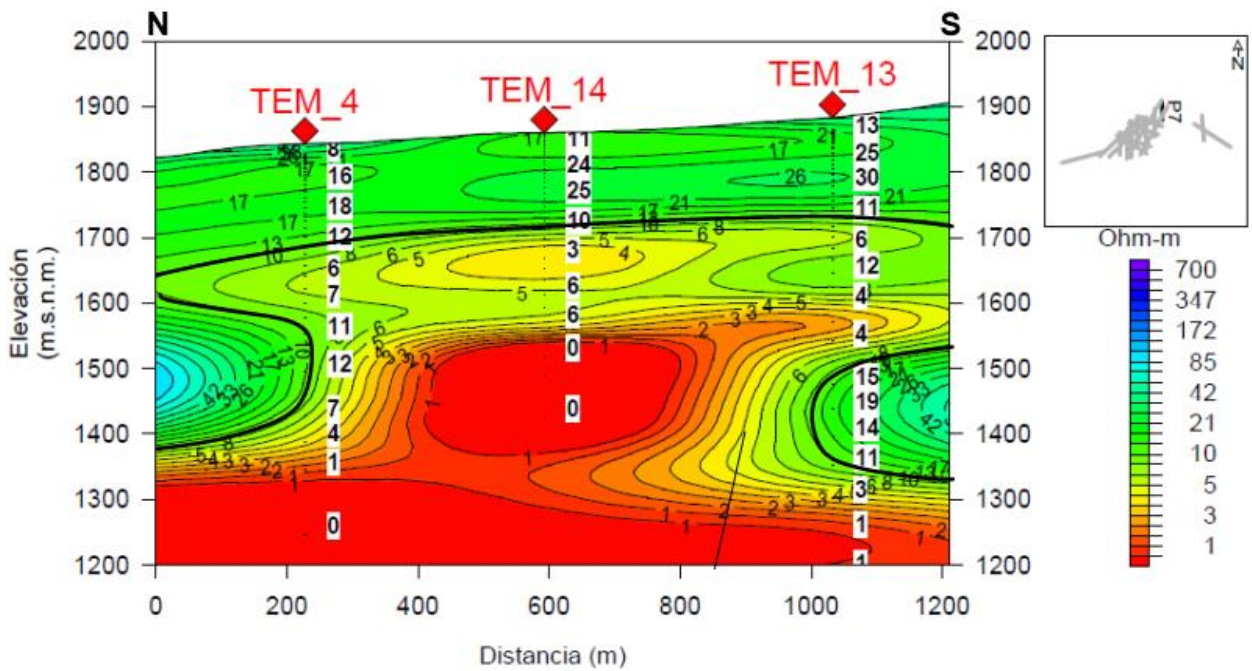


Figura 5.7: Perfil Geoeléctrico 7

Este perfil está compuesto por 3 sondeos, los TEMs 4, 14 y 13, ubicado en la zona centro-este de la zona de estudio, cuenta con 1.2 km de extensión lateral, 700 m de profundidad y resistividades bajas a intermedias, presentando como máximo 30 Ohm-m.

Superficialmente está presente un paquete con resistividades de 8 a 30 Ohm-m, representado en color verde, que se presenta en superficie alcanzando poco más de 200 m de espesor.

Subyaciendo al paquete anterior existe un paquete con resistividades 1 a 10 Ohm-m, presente en colores rojo, amarillo y naranja, con un espesor que aumenta de norte a sur de 340 hasta más de 500 m.

El paquete anterior es interrumpido en sus extremos N y S por dos paquetes de resistividades de 11 a 19 Ohm-m, con un espesor de 200 m.

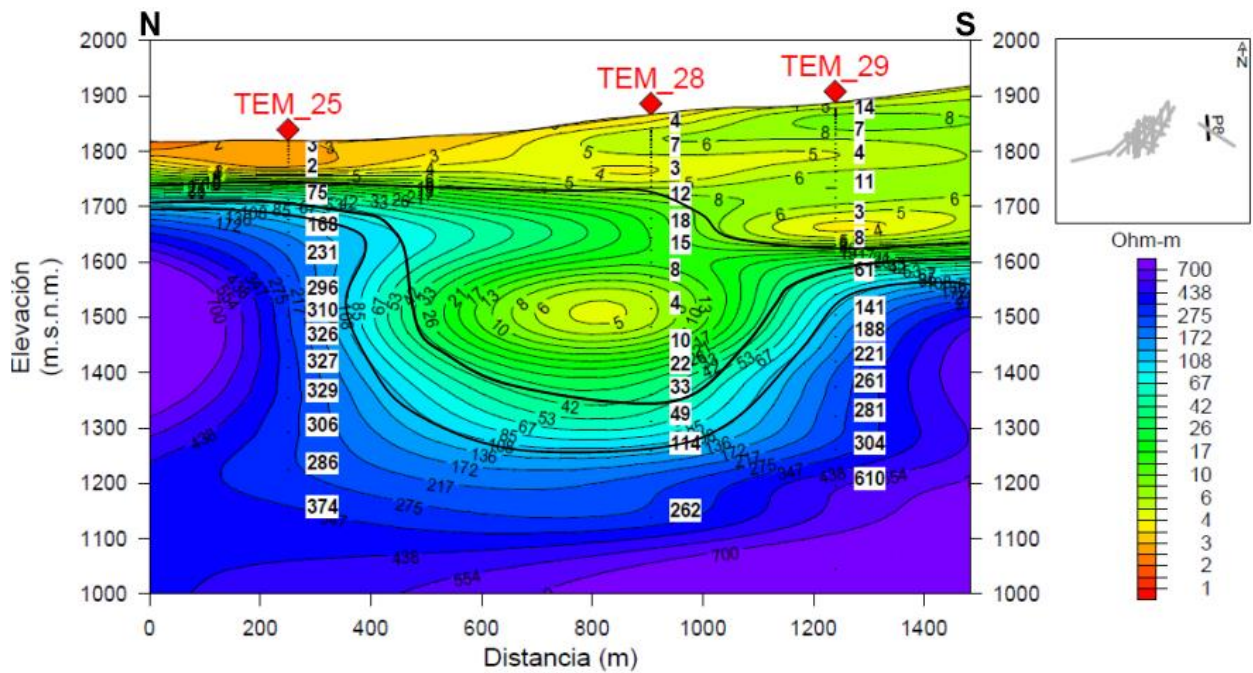


Figura 5.8: Perfil Geoeléctrico 8

El perfil 8 solamente consta de tres sondeos TEM (25, 28 y 29), y se encuentra ubicado en la porción oriente de la zona de estudio. Cuenta con una profundidad de 800 m desde su parte más alta y una extensión de 1.5 km aproximadamente. Su rango de resistividades es amplio ya que va hasta los 610 Ohm-m.

El paquete de bajas resistividades, de 1 a 10 Ohm-m es la que corona esta sección encontrándose desde superficie, con colores naranja, verde y amarillo, con un espesor de 100 m a 300 m.

Las resistividades de 12 a 33 m, representadas en color verde, son las que se encuentran por debajo del conductor esta sección con un espesor que alcanza los 300 m.

Subyaciendo al paquete anterior se encuentra un paquete con resistividades de 49 a 175 Ohm-m, representado en color azul claro, y con un espesor promedio de 100 m.

Por debajo de los paquetes mencionados anteriormente están presentes resistividades que aumentan considerablemente (141-610 Ohm-m) conforme aumenta la profundidad, en colores azul marino y morado, en el extremo sur pudiéndose observar con un espesor de 700 m, en la porción centro con apenas 300 m de espesor y en el extremo norte alcanzando los 600 m de espesor.

### 5.1.2 Perfiles Geoeléctricos NE-SW

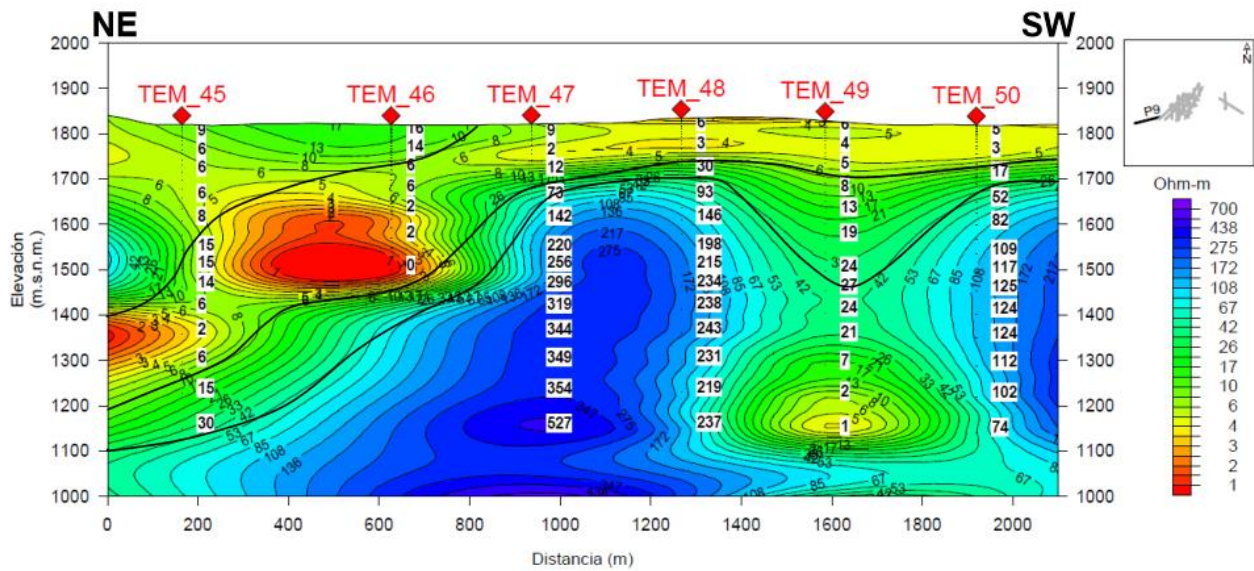


Figura 5.9: Perfil Geoeléctrico 9

Este perfil está conformado por 6 sondeos, los TEMs 45, 46, 47, 48, 49 y 50, se encuentra ubicado en la parte SW de la zona de estudio, tiene una extensión mayor a los 2 km y una profundidad de 800 m en promedio. Cuenta con un rango de resistividades que va desde 1 hasta 527 Ohm-m.

En el extremo NE existe un paquete de resistividades bajas (6-15 Ohm-m), en color verde, con un espesor de 400 m que se reduce hacia el SW en una extensión de 800 m.

En la parte superior también se pueden observar un paquete resistividades muy bajas que van desde 1 hasta 10 Ohm-m, representadas en colores rojo y amarillo, los cuales se extienden de NE a SW, con un espesor de 200 m que se reduce a los 100 al final del perfil.

Subyaciendo a este paquete está presente otro de resistividades medias de 8 a 30 Ohm-m en colores verde y azul claro, este varía su profundidad a lo largo del perfil, presentándose al NE a los 1200 m.s.n.m. y en la parte SW a los 1700 m.s.n.m. con espesores que van desde 100 hasta 300 m.

Por último, subyaciendo a la capas anteriores se presentan los materiales con resistividades altas, que van de 52 a 527 Ohm-m, en color azul marino, predominando

en la parte central y SW del perfil, extendiéndose en profundidad con espesores de hasta 600 m.

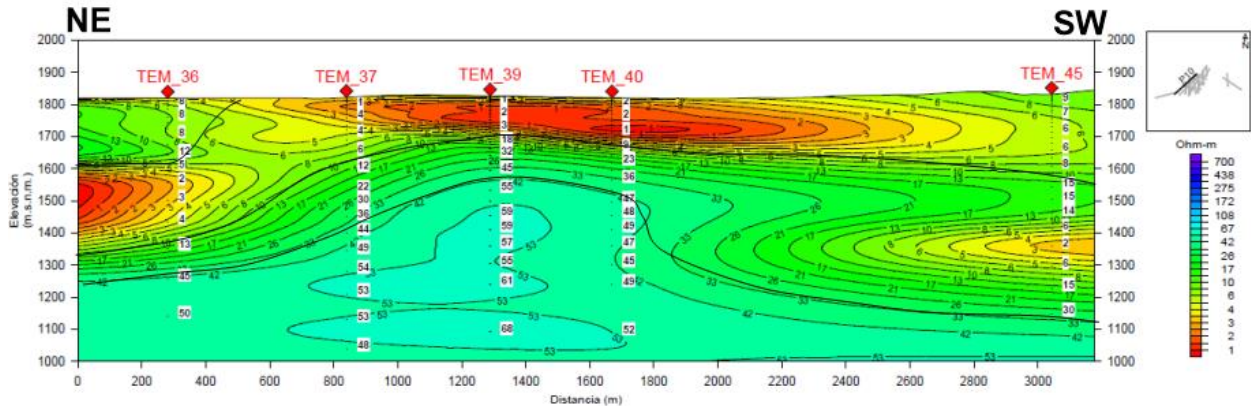


Figura 5.10: Perfil Geoeléctrico 10

Constituido por 5 sondeos, los TEMs 36, 37, 39, 40 y 45, ubicado en la parte oeste de la zona de estudio, el perfil 10 tiene poco más de 3.1 km de longitud y alcanza 700 m de profundidad en promedio. Su rango de resistividades va hasta los 68 Ohm-m.

En el extremo NE existe un paquete de resistividades bajas (8-12 Ohm-m), en color verde, con un espesor de 200 m que se reduce hacia el SW en una extensión de 400 m.

Un paquete de resistividades de 1 a 10 Ohm-m está presente en superficie desde la porción NE del perfil a los 1600 m.s.n.m. con un espesor de 200 m, en la parte central se encuentra completamente en superficie con un espesor de 150 m el cual aumenta hasta la porción SW hasta alcanzar los 200 m.

Existe un paquete de resistividades de 12 a 45 Ohm-m subyaciendo al anterior, representado en color verde, con un espesor que aumenta de los 100 a los 450 m de NE a SW.

Por último, un paquete de resistividades de 44-68 Ohm-m se encuentra subyaciendo a los anteriores, está representado en color verde y azul claro, con un espesor que varía entre 200, 500 y 100, en las partes NW, centro y SW del perfil, respectivamente.

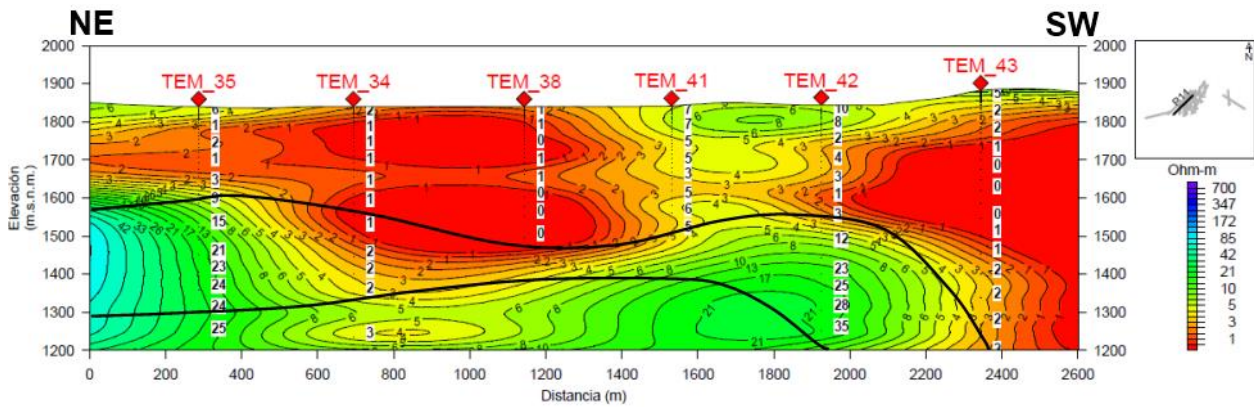


Figura 5.11: Perfil Geoeléctrico 11

Con una profundidad de 700 m en promedio, ubicado en la parte centro-oeste de la zona de estudio y una extensión lateral de 2.6 km, el perfil geoelectrico 11 está conformada por 7 sondeos (TEM 35, TEM 34, TEM 38, TEM 41, TEM 42, TEM 43), los cuales se caracterizan por presentar resistividades predominantemente bajas que incrementan ligeramente en profundidad de la sección alcanzando un máximo de 53 Ohm-m.

Superficialmente el paquete conductor es visiblemente predominante, representado en colores rojo, naranja y amarillo, con resistividades de 1 a 10 Ohm-m, se extiende a lo largo del perfil mostrando espesores de 300 m en la parte NE hasta los 700 m en el extremo SW.

Subyaciendo al paquete anterior existe un cuerpo de resistividades, de 10 a 23 Ohm-m, en colores verde y azul claro, se encuentra presente desde la porción NE del perfil con un espesor de 350 m que varía a lo largo del perfil.

Por último, existe un paquete con resistividades de 25 a 53 Ohm-m, en color azul claro que presenta un espesor variable entre 100 y 200 m y se extiende a lo largo de 1.9 km aproximadamente.

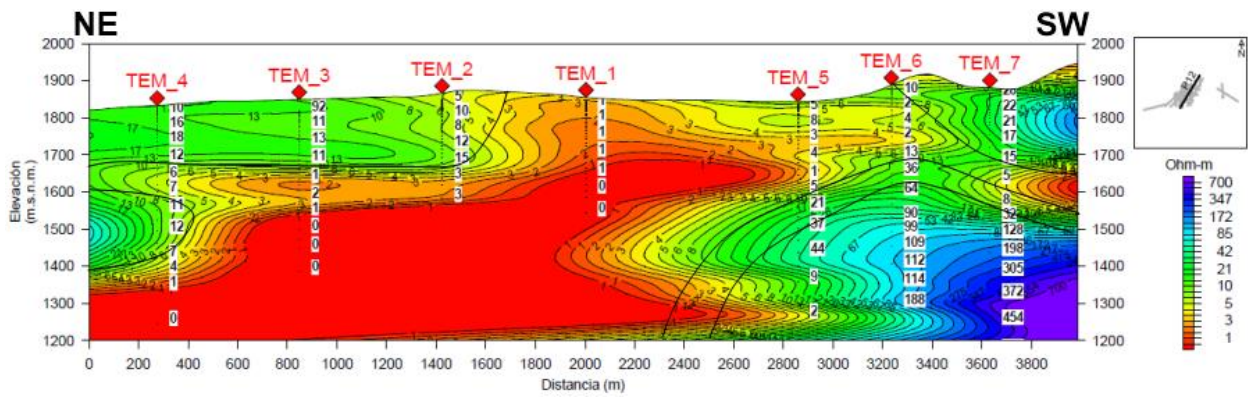


Figura 5.12: Perfil geoelectrico 12

El perfil geoelectrico 12 está ubicado en la parte central de la zona de estudio, constituido por 7 estaciones, siendo estas los TEM (4, 3, 2, 1, 5, 6 y 7), cuenta con una extensión de 3.9 km y una profundidad poco mayor a los 700 m. Este perfil corta el sitio en dónde se localiza el pozo inducido que presentó la manifestación hidrotermal. El rango de sus resistividades va desde 1 hasta 454 Ohm-m localizado en el TEM 7.

Superficialmente existe un paquete de resistividades de 10-92 Ohm-m, en color verde, que tiene un espesor promedio de 200 m y una extensión que comienza en la parte NE de poco más de 1.6 km.

En el extremo SW, en color verde y azul claro, existe un paquete de resistividades de 19 a 22 Ohm-m, el cual tiene un espesor de 300 m y se acuña hacia en NE a lo largo de 500 m.

El paquete que se observa en colores rojo, naranja y amarillo, representa las bajas resistividades de 1 a 10 Ohm-m, predomina en la parte central del perfil es un conductor que está presente entre los TEMs 5 y 1, este paquete se extiende desde la superficie hasta alcanzar los 700 m de espesor, alcanzando los 2.3 km de manera homogénea, pero llegando a extenderse hasta el final del perfil con un espesor mucho menor.

Existe un paquete con resistividades de 11-12 Ohm-m, en el extremo NE, con 200 m de espesor y 400 m de extensión, se observa en color verde.

Un paquete, con un espesor de entre 50 y 200, en color verde (13-36 Ohm-m), se extiende a lo largo de 1500 m hacia el NE-SW.

Por último, subyaciendo a los paquetes anteriores en la porción SW, está presente un paquete con un rango de resistividades de 9 a 454 Ohm-m que aumentan de NE a SW, está representado en colores verde, azul y morado, y tiene un espesor de 400 m en su parte más ancha, con una extensión lateral de 1.3 km.

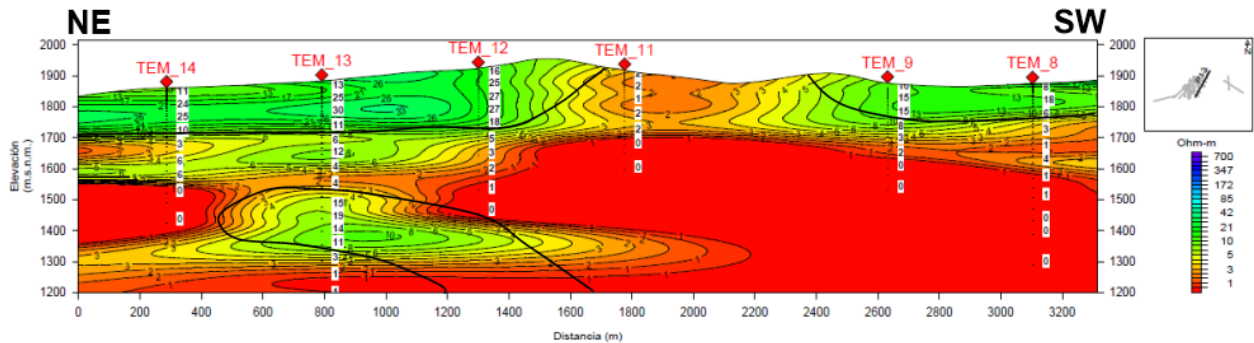


Figura 5.13: Perfil geoelectrico 13

El perfil 13 está compuesto por 6 estaciones, siendo los TEM 14, 13, 12, 11, 9 y 8, está ubicado en la porción centro de la zona de estudio, tiene una extensión de 3.3 km, una profundidad de 700 m en promedio y está caracterizado por presentar resistividades bajas, mostrando un máximo de 30 Ohm-m. Cabe mencionar que este perfil se encuentra en las inmediaciones del pozo inducido en donde se presentó la manifestación hidrotermal.

Desde la porción NE en superficie está presente un paquete de resistividades de 11 a 30 Ohm-m, observándose en colores verdes, con un espesor de 100 m que aumenta en la parte central a 200 m.

En el extremo SW existe un paquete con resistividades de 8-18 Ohm-m, con un espesor de 100 y una extensión lateral de 900 m.

El paquete de bajas resistividades (1-10 Ohm-m) está presente en la mayor parte del modelo; en la porción NW teniendo un espesor de 500 m en promedio y siendo interrumpido por un paquete de mayores resistividades; en la parte central alcanzando su mayor espesor de 700 m y disminuyendo a 600 m en la porción SW.

Un paquete de resistividades de 11 a 19 Ohm-m se extiende debajo de los TEMs, 12, 13 y 14, con un espesor de 200 a 400 m y una extensión lateral de 1.2 km.

### 5.1.3 Perfiles Geoeléctricos NW-SE

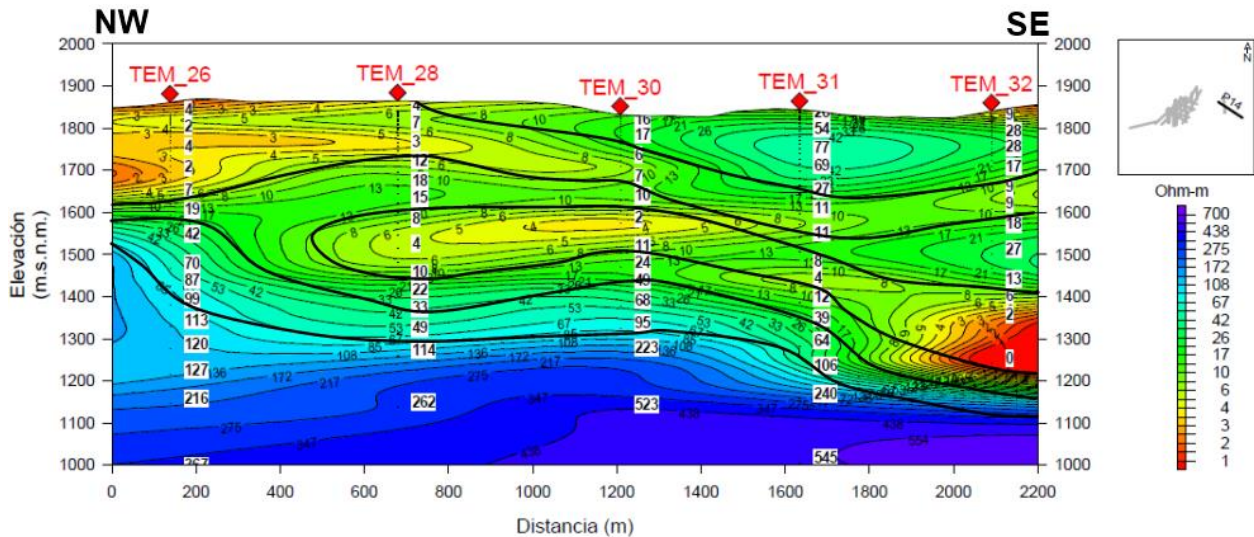


Figura 5.14: Perfil Geoelectrico 14

El perfil geoelectrico 14 consta de 6 sondeos TEM (26, 28, 30, 31 y 32), los cuales alcanzaron los 850 m de profundidad en promedio, está ubicado en la parte oriente de la zona de estudio, extendiéndose por poco más de 2.2 km, y su rango de resistividades es amplio, llegando a un máximo de 545 Ohm-m.

Superficialmente las resistividades medias (9-28 Ohm-m), en colores verdes y azul claro, se presentan en la mayor parte del área, desde la porción NW, sobreyaciendo a la unidad con resistividades bajas con un espesor que va de menos desde los 150 m y se acuña en sus 1400 m de extensión lateral.

Los materiales de baja resistividad (1-10 Ohm-m), representados en colores rojos y naranja, se hacen presentes en los dos extremos del perfil y de menor manera en la porción central del perfil. En la parte NW se observa en superficie con 250 m de espesor, que se reduce hacia el SE. Un segundo paquete de bajas resistividades está presente desde el SE al NW con 200 m de espesor y 1700 m de extensión lateral.

Un paquete de resistividades de 12 a 39 Ohm-m, se extiende a lo largo del modelo con un espesor que varía desde los 20 a los 200 m, se encuentra circundando al paquete de bajas resistividades.

Subyaciendo al paquete anterior existe un paquete en color azul claro con resistividades de 42 a 99 Ohm-m, con un espesor de 50 m en su parte más angosta hasta 200 m en su parte más ancha.

Por último, un paquete de altas resistividades (113-545 Ohm-m), en color azul y morado, muestra un espesor de 500 m en su extremo NW que se va reduciendo gradualmente hasta llegar a los 100 m en la porción SE.

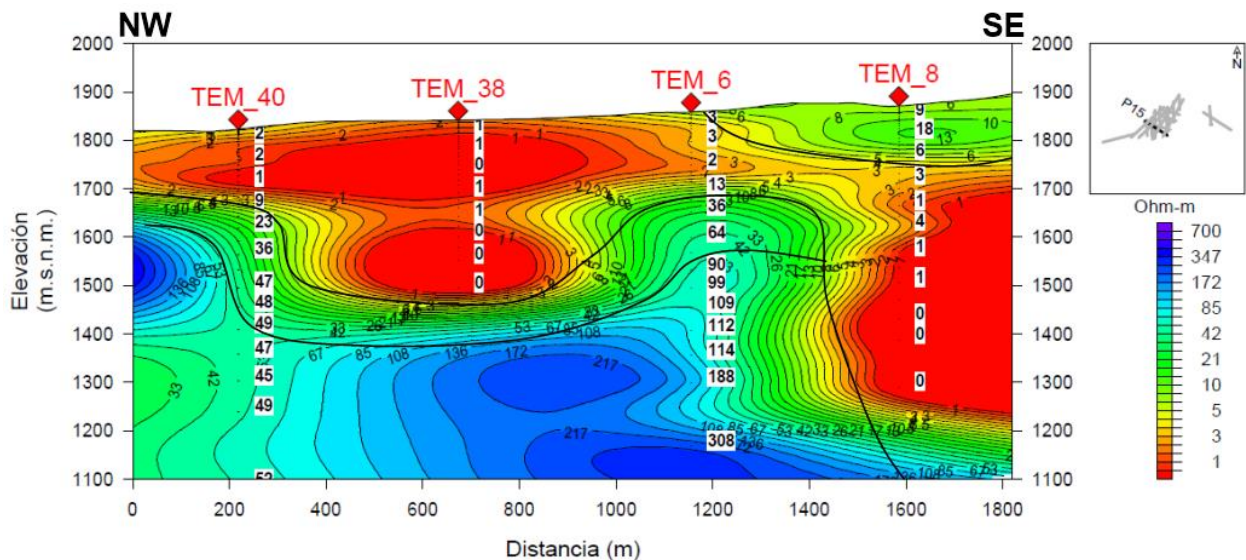


Figura 5.15: Perfil geoelectrico 15

Este perfil se encuentra en la porción centro-oriental de la zona de estudio, tiene una orientación, y está conformado por 4 sondeos TEM (40, 38, 6 y 8), una profundidad de 800 m desde su parte más alta, con una extensión lateral de poco más 1.8 km aproximadamente, su rango de resistividades va de 1 hasta 300 Ohm-m.

El paquete de bajas resistividades (1-10 Ohm-m) es el que se encuentra en superficie, pudiéndose observar en colores rojo, amarillo y naranja, comienza en la parte NW del perfil, con 100 m de espesor y se extiende por casi 1.5 km en dónde sufre un desnivel

para volver a presentarse con menor extensión, pero con un espesor de 600 m, este paquete puede observarse hasta los 1500 m.s.n.m., debajo del TEM 38 y hasta los 1100 m.s.n.m. debajo del TEM 8.

Las resistividades medias (36-64 Ohm-m) en colores verde y azul claro están presentes de manera superficial en un paquete que se logra observar en la porción SE del perfil, además de por debajo del paquete conductor a partir de los 1500 m.s.n.m. con 100 m de espesor y una extensión lateral de 1.5 km.

Subyaciendo a los dos paquetes anteriores está presente un paquete con resistividades más altas (90-308 Ohm-m), teniendo un espesor variable de entre 300 y 500 m, con una extensión lateral de 1.6 km.

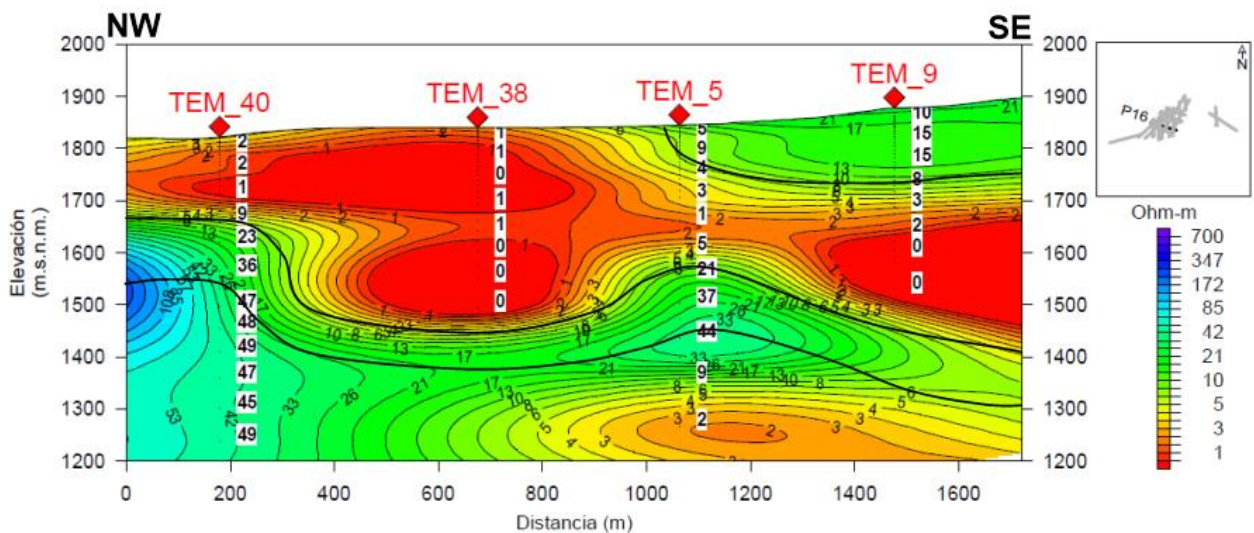


Figura 5.16: Perfil geoelectrico 16

Conformado por 4 sondeos TEM (40, 38, 5 y 9), ubicado en la parte central, el perfil geoelectrico16 tiene una extensión lateral aproximada de 1.7 km y alcanza una profundidad de 700 m desde su parte más alta. Sus resistividades van hasta los 49 Ohm-m, predominando los materiales de bajas de resistividades.

Superficialmente en la porción SE está presente un paquete de resistividades de 7 a 10 Ohm-m, representado en color verde, con un espesor de 120 m aproximadamente y que se extiende hacia el NW por poco más de 600 m.

El paquete de bajas resistividades (1-10 Ohm-m), en colores rojo, amarillo y naranja, se puede encontrar en la porción NW en superficie con 100 m de espesor y mientras se extiende hacia el SE aumenta en profundidad alcanzando así los 1400 m.s.n.m., una extensión lateral de 1.7 km y un espesor máximo de 400 m.

Subyaciendo al anterior, el paquete en color verde (20-36 Ohm-m), muestra un espesor que varía entre los 100 y 140 m, extendiéndose a lo largo del modelo por 1.7 km.

El siguiente paquete (36-49 Ohm-m), está presente a lo largo de todo el modelo, con un espesor que va de los 350 m, y se reduce hacia la porción SE llegando a 100 m.

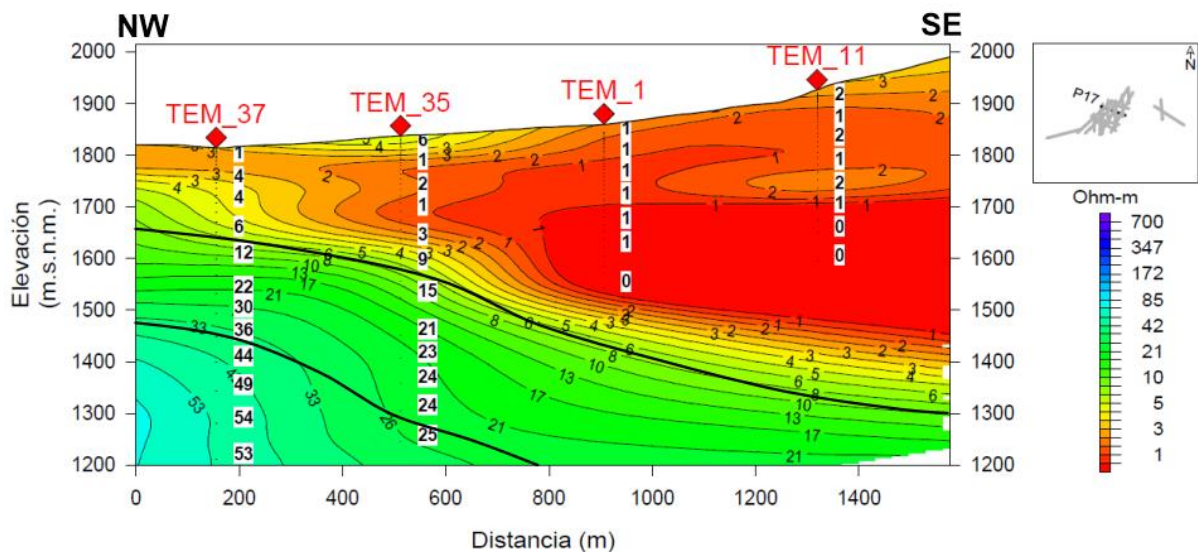


Figura 5.17: Perfil geoelectrico 17

El perfil 17 está conformado por 4 sondeos TEM (37, 35, 1 y 11), se encuentra ubicado en la parte centro de la zona de estudio, alcanzó una profundidad de entre 600 y 800 m y una extensión lateral de más de 1.5 km. El rango de sus resistividades va hasta los 54 Ohm-m.

Un paquete de bajas resistividades (1-10 Ohm-m), está presente en la parte superficial desde el NW con un espesor de apenas 150 m que se va acrecentando en dirección Se hasta alcanzar los 700 m, se le puede observar en colores rojo, naranja y amarillo.

Subyaciendo al paquete anterior se encuentra uno de resistividades medias (12-36 Ohm-m), en color el cual está presente desde la porción NW con un espesor de poco más de 150 m en promedio y se extiende lateralmente a lo largo de todo el modelo.

Subyaciendo al anterior se encuentra un último paquete, en color azul claro (25-53 Ohm-m), con un espesor de 280 m en la porción NW que se reduce hacia el SE, con una extensión lateral de 800 m.

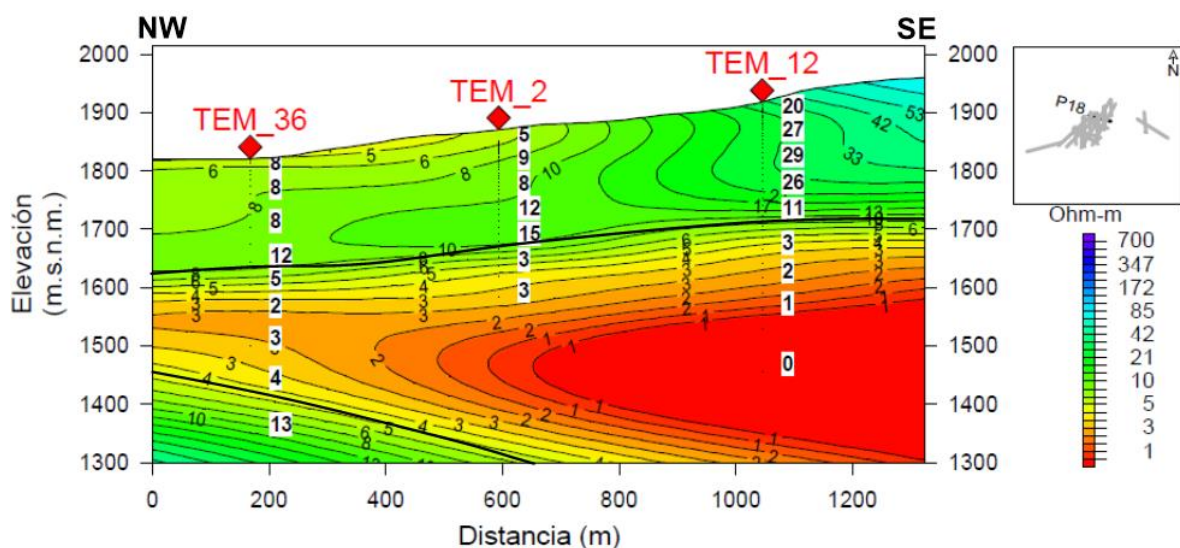


Figura 5.18: Perfil geoelectrico 18

El perfil 18 está conformado por 3 sondeos TEM (36, 2 y 12), se encuentra ubicado en la parte central de la zona de estudio. Alcanza una profundidad de 600 m en promedio y cuenta una extensión de aproximadamente 1.3 km de longitud.

Superficialmente está presente un paquete en color verde, cuyas resistividades (8-29 Ohm-m) van aumentando gradualmente en dirección SE (color azul claro), este paquete tiene un espesor de entre 200 y 250 m.

Subyaciendo al paquete anterior se encuentra uno con resistividades bajas (color rojo, amarillo y naranja) presente a los 1600 m.s.n.m. y con un espesor que va de 150 m en la porción NW y alcanza los 400 m en el extremo SE.

Debajo del paquete anterior se logra apreciar un paquete en color verde, con resistividades de 13 Ohm-m, de 150 m en la porción NW el cual se reduce a lo largo de sus 600 m de extensión lateral.

#### 5.1.4 Visualización 3D de las secciones de resistividad

Se utilizaron distintos softwares para poder visualizar las secciones de resistividad del área de estudio de una mejor manera. Dichos softwares se mencionan a continuación con una descripción de manera general de su funcionamiento en el proceso:

- WingLink (TM): De dónde se exportaron los archivos XYZ de las secciones
- Surfer ®: En este software se crearon los grids que sirvieron para la creación de las secciones a partir de los XYZ generados en WingLink (TM)
- MATLAB ®: A partir de él se obtuvieron las coordenadas X y Y de cada uno de los puntos del mallado generado en Surfer ®.
- Microsoft ® Excel: En él se reunieron los datos obtenidos de Surfer ® y MATLAB ®, para crear un archivo que se importaría en Voxler ®.
- Voxler ®: A partir de los datos anteriores se generó un modelo que permitió visualizar de manera las secciones en dónde se emuló la escala de resistividades usada en WingLink (TM).

Este modelo permite visualizar de mejor manera la distribución de los perfiles trazados y sus resistividades a lo largo y ancho de la zona de estudio.

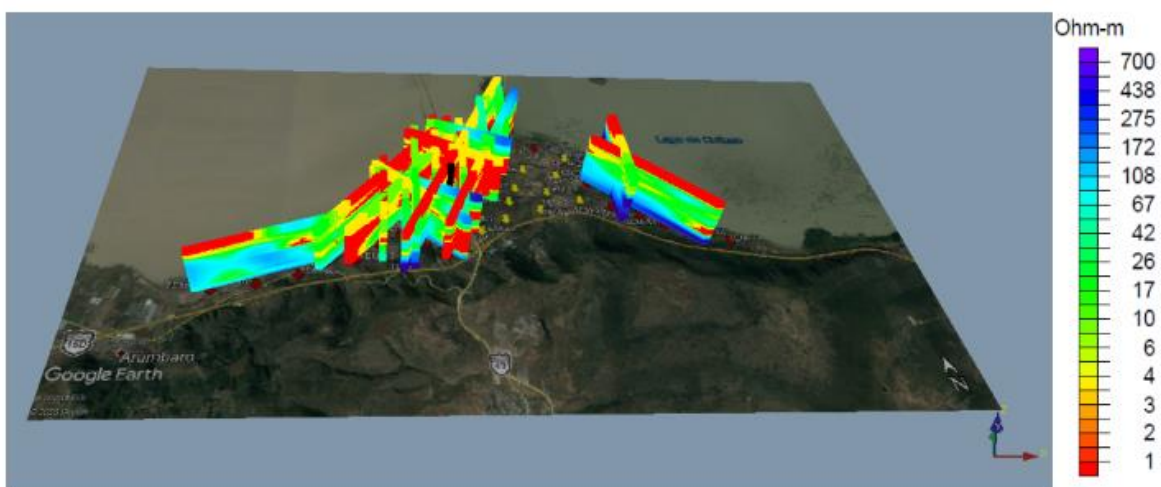


Figura 5.19: Visualización 3D de las secciones de resistividad.

En dicho modelo, se puede observar la distribución de resistividades en las diferentes secciones de mejor manera. Claramente se observa que las secciones que se encuentran en las inmediaciones del pozo inducido (línea vertical en color negro) muestran resistividades bajas (color rojo, amarillo y naranja) de 1 a 5 Ohm-m y mientras que las que se encuentran a una mayor distancia tienen un rango más amplio de resistividades, llegando a superar valores de 500 Ohm-m (colores azules)

En las figuras 5.20-5.22 es posible observar con mayor claridad que las resistividades bajas se encuentran en superficie y predominantemente en la porción norte y centro del área de estudio, mientras que las resistividades aumentan gradualmente en la porción sur, especialmente en la zona sureste, en dónde se encuentran los perfiles 8 (N-S) y 14 (NW-SE).

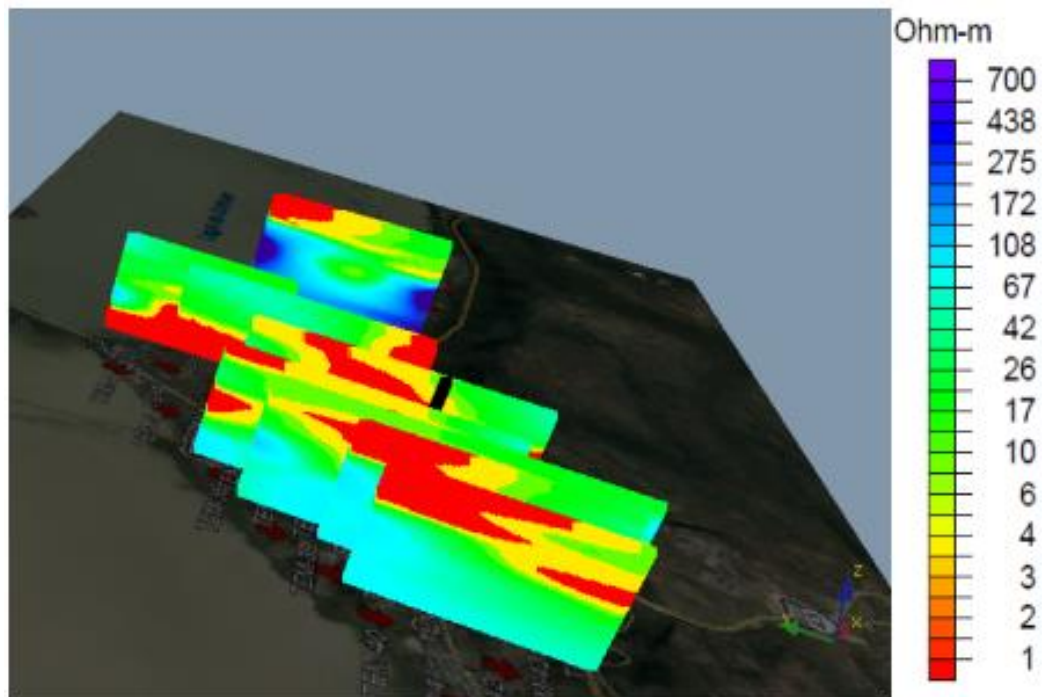


Figura 5.20: Secciones de resistividad N-S vistos desde una dirección suroeste.

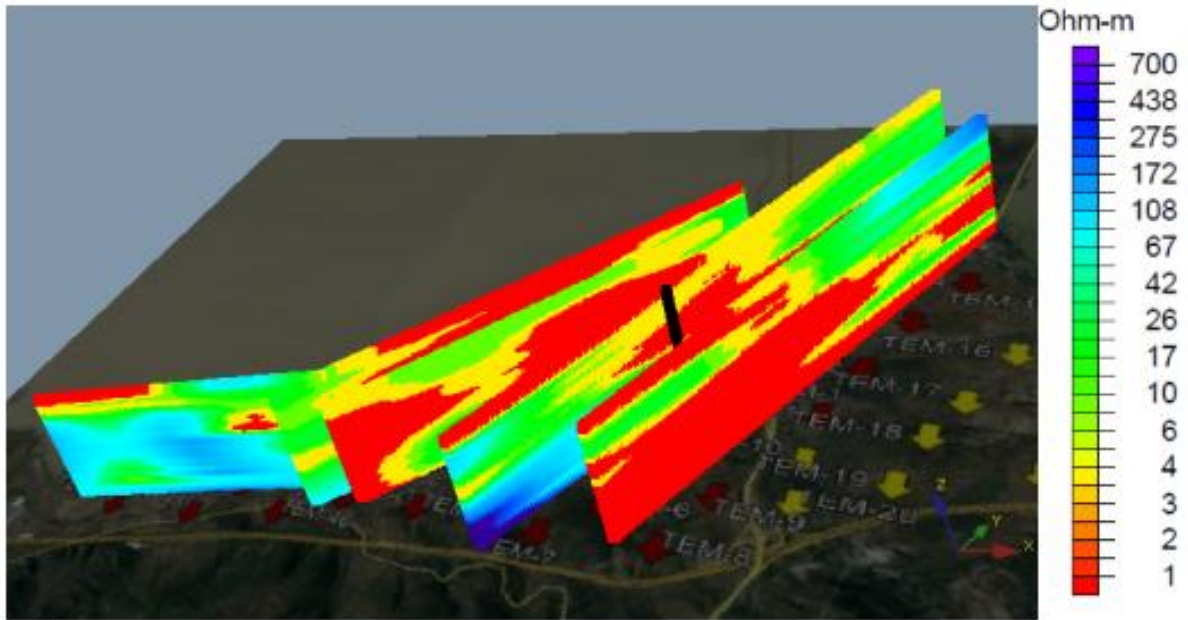


Figura 5.21: Secciones de resistividad NE-SW vistos desde una dirección sureste.

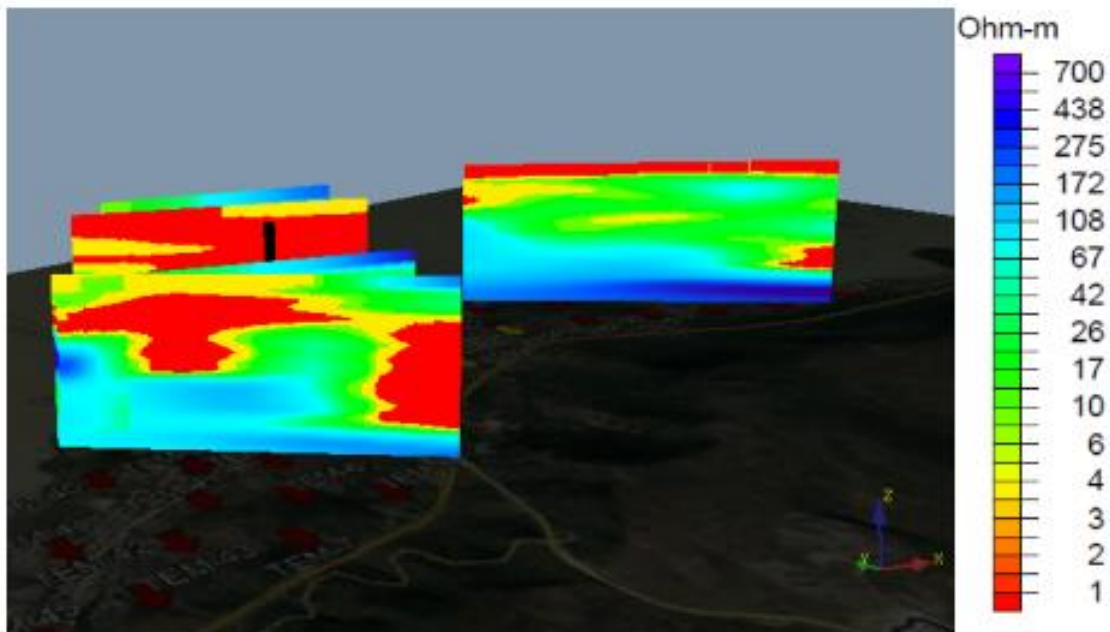


Figura 5.22: Secciones de resistividad NW-SE vistos desde una dirección Oeste.

## 5.2 CONFIGURACIONES EN PLANTA

Con el fin de visualizar de mejor manera la distribución electro-estratigráfica en la totalidad del campo, se construyeron configuraciones de resistividad real en planta a las profundidades de 100, 200, 300, 400, 500, 600 y 700.

### *100 m de profundidad*

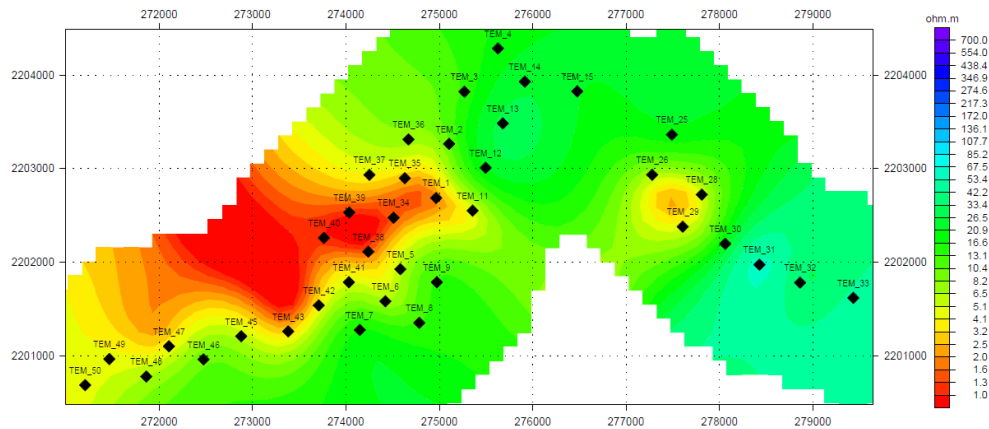


Figura 5.23: Sección de resistividad en planta a 100 m de profundidad

En esta sección se puede observar que en la porción poniente de la zona de estudio, alrededor de los TEM 1, 34, 35, 37, 38 y 40 las resistividades tienden a ser bajas (color rojo, naranja y amarillo), mientras que al norte las resistividades son medias (color verde) aumentando gradualmente hacia la porción oriente (color azul claro).

### *200 m de profundidad*

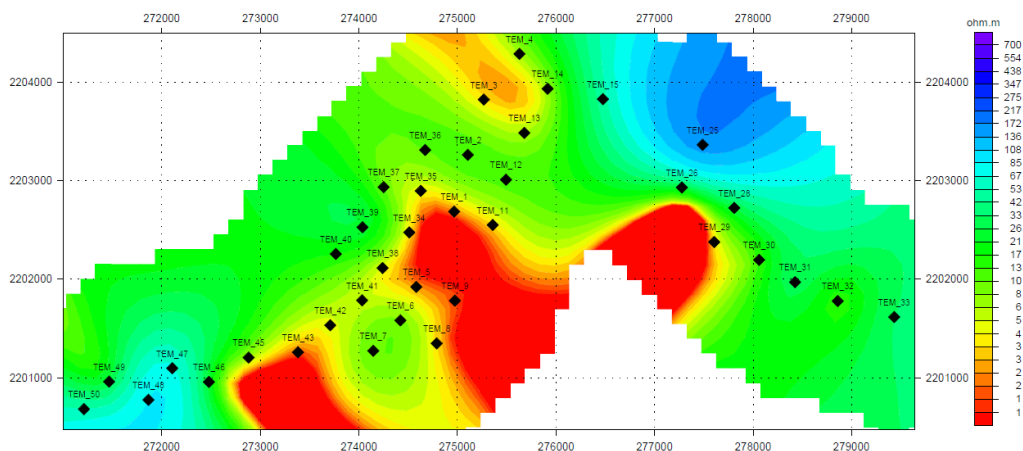


Figura 5.24: Sección de resistividad en planta a 200 m de profundidad

A dicha profundidad se puede observar que las bajas resistividades (color rojo y amarillo) se extienden hacia la porción sureste y parte del oriente de la zona de estudio, mientras que el norte, oriente y poniente muestra resistividades medias (color verde) a medias-altas (color azul claro).

*300 m de profundidad*

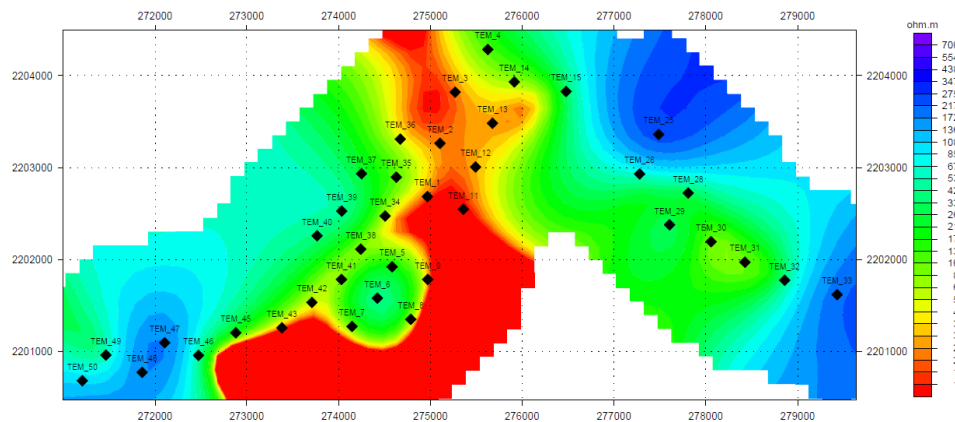


Figura 5.25: Sección de resistividad en planta a 300 m de profundidad

A esta profundidad las bajas resistividades (color rojo y amarillo) son claramente predominantes en la zona centro, sur y también están presentes en una pequeña porción de la zona norte. Las resistividades medias (color verde y azul claro) están presentes en la zona poniente y oriente, abarcando la mayor parte del área; mientras que las resistividades más altas (color azul marino) se muestran en mayor manera en los extremos NE y SE de la zona de estudio.

*400 m de profundidad*

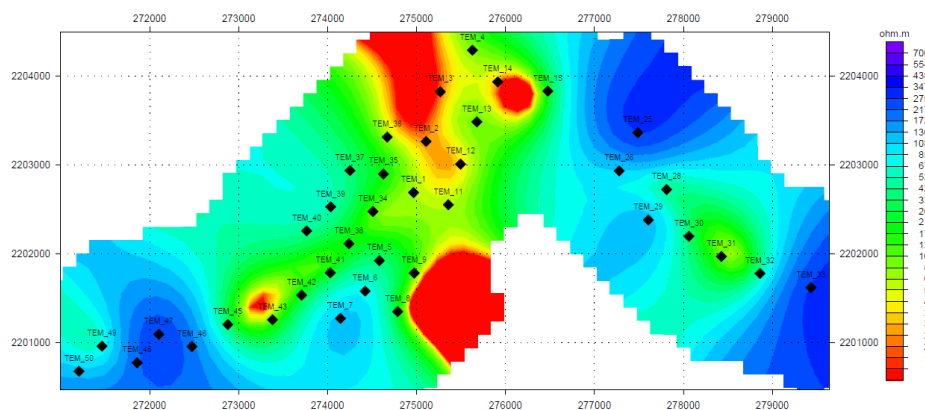


Figura 5.26: Sección de resistividad en planta a 400 m de profundidad

En esta sección se puede observar que a dicha profundidad las resistividades bajas (color rojo y amarillo) empiezan a perder área dentro de la zona de estudio ya que sólo se les observa en la zona centro-sur y centro-norte. Las resistividades medias (color verde y azul claro) bordean a las resistividades bajas en la zona centro y una porción de la zona SW mientras que en la porción poniente del área las resistividades que se presentan son cada vez mayores (color azul rey) en comparación a la profundidad anterior.

*500 m de profundidad*

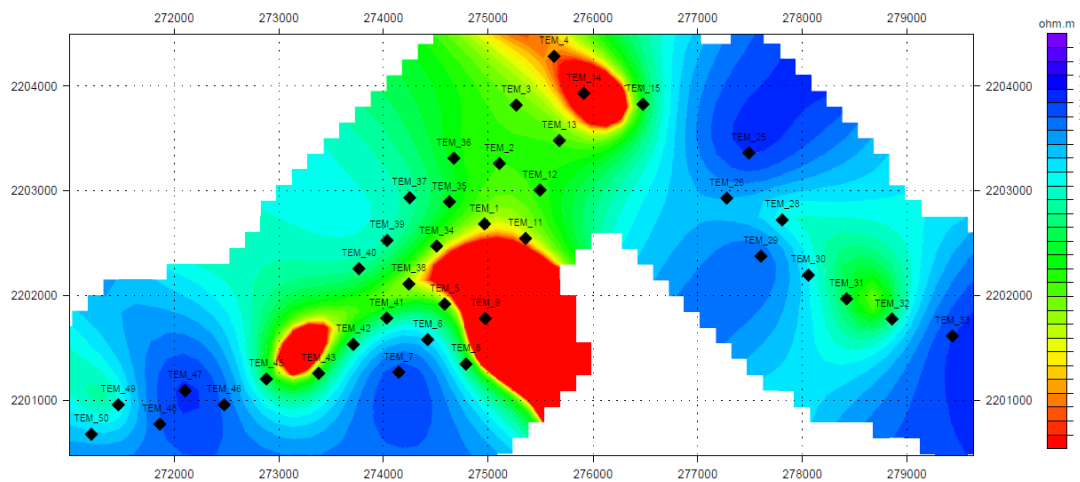


Figura 5.27: Sección de resistividad en planta a 500 m de profundidad

En esta sección en planta se observa que las resistividades bajas (color rojo y amarillo) pierden importancia en la parte centro-norte mientras que en la parte centro-sur retoman un poco más de área. Las resistividades medias (color verde y azul claro) por su parte se observan en la porción central, SW y parte del SE, mientras que las resistividades altas (color azul rey) abarcan prácticamente toda la porción poniente del área de estudio.

### 600 m de profundidad

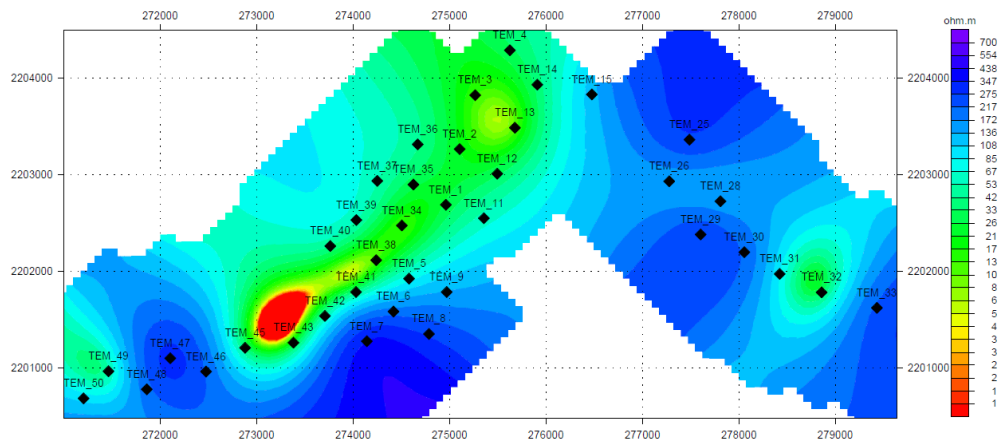


Figura 5.28: Sección de resistividad en planta a 600 m de profundidad

En esta sección es posible observar que las resistividades bajas (color rojo y amarillo) prácticamente ya no están presentes salvo una pequeña porción alrededor de los TEMs 42, 43 y 45. Las resistividades medias (color verde y azul claro) también perdieron área puesto que ahora sólo se encuentran en una franja que va del SW al norte y en una pequeña porción al poniente del área de estudio. Las resistividades altas (color azul rey) se observan ya al sur, sureste, suroeste y noreste de la zona, abarcando una gran parte del área de estudio.

### 700 m de profundidad

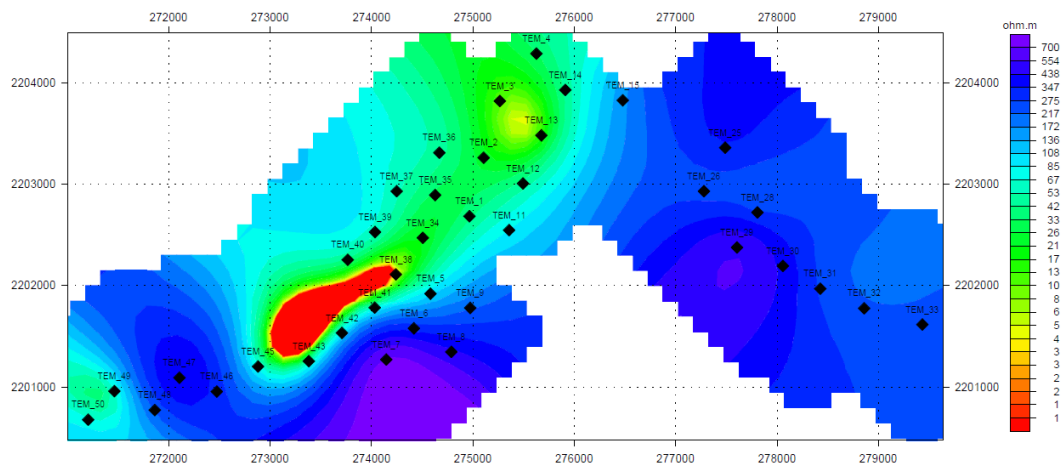


Figura 5.29: Sección de resistividad en planta a 700 m de profundidad

Las resistividades bajas (color rojo y amarillo) apenas y se observan en parte del SW de la zona, las resistividades medias (verde y azul claro) se encuentran solamente desde el SE hacia el norte en una franja delgada. Por su parte los altos resistivos se hacen presentes al sur, suroeste, noreste y sureste de la zona abarcando la mayor parte del área de estudio.

### 5.2.1 Visualización 3D de secciones en planta

Se generó un modelo tridimensional de las 7 secciones a diferentes profundidades, a partir de los datos generados en WingLink (TM) y con un procedimiento similar al utilizado para la realización del modelo de los perfiles. Se muestra el modelo visto desde un ángulo ubicado en la porción sur de la zona de estudio (Figura 5.33)

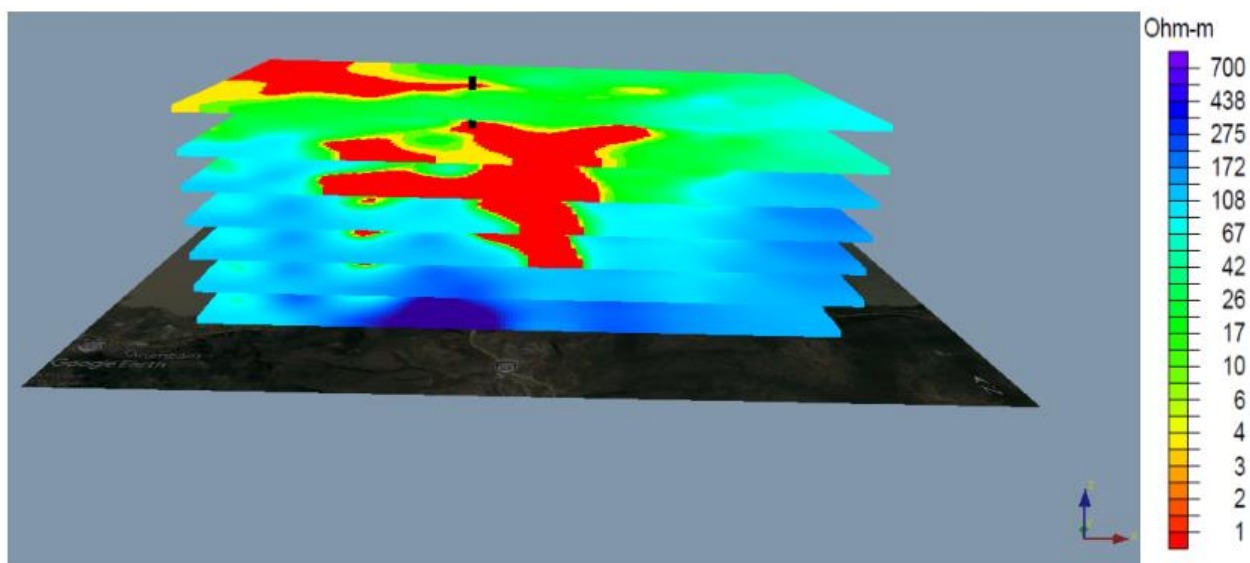


Figura 5.30: Visualización 3D de secciones en planta visto desde el sur.

Es notable que las resistividades bajas (color rojo y amarillo) se encuentran en las inmediaciones del pozo inducido (Línea vertical negra) que se encuentra localizado en la porción centro-oeste de la zona de estudio, y que estas se extienden hacia el NW a 100 m de profundidad y hacia la porción centro-sur desde los 200 hasta los 500 m, las resistividades medias (color verde y azul claro) están presentes en la mayor parte de la

zona a los 100 m de profundidad, notándose que en la porción SE tienden a ser un poco mayores. Conforme aumenta la profundidad las resistividades también lo hacen y logran abarcar la mayor parte de la zona de estudio, siendo la porción centro-sur y suroeste las que muestran las resistividades más elevadas (azul marino).

### 5.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo con los mapas de geología local elaborados por la CFE (2011) (Figura 2.9) y el SGM (1998) (Figura 2.8), se realizó un corte este-oeste de la zona de estudio, para así obtener su modelo de elevaciones y a partir de este elaborar un modelo geológico conceptual (Figura 6.4) el cual será la base para la interpretación de cada uno de los modelos de resistividad. El mapa de TEMs realizado fue modificado para añadir la falla conocida como Falla Chehuayo; dicha falla es de importancia ya que, debido al análisis de los rasgos estructurales, se consideraría una “Falla maestra” dentro de un sistema oculto de fallas escalonadas.

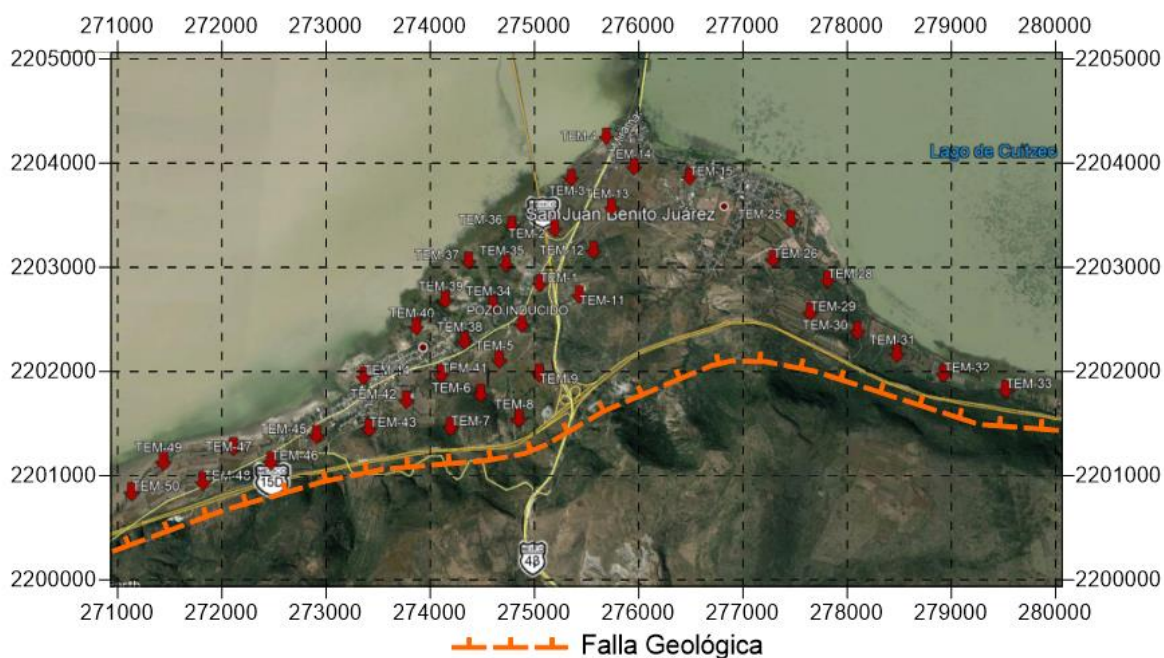


Figura 5.31: Mapa de sondeos TEM con el paso de la Falla Chehuayo.

Se trazaron 6 perfiles de elevación sobre el DEM de la zona de estudio con dirección N-S (Figuras 5.32 y 5.33) para así poder proponer de mejor manera el sistema oculto de fallas escalonadas. Estas fallas serían de suma importancia en el sistema geotérmico ya que tendrían la función de recarga y descarga en él.

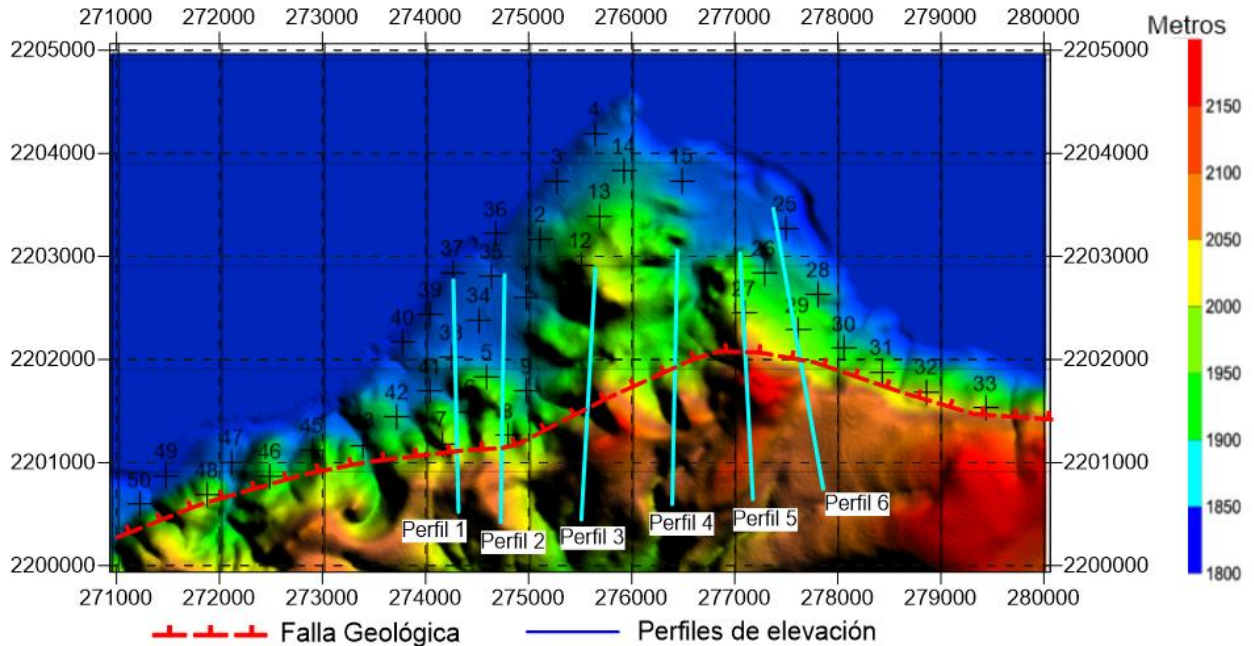
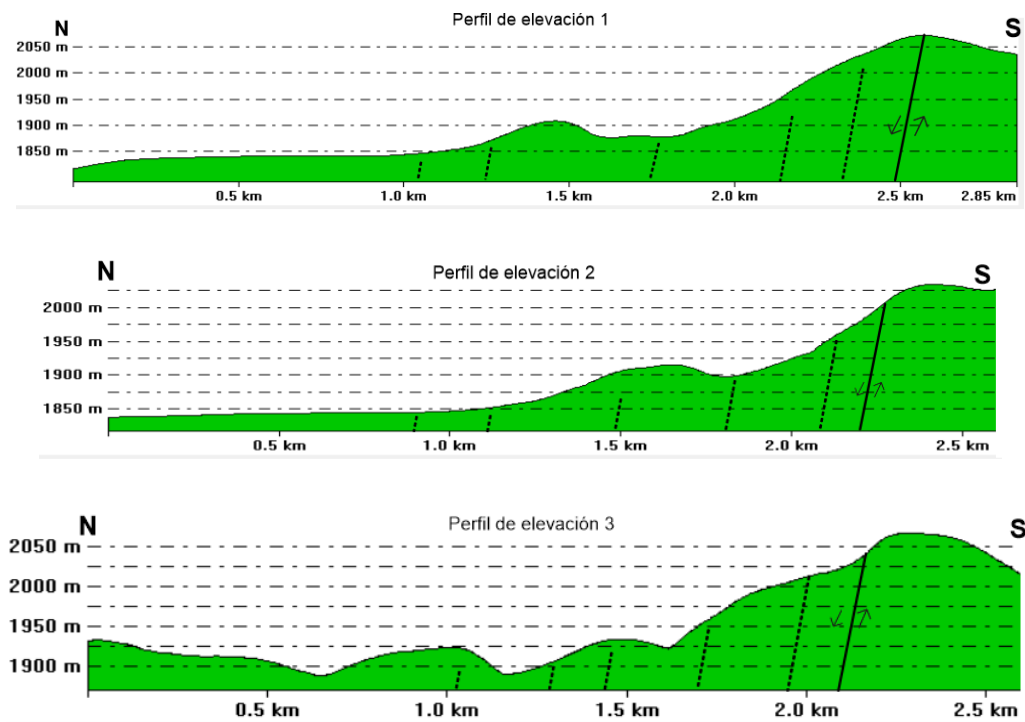


Figura 5.32: Distribución de los perfiles de elevación que cruzan la Falla Chehuayo.



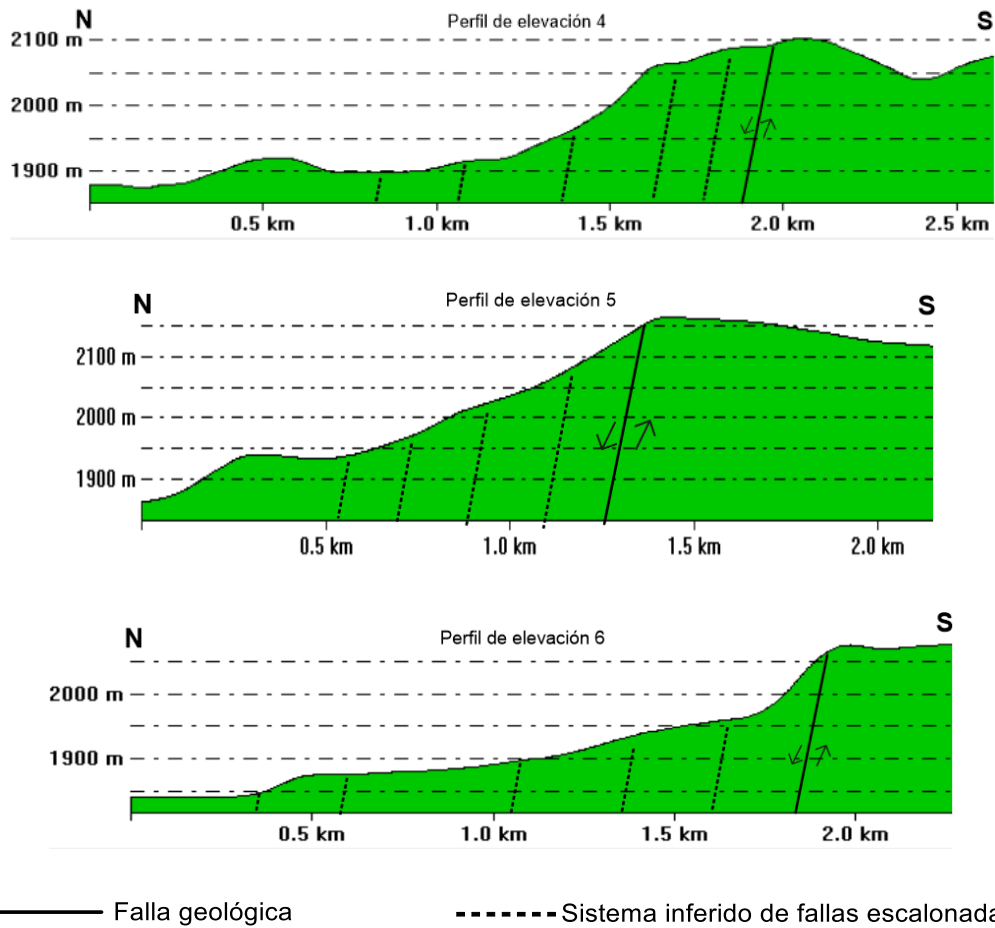


Figura 5.33: Perfiles de elevación que muestran el sistema oculto de fallas escalonadas.

Como puede observarse en los perfiles de elevación la falla maestra aflora en la porción sur y a partir de ella se infieren las siguientes fallas ocultas que se encontrarían a mayor profundidad (sin aflorar) conforme se avanza hacia la porción norte.

Con base en la geología local ya mencionada (CFE, 2011) (SGM, 1998), el recorrido de campo realizado y los rangos de resistividades observados en los modelos obtenidos y correlacionándolos con rangos de resistividades de rocas utilizados en proyectos de geotermia, se procedió a proponer las siguientes unidades litológicas que posteriormente se utilizaron para la creación de un modelo geológico conceptual:

Tabla 5.1: Unidades geoelectricas asociadas con la geología de la zona.

UNIDAD GEOELÉCTRICA		RESITIVIDAD (Ohm-m)	UNIDAD LITOLÓGICA ASOCIADA
Unidad (U1)	U1a	1 a 15	Materiales de cobertura posiblemente asociados a depósitos superficiales y lacustres
	U1b	5 a 100	Materiales de cobertura posiblemente asociados a ignimbritas y riolitas intemperizadas
	U1c	5 a 30	Materiales de cobertura posiblemente asociados a andesitas intemperizadas
	U1d	15 a 80	Materiales de cobertura posiblemente asociados a basaltos intemperizados
Unidad 2 (U2)		1 a 10	Materiales alterados hidrotermalmente ( <i>clayclap</i> )
Unidad 3 (U3)		10 a 50	Materiales posiblemente asociados a ignimbritas y riolitas alteradas y fracturadas
Unidad 4 (U4)		10 a 200	Materiales posiblemente asociados a basaltos fracturados
Unidad 5 (U5)		50 a 900	Materiales posiblemente asociados a andesitas fracturadas

A partir de toda la información anterior se realizó el modelo geológico conceptual, en el que se observan las unidades litológicas y el sistema oculto de fallas escalonadas que es parte esencial del sistema geotérmico, dicho sistema es inferido a partir del análisis de los perfiles de resistividad y la información geológica de la zona. La presencia de dichas fallas en el modelo geológico conceptual y en cada uno de los modelos está basada en los cambios de resistividad que pueden observarse en los perfiles geoelectricos, así como en los gradientes de las curvas de resistividad que existen en los mismos, tomándose en cuenta también la posición de las fallas propuestas por CFE en el año 2011.

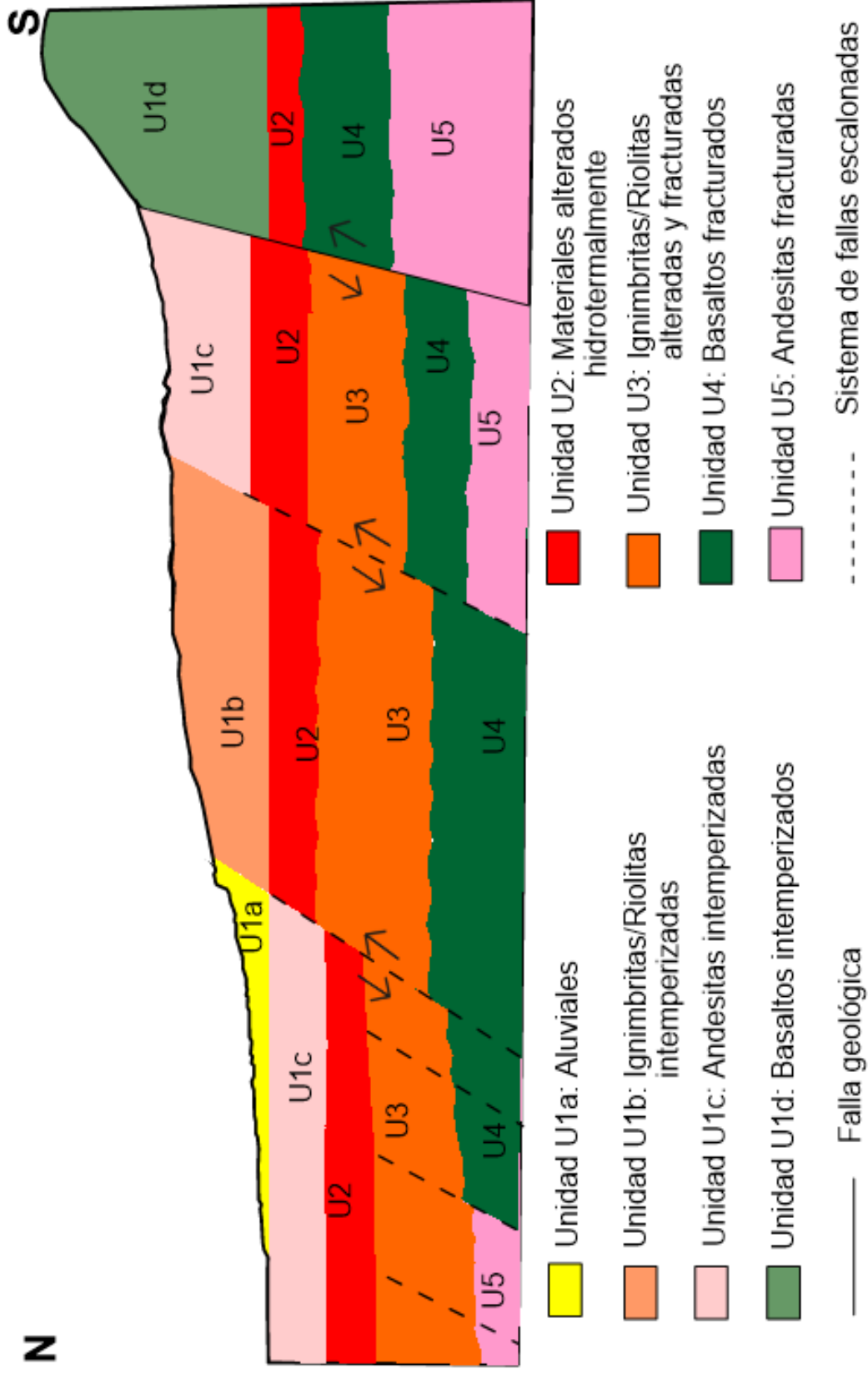


Figura 5.34: Modelo Geológico Conceptual del área de estudio.

### 5.3.1 Interpretación de los perfiles geoelectricos

De acuerdo con el modelo geológico conceptual se interpretó cada uno de los perfiles de resistividad, asignando a cada paquete de resistividades una unidad de acuerdo con la geología local de la zona de estudio.

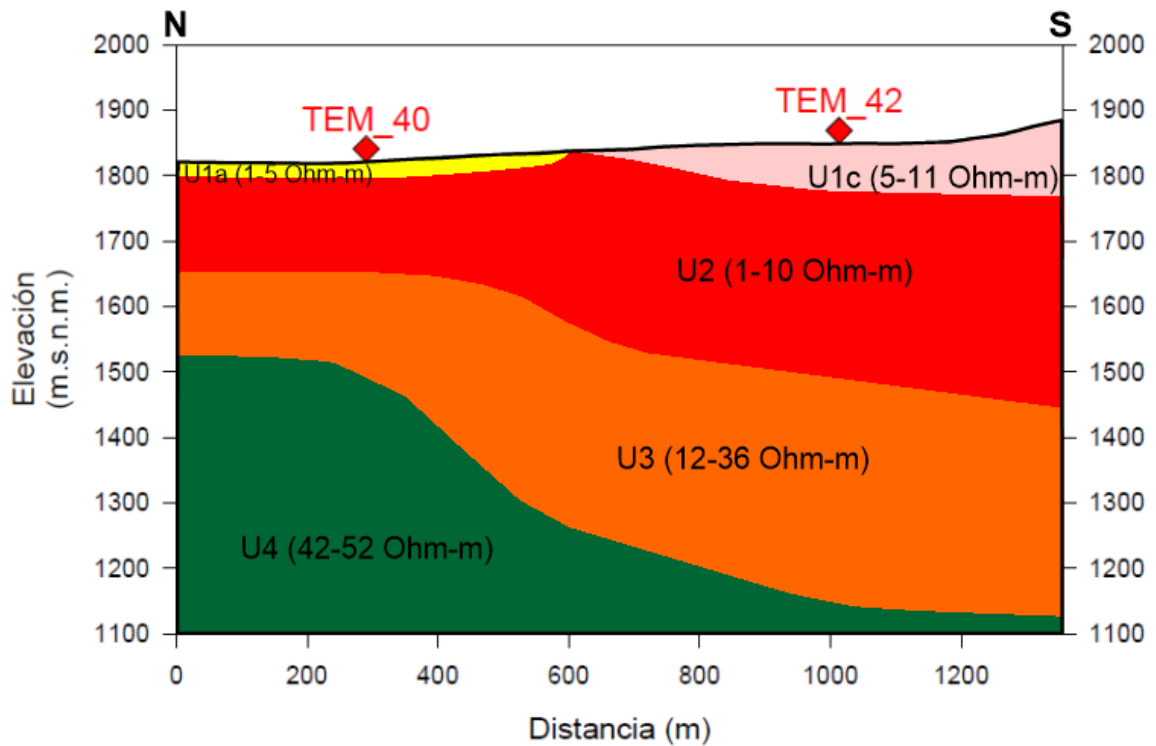


Figura 5.35: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 1.

En este modelo se pueden reconocer 5 unidades:

La primera es la U1a, con resistividades de 1 a 5 Ohm-m, presente en color amarillo, posiblemente asociada a depósitos superficiales y lacustres, está presente en la porción sur del modelo con un espesor de apenas 20 m, y tiene una extensión lateral aproximada de 600 m.

Adyacente a la unidad anterior se encuentra la U1c, que presenta resistividades de 5 a 11 Ohm-m, presente en color rosa claro, posiblemente asociada a andesitas

intemperizadas, cuenta con un espesor de 100 m, que se reduce de sur a norte, extendiéndose a lo largo de 700 m.

Subyaciendo a las dos anteriores, la unidad presente es la U2, con resistividades de 1 a 10 Ohm-m, en color rojo, asociada a materiales alterados hidrotermalmente, esta unidad funge como *claycap*, tiene un espesor que va de 100 a 300 m de N-S, y se extiende a lo largo de los 1.3 km a lo largo del modelo.

En color naranja se presenta la U3, con resistividades de 12 a 36 Ohm-m, posiblemente asociada a ignimbritas y riolitas alteradas y fracturadas, con un espesor que aumenta de los 150 a los 300 m de norte a sur a lo a largo de 1.3 km.

Por último y subyaciendo a las unidades anteriores, la U4, en color verde, con resistividades de 42 a 52 Ohm-m, posiblemente asociada a basaltos fracturados; esta unidad posee un espesor que muestra 400 m en su parte más ancha y se reduce hacia el sur, con una extensión lateral de 1 km.

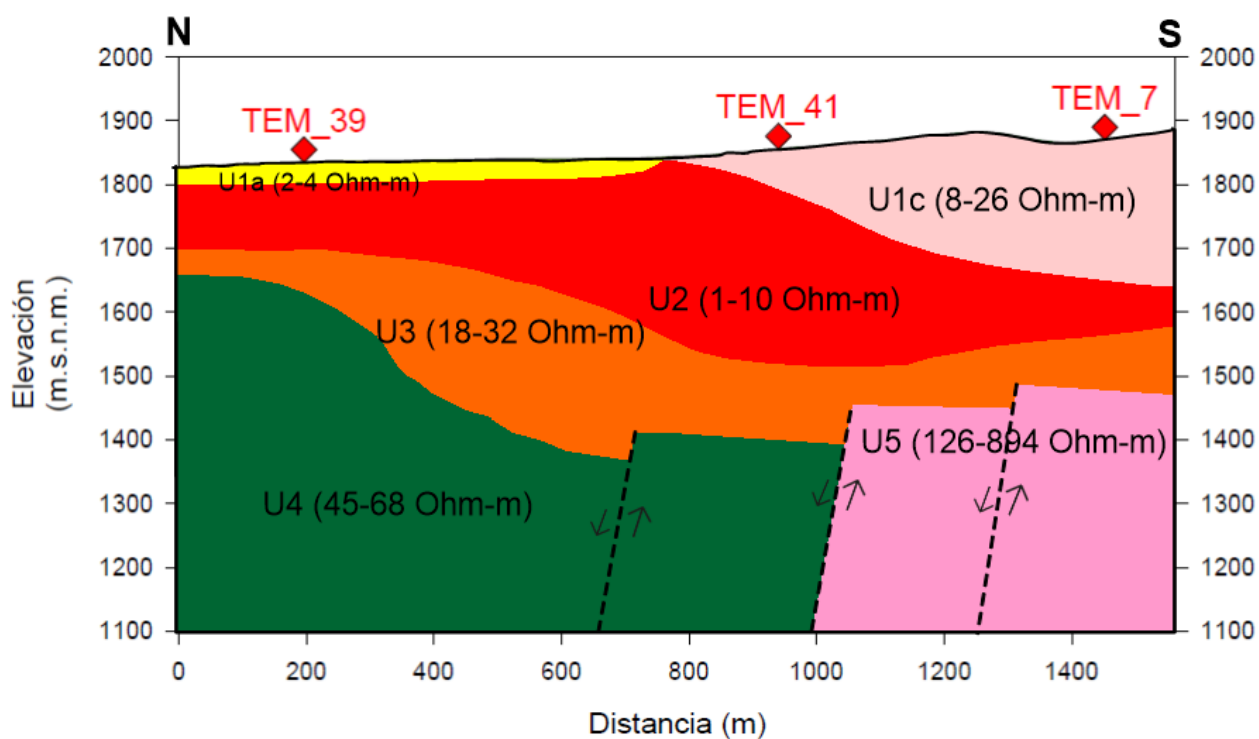


Figura 5.36: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 2.

Se marcan 3 fallas escalonadas inferidas que cruzan este modelo: La primera de norte a sur cruzaría la U3 y la U4, mostrando un desnivel hacia el norte; la siguiente sería el límite entre la U4 y U5, cruzando también la U3; mientras que la última falla afectaría las U3 y U5, mostrando un desnivel hacia el norte en estos paquetes.

En este modelo se pueden reconocer 6 unidades:

La U1a, en color amarillo, con resistividades de 2 a 4 Ohm-m, está posiblemente asociada a depósitos superficiales y aluviales, tiene un espesor delgado de aproximadamente 20 m y una extensión lateral de 800 m.

Adyacente a la unidad anterior se encuentra la U1c, con resistividades de 8 a 26 Ohm-m, en color rosa claro, posiblemente asociada a andesitas intemperizadas, está presente en la porción sur superficial del modelo, con un espesor que va desde su parte más ancha con 200 m y se acuña con dirección al norte, teniendo una extensión lateral de 700 m.

La siguiente unidad presente es la U2, con resistividades de 1 a 10 Ohm-m, en color rojo, asociada a materiales alterados hidrotermalmente, esta unidad funge como *claycap*, muestra un espesor que comienza en 100 m en la porción norte, aumenta hasta alcanzar los 300 m en su parte central y se va reduciendo hacia el sur mostrando un espesor de apenas 50 m aproximadamente, con 1.5 km de extensión lateral.

Subyaciendo a las unidades anteriores se observa la U3, en color naranja, con resistividades de 18 a 32 Ohm-m, posiblemente asociada a ignimbritas y riolitas alteradas, con un espesor de poco más 200 m en su parte más ancha y de 100 m en su parte más angosta, se extiende a lo largo de los 1.5 km del modelo. Esta unidad sería afectada por 3 fallas del sistema escalonado.

Por debajo de la anterior, la unidad siguiente es la U4, en color verde, está posiblemente asociada a basaltos fracturados y muestra resistividades de 45 a 68 Ohm-m. Tiene un espesor variable de entre 550 y 350 m, con una extensión lateral de 1 km. Esta unidad sería afectada por una de las fallas inferidas.

La U5, en color rosa, se encuentra adyacente a la unidad anterior, tiene resistividades de 126 a 894 Ohm-m y está posiblemente a andesitas fracturadas; esta unidad es en la que posiblemente se encuentre el yacimiento geotérmico, debido a que sus altas

resistividades muestran que existe la permeabilidad idónea para almacenar fluidos hidrotermales. La unidad sería afectada por una falla que sería de suma importancia al igual que las demás ya que serviría como medio de recarga para el yacimiento geotérmico. Tiene un espesor de 350 a 450 Ohm-m de norte a sur, con una extensión lateral de 500 m.

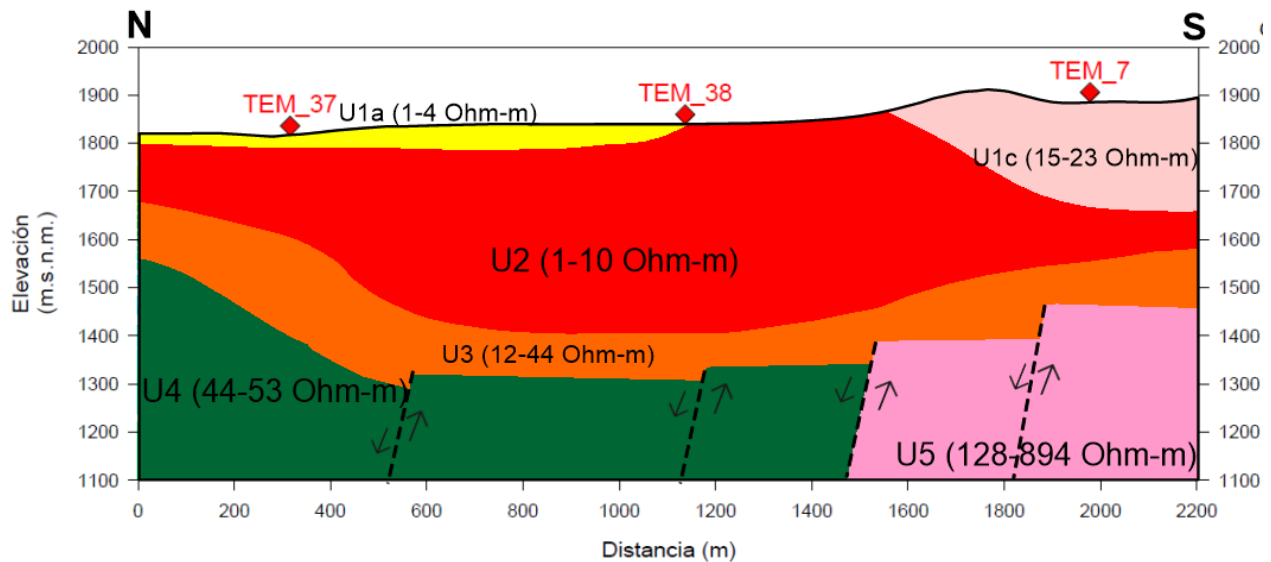


Figura 5.37: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 3.

Se marcan 4 fallas escalonadas inferidas que cruzarían este modelo: Las primeras de norte a sur cruzaría la U3 y la U4 a los .5 y 1.15 km aproximadamente, mostrando un desnivel hacia el norte; la siguiente sería el límite entre la U4 y U5, cruzando también la U3 a los 1.45 km; mientras que la última falla cruzaría las U3 y U5, mostrando un desnivel hacia el norte en estos paquetes presentándose a los 1.8 km de la extensión del modelo.

Al igual que en el modelo anterior se pueden identificar 6 unidades:

La U1a, en color amarillo, con resistividades de 1 a 4 Ohm-m, está posiblemente asociada a depósitos superficiales y aluviales, tiene un espesor delgado de aproximadamente 20 m y una extensión lateral de 1.1 km.

Adyacente a la unidad anterior se encuentra la U1c, con resistividades de 15 a 23 Ohm-m, en color rosa claro, posiblemente asociada a andesitas intemperizadas, está presente

en la porción sur superficial del modelo, con un espesor que va desde su parte más ancha con poco más 200 m y se acuña con dirección al norte, teniendo una extensión lateral de 600 m.

La siguiente unidad presente es la U2, con resistividades de 1 a 10 Ohm-m, en color rojo, asociada materiales alterados hidrotermalmente, esta unidad funge como *claycap*, muestra un espesor que comienza en 100 m en la porción norte, aumenta hasta alcanzar los 400 m en su parte central y se va reduciendo hacia el sur mostrando un espesor de apenas 50 m aproximadamente, con 2.2 km de extensión lateral.

Subyaciendo a las unidades anteriores se observa la U3, en color naranja, con resistividades de 12 a 44 Ohm-m, posiblemente asociada a ignimbritas y riolitas alteradas, con un espesor promedio de 100 m, se extiende a lo largo de los 2.2 km del modelo.

Por debajo de la anterior, la unidad siguiente es la U4, en color verde, está posiblemente asociada a basaltos fracturados y muestra resistividades de 45 a 53 Ohm-m. Tiene un espesor variable de entre 450 y 300 m, con una extensión lateral de casi 1.5 km. Esta unidad sería afectada por una de las fallas inferidas.

La U5, en color rosa, se encuentra adyacente a la unidad anterior, tiene resistividades de 128 a 894 Ohm-m, está posiblemente a andesitas fracturadas; esta unidad es en la que posiblemente se encuentre el yacimiento geotérmico, debido a que sus altas resistividades muestran que existe la permeabilidad idónea para almacenar fluidos hidrotermales. La unidad sería afectada por una falla que sería de suma importancia al igual que las demás ya que serviría como medio de recarga para el yacimiento geotérmico. Tiene un espesor de 300 a 400 Ohm-m de norte a sur, con una extensión lateral de 700 m aproximadamente.

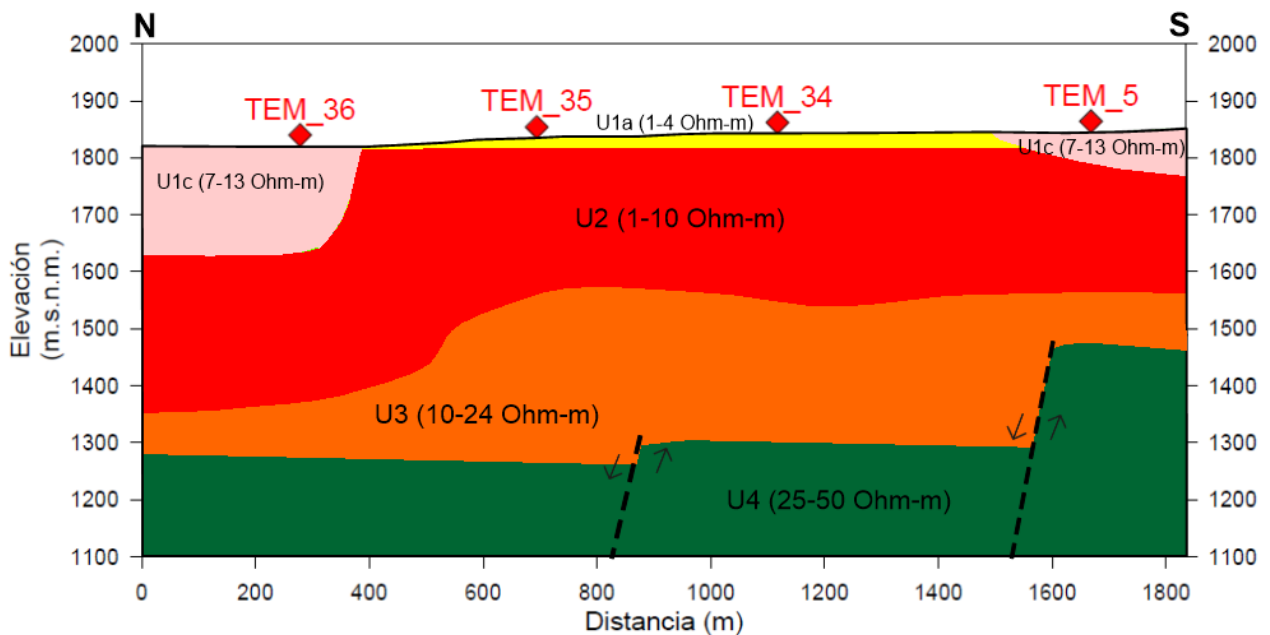


Figura 5.38: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 4.

En este modelo se marcan dos fallas inferidas, la primera a los 800 m del inicio del modelo afectando la U3 y U4, mientras que la segunda se encuentra en la porción sur del modelo y afectaría a la U3 y U4, con sus bloques caídos hacia el norte.

En este modelo se pueden identificar 5 unidades:

La U1a, en color amarillo, con resistividades de 1 a 4 Ohm-m, está posiblemente asociada a depósitos superficiales y aluviales, tiene un espesor delgado de aproximadamente 20 m en su parte más ancha, está localizada al centro del modelo y tiene una extensión lateral de 1.1 km.

Se encuentra adyacente en sus dos extremos a la unidad anterior se encuentra la U1c, con resistividades de 7 a 13 Ohm-m, en color rosa claro, posiblemente asociada a andesitas intemperizadas, está presente en la porción norte y sur del modelo; en el primero mostrando un espesor de 200 m y una extensión lateral de casi 400 m, mientras que en el sur solamente muestra 100 m de espesor y 250 m de extensión lateral.

Subyaciendo a las unidades anteriores se encuentra la U2, con resistividades de 1 a 10 Ohm-m, en color rojo, asociada a materiales alterados hidrotermalmente, esta unidad funge

como *claycap*, la cual se extiende a lo largo de todo el modelo y presenta un espesor variable entre 200 y 300 m.

Subyaciendo a la unidad anterior se observa la U3, en color naranja, con resistividades de 10 a 24 Ohm-m, posiblemente asociada a ignimbritas y riolitas alteradas, con un espesor que va desde los 50 m en su parte más angosta y 300 m en su parte más ancha, se extiende a lo largo de los 1.8 km del modelo y sería afectada por la falla inferida.

Por último, la U4, en color verde, está posiblemente asociada a basaltos fracturados y muestra resistividades de 25-50 Ohm-m. Tiene un espesor variable de 180 a 380 m de norte a sur, con una extensión lateral de 1.8 km, y también sería afectada por la falla inferida.

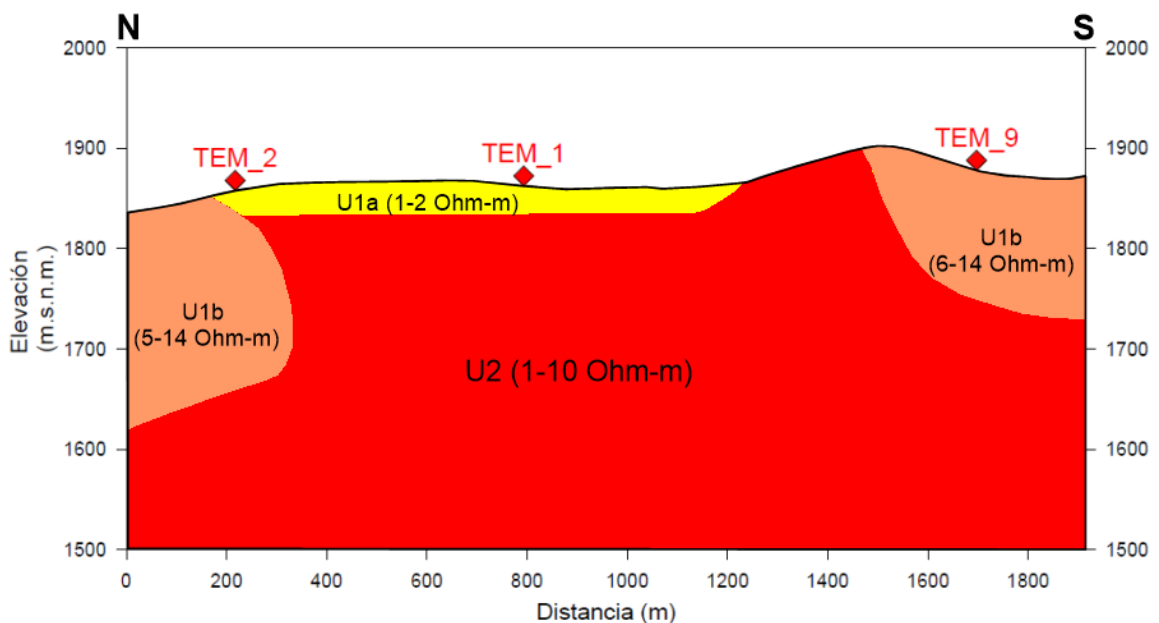


Figura 5.39: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 5.

Se pueden identificar 3 unidades solamente:

Superficialmente la U1a, en color amarillo y con resistividades de 1 a 2 Ohm-m, está posiblemente asociada a depósitos superficiales y aluviales, tiene un espesor de 20 m y se extiende a lo largo de 1 km aproximadamente.

Adyaciendo en sus extremos a la unidad anterior, está presente la U1b, con resistividades de 5 a 14 Ohm-m, representada en color rosa está posiblemente asociada a andesitas intemperizadas, y se encuentra en la porción norte y sur del modelo, con paquetes de 250 y 400 m de extensión lateral, respectivamente y ambos teniendo 180 m de espesor aproximadamente.

Subyaciendo a las unidades anteriores se encuentra la U2, con resistividades de 1 a 10 Ohm-m, en color rojo, asociada materiales alterados hidrotermalmente, esta unidad funge como capa sello, se extiende a lo largo de todo el modelo y presenta un espesor variable entre 100 y 300 m. La predominancia de esta unidad alterada puede deberse a su cercanía con el pozo inducido.

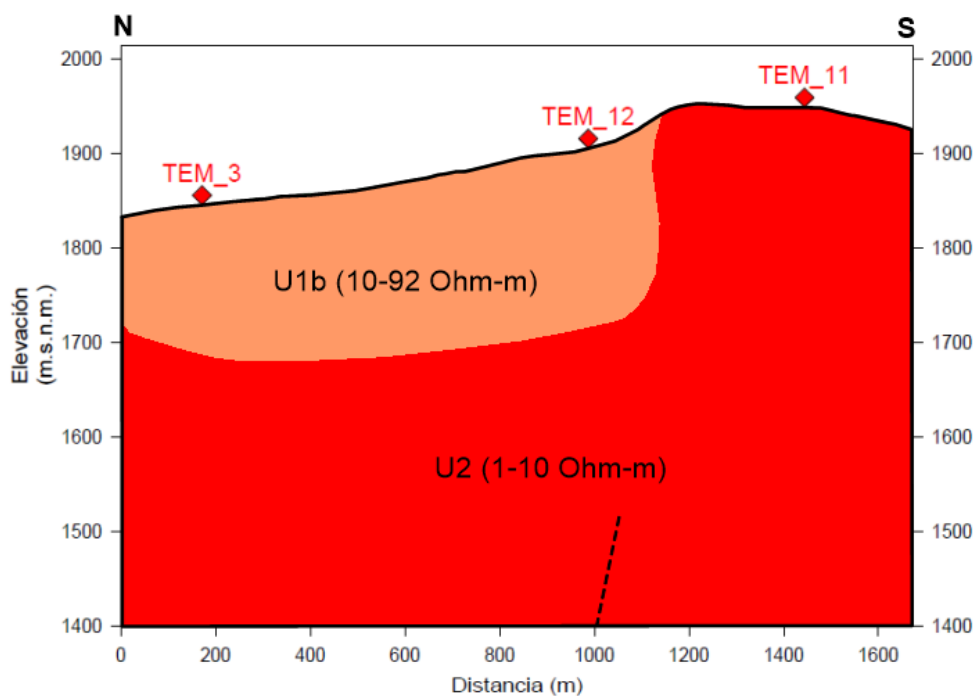


Figura 5.40: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 6.

Se infiere una falla que afectaría una parte de los materiales alterados de la U2.

Se pueden identificar 2 unidades solamente:

Superficialmente la U1b, en color crema y con resistividades de 10 a 92 Ohm-m, está posiblemente asociada a riolitas intemperizadas, tiene un espesor variable de 120 a más de 200 m, y una extensión lateral de casi 1.2 km.

Subyaciendo a la unidad anterior se encuentra la U2, en color rojo, que está asociada a materiales alterados hidrotermalmente, y funge como *claycap*, se extiende a lo largo de todo el modelo con un espesor que aumenta de norte a sur de 300 hasta más de 500 m; la predominancia de esta unidad alterada puede deberse a su cercanía con el pozo inducido.

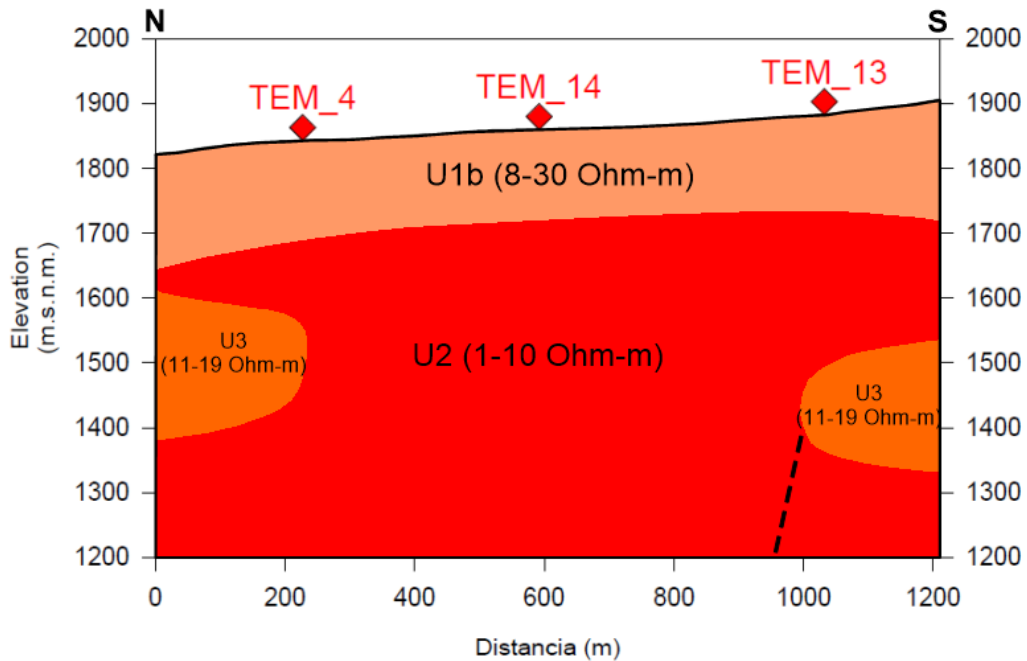


Figura 5.41: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 7.

Se infiere una falla que afectaría una parte de los materiales alterados de la U2 en la porción sur del modelo.

Se identifican 3 unidades:

Superficialmente la U1b, en color crema y con resistividades de 8 a 30 Ohm-m, está posiblemente asociada a riolitas intemperizadas, tiene un espesor promedio de 200 m, y una extensión lateral de 1.2 km.

Subyaciendo a la unidad anterior se encuentra la U2, en color rojo con resistividades de 1 a 10 Ohm-m, que está asociada a materiales alterados hidrotermalmente, y funge como *claycap*, se extiende a lo largo de todo el modelo con un espesor que aumenta de norte

a sur de 340 hasta más de 500 m solamente interrumpida en sus extremos por la U3; la predominancia de esta unidad alterada puede deberse a su cercanía con el pozo inducido.

En los extremos norte y sur existen dos pequeños cuerpos, que por sus resistividades (11-19 Ohm-m) se asocian a la U3, que está posiblemente asociada a ignimbritas y riolitas alteradas, estos dos cuerpos se presentan con un espesor y extensión lateral de 200 m.

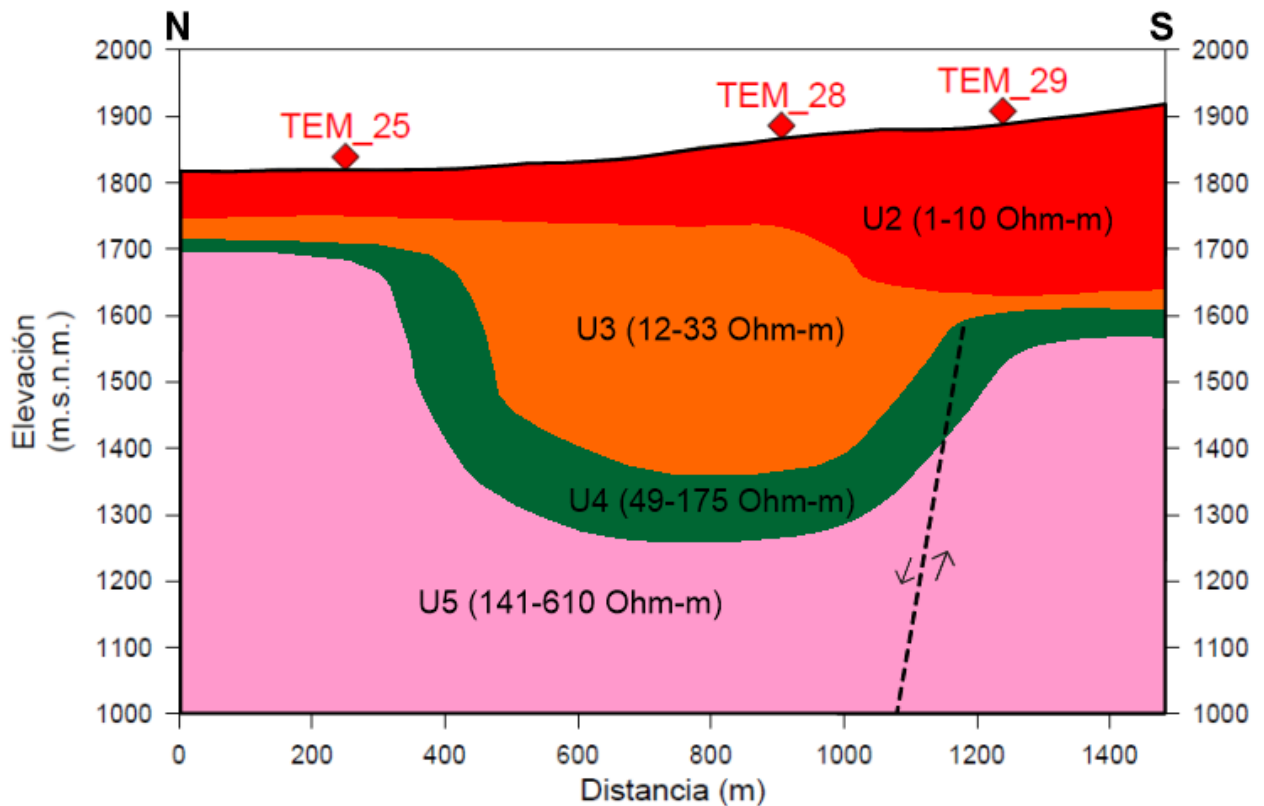


Figura 5.42: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 8.

Se infieren una falla en la porción sur que afectaría las U5 y U4 y serviría como sistema de recarga para el yacimiento hidrotermal.

En este modelo se pueden identificar 4 unidades:

Superficialmente se encuentra la U2, con resistividades de 1 a 10 Ohm-m, en color rojo, asociada materiales alterados hidrotermalmente, esta unidad funge como *claycap*, se

extiende a lo largo de todo el modelo y presenta un espesor que va desde los 80 m aproximadamente y aumenta hacia el sur alcanzando los 250 m de profundidad.

Subyaciendo a la unidad anterior se observa la U3, en color naranja, con resistividades de 12 a 33 Ohm-m, posiblemente asociada a ignimbritas y riolitas alteradas, con un espesor que va desde los 20 m en su parte más angosta y 300 m en su parte más ancha, se extiende a lo largo de los 1.5 km del modelo y sería afectada por la falla inferida.

La U4, en color verde, se encuentra subyaciendo a las unidades anteriores, está posiblemente asociada a basaltos fracturados y muestra resistividades de 49-175 Ohm-m. Tiene un espesor variable que alcanza los 100 m en su parte más ancha, con una extensión lateral de 1.5 km, esta unidad sería afectada por la falla inferida.

La U5, en color rosa, se encuentra subyaciendo a todas las unidades anteriores, tiene resistividades de 141 a 610 Ohm-m, está posiblemente a andesitas fracturadas; esta unidad es en la que posiblemente se encuentre el yacimiento geotérmico, debido a que sus altas resistividades muestran que existe la permeabilidad idónea para almacenar fluidos hidrotermales. La unidad sería afectada por una falla que sería de suma importancia al igual que las demás ya que serviría como medio de recarga para el yacimiento geotérmico. Tiene un espesor de 700 en su parte norte, se reduce a 300 m en su parte central y en la porción sur alcanza los 550 m.

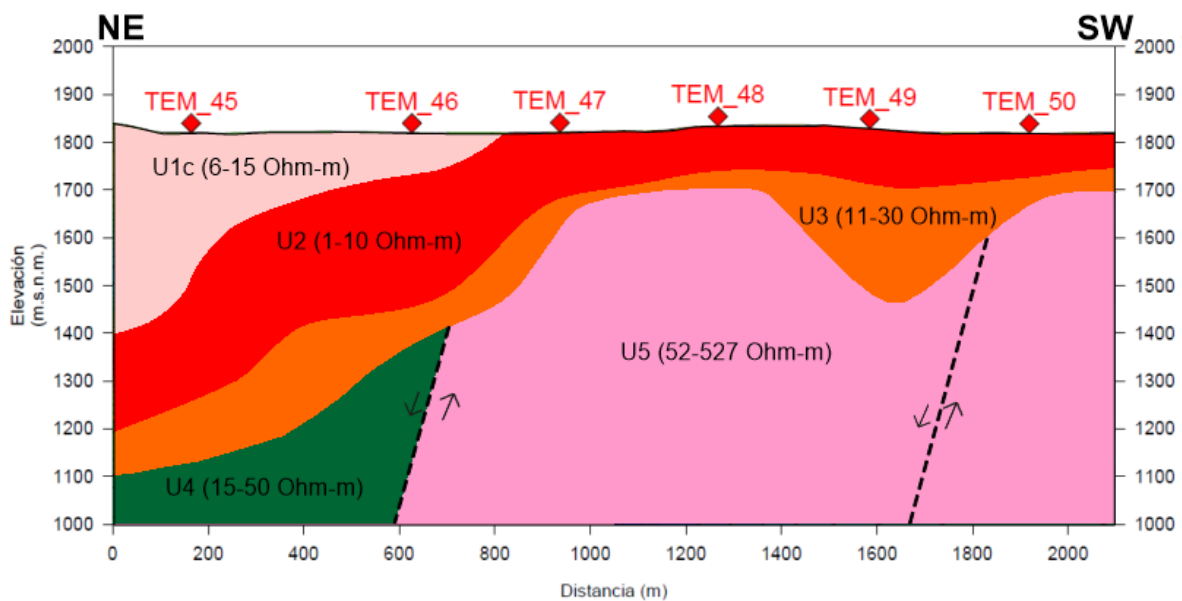


Figura 5.43: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 9.

Se infieren dos fallas: una en la porción norte, que actuaría como límite geológico entre la U4 y U5, y también afectaría la U3 en la porción sur, dicha falla afectaría las U5 y U4 y serviría como sistema de recarga para el yacimiento hidrotermal.

En este modelo se pueden identificar 5 unidades:

En la porción sur, de manera superficial se presenta la U1c, en color rosa claro, con resistividades de 6 a 15 Ohm-m, que está posiblemente asociada a andesitas intemperizadas, muestra un espesor de 400 al sur que se acuña hacia el norte en una extensión de 700 m aproximadamente.

Adyaciendo y subyaciendo a la U1c, se encuentra la U2, con resistividades de 1 a 10 Ohm-m, en color rojo, asociada materiales alterados hidrotermalmente, esta unidad funge como *claycap*, se extiende a lo largo de todo el modelo y presenta un espesor que va desde los 200 a los 100 m de norte a sur, en donde se encuentra superficialmente.

Subyaciendo a la unidad anterior se observa la U3, en color naranja, con resistividades de 11 a 30 Ohm-m, posiblemente asociada a ignimbritas y riolitas alteradas, con un espesor promedio de 100 m pero que llega a alcanzar los 200 m en algunas zonas.

La U4, en color verde, se encuentra subyaciendo a las unidades anteriores, está posiblemente asociada a basaltos fracturados y muestra resistividades de 15 a 50 Ohm-m. Tiene un espesor variable que va de 100 a 400 m de NE a SW, extendiéndose hasta 600 m teniendo como límite una falla.

La U5, en color rosa, tiene resistividades de 52 a 527 Ohm-m, está posiblemente a andesitas fracturadas; esta unidad es en la que posiblemente se encuentre el yacimiento geotérmico, debido a que sus altas resistividades muestran que existe la permeabilidad idónea para almacenar fluidos hidrotermales. La unidad sería afectada por una falla la que sería de suma importancia al igual que las demás ya que serviría como medio de recarga para el yacimiento geotérmico. Tiene un espesor que varía de los 400 a los 700 m de lo largo del modelo, con una extensión lateral de 1.5 km aproximadamente.

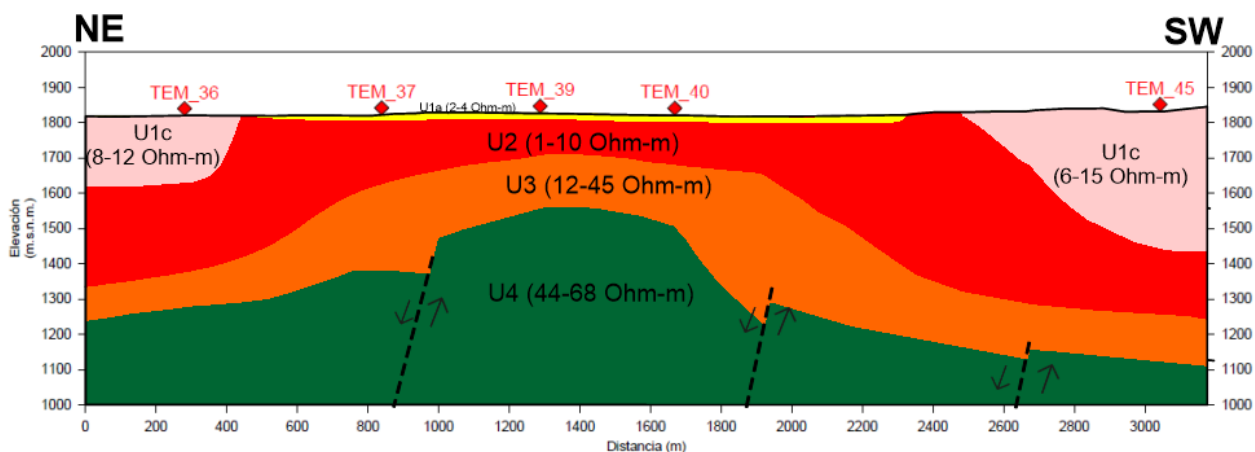


Figura 5.44: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 10.

Se infieren tres fallas: dos en la porción centro del modelo afectando a las unidades U3 y U4; y una tercera falla en la porción sur del modelo que afectaría las mismas unidades que las anteriores además de la U2.

En este modelo se pueden identificar 4 unidades:

Superficialmente, en los extremos del modelo se puede identificar la U1c, en color rosa, con un rango de resistividades de 6 a 15 Ohm-m está posiblemente asociada a andesitas intemperizadas. En la porción NE la unidad tiene 200 m de espesor y 400 de extensión lateral, mientras que en el SW alcanza los 400 m de espesor y se acuña hacia el NE en sus 800 m de extensión lateral.

La U2, en color rojo se presenta superficialmente, con resistividades de 1 a 10 Ohm-m, está asociada a materiales alterados hidrotermalmente que actúan como *claycap*, esta unidad tiene un espesor que varía de 200 a 250 m a lo largo de todo el modelo, alcanzando mayor profundidad en la porción SW.

Subyaciendo a la unidad anterior se encuentra la U3, con un rango de resistividades de 12 a 45 Ohm-m, está posiblemente asociada riolitas e ignimbritas alteradas, cuenta con un espesor promedio de 100 m, pero llegando a superar los 300 m en su parte más ancha. Esta unidad sería afectada por las 3 fallas inferidas.

Por último, se presenta la U4, subyaciendo a las unidades anteriores, con resistividades de 44 a 69 Ohm-m, posiblemente asociada a basaltos fracturados, esta unidad sería

afectada por 3 fallas, y muestra un espesor que comienza en los 200 en la porción NE, aumenta a 500 m en su parte central y se reduce a 100 m en la porción SW.

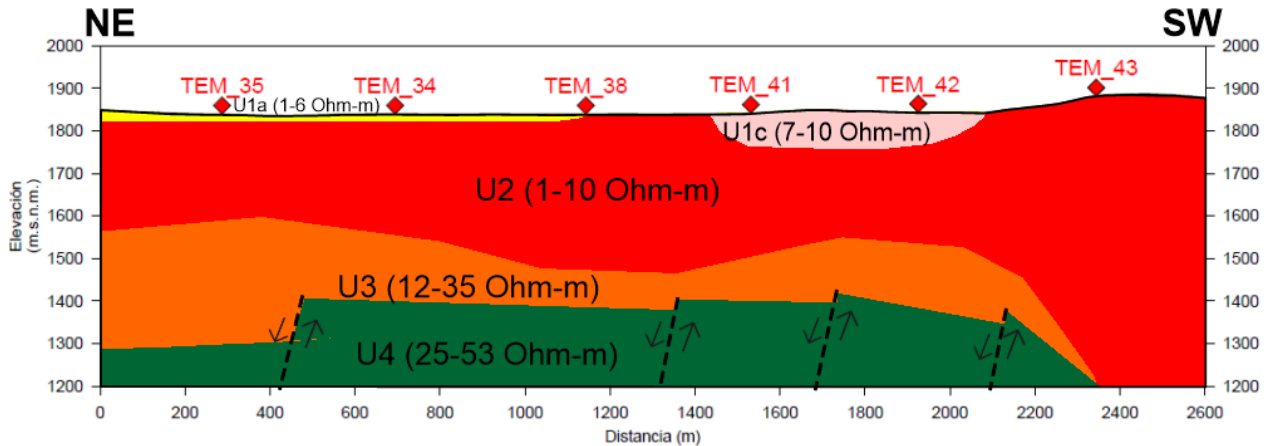


Figura 5.45: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 11.

Se infieren cuatro fallas: una en la porción NE del modelo que afectarían a las unidades U3 y U4; una más en la porción central y otras dos en la en SW del modelo; estas fallas también afectarían las mismas unidades que las anteriores.

En este modelo se pueden identificar 5 unidades:

De manera superficial desde la parte NE, con un espesor de apenas 20 m y extensión lateral de poco más de 1.1, está presente la U1a (1-6 Ohm-m), posiblemente asociada a depósitos aluviales y superficiales.

Entre los TEMs 41 y 42, con resistividades de 7 a 10 Ohm-m, se puede identificar la U1c, en color rosa, posiblemente asociada a andesitas intemperizadas, con un espesor de 100 m y una extensión lateral de 700 m.

La U2, en color rojo se presenta superficialmente, con resistividades de 1 a 10 Ohm-m, está asociada a materiales alterados hidrotermalmente que actúan como *claycap*, esta unidad tiene un espesor que va desde los 300 hasta los 700, se extiende a lo largo de todo el modelo.

Subyaciendo a la unidad anterior se encuentra la U3, con un rango de resistividades de 12 a 35 Ohm-m, está posiblemente asociada riolitas e ignimbritas alteradas, cuenta con un espesor que varía de los 100 a los 400 Ohm-m. Esta unidad sería afectada por las 4 fallas inferidas.

Por último, se presenta la U4, subyaciendo a las unidades anteriores, con resistividades de 25 a 53 Ohm-m, posiblemente asociada a basaltos fracturados, esta unidad sería afectada por 3 fallas, y muestra un espesor que comienza en los 100 en la porción NE, y aumenta a los 200 m en su parte más ancha. Esta unidad alcanza los 1.9 km de extensión lateral.

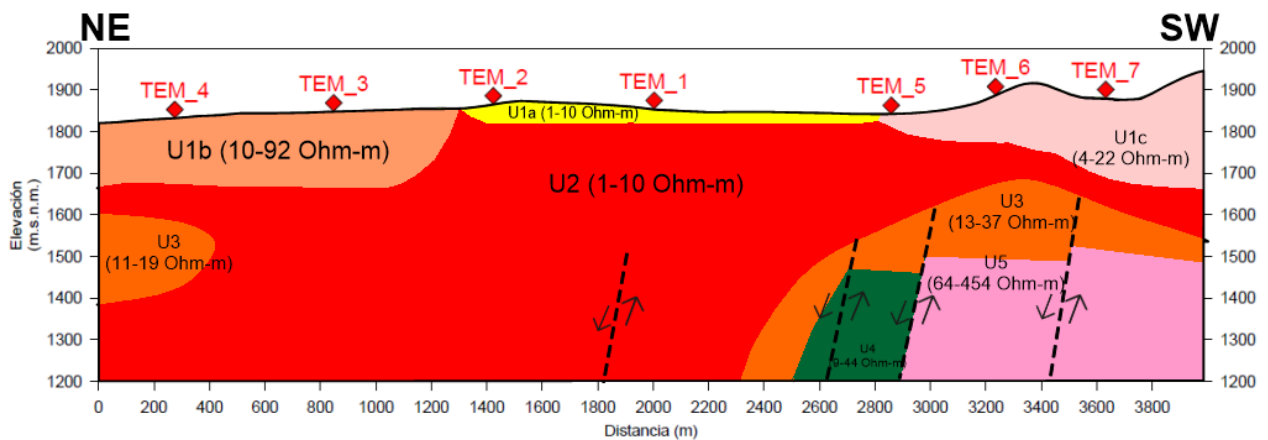


Figura 5.46: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 12.

Se infieren cuatro fallas: una en la porción central del modelo que afectaría a la U2, y las siguientes se ubicarían en la porción SW afectando a las unidades U3, U4 y U5.

En este modelo se pueden identificar 6 unidades:

De manera superficial en la parte NE, con un espesor de 150 a 200 m y extensión lateral de poco más de 1.3 km, está presente la U1b (10-92 Ohm-m), posiblemente asociada a ignimbritas y riolitas intemperizadas.

Adyacente a la unidad anterior, se encuentra la U1a, con un espesor de 20 m en su parte más ancha, y una extensión lateral de 1.5 km, esta unidad está posiblemente asociada a depósitos aluviales y superficiales de acuerdo con sus resistividades (1-10 Ohm-m).

Superficialmente en la porción SW se encuentra la unidad U1c, con un rango de resistividades de 5-22 Ohm-m, está posiblemente asociada a andesitas intemperizadas, muestra un espesor de 300 m al SW el cual disminuye gradualmente a lo largo de su extensión de 1.1 km.

La U2, en color rojo se presenta subyaciendo a las unidades anteriores, con resistividades de 1 a 10 Ohm-m, está asociada a materiales alterados hidrotermalmente que actúan como *claycap*, se extiende desde superficie hasta alcanzar los 700 m de espesor, alcanzando lateralmente los 2.3 km de manera homogénea, pero llegando a extenderse hasta el final del modelo con un espesor de apenas 100 m. La unidad sería afectada en su parte central por una de las fallas inferidas.

La U3 (11-37 Ohm-m), posiblemente asociada riolitas e ignimbritas alteradas, se encuentra presente en los dos extremos del modelo; en la porción NE, un cuerpo que tiene 200 m de espesor y 400 m de extensión; mientras que en la porción SW, se presenta como un cuerpo de espesor variable de 200 a 100 m, que se extiende a lo largo de 1.5 km y sería afectado por 3 de las fallas inferidas.

La U4, subyaciendo a la unidad anterior, con resistividades de 10 a 44 Ohm-m, está posiblemente asociada a basaltos fracturados; esta unidad sería afectada por 2 fallas, y una de ellas actuaría como límite con su unidad adyacente. Está presente en un cuerpo que alcanza un espesor de 300 m y una extensión lateral de 400 m.

Adyacente a la U4 y subyaciendo a la U3, se encuentra la U5, con resistividades de 64 a 454 Ohm-m, está posiblemente a andesitas fracturadas; esta unidad es en la que posiblemente se encuentre el yacimiento geotérmico, debido a que sus altas resistividades muestran que existe la permeabilidad idónea para almacenar fluidos hidrotermales. La unidad sería afectada por dos fallas, una de ellas actuaría como límite con la U4, estas fallas serían de suma importancia ya que serviría como medio de recarga para el yacimiento geotérmico. Tiene un espesor promedio de 300 m y una extensión lateral de 1 km aproximadamente.

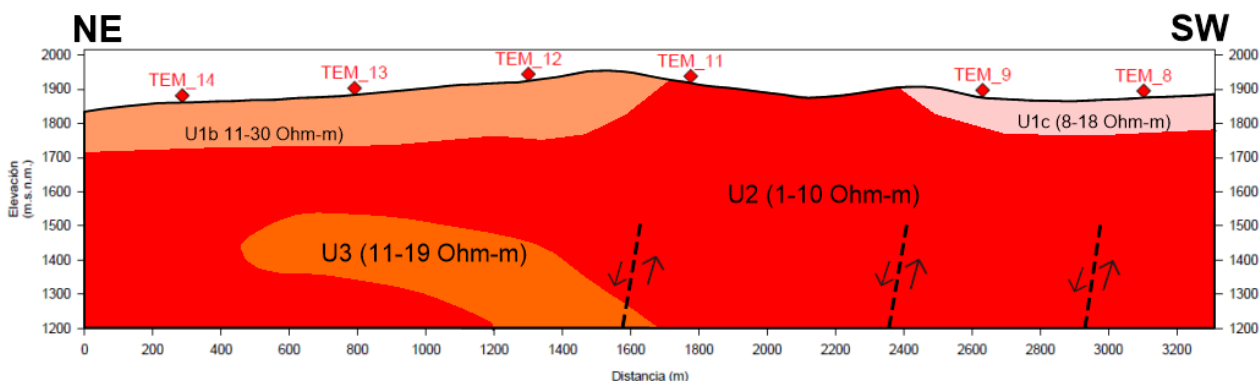


Figura 5.47: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 13.

Se infieren tres fallas: una en la porción central del modelo que afectaría a la U2 y a la U3, y las siguientes se ubicarían en la porción SW afectando solamente a la U2.

En este modelo se pueden identificar 4 unidades:

De manera superficial en la parte NE, con un espesor de 150 m en promedio y extensión lateral de poco más de 1.7 km, está presente la U1b (11-30 Ohm-m), posiblemente asociada a ignimbritas y riolitas intemperizadas.

Superficialmente, pero en el extremo SW, se encuentra la U1c (8-18 Ohm-m), con un espesor promedio de 100 m, y una extensión lateral de 900 m, esta unidad está posiblemente asociada a andesitas intemperizadas.

La U2, con resistividades de 1 a 10 Ohm-m, está asociada a materiales alterados hidrotermalmente que actúan como *claycap*, está presente en la mayor parte del modelo.

La U3 (11-19 Ohm-m), posiblemente asociada riolitas e ignimbritas alteradas, se extiende debajo de los TEMs, 12, 13 y 14, con un espesor de 200 a 400 m y una extensión lateral de 1.2 km., este cuerpo sería afectado por 1 de las fallas inferidas.

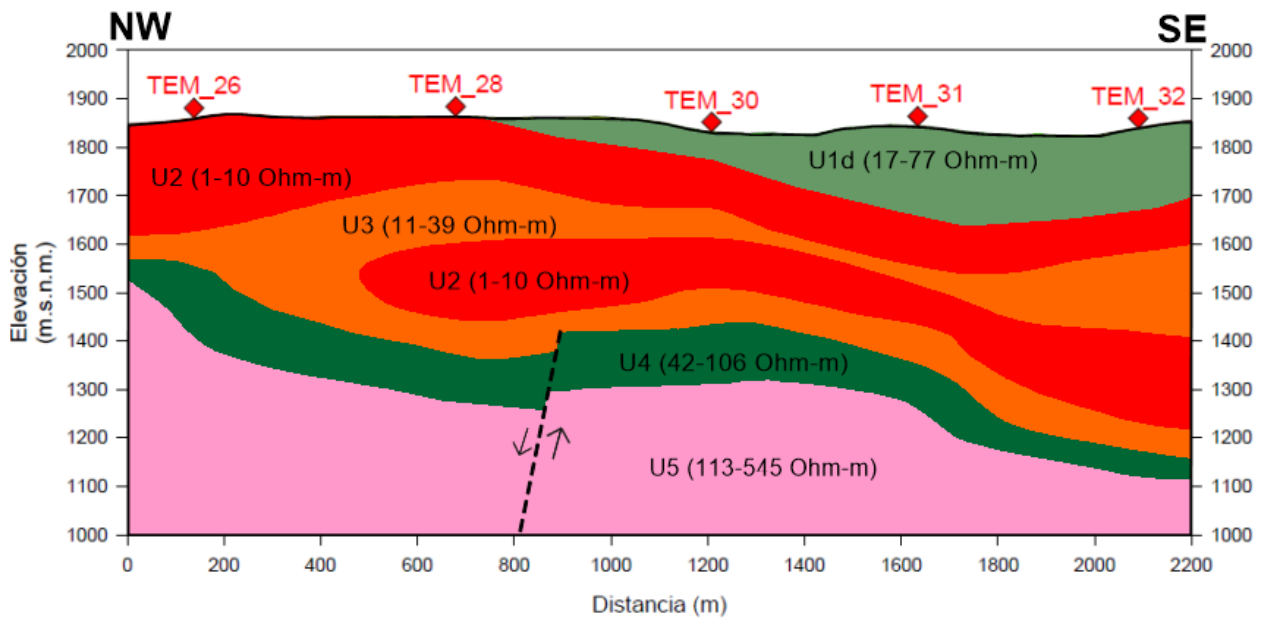


Figura 5.48: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 14.

Se infieren una falla que se encuentra a los 800 m de longitud del modelo y cortaría a las U3, U4 y U5.

En este modelo se pueden identificar 5 unidades:

De manera superficial en la parte SE extendiéndose hacia el NW por 1.4 km, se encuentra la U1d (17-77 Ohm-m), posiblemente asociada a basaltos intemperizados, y muestra un espesor que empieza en los 150 m y va disminuyendo gradualmente.

La U2, en color rojo se presenta subyaciendo a la unidad anterior, con resistividades de 1 a 10 Ohm-m, está asociada a materiales alterados hidrotermalmente que actúan como *claycap*. Se presenta en dos cuerpos: el primero se extiende desde superficie con un espesor de 200 m que disminuye a 100 m en la porción SE, y el segundo se encuentra a más profundidad y cuenta con un espesor promedio de 200 m.

La U3, posiblemente asociada riolitas e ignimbritas alteradas, se encuentra presente circundando a la U2, tiene un rango de resistividades de 11-39 Ohm-m, y un espesor variable desde los 50 hasta las 200 m, con una extensión lateral de 2.2 km; esta unidad sería afectada por una falla.

La U4, se encuentra subyaciendo a la unidad anterior, con resistividades de 42 a 106 Ohm-m, está posiblemente asociada a basaltos fracturados; esta unidad sería afectada por una falla. Está presente en un cuerpo de espesor variable entre 50 y 100 m, extendiéndose a lo largo de los 2.2 km del modelo.

Subyaciendo a las unidades anteriores, se encuentra la U5, con resistividades de 113 a 545 Ohm-m, está posiblemente a andesitas fracturadas; en dicha unidad es la que tiene alta probabilidad de contener el yacimiento geotérmico, debido a que sus altas resistividades muestran que existe la permeabilidad idónea para almacenar fluidos hidrotermales. La unidad sería afectada por una falla que sería de suma importancia ya que serviría como medio de recarga para el yacimiento geotérmico. Tiene un espesor que va de los 500 m en la porción NW y disminuye gradualmente hacia el SE hasta alcanzar los 100 m.

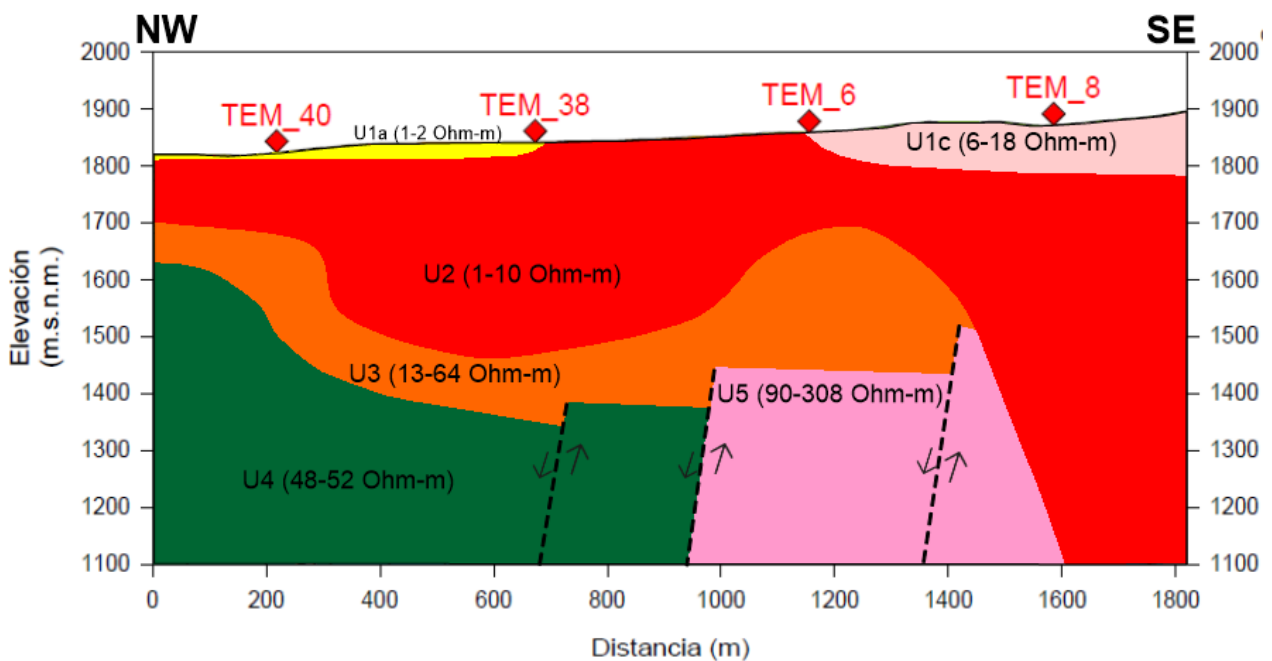


Figura 5.49: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 15.

Se infieren tres fallas: dos en la porción central del modelo que afectarían a la U3 y U4 y la siguiente en la porción SE, que afectaría a la U3 y U5.

En este modelo se pueden identificar 6 unidades:

Superficialmente en la porción NW se encuentra la U1a, con un espesor de 20 m en su parte más ancha, y una extensión lateral de 700 m, esta unidad está posiblemente asociada a depósitos aluviales y superficiales de acuerdo con sus resistividades (1-2 Ohm-m).

En la porción SE, de manera superficial se encuentra la U1c, con un rango de resistividades de 6-18 Ohm-m, está posiblemente asociada a andesitas intemperizadas, muestra un espesor de 200 m al SE que disminuye gradualmente a lo largo de su extensión de 700 m.

La U2, en color rojo se presenta subyaciendo a las unidades anteriores, con resistividades de 1 a 10 Ohm-m, está asociada a materiales alterados hidrotermalmente que actúan como *claycap*, se extiende a lo largo de todo el modelo, variando en su espesor, el cual es de 100 m en la parte NW, aumenta a 350 m en la parte central y llega los 700 en el extremo SE.

La U3 (13-64 Ohm-m), posiblemente asociada riolitas e ignimbritas alteradas, se encuentra subyaciendo a la unidad anterior; tiene un espesor promedio de 100 m y una extensión lateral de 1.4 km, esta unidad sería afectada por las 3 fallas inferidas.

La U4, se encuentra subyaciendo a la unidad anterior, con resistividades de 48 a 52 Ohm-m, está posiblemente asociada a basaltos fracturados; esta unidad sería afectada por 2 fallas, y una de ellas actuaría como límite con su unidad adyacente. Está presente en un cuerpo que alcanza un espesor de 500 m en su parte más ancha y una extensión lateral de poco más de 900 m.

Adyacente a la U4 y subyaciendo a la U3, se encuentra la U5, con resistividades de 90 a 308 Ohm-m, está posiblemente a andesitas fracturadas; esta unidad es en la que posiblemente se encuentre el yacimiento geotérmico, debido a que sus altas resistividades muestran que existe la permeabilidad idónea para almacenar fluidos hidrotermales. La unidad sería afectada por dos fallas, una de ellas actuaría como límite con la U4, estas fallas serían de suma importancia al ya que serviría como medio de recarga para el yacimiento geotérmico. Tiene un espesor que va de 300 a 450 m y una extensión lateral de 650 m.

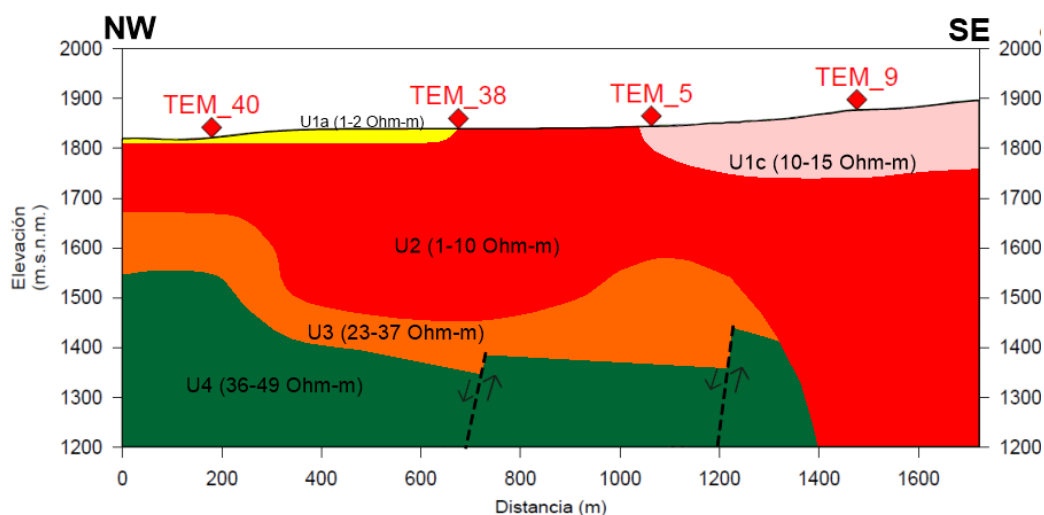


Figura 5.50: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 16.

Se infieren tres fallas: dos en la porción central del modelo que afectarían a la U3 y U4 y la siguiente en la porción SE, que afectaría a la U3 y U5.

En este modelo se pueden identificar 5 unidades:

Superficialmente en la porción NW se encuentra la U1a, con un espesor de 20 m en su parte más ancha, y una extensión lateral de 700 m, esta unidad está posiblemente asociada a depósitos aluviales y superficiales de acuerdo con sus resistividades (1-2 Ohm-m).

En la porción SE, de manera superficial se encuentra la U1c, con un rango de resistividades de 6-18 Ohm-m, está posiblemente asociada a andesitas intemperizadas, muestra un espesor de 120 m al SE que disminuye gradualmente a lo largo de su extensión de 700 m.

La U2, en color rojo se presenta subyaciendo a las unidades anteriores, con resistividades de 1 a 10 Ohm-m, está asociada a materiales alterados hidrotermalmente que actúan como *claycap*, se extiende a lo largo de todo el modelo, variando en su espesor, el cual es de 120 m en la parte NW, aumenta a 350 m en la parte central y llega los 550 en el extremo SE.

La U3 (23-37 Ohm-m), posiblemente asociada riolitas e ignimbritas alteradas, se encuentra subyaciendo a la unidad anterior; tiene un espesor promedio de 100 m y una extensión lateral de casi 1.4 km, esta unidad sería afectada por las 2 fallas inferidas.

La U4, se encuentra subyaciendo a la unidad anterior, con resistividades de 36 a 49 Ohm-m, está posiblemente asociada a basaltos fracturados; esta unidad sería afectada por 2 fallas. Está presente en un cuerpo que alcanza un espesor de 350 m en su parte más ancha al NW del modelo, el cual se reduce a 200 m, teniendo una extensión lateral de 1.4 km.

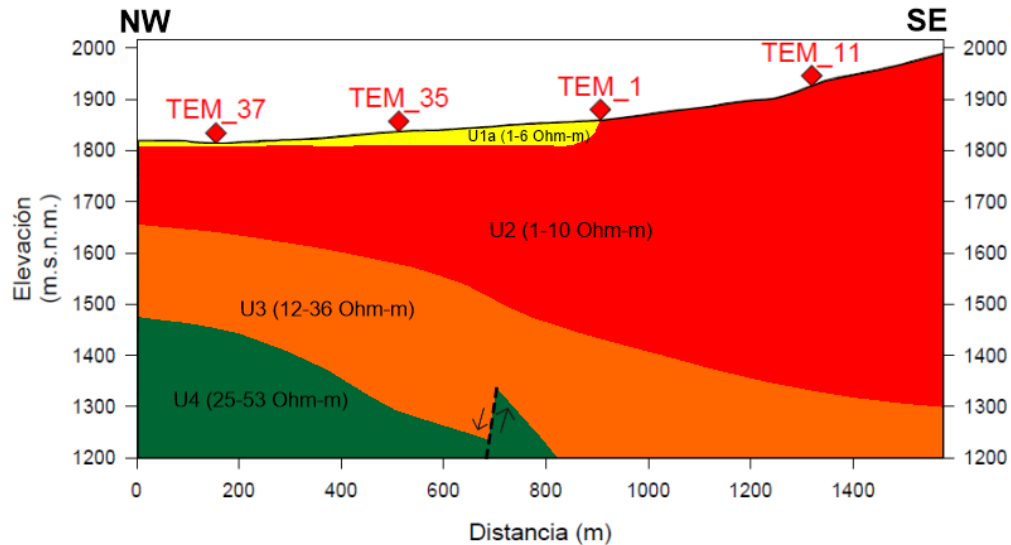


Figura 5.51: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 17.

Se infieren una falla en la parte central del modelo, la cual afectaría la U3 y una pequeña porción de la U4.

En este modelo se pueden identificar 4 unidades:

Superficialmente en la porción NW se encuentra la U1a, con un espesor que aumente hasta los 20 m en su parte más ancha, y una extensión lateral de aproximadamente 900 m, esta unidad está posiblemente asociada a depósitos aluviales y superficiales de acuerdo con sus resistividades (1-6 Ohm-m).

Subyaciendo a la unidad anterior se encuentra la U2, en color rojo, con resistividades de 1 a 10 Ohm-m, está asociada a materiales alterados hidrotermalmente que actúan como *claycap*, se extiende a lo largo de todo el modelo, variando en su espesor, que es de 140 m en la parte NW, y aumenta gradualmente hacia la porción SE alcanzando los 700 m.

La U3 (12-36 Ohm-m), posiblemente asociada riolitas e ignimbritas alteradas, se encuentra subyaciendo a la unidad anterior; tiene un espesor promedio de 150 m que se reduce a 100 m en la porción SE, esta unidad sería afectada por la falla inferida en el modelo.

La U4, se encuentra subyaciendo a la unidad anterior, con resistividades de 25 a 53 Ohm-m, está posiblemente asociada a basaltos fracturados; esta unidad sería afectada por una falla en una pequeña parte de su extensión de casi 800 m; su espesor es de 280 m el cual se va reduciendo gradualmente.

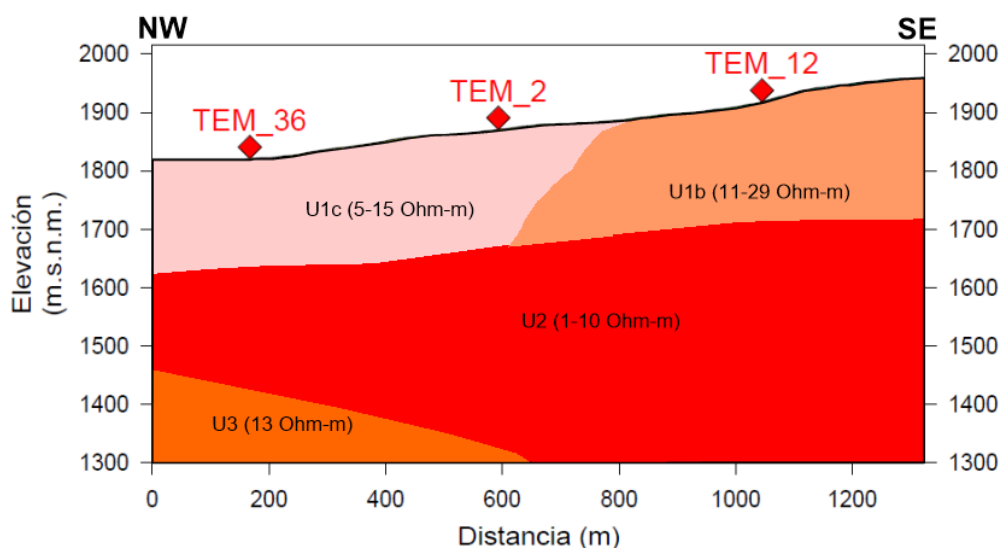


Figura 5.52: Modelo Geológico Conceptual del perfil geoelectrico 18.

En este modelo se identifican 4 unidades:

La U1c se encuentra superficialmente desde el extremo NE, con un espesor promedio de 200 m, extendiéndose a lo largo de 800, esta unidad (5-15 Ohm-m), está posiblemente asociada a andesitas intemperizadas

De manera adyacente a la unidad anterior se encuentra la U1b (11-29 Ohm-m), posiblemente asociada a ignimbritas y riolitas intemperizadas, muestra un espesor que va de los 200 m y aumenta hacia el SE alcanzando los 250 m, con una extensión lateral de 500 m.

Subyaciendo a las unidades anteriores está presente la U2 (1-10 Ohm-m), asociada a materiales alterados hidrotermalmente que actúan como *claycap*. Esta unidad se



## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

Con base en la interpretación de los resultados, en donde se integraron los modelos de resistividades y el modelo geológico conceptual de la zona de estudio comprendida entre San Agustín del Maíz y San Juan Tarameo se desprenden las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- El procesado de los 38 sondeos TEM que cubren el área de estudio de 45 km<sup>2</sup>, con separación de 300 m entre cada uno, permitió obtener secciones de resistividad que cubren la zona en direcciones N-S, NE-SW y NW-SE, y que así se realizara un análisis cuantitativo de las mismas. Posteriormente, a partir del reconocimiento de campo, se llevó a cabo un mejor análisis geológico y estructural que permitió precisar el modelo geológico conceptual. Por último, se interpretaron las secciones obtenidas, asociando así, los paquetes de resistividad a 5 posibles unidades litológicas.
- El sistema oculto de fallas escalonadas inferido propuesto a partir del reconocimiento geológico general muestra 4 fallas que surgen a partir de la falla maestra, conocida como falla Chehuayo, dicho sistema de fallas fungiría como sistema de recarga y descarga para el sistema geotérmico.
- La unidad más somera (U1), que se consideraría como materiales de cobertura, está subdividida de acuerdo a los mapas de geología local en: depósitos lacustres superficiales, ignimbritas y riolitas, andesitas y basaltos, presentando un rango de resistividades de 1 a 100 Ohm-m, siendo este un indicador del intemperismo que han sufrido esos materiales superficiales. Estos materiales están presentes en toda la zona, tienen un espesor variable desde los 20 hasta los 400 m, siendo las porciones norte, sur y este en dónde se pueden observar cuerpos con mayor espesor.

- La unidad 2 (U2), está asociada a materiales que presentan resistividades de 1 a 10 Ohm-m por lo que se asocia a material que sufrieron alteración hidrotermal; esta unidad fungiría como *claycap*, la cual mantendría confinado al sistema geotérmico. Está presente en toda la zona de estudio, con un espesor variable de 50 hasta los 700 m, observándose estos espesores mayores en la porción central del área; sería cortada en algunas zonas por las fallas inferidas, y es por ese medio por el que ascenderían los fluidos hidrotermales que alterarían los materiales correspondientes a la unidad.
- Las ignimbritas y riolitas (U3), tienen un rango de resistividades de 10 a 50 Ohm-m, esto sería un indicador de su alteración y fracturamiento, están presentes a lo largo de toda el área de estudio, con espesores que van desde 50 a 300 m. Esta unidad sería afectada en diversas zonas por el sistema oculto de fallas escalonado.
- Los basaltos (U4), estarían presentes en mayor las zonas norte y noroeste, en dónde alcanzarían espesores de hasta 500 m. Sus resistividades van de 10 a 200 Ohm-m, indicando fracturamiento y fallamiento de acuerdo al sistema oculto de fallas escalonadas.
- La unidad correspondiente a las andesitas (U5) sería las que contendría el reservorio geotérmico, según sus resistividades de 50 a 900 Ohm-m, siendo sus altas resistividades un posible indicativo de que esta unidad cuente con permeabilidad y saturación; esta unidad estaría afectado por el sistema oculto de fallas inferido que serviría como sistema de recarga y descarga para el reservorio; se encuentra presente con mayores espesores en las porciones sur, suroeste, noreste y oeste del área de estudio, como se puede observar en los modelos geológicos de las secciones 8, 9 y 14 (Figuras 6.11, 6.12 y 6.17), en dónde esta unidad logra alcanzar los 700 m de espesor, y de manera más somera, siendo estas las zonas que cuentan con las características idóneas por lo que le confieren el mayor potencial geotérmico del área de estudio.

- A partir del análisis de las secciones de resistividad en planta se puede concluir que las zonas con mayor alteración son las porciones centro y oeste, mientras que, por otro lado, se observa que las altas resistividades se presentan desde los 400 m en las porciones sur y este, siendo un indicativo, como ya se analizó, de materiales con alta permeabilidad que confieren un buen potencial geotérmico.
- Se identifican dos zonas con potencial geotérmico basadas en la presencia de andesitas. Los paquetes litológicos en dichas zonas contendrían los fluidos geotérmicos propios del sistema, además de ser afectado por el sistema de fallas escalonadas:
  - La Zona I que se encuentra en la porción suroeste de la zona de estudio en cercanía de la falla Chehuayo y siendo afectada por 1 de las fallas inferidas.
  - La Zona II, ubicada en la porción este de la zona de estudio, también en las inmediaciones de la falla Chehuayo y que es afectada por 4 de las fallas inferidas del sistema escalonado.

## 6.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar una segunda campaña de exploración geofísica en el que se realice la adquisición de datos de los sondeos TEM faltantes del proyecto inicialmente propuesto, así como realizar otros sondeos TEM enfatizando en las porciones sur, este y oeste de la zona de estudio; además se recomienda realizar sondeos Magnetotelúricos (MT) distribuidos estratégicamente a lo largo del área y en las zonas marcadas con mayor potencial geotérmico para lograr alcanzar mayor profundidad y así poder analizar el comportamiento de las resistividades de los materiales.
- Se recomienda realizar un reconocimiento geológico y estructural con mayor detalle para definir el sistema de fallas que afecta a la zona de estudio, ya que este es parte importante del sistema geotérmico.

- Por último, un pozo de exploración dentro de la zona sería factible para poder interpretar con mayor certeza las secciones de resistividad y así tener mayor certidumbre de las zonas con mayor potencial geotérmico.

## BIBLIOGRAFÍA

### BIBLIOGRAFÍA BÁSICA

#### *Documentos impresos:*

1. Aguirre, G., Ferrari L., Nelson S., Carrasco G., López M., y Urrutia J. (1998). *El Cinturón Volcánico Mexicano: Un proyecto multidisciplinario*. GEOS, Unión Geofísica Mexicana, A.C.
2. Cedillo, F. (2019). Trazo de subcuencas de Cuitzeo en plano topográfico. Ciudad de México.
3. Colegio de Geofísicos. (2018a). Exploración geofísica mediante sondeos transitorios electromagnéticos. Ciudad de México.
4. Colegio de Geofísicos. (2018b). Exploración mediante sondeos y calicatas electromagnéticas por transitorios. Ciudad de México.
5. Ferrari, L. (2000). *Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 53.
6. González, D. (2015). Estudio Geoeléctricos en el Valle de San Felipe, Baja California. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
7. Hernández, J. O. y Rodríguez, A. (2008). *Aplicación de métodos Geoeléctricos para el diagnóstico de un sitio urbano contaminado por hidrocarburos*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
8. Hernández, V. H. y Ávila, J.A. (2010). Unidades Geohidrológicas de la región Morelia-Cuitzeo. En Cram, S., Galicia L., Israde I. (Comp), *Atlas de la Cuenca del Lago Cuitzeo: Análisis de su geografía y entorno socioambiental*. Michoacán: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
9. Israde I., Buenrostro O., Garduño, V. H., Hernández, V. y López, E. (2009). *Problemática geológico-ambiental de los tiraderos de la Cuenca de Cuitzeo, norte del estado de Michoacán*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol. 61(1).
10. Israde, I. y Garduño, V. (2010). Geología. En Cram, S., Galicia L., Israde I. (Comp), *Atlas de la Cuenca del Lago Cuitzeo: Análisis de su geografía y entorno socioambiental*. Michoacán: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

11. Maza, A. E. (2015). *Estudio de sensibilidad del método electromagnético marino de fuente controlada en el dominio de la frecuencia con datos sintéticos*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
12. Palacios, J. (2019). *Elaboración de anaglifo de San Agustín del Maíz y San Juan Tarameo*. Ciudad de México.
13. Sánchez, R. R. (2018). *Aplicación de los métodos eléctrico y electromagnético para la caracterización e identificación de los límites entre el acuífero valle de Amealco y valle de San Juan del río, Querétaro*. (Tesis de licenciatura). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México.
14. Valencia, A. (2012). *Estudio de resistividad electromagnética en zonas geotérmicas del Cinturón Volcánico Mexicano, área Los Humeros*. (Informe de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.
15. Zúñiga, R. (2011). *Detección de zonas de riesgo a lo largo del colector de drenaje poniente de la ciudad de Guatemala*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.

*Documentos electrónicos:*

1. Comisión Federal de Electricidad. (2011). *Informe preventivo: Perforación exploratoria en la zona geotérmica San Agustín del Maíz-San Juan Tarameo, Mich.* Recuperado de: <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/mich/estudios/2011/16MI2011E0013.pdf>
2. Ferrari, L. (2014). *Tectónica y volcanismo en el Cinturón Volcánico Transmexicano*. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/260383955\\_Tectonica\\_y\\_volcanismo\\_en\\_el\\_Cinturon\\_Volcanico\\_Trans-Mexicano](https://www.researchgate.net/publication/260383955_Tectonica_y_volcanismo_en_el_Cinturon_Volcanico_Trans-Mexicano)
3. Guevara, J.A. (2016). *Estudios geofísicos y geológicos para la elaboración del modelo conceptual del yacimiento geotérmico de San Agustín del Maíz, Michoacán, México*. (Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo). Recuperado de: <https://colecciondigital.cemiegeo.org/xmlui/handle/123456789/516>

4. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Modelo Digital de Elevación de Michoacán de Ocampo. Recuperado de: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
5. Santoyo, E., Barragán, R. (2010). Energía geotérmica. *Ciencia*, Vol. 61 (2), Recuperado de: <https://www.amc.edu.mx/revistaciencia/index.php/234-vol-61-num-2-abril-junio-2010>
6. Schlumberger Oilfield Glossary. Inversión de Occam. Recuperado de: [https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/o/occams\\_inversion.aspx](https://www.glossary.oilfield.slb.com/es/Terms/o/occams_inversion.aspx)
7. Servicio Geológico Mexicano. Carta geológica Morelia E14-1. Recuperado de: [http://www.sgm.gob.mx/cartas/Cartas\\_Ed.jsp](http://www.sgm.gob.mx/cartas/Cartas_Ed.jsp)
8. Torres, V., Arellano, V., Barragán, R. M., González, E., Herrera, J. J., Santoyo, E., y Venegas, S. (1993). *Geotermia en México*. México. Programa Universitario de Energía, Coordinación de la Investigación Científica, UNAM. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/317621438\\_GEOTERMIA\\_EN\\_MEXICO](https://www.researchgate.net/publication/317621438_GEOTERMIA_EN_MEXICO)

## **BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA:**

### *Documentos impresos:*

1. Arredondo, J. (1983). *Levantamiento Gravimétrico en la Zona Central de la Laguna de Cuitzeo, Mich.* G.P.G. Comisión Federal de Electricidad, Reporte técnico.
2. Escobar, L. H. (2010). Onda Electromagnética. En Escobar, L. H. y Cortés, F. O., *Fundamentos de Teoría Electromagnética*. Ciudad de México: UNAM.
3. Garduño, V. H. y Gutiérrez, A. (1992). *Magmatismo, Hiatus y Tectonismo de la Sierra Madre Occidental y del Cinturón Volcánico Mexicano*. Geofísica Internacional 31.
4. Garduño, V., Arreygue, E., Israde I. y Rodríguez, G. (2001). *Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuífero y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Vol. 18(1).
5. Garduño, V. H., Giordano, N., Ávila, J.A., Hernández, V.M., Sámano, A. y Díaz, J.E. (s.f). Estudio hidrogeológico del sistema acuífero de Morelia, Michoacán, para

- una correcta planificación del territorio. En Vyera, A. y Larrazábal A., *Urbanización, vulnerabilidad y riesgo*. (Ciudad de México: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental.
6. Israde, I., Garduño, V. H. y Ortega, R. (2001). *Paleoambiente lacustre del cuaternario tardío en el centro del lago de Cuitzeo*. Hidrobiológica. Vol. 12 (1).
  7. Menke, W. (1989). *Geophysical data analysis: discrete inverse theory*. *International Geophysics Series*, Vol. 45. Academic Press.
  8. McNeil, J.D. (1994). *Principles and Application of Time Domain Electromagnetic Techniques for Resistivity Sounding*. Technical Note TN-27, Geonics Limited.
  9. Moncayo R., Israde, I., y Garduño, V. H. (2001). *La cherehuita Hubbsina Turneri De Buen (1941) (Pices: Goodeidae)*. Origen y Distribución y su uso en la regionalización de la cuenca del Lerma. Hidrobiológica, Vol. 11 (1).
  10. Morales, L. (2010). Área de estudio. En Cram, S., Galicia L., Israde I. (Comp), *Atlas de la Cuenca del Lago Cuitzeo: Análisis de su geografía y entorno socioambiental*. Michoacán: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
  11. Nabighian, M. N. y Macnae, J. C. (1991). Time domain electromagnetic prospecting methods. En: Nabighian, M.N. ED., *Electromagnetic Methods Applied to Geophysics Part A*, Vol. 2.
  12. Orellana, E. (1982). *Prospección Geoeléctrica por Corriente Continua*. Paraninfo: Madrid, España.
  13. Tarantola, A. (2005). *Inverse problem theory and methods for model parameter estimation*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
  14. Ward, S.H. y Hohmann, G.W. (1988). *Electromagnetic theory for geophysical applications*, en Nabighian, M.N., ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics*. Tulsa, Oklahoma, Society of Exploration Geophysics.
  15. Weyl, H. (1919). *Ausbreitung elektromagnetischer Wellen über einem ebenen Leiter* (Vol. 60). Annalen der Physik.

#### *Documentos electrónicos:*

1. Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica. (2016). Geotermia en México. México: CeMIEGeo. Recuperado de: <http://www.cemiegeo.org/index.php/geotermia-en-mexico>

2. Comisión Nacional del Agua. (2018). Actualización de la disponibilidad media anual del agua en el acuífero Lago de Cuitzeo, 1121. Guanajuato. Recuperado de: [https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\\_Acuiferos\\_18/guanajuato/DR\\_1121.pdf](https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/guanajuato/DR_1121.pdf)
3. Gómez, P. y González Esteban. (2012). *Las ecuaciones de Maxwell* (1ª Ed). España. Recuperado de: <https://eltamiz.com/2012/03/19/el-libro-de-las-ecuaciones-de-maxwell-en-pdf/>
4. Ferrari, L., V. H. Garduño, G. Pasquaré y A. Tibaldi (1994). *Volcanic and Tectonic Evolution of the Central Mexico: Oligocene to Present*. Geofísica Internacional, Vol. 33, (1). Recuperado de: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/geofisica/article/view/39540>
5. Instituto Geológico y Minero de España. (1985). *Análisis y valoración de las técnicas geofísicas aplicadas a la investigación geotérmica*. Ministerio de Industria y Energía: España. Recuperado de: [http://info.igme.es/SidPDF/035000/001/Analisis%20y%20valoracion%20de%20las%20tecnicas%20geofisicas%20apliacadas%20a%20la%20investigacion%20geotermica/35001\\_0002.pdf](http://info.igme.es/SidPDF/035000/001/Analisis%20y%20valoracion%20de%20las%20tecnicas%20geofisicas%20apliacadas%20a%20la%20investigacion%20geotermica/35001_0002.pdf)
6. Pasquaré G., Ferrari, L., Garduño, V. H., Tibaldi, A. y Vezzoli, L. (1991). *Geologic Map of the Central Mexican Volcanic Belt, States of Guanajuato and Michoacan, Mexico*. University of Milano. Editado por: Geological Society of America, Map and Chart, Series MCH072. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/313366242\\_Geologic\\_Map\\_of\\_the\\_Central\\_Sector\\_of\\_the\\_Mexican\\_Volcanic\\_Belt\\_States\\_of\\_Guanajuato\\_and\\_Michoacan\\_Mexico\\_Geological\\_Society\\_of\\_America](https://www.researchgate.net/publication/313366242_Geologic_Map_of_the_Central_Sector_of_the_Mexican_Volcanic_Belt_States_of_Guanajuato_and_Michoacan_Mexico_Geological_Society_of_America)
7. Pérez, L. (2004). *Apunte: Ecuaciones de Maxwell*. Buenos Aires: Facultad de Ingeniería-UBA. Recuperado de: <http://materias.fi.uba.ar/6203/Download/Contribuciones/Maxwell/Apunte%20Charla%20Maxwell.pdf>

## ANEXOS

### ANEXO A

#### ÍNDICE DE ECUACIONES

Ley de Gauss para campo eléctrico.....	28
Ley de Gauss para campo magnético.....	28
Ley de Faraday.....	28
Ley de Ampere.....	28
Ecuación para campo eléctrico en el dominio del tiempo.....	32
Ecuación para campo magnético en el dominio del tiempo.....	32
Ecuación para campo eléctrico en el dominio de la frecuencia.....	34
Ecuación para campo magnético en el dominio de la frecuencia.....	34
Constante de propagación.....	45
Ley de Ohm.....	37
Resistividad eléctrica de un material.....	39
Conductividad de un material.....	39
Ley de Archie.....	40

## ANEXO B

En este anexo se incluyen las coordenadas de todos los sondeos TEM realizados para el proyecto.

Tabla 1 Anexo B. Coordenadas UTM y elevación de los sondeos TEM.

TEM	X	Y	Z (m)
1	274965	2202687	1866
2	275105	2203263	1870
3	275268	2203821	1847
4	275628	2204287	1845
5	274583	2201922	1859
6	274421	2201582	1899
7	274145	2201272	1873
8	274787	2201349	1888
9	274972	2201783	1880
11	275356	2202549	1930
12	275494	2203008	1929
13	275678	2203483	1890
14	275913	2203931	1870
15	276477	2203828	1857
25	277488	2203362	1846
26	277279	2202931	1870
28	277809	2202723	1860
29	277606	2202378	1896
30	278059	2202196	1867
31	278425	2201970	1858
32	278859	2201778	1845
33	279433	2201618	1855
34	274508	2202474	1851
35	274628	2202896	1846
36	274670	2203311	1840
37	274250	2202934	1839
38	274240	2202113	1853
39	274035	2202529	1841
40	273765	2202258	1839

41	274031	2201785	1860
42	273709	2201535	1851
43	273381	2201259	1891
44	273284	2201768	1841
45	272880	2201206	1849
46	272475	2200959	1849
47	272104	2201096	1842
48	271861	2200775	1851
49	271465	2200961	1842
50	271206	2200681	1840

## ANEXO C

Este anexo contiene todas las curvas de resistividades y los modelos de capa correspondientes a cada uno de los sondeos TEM procesados.

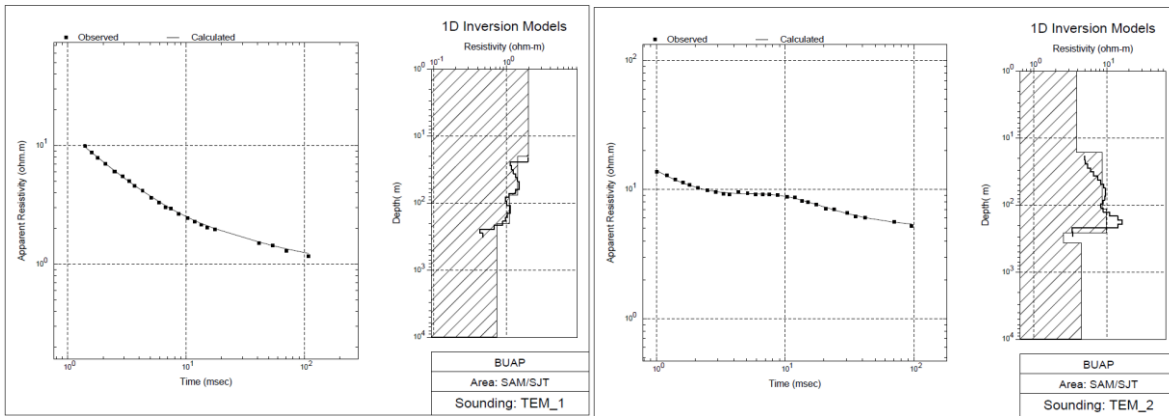


Figura 1 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 1

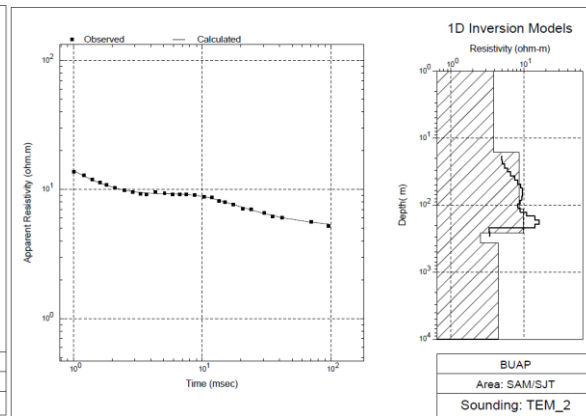


Figura 2 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 2

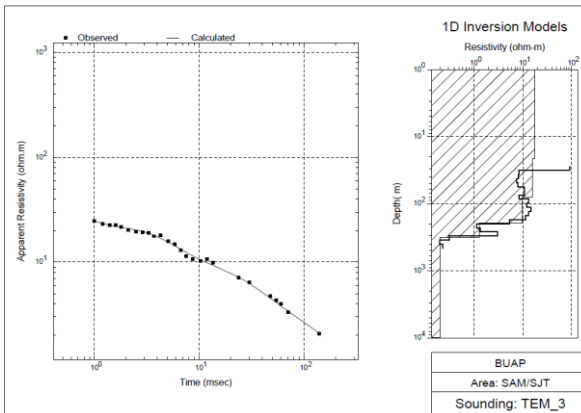


Figura 3 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 3

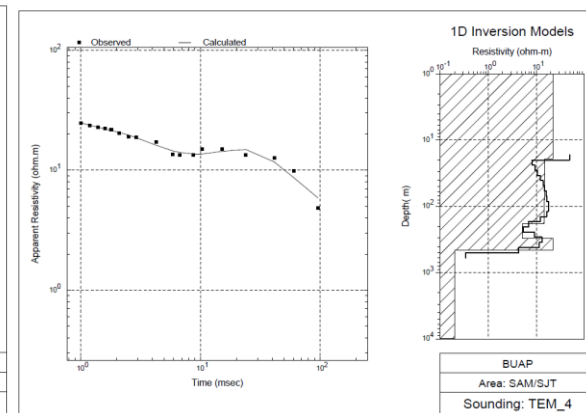


Figura 4 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 4

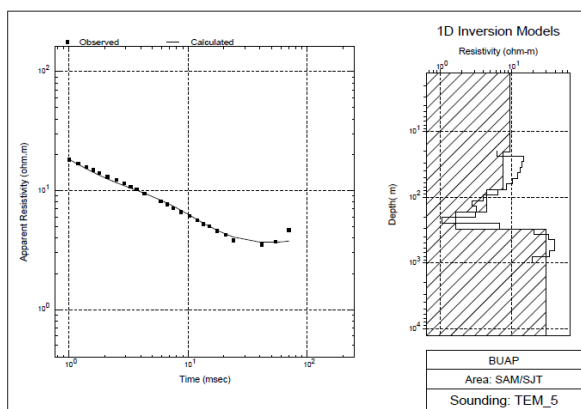


Figura 5 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 5

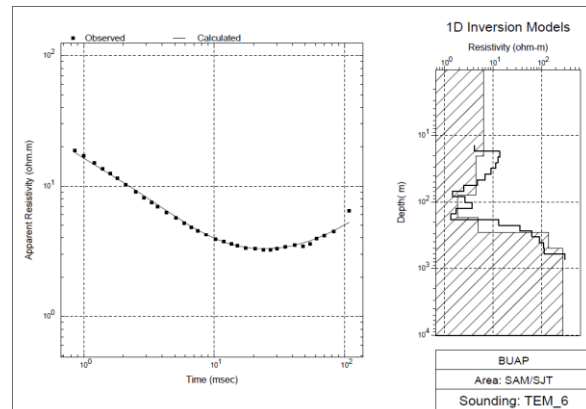


Figura 6 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 6

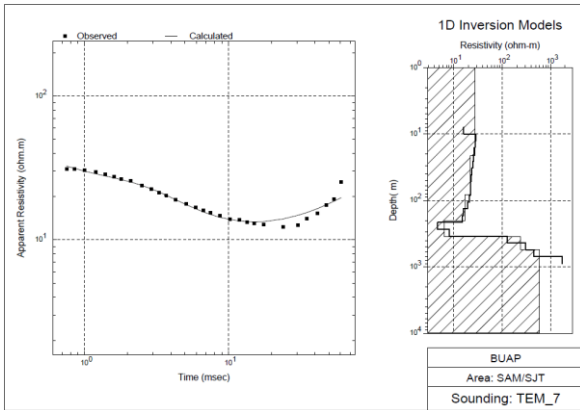


Figura 7 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 7

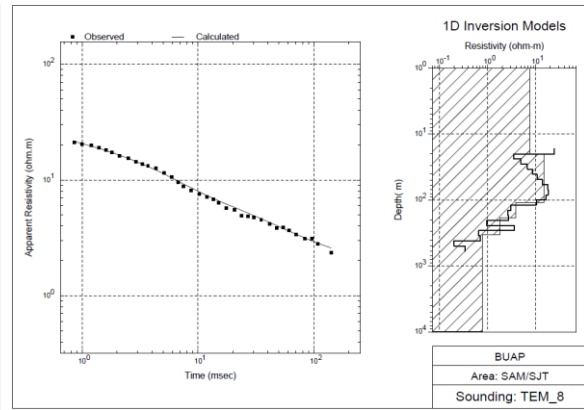


Figura 8 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 8

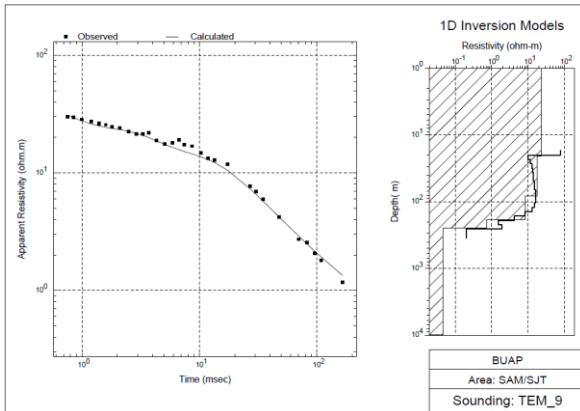


Figura 9 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 9

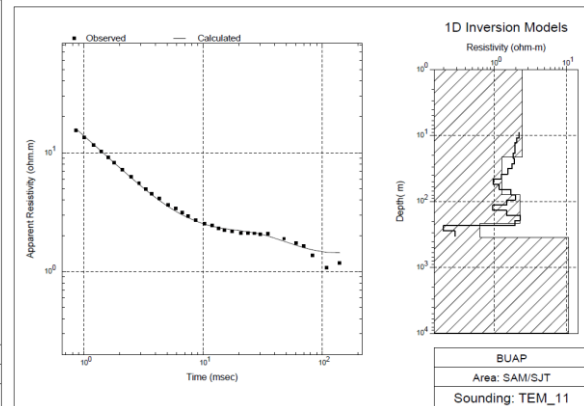


Figura 10 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 11

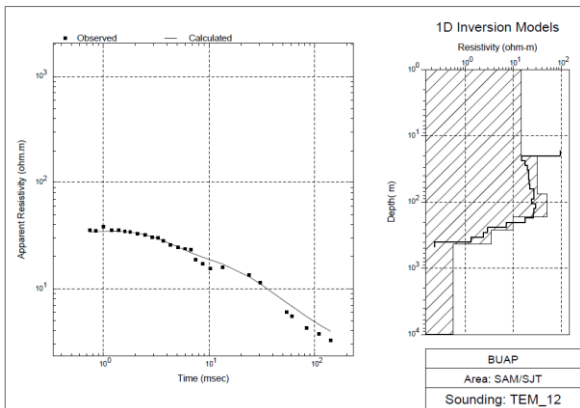


Figura 11 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 12

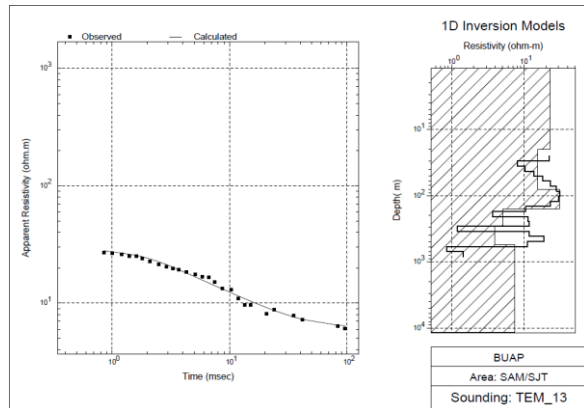


Figura 12 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 13

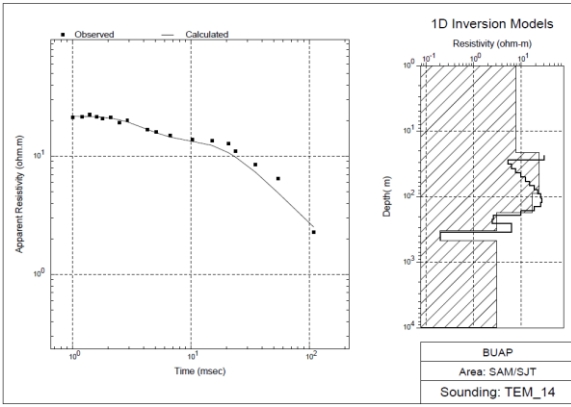


Figura 13 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 9

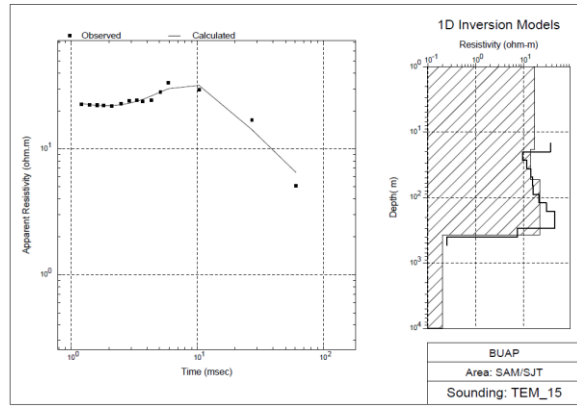


Figura 14 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 15

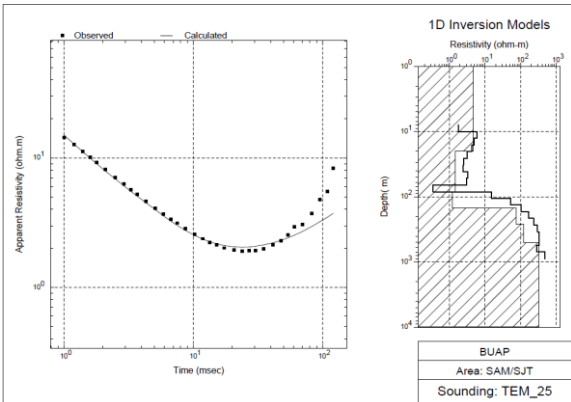


Figura 15 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 25

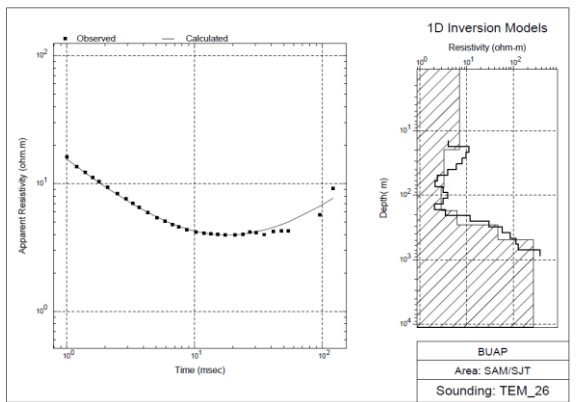


Figura 16 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 26

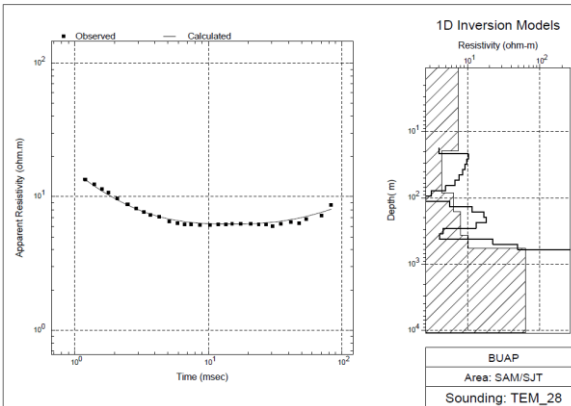


Figura 17 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 28

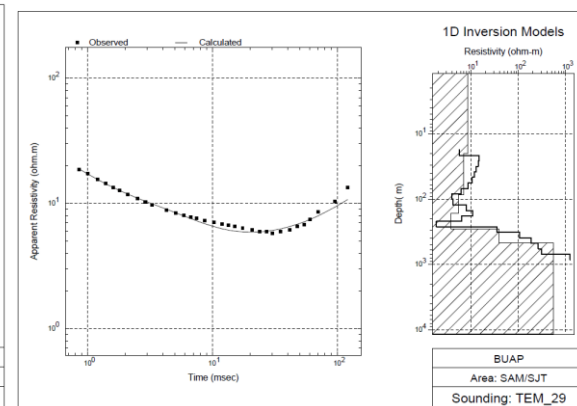


Figura 18 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 29

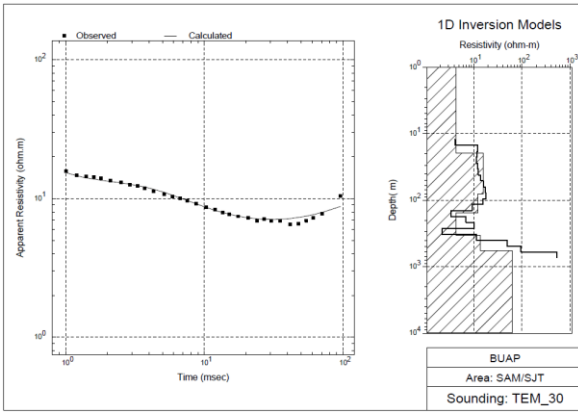


Figura 19 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 30

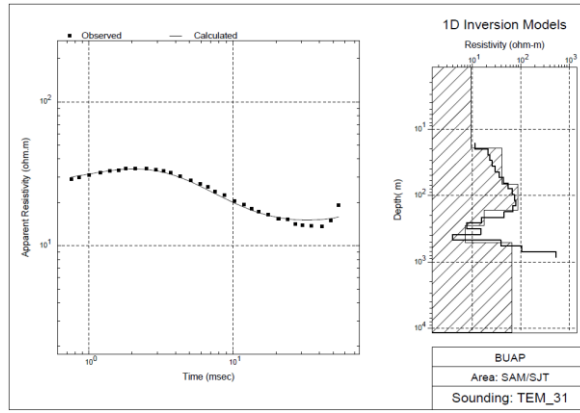


Figura 20 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 31

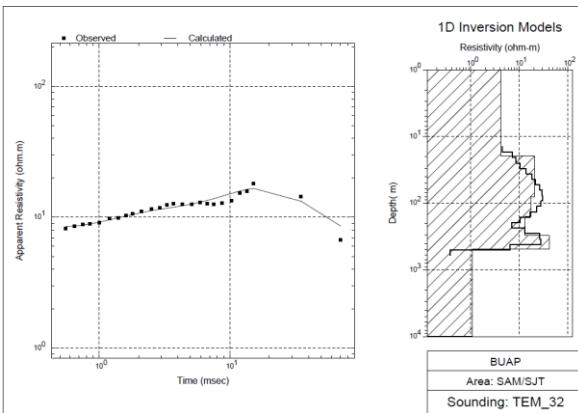


Figura 21 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 32

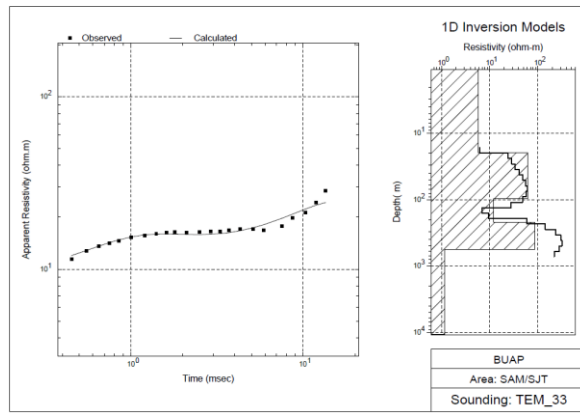


Figura 22 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 33

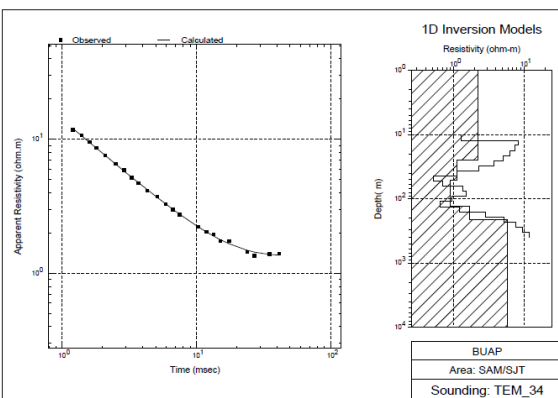


Figura 23 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 34

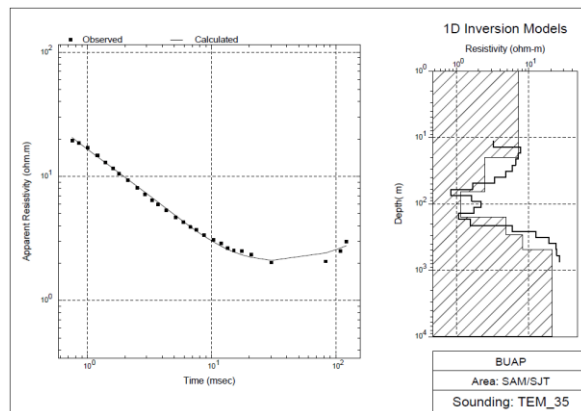


Figura 24 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 35

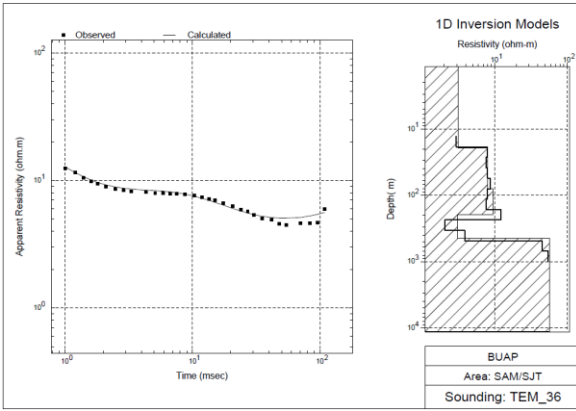


Figura 25 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 36

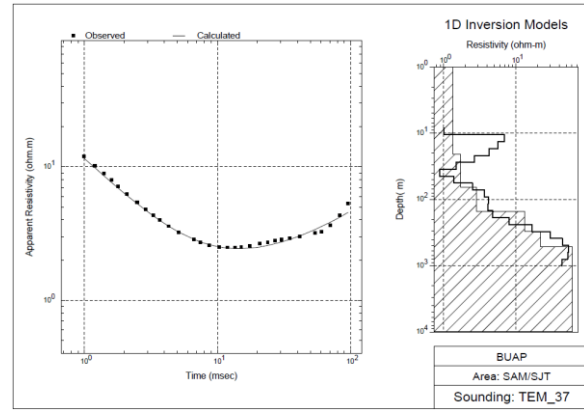


Figura 26 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 37

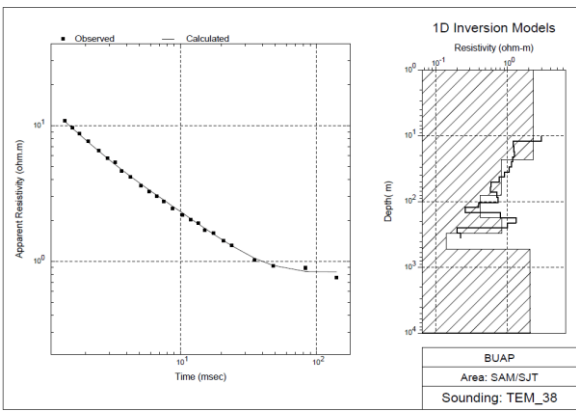


Figura 27 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 38

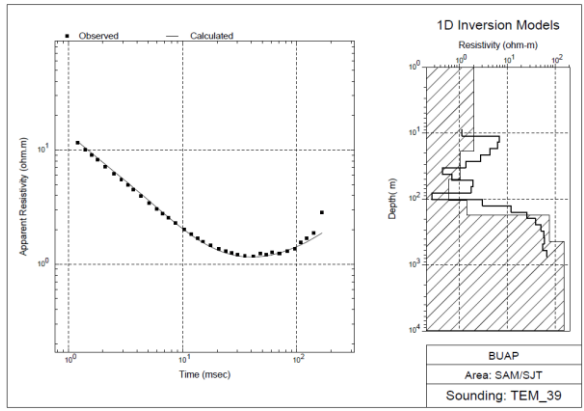


Figura 28 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 39

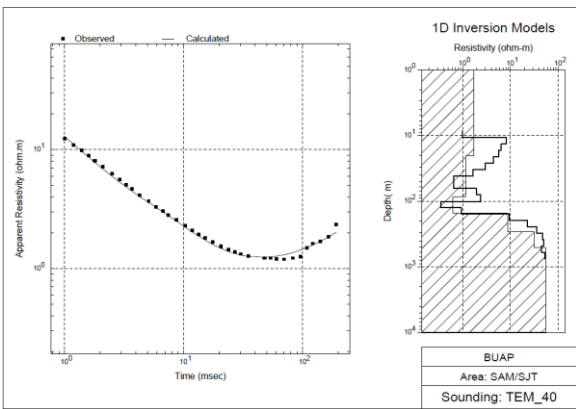


Figura 29 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 40

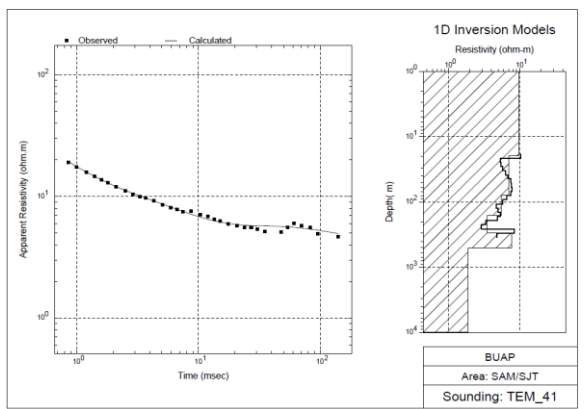


Figura 30 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 41

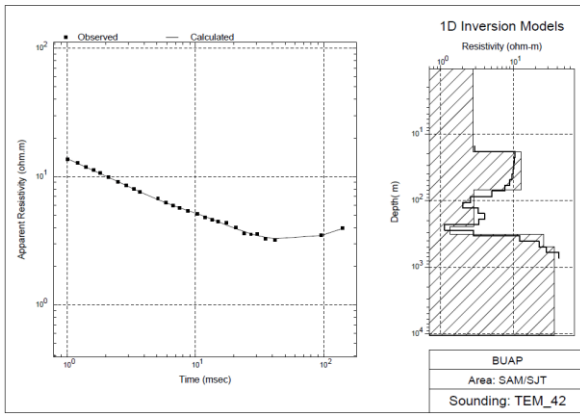


Figura 31 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 42

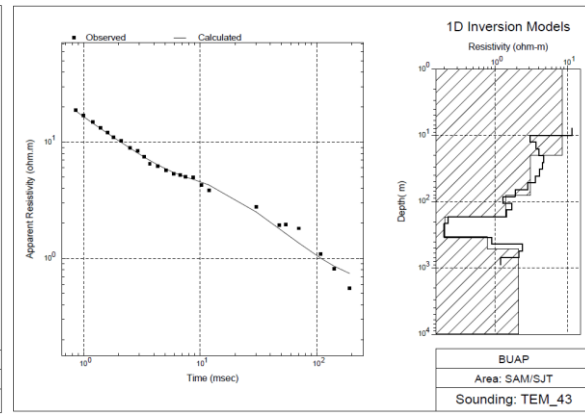


Figura 32 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 43

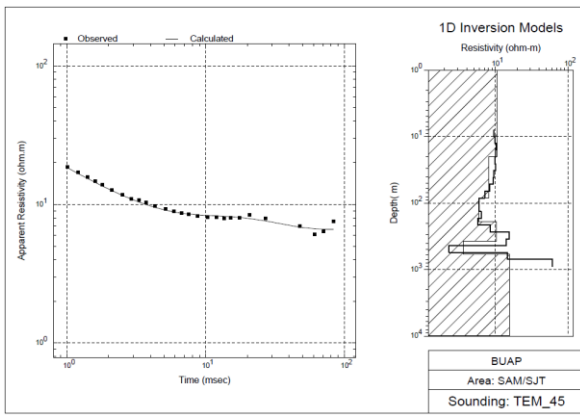


Figura 33 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 45

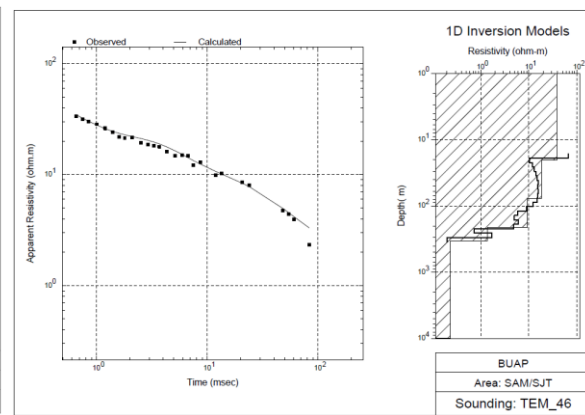


Figura 34 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 46

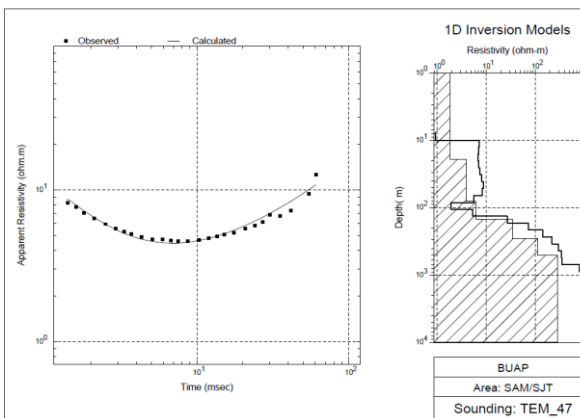


Figura 35 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 47

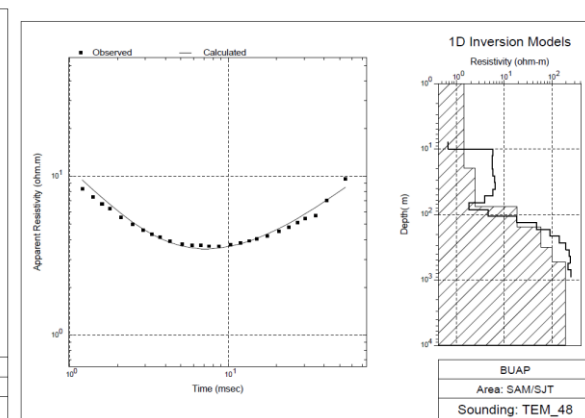


Figura 36 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 48

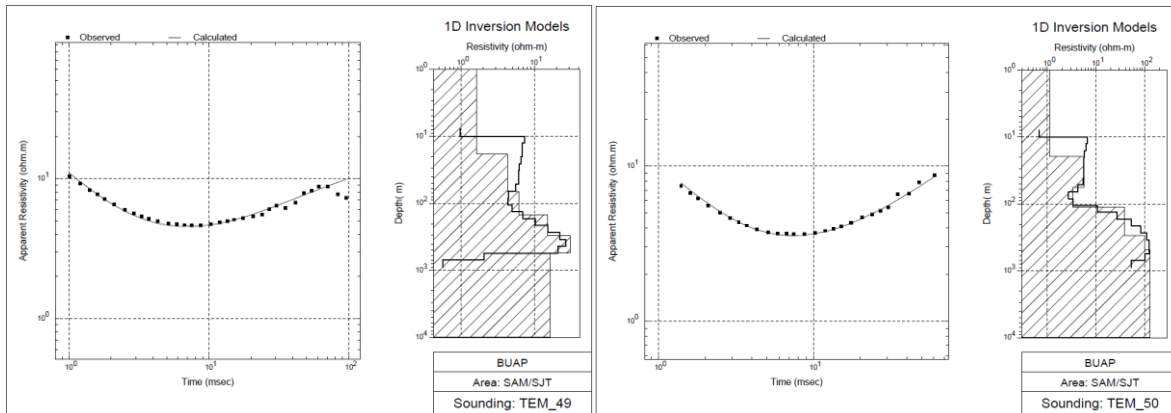


Figura 37 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 49

Figura 38 Anexo C. Curva de resistividad y modelo de capas asociados al TEM 50

## ANEXO D

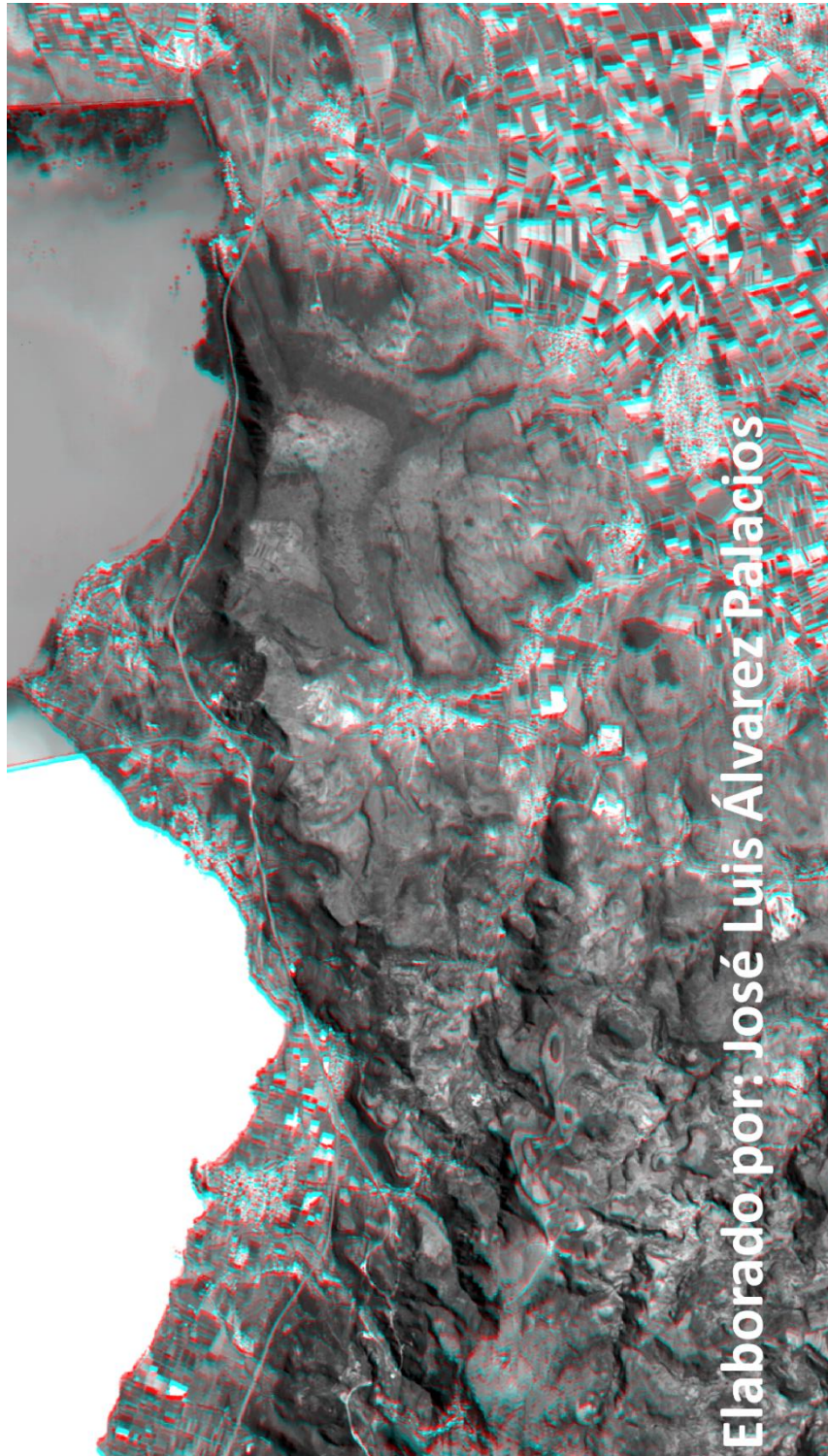


Figura 1 Anexo D. Anaglifo tridimensional. Fuente: Palacios, J. (2020)