

Diplomado en Geotermia para América Latina
Cuarta Edición

Universidad de El Salvador
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Unidad de Posgrados

Trabajo de Investigación Final:

**Caracterización del acuífero intermedio de un sistema
geotérmico de El Salvador mediante el uso de datos
geofísicos**

Presentado por:

Luis Adrián Mayén Flamenco

Asesores:

Lic. José A. Rivas

Lic. Pedro Santos

San Salvador, noviembre de 2019

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS	4
ÍNDICE DE FIGURAS	5
1. RESUMEN	7
2. INTRODUCCIÓN	8
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....	10
5. OBJETIVOS	11
5.1. Objetivo General.....	11
5.2. Objetivos Específicos.....	11
6. MARCO TEÓRICO.....	12
6.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	12
6.2. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA.....	13
6.2.1. Geomorfología.....	14
6.3. HIDROGEOLOGÍA	15
6.3.1. Acuífero Intermedio Termal.....	17
6.4. MÉTODOS GEOFÍSICOS EN EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA.....	17
6.4.1. GRAVIMETRÍA.....	18
6.4.2. MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS.....	19
6.5. CORRELACIÓN DE ANOMALÍAS GEOFÍSICAS CON ACUÍFEROS	20
6.6. CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA DE POZOS.....	22
7. METODOLOGÍA.....	23
7.1. PROCESAMIENTO DATOS GEOFÍSICOS	23
7.1.1. Datos Electromagnéticos	23
7.1.2. Datos Gravimétricos	25
7.2. CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA.....	26
7.3. INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN GEOFÍSICA-GEOLÓGICA	27

8.	ANÁLISIS DE DATOS	27
8.1.	DATOS MT	27
8.2.	DATOS GRAVIMÉTRICOS.....	33
8.3.	INTEGRACIÓN DE RESULTADOS DE INTERPRETACIÓN DATOS GEOFÍSICOS ..	34
9.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	36
10.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	41
11.	AGRADECIMIENTOS.....	43
12.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Unidades Litoestratigráficas y materiales vinculados a dichas unidades (Fuente: Modificado de (LaGeo, 2012)).....	13
Tabla 2. Acuíferos principales del Sistema Geotérmico de Interés (Fuente: Modificado de (LaGeo, 2012)).....	16
Tabla 3. Correcciones realizadas al valor medido de la gravedad por medio de un gravímetro (Fuente: Modificado de (Georgsson, 2009)).....	18
Tabla 4. Valores de propiedades de materiales comunes (Fuente: (Astier, 1975)).....	20

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio.	12
Figura 2. Mapa de elementos geomorfológicos y estructurales predominantes en la zona de estudio.	15
Figura 3. Mapa Hidrogeológico Superficial de la región de estudio (Fuente: Elaboración Propia con base a los datos de (ANDA, 2011))	16
Figura 4. Esquema de ubicación del acuífero termal intermedio según los registros de perforación (Fuente: (LaGeo, 2012)).....	17
Figura 5. Arreglo de los sensores utilizados durante un estudio de MT (Fuente: (Comeau, 2015))	19
Figura 6. Resultados del procesamiento de datos MT. a) Mapa de distribución de resistividades de un campo geotérmico. b) Sección 2-D de un perfil de resistividades de un campo geotérmico, se aprecia la característica formación de una cúpula resistiva. (Fuente: Tsend-Ayus, 2006 & Árnasson, 2007 en (Georgsson, 2009))	20
Figura 7. Resultado del procesamiento, modelación e interpretación de un sondeo de resistividad eléctrica. La información litológica de pozos ayuda a signar el tipo de roca que subyace en el punto de realización del estudio (Fuente: (Sundararajan, Sankaran, & Al-Hosni, 2012))	21
Figura 8. Ejemplificación de correlación litoestratigráfica de pozos geotérmicos (Fuente: Informe Perforación Pozo LaGeo).....	22
Figura 9. Ubicación de la red de sondeos MT utilizados en la investigación	23
Figura 10. Rutina de creación de base de datos, procesamiento previo (smooth) y modelaje 1-D para datos MT en WingLink	24
Figura 11. Mapa de anomalía de Bouguer (Izq) y mapa de primera derivada horizontal (der) del sistema geotérmico de interés	26
Figura 12. Sondeos “B” MT en los que se identificó un patrón de resistividades característicos en donde se puede identificar las resistividades asociadas al acuífero intermedio. La línea punteada delimita el techo y el fondo de la unidad acuífera	28
Figura 13. Sondeos “B” MT en los que se identificó un patrón de resistividades característicos en donde se puede identificar las resistividades asociadas al acuífero intermedio. La línea punteada delimita el techo y el fondo de la unidad acuífera	28



Figura 14. Sondeos “MTB” MT en los que se identificó un patrón de resistividades características en donde se puede identificar las resistividades asociadas al acuífero intermedio. La línea punteada delimita el techo y el fondo de la unidad acuífera.29

Figura 15. Distribución espacial del techo del acuífero intermedio del sistema geotérmico de interés.....30

Figura 16. Distribución espacial de la base del acuífero intermedio del sistema geotérmico de interés.....31

Figura 17. Superposición de mapas de Techo y Base del acuífero intermedio para determinación de espesor del acuífero32

Figura 18. Correlación de los lineamientos identificados con el mapa de primera derivada de gravimetría y el mapa estructural de la región de estudio33

Figura 19. Integración de mapa de distribución de profundidad del techo del acuífero y estructuras geológicas predominantes de la zona.....35

Figura 20. Distribución del espesor del acuífero intermedio, integrado con estructuras geológicas predominantes en la zona de interés.....36

Figura 21. Propuesta de distribución del acuífero intermedio basado en información estratigráfica y de anomalías 1-D de MT.....38

Figura 22. Perfil propuesto (línea roja) N-S para modelo de resistividades 2-D con base a los datos de MT.....39

Figura 23. Perfil 2-D del comportamiento de la resistividad en profundidad (isocontornos); patrón de flujo preferencial de los fluidos (simbolizado por las flechas azules).40

1. RESUMEN

La presente investigación propone la delimitación del acuífero intermedio de un sistema geotérmico en El Salvador a partir de información geofísica y de datos de pozos. La metodología a seguir se basa en identificar, en primera instancia, las zonas que presentaron pérdidas parciales durante la perforación de pozos y enfocarse en las unidades que el área de geología ha categorizado como acuíferas.

Se realizó la consulta de 7 pozos cuyos registros suponen la existencia del acuífero intermedio de mediana-alta temperatura, habiéndose identificado en cada pozo las unidades estratigráficas que se vinculan a este, correspondiendo a secuencias de lavas basálticas, basalto-andesíticas y andesíticas y tobas líticas ácidas o intermedias; dichos materiales se ubicaban en el rango de 400 a -500 msnm.

Con las unidades estratigráficas ubicadas se llevaron a cabo los procesamientos de 34 sondeos magnetoteléuticos en el área de interés, generando modelos 1-D de detalle realizándose una interpretación cualitativa, donde se identificaron los materiales asociados al acuífero intermedio, los cuales constan de materiales con resistividades entre $10 - 20 \Omega \cdot m$, con profundidades variables entre 400 a -450 msnm y que subyacen materiales conductivos ($<6 \Omega \cdot m$). Se llevó a cabo un modelo 2-D en un perfil S – N permitiendo delimitar en él las regiones con resistividades asociadas al acuífero y los espesores que estas capas pueden tener. La distribución espacial, o vista en planta, fue generada por la compilación de los puntos MT en donde se identificó la profundidad del techo del acuífero, su resistividad asociada y el fondo del mismo.

Además, se llevó a cabo el procesamiento de datos gravimétricos para la determinación de estructuras que pudiesen tener influencia en el transporte o forma del acuífero, identificándose a partir de mapas de primera derivada lineamientos que correspondían con los mapas estructurales de la región de interés.

Con toda la información procesada e interpretada, se obtuvo como resultado un mapa de distribución del acuífero el cual sugiere que este se encuentra predominantemente en la región central del sistema geotérmico, con espesores que rondan los 50 – 450 m y con valores de resistividad asociados de $10 - 20 \Omega \cdot m$, y un patrón de flujo preferencial con componente SE – NW y S – N.

2. INTRODUCCIÓN

La caracterización de acuíferos basada en información geofísica permite obtener parámetros que pueden ser vinculados a la geometría simple de estos. Usualmente en los sistemas geotérmicos de alta temperatura se pueden tener dos o más acuíferos a diferentes temperaturas.

Los acuíferos de temperatura intermedia pueden ser utilizados para diferentes actividades, entre ellas sistemas binarios, o para reinyección de fluidos en caliente. Para conocer las condiciones de estos acuíferos usualmente se realizan estudios geocientíficos enfocados en las características físicas de estos.

Al utilizar información gravimétrica para delimitar estructuras que puedan intervenir en la distribución de los materiales, espesores o generación de patrones de flujo de los acuíferos podemos generar un esbozo generalizado estas mismas, y si esta información se integra con datos de resistividad eléctrica obtenidos a partir de métodos electromagnéticos, se tiene la posibilidad de generar un modelo simple de la geometría del acuífero basada en información geofísica.

No obstante, la información geofísica necesita de la correlación de información geológica, es por ello que aprovechando los registros de perforación de pozos se puede vincular el comportamiento de anomalías geofísicas a materiales específicos y de esta manera fundamentar los resultados geofísicos.

Toda la información puede presentarse en mapas que incluyan las estructuras que predominan en la región de estudio y un análisis cualitativo que permita fundamentar y darle peso a la interpretación de datos geofísicos.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Un sistema geotérmico puede caracterizarse por una formación geológica con capacidad de retener fluido, ya sea líquido o gaseoso, a una temperatura elevada, la cual puede ser aprovechada para la generación de energía. Dichos sistemas suelen poseer más de una región, o acuíferos, según se va profundizando en la exploración.

Dentro de estos se pueden encontrar acuíferos superficiales fríos, intermedios fríos y calientes y profundos (fríos y calientes). En el caso del sistema geotérmico de interés, la generación de energía se hace con base al recurso más profundo, no obstante, exploraciones geocientíficas previas han identificado una unidad intermedia con temperaturas relativamente altas.

El acuífero intermedio del sistema geotérmico de estudio levanta interés para evaluar múltiples actividades, entre ellas la reinyección del fluido geotérmico a alta temperatura, o el aprovechamiento de este para la implementación de un sistema binario de temperatura intermedia. No obstante, para proceder a realizar estas actividades se debe de conocer las dimensiones y geometría de dicho reservorio, con el propósito de focalizar estudios más específicos en dichas áreas.

Por lo tanto, saber si el acuífero intermedio se encuentra distribuido uniformemente dentro de los límites del sistema geotérmico o si existen estructuras que limiten la interconexión de las unidades geológicas que componen dicho acuífero, así como las características geofísicas de las unidades que forman parte del acuífero, abonaría a conocer la dinámica de flujo y las propiedades del acuífero, y con ello aportar para el aprovechamiento de este y de nuevas investigaciones relacionadas al mismo.

Hasta el momento, los estudios enfocados a este acuífero se resumen en identificación de unidades estratigráficas vinculadas a zonas de pérdida en la perforación y la determinación de la existencia con base a información geológica. Por lo que, es de suma importancia generar propuestas para la delimitación y caracterización, en su defecto preliminar, de dicha formación.

4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

El propósito principal de esta investigación es dar una primera opinión simplificada del acuífero intermedio, para posteriormente ahondar en la exploración de este para aprovecharlo de la mejor manera posible.

A partir de datos geofísicos se puede llegar a obtener una interpretación que sugiera la forma, espesor y dirección preferencial de los fluidos que se alojan en el acuífero intermedio. Así como observar el comportamiento de las anomalías de diferentes propiedades físicas para que en futuras investigaciones estas puedan ser vinculadas al acuífero en cuestión.

Afortunadamente para este estudio, se contó con datos suficientes para poder realizar una aproximación de las condiciones del acuífero, basadas en información gravimétrica y electromagnética, vinculada a su vez con la información geológica existente que pueda correlacionarse para la profundización de las características del acuífero intermedio.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo General

Identificar anomalías geofísicas y correlacionarlas con estructuras y materiales geológicos asociados al acuífero intermedio de un sistema geotérmico en El Salvador.

5.2. Objetivos Específicos

- Procesar datos gravimétricos y electromagnéticos del sistema geotérmico de interés para delimitar las capas correspondientes al acuífero intermedio.
- Realizar la correlación litológica con los datos geofísicos que aporten información del acuífero intermedio.
- Generar un modelo simplificado del acuífero intermedio del campo geotérmico.

6. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentará la base teórica que fundamentará la investigación. Las fuentes de información principal serán basadas en libros, artículos científicos de revistas, informes técnicos y recursos web de páginas oficiales.

6.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área considerada se muestra en la Figura 1. La topografía presenta montañas volcánicas en el Sur, con picos en la región de hasta 1500 msnm, estos mismos descienden hacia el sector Norte hasta unos 300 msnm. El área de interés cubre aproximadamente 16 km² (LaGeo, 2012).

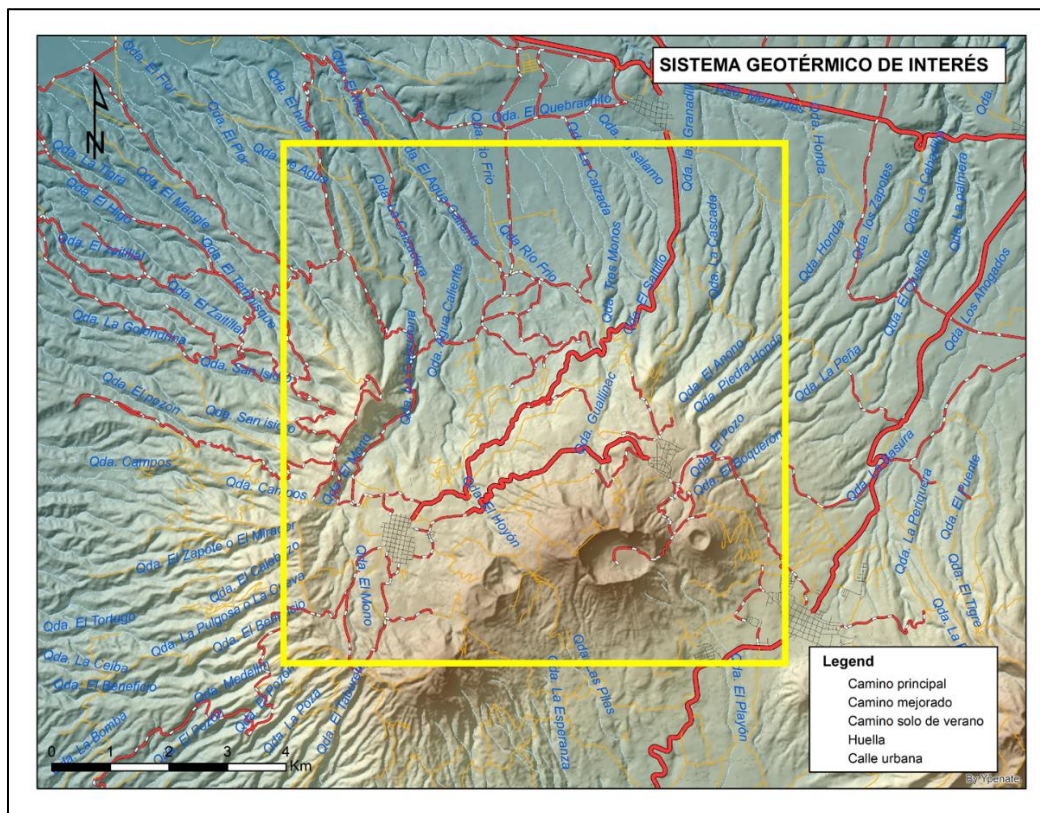


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

El sistema geotérmico se ha mantenido en producción desde el año 1992, cuenta con 16 pozos productores y 21 reinyectores, teniendo una capacidad instalada de 109.2 MW a partir de 3 unidades a condensación y una unidad de ciclo binario.

6.2. GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

Los estudios geológicos de la región se basan en el mapa geológico de El Salvador (Bosse, Schmidt-Thomé, & Merino, 1978).

Geología de la zona

La zona de estudio muestra un esfuerzo de compresión debido a la subducción oblicua de la placa de Cocos bajo la placa del Caribe, lo que parece haber originado las principales estructuras de la zona, interpretado como una caldera atravesado por un graben funcionamiento NW – SE. El esfuerzo horizontal máximo en el sistema parece correr NW – SE (LaGeo, 2012).

En cuanto al fallamiento, las principales tendencias son: N – S, E – W y NW – SE, NE – SW, siendo los más desarrollados los sistemas NW – SE y E – W.

En el área se observan efectos de una actividad volcanotectónica reciente o activa, la cual está relacionada con la última explosión freática originada en El Hoyón. Según dataciones de depósitos de ignimbritas, la erupción data de 700 años D.C. El reservorio asociado al sistema geotérmico está compuesto por flujos de lava subarreales Plio-Cuaternarios y se encuentra actualmente localizado a una elevación de -1000 msnm, lo que implica sustanciales movimientos tectónicos recientes (LaGeo, 2012).

Las unidades geológicas que afloran en la zona de estudio se resumen en la Tabla 1, seguida de una descripción de las características de los materiales que la conforman.

Tabla 1. Unidades Litoestratigráficas y materiales vinculados a dichas unidades (Fuente: Modificado de (LaGeo, 2012))

Unidad	Afloramiento Superficie	Litología	Descripción Sector Sur	Descripción Sector Norte	Espesor [m]
Unidad I	by, bm	Alternancia de lavas andesíticas y andesítico basálticas con niveles de tobas de varios tipos	Principalmente lavas, con presencia en algunos pozos de niveles piroclásticos en el techo. No se observaron diques	Gruesos niveles piroclásticos en el techo de esta unidad. Presencia de esporádicos diques o sills.	600 - 800 (410 - 435 en Pozo RT-11)
Unidad II	gi, bi	Flujos piroclásticos de varios tipos, (variaciones de líticas y cristalinas) con la característica de ser escoriáceas, intercalando con delgados y gruesos	En la mayoría de los pozos inicia con fragmentos tipo ignimbrítico (bandeados). Gruesos paquetes tobáceos en su	Niveles tobáceos gruesos y delgados de varios tipos (menor presencia de escorias), alternando con niveles lávicos de diferentes espesores.	570 - 850 (985 en pozo RT-11)

niveles de lavas mayoría
andesítico-basálticas escoriáceos.

Unidad III	No aflora (tf)	Nivel guía formado por toba cinerítica fina, verde claro, con cristales de Plagioclasa sin orientación definida, con esporádicas capas delgadas de lavas (A o AB) o diques. Se definió como la capa sello del reservorio geotérmico	Presenta mejor las características de esta unidad. Observada en todos los pozos de este sector	Características no completas, cristales más grandes y espesor de los niveles es menor	105 - 345 (365 en RT-11)
Unidad IV	bo	Principalmente andesitas con intercalaciones de andesitas basálticas, tobas y abundantes diques o sills. Presencia de toba cuarzosa en algunos pozos	Gruesas lavas con tobas de menor espesor y abundantes diques o sills.	Gruesos paquetes de lavas y tobas, con mayor número de diques que en el sector Sur	370 - 920 (210 - 730 en RT-11)

6.2.1. Geomorfología

El mapa morfológico de detalle del área muestra varios rasgos muy particulares relacionados con cambios abruptos en topografía asociados con la falda del complejo volcánica cercano al sistema de geotérmico de interés. Asimismo, hay cambios en topografía relacionados con cambios en dirección de los patrones de drenaje, donde se observa que quebradas con una orientación WNW – ESE, en el Sur, cambian a una orientación N – S en el sector norte del campo. Los cambios en el patrón de drenaje están asociados a fallas geológicas predominantes en cada sector (LaGeo, 2012).

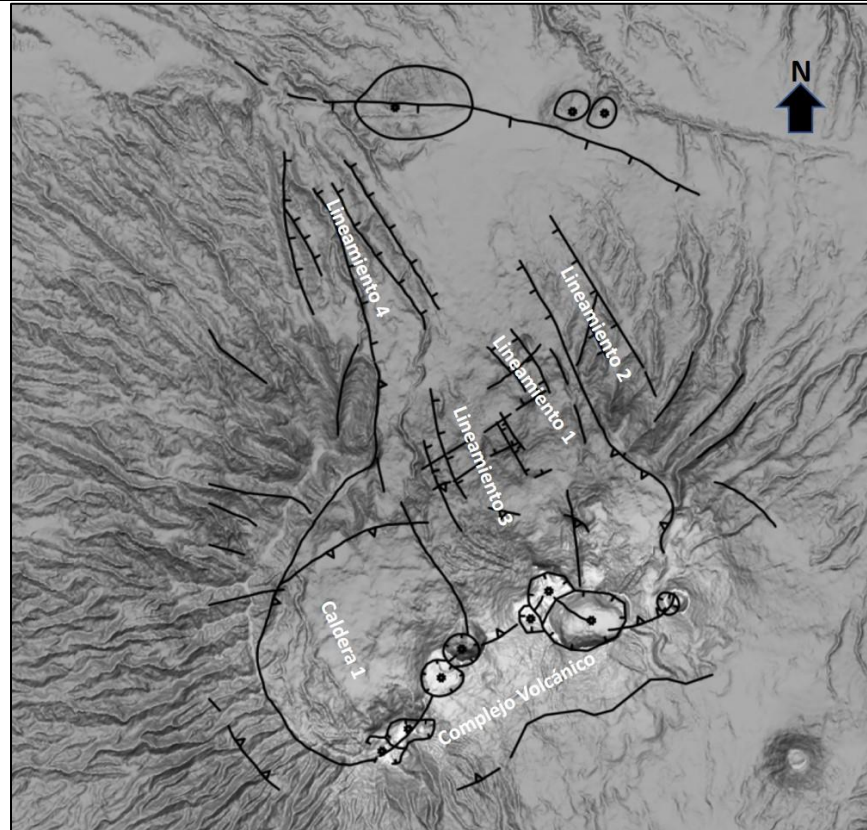


Figura 2. Mapa de elementos geomorfológicos y estructurales predominantes en la zona de estudio.

La geomorfología del área está controlada por eventos tectónicos y principalmente eventos volcánicos. Las partes altas las constituyen edificios volcánicos con pendientes moderadas a abruptas.

6.3. HIDROGEOLOGÍA

Los estudios hidrogeológicos de la región se concentran principalmente en el trabajo realizado por (ANDA, 2011) a partir del Mapa Hidrogeológico de El Salvador, el cual detalla las características de las unidades acuíferas superficiales a lo largo del país. Para la zona de estudio se determina que las unidades acuíferas predominantes están relacionadas a acuíferos volcánicos fracturados de gran extensión y posiblemente de alta productividad de agua fresca en la sección más al Sur y acuíferos porosos de gran extensión de productividad media (Ídem) en la zona Norte del área de interés (Figura 3)

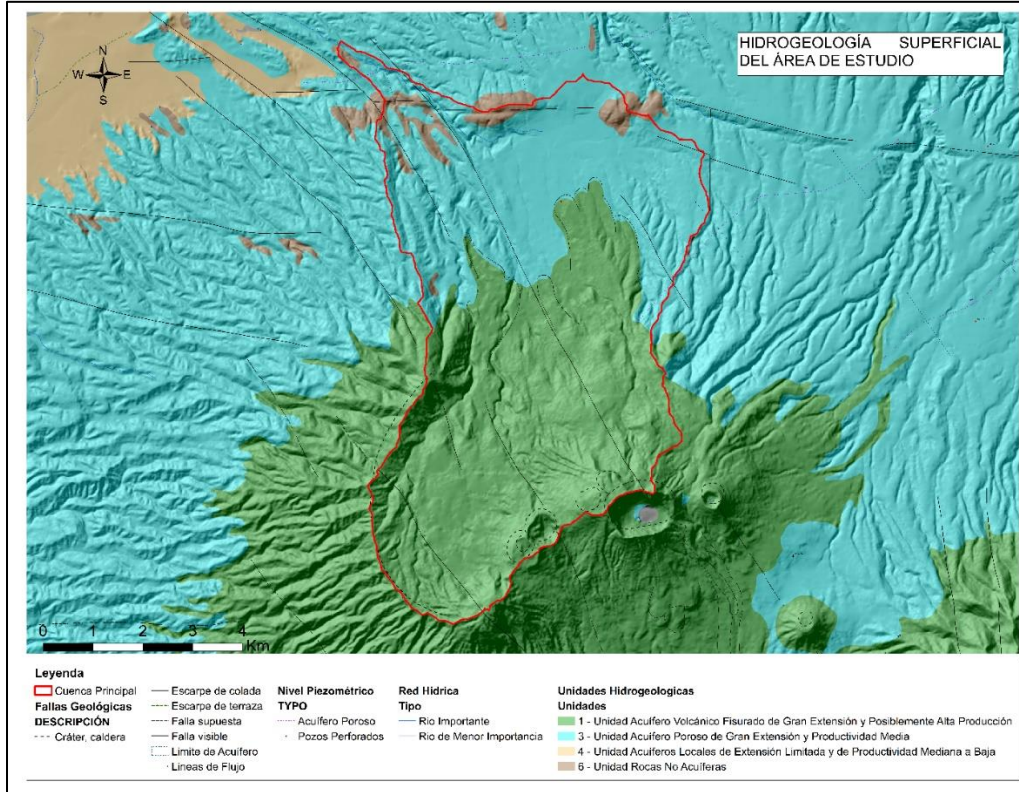


Figura 3. Mapa Hidrogeológico Superficial de la región de estudio (Fuente: Elaboración Propia con base a los datos de (ANDA, 2011))

Además, el área de geología de LaGeo en el año 2012, determina que a partir de la exploración profunda mediante perforación de pozos identifica por lo menos 3 grandes unidades acuíferas, cuyas características principales se describen en la Tabla 2.

Tabla 2. Acuíferos principales del Sistema Geotérmico de Interés (Fuente: Modificado de (LaGeo, 2012))

Acuífero Superficial Frío	Acuífero Intermedio	Acuífero Termal Profundo
Corresponde a zonas lávicas altamente fracturadas sin movimiento del fluido entre sus fracturas. Concordante con la descripción del Mapa Hidrogeológico de ANDA. El nivel freático varía entre los 10 a 50 metros de profundidad	Solamente se presenta la descripción de la temperatura de este, la cual ronda los 200°C. En cuanto a su localización se sugiere que se encuentra entre los 250 y -50 msnm.	Se localizó a través de perforaciones poco profundas. Se identificó a unos 70 m de profundidad con temperatura de 100°C.

6.3.1. Acuífero Intermedio Termal

Los registros de perforación de pozos, en conjunto con los registros de temperatura lograron determinar la existencia a diferentes niveles del acuífero termal intermedio, cuyas temperaturas rondan los 170 – 190°C (Figura 4) y a profundidades entre 400 - 500 msnm. Los pozos donde se aprecia dicho acuífero en un perfil S – N son los pozos 1, 1A, 2, 3, 5, 7, 12 y 14.

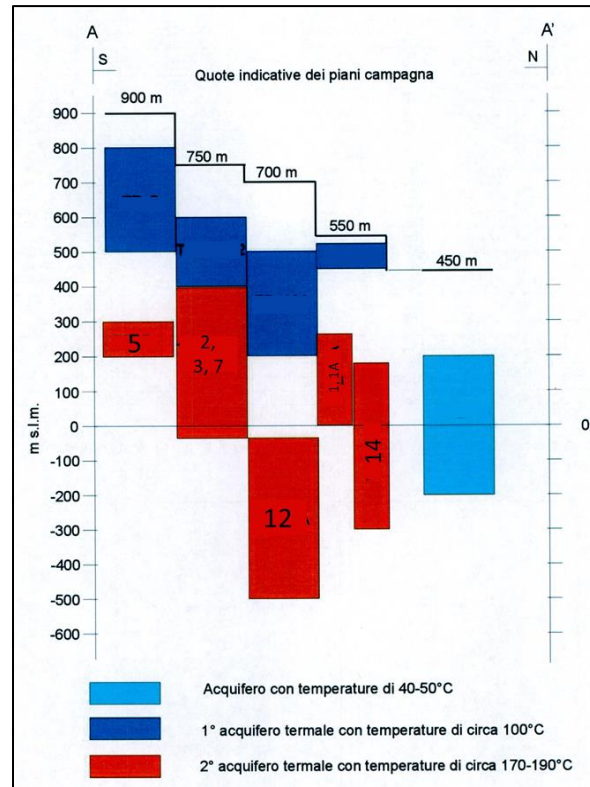


Figura 4. Esquema de ubicación del acuífero termal intermedio según los registros de perforación (Fuente: (LaGeo, 2012))

6.4. MÉTODOS GEOFÍSICOS EN EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

La exploración geofísica de recursos geotérmicos trata con las mediciones de propiedades físicas de la Tierra. El énfasis de estos estudios son principalmente parámetros que son sensitivos a la temperatura y el contenido de fluidos de las rocas, o en parámetros que pueden revelar estructuras que se vean influenciadas por las propiedades de los sistemas geotermiales (Georgsson, 2009).

Los principales objetivos de la exploración geofísica vinculada a sistemas geotérmicos pueden ser: a) delimitar un recurso; b) esbozar un campo de producción; c) identificar acuíferos, o

estructuras que pueden controlar acuíferos de manera que puedan darse objetivos de perforación; o d) evaluar las propiedades generales del sistema geotérmico (Ídem).

En esta investigación se profundizará en la implementación del método gravimétrico y Magnetoteléurico para la identificación y caracterización de unidades geológicas dentro de un sistema geotérmico vinculadas a zonas de saturación o acuíferos a diferentes niveles de profundidad,

6.4.1. GRAVIMETRÍA

La prospección de la gravedad, o gravimetría, envuelve la medición de las variaciones en el campo gravitacional de la Tierra (Telford, Geldart, & Sheriff, 1990). Las variaciones del campo gravitacional medidas en los estudios gravimétricos son debidos a las diferencias de densidad de las rocas de la subsuperficie (Reynolds, 2011), la densidad de las rocas depende principalmente de la composición de estas y su porosidad, sin embargo, la saturación parcial de las rocas puede influir también en los valores de campo gravimétrico (Georgsson, 2009).

La medición del valor de la gravedad se realiza a partir de instrumentos conocidos como gravímetros, los cuales registran un valor instrumental relacionado a la atracción o aceleración gravitatoria en un punto específico registrado en unidades de mili Gal (1 mGal = 0.001 Gal [cm/s^2] = $10^{-5}m/s^2$).

La data gravimétrica colectada, o cruda, necesita ser corregida por varios factores. La Tabla 3 presenta a manera de resumen las ecuaciones correspondientes a cada una de las correcciones que se realizan para el método gravimétrico. Los resultados son usualmente presentados como mapas de gravedad de Bouguer basados en la Anomalía de Bouguer (Δg_B) (Ecuación 1) (Georgsson, 2009)

$$\Delta g_B = g_M - g_{lat} + 0.3086 \cdot h + 0.04193 \cdot \rho \cdot h \quad \text{Ecuación 1}$$

Tabla 3. Correcciones realizadas al valor medido de la gravedad por medio de un gravímetro (Fuente: Modificado de (Georgsson, 2009))

Corrección	Valor
Marea	Dada por el equipo de medición
Elevación (Aire Libre)	$0.3086 \cdot h$
Topografía	Obtenida por software de procesamiento
Latitud	$978032.7 (1 + 00052790414 \cdot \sin^2 \phi + 0.0000232718 \cdot \sin^4 \phi + 0.0000001262 \cdot \sin^6 \phi$
Densidad	$0.04193 \cdot \rho \cdot h$
Deriva del Instrumento	Obtenida por software de procesamiento

6.4.2. MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS

Los recursos geotérmicos son objetivos ideales para los métodos electromagnéticos considerando las fuertes variaciones de resistividad eléctrica del subsuelo que se producen. Las aguas geotérmicas tienen altas concentraciones de sales disueltas, lo que da como resultado electrolitos dentro de una matriz rocosa. Las resistividades de los electrolitos y la matriz rocosa son dependientes de la temperatura, de tal manera que hay una reducción considerable en la resistividad de los cuerpos según se incrementa la temperatura (Spichak & Manzella, 2009).

Método Electromagnético Magnetotelúrico (MT)

Es un método en el cual las componentes ortogonales de los campos horizontal y magnético, inducidos por fuentes primarias naturales, se miden simultáneamente como funciones de la frecuencia (Sheriff, 2002). La resistividad aparente ρ_a en función de la frecuencia f se calcula como:

$$\rho_a = \frac{1}{\mu\omega} \left(\frac{E_i}{H_j} \right)^2 ; \omega = 2\pi f \quad \text{Ecuación 2}$$

El equipo de prospección MT es bastante simple y portable. El arreglo para la adquisición de datos MT consta de dos dipolos eléctricos ortogonales que permiten la medición de las dos componentes eléctricas horizontales, y de dos sensores magnéticos paralelos a los dipolos eléctricos que se encargan de medir la componente magnética. Además, se utiliza un tercer sensor dispuesto en forma vertical en el terreno que mide la componente magnética vertical (Figura 5).

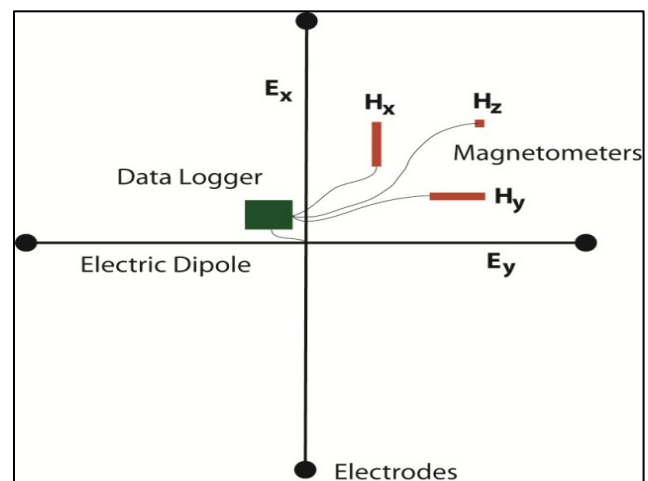


Figura 5. Arreglo de los sensores utilizados durante un estudio de MT (Fuente: (Comeau, 2015))

Los sensores magnéticos están hechos de bobinas de hierro con cientos o miles de vueltas de aproximadamente 2 metros de longitud (Ídem). Los sensores eléctricos son “tazas” o electrodos no polarizables que contienen una solución que permite un mejor contacto con el terreno a manera de mejorar la medición de las componentes del campo eléctrico.

Los resultados de MT pueden ser presentados como mapas de resistividad (Figura 6. a)), en el caso de tener una rejilla de puntos de muestreo, o como modelos 1-D, 2-D (Figura 6. b)) o inclusive 3-D, dependiendo del propósito del estudio.

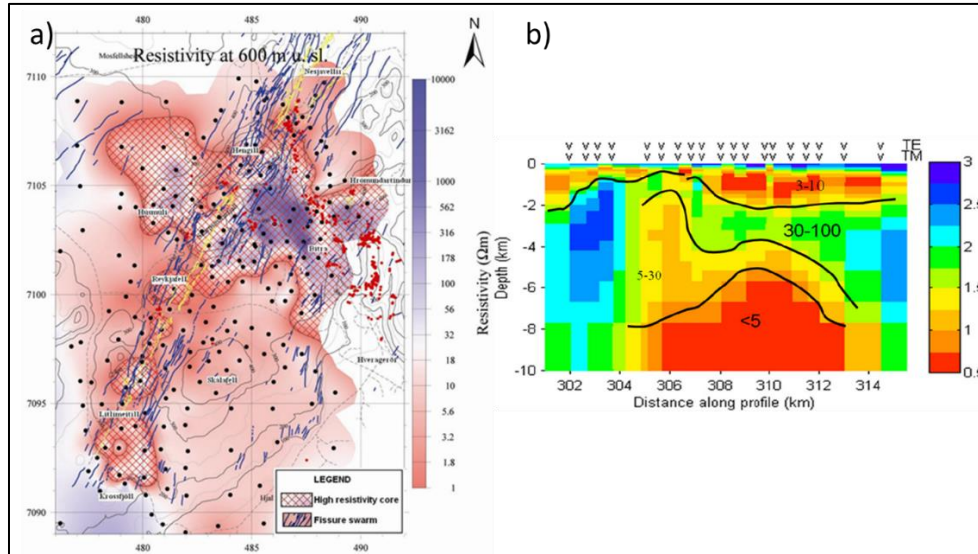


Figura 6. Resultados del procesamiento de datos MT. a) Mapa de distribución de resistividades de un campo geotérmico. b) Sección 2-D de un perfil de resistividades de un campo geotérmico, se aprecia la característica formación de una cúpula resistiva. (Fuente: Tsend-Ayus, 2006 & Árnason, 2007 en (Georgsson, 2009))

6.5. CORRELACIÓN DE ANOMALÍAS GEOFÍSICAS CON ACUÍFEROS

El propósito de los métodos geofísicos de exploración es identificar e interpretar anomalías o cambios a nivel espacial de las propiedades físicas de las rocas que pueden ser asociadas a materiales con características de interés. Por ejemplo, un segmento de arenas y gravas secas puede tener valores de resistividad eléctrica que ronda los $1000 \Omega \cdot m$, pero si esta misma unidad litológica se encuentra saturada con agua dulce su resistividad disminuye, teniendo así valores asociados de resistividad igual a $50 - 500 \Omega \cdot m$ (Astier, 1975). La Tabla 4 presenta un resumen del comportamiento de algunos materiales geológicos encontrándose en condiciones de no saturación y condiciones de saturación.

Tabla 4. Valores de propiedades de materiales comunes (Fuente: (Astier, 1975))

Material	Resistividad [$\Omega \cdot m$]	Densidad [g/cm^3]
Arenas y Gravas Secas	1000 - 10000	1.4 – 2.2
Arenas y Gravas con agua dulce	50 – 500	1.8 – 2.4
Arenas y Gravas con agua Salada	0.5 – 5	Ídem

Arcillas	2 – 20	1.7 – 2.5
Lavas	300 – 10000	2.8 – 3
Gneis, granitos alterados	100 – 1000	2.7 – 3
Cineritas, tobas volcánicas	20 – 100	-

Estos parámetros pueden servir como guía dentro de los registros de datos y también en los modelos de inversión de estos. Sin embargo, para correlacionar de manera adecuada la anomalía geofísica con un material específico es preferible contar con registros litológicos de pozos (Figura 7). Esto permite aumentar el análisis cualitativo de los datos, permitiendo hacer interpretaciones basadas en la distribución de materiales ((Sundararajan, Sankaran, & Al-Hosni, 2012)).

En la exploración geofísica siempre es sugerido integrar dos o más métodos debido a la no unicidad de los modelos y de esta manera mejorar la interpretación de los resultados obtenidos. Existe una variedad de trabajos que llevan a cabo la integración de datos de diferentes métodos, en los que usualmente se combina un método potencial para determinar estructuras que pueden determinar las condiciones internas y un método eléctrico o electromagnético para delimitar las capas de materiales.

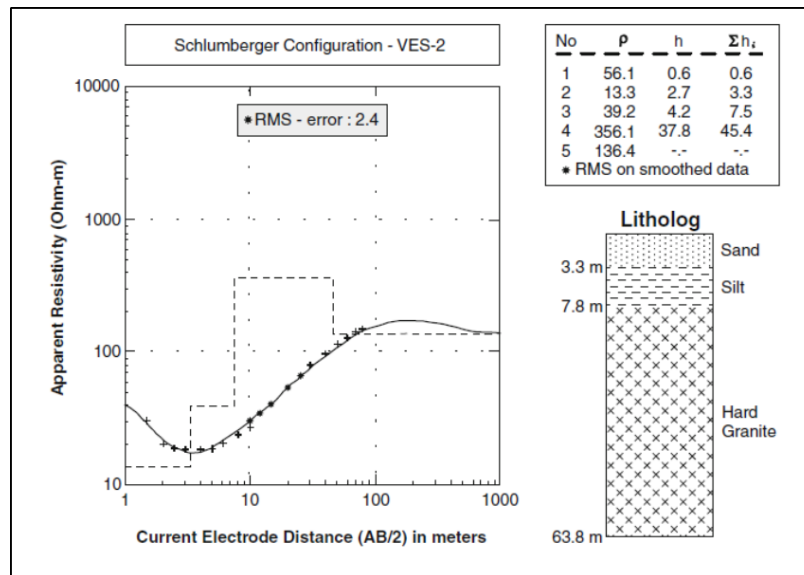


Figura 7. Resultado del procesamiento, modelación e interpretación de un sondeo de resistividad eléctrica. La información litológica de pozos ayuda a signar el tipo de roca que subyace en el punto de realización del estudio (Fuente: (Sundararajan, Sankaran, & Al-Hosni, 2012))

Para esta investigación se ha considerado el uso de datos gravimétricos para delimitar estructuras en superficie que pueden sugerir posibles geometrías de la unidad acuífera intermedia, y a su vez, sondeos MT para identificar el acuífero, así como su espesor.

6.6. CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA DE POZOS

El reconocimiento de unidades estratigráficas idénticas en dos ubicaciones geográficamente diferentes es conocido como “*correlación estratigráfica*” y como correlación es una de las operaciones básicas en el análisis estratigráfico. La estratigrafía, en general, tiene amplios objetivos y la geología histórica se interesa en el desarrollo de grandes áreas más que una sola ubicación geográfica (Schwarzacher, 1975).

La identificación de unidades geológicas con potencial de almacenamiento de fluidos puede realizarse por medio de análisis de rocas que afloran en superficie o bien mediante ensayos de laboratorio; durante una perforación de pozos profundos las unidades acuíferas están vinculadas con zonas de pérdida de fluidos de perforación; las unidades acuíferas usualmente tienen alto potencial de almacenamiento y permeabilidad, por lo tanto, al inyectar un fluido estas tienen la capacidad de retenerlo almacenarlo entre sus poros o fracturas.

Al identificar las zonas de pérdidas y las unidades geológicas que las componen, se facilita la correlación de valores de anomalía geofísica con los materiales asociados a las zonas acuíferas a diferentes profundidades y la posibilidad de encontrar estructuras vinculadas al moldeamiento de la geometría de estos.

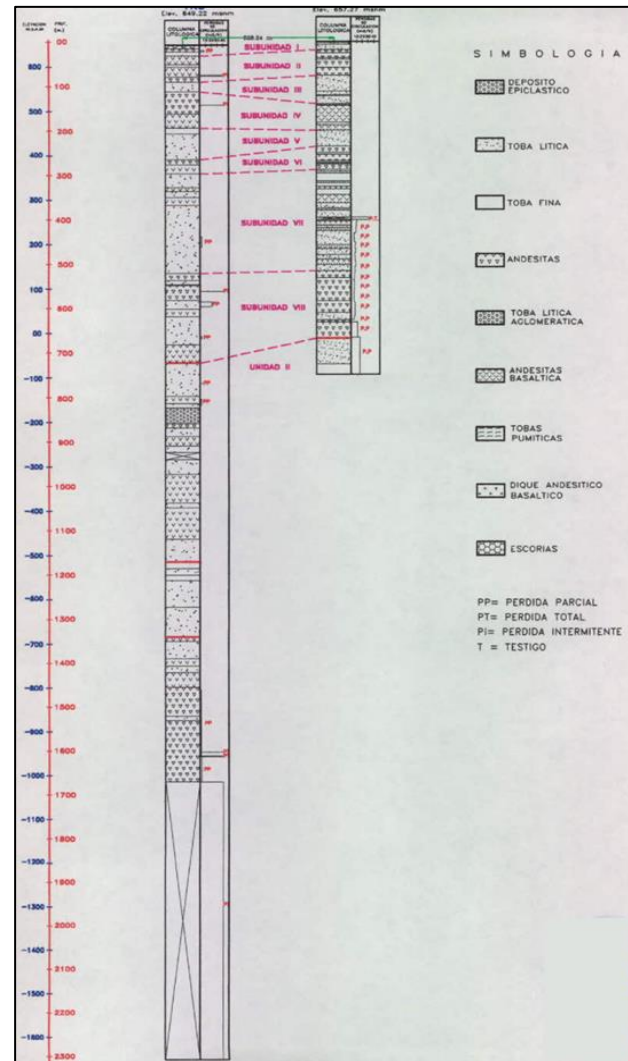


Figura 8. Ejemplificación de correlación litoestratigráfica de pozos geotérmicos (Fuente: Informe Perforación Pozo LaGeo)

7. METODOLOGÍA

7.1. PROCESAMIENTO DATOS GEOFÍSICOS

La base de información de esta investigación fue la data geofísica existente del sistema geotérmico de interés, siendo los datos de MT y Gravimetría los que se utilizaron para la realización de las propuestas de delimitación de la unidad acuífera intermedia.

A continuación, se detalla la metodología seguida para la obtención de información de modelos geofísicos 1-D y 2-D.

7.1.1. Datos Electromagnéticos

Los datos de resistividad utilizados en este trabajo fueron obtenidos a partir de los sondeos MT realizados en diferentes campañas de exploración del sistema geotérmico de interés (Figura 9). Con ellos se procuró realizar la interpretación a partir de la generación de modelos 1-D a partir del software WingLink. Posteriormente, se realizó una revisión e interpretación de los modelos, con el afán de identificar patrones de anomalías que sugirieran la existencia de secciones acuíferas. Al identificar las zonas anómalas de interés, se compilaron los techos y fondos de las secciones de interés en una hoja de cálculo con propósito de generar un mapa de distribución de la anomalía en la región de interés.

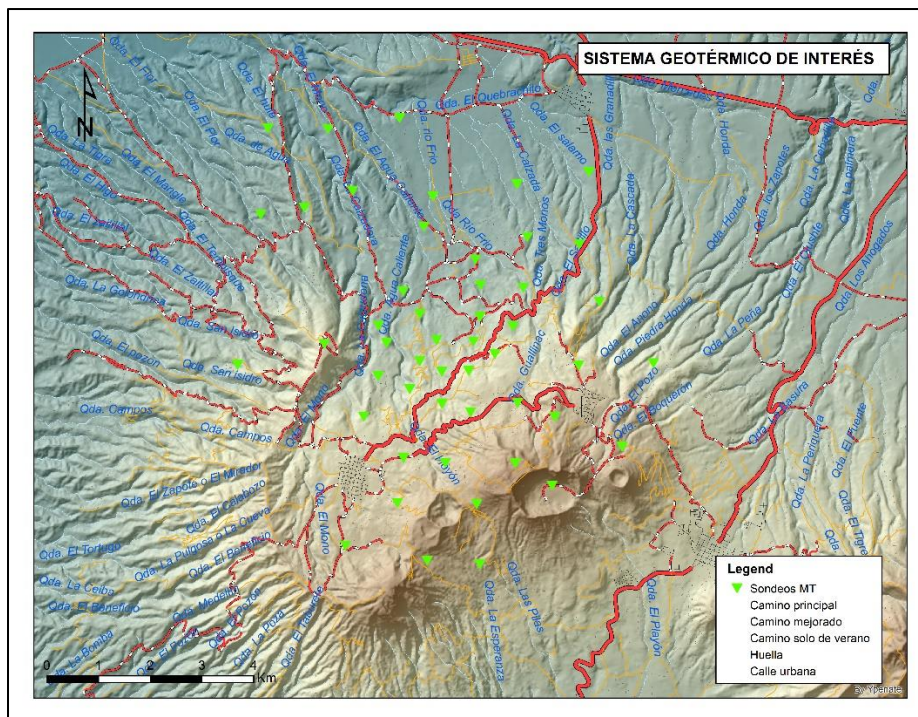


Figura 9. Ubicación de la red de sondeos MT utilizados en la investigación

Los datos de MT fueron ingresados en un nuevo proyecto de la plataforma WingLink, con el propósito de poder integrarlos posteriormente a información de tipo gravimétrico de la región; el primer paso fue la creación de la base de datos a partir de archivos formato “. edi” que contenían los parámetros de cada uno de los sondeos MT de la grilla. Se utilizaron un total de 34 sondeos MT distribuidos en la región de interés. Una vez ingresados los datos MT, se realizó la edición de las curvas de componentes TE y TM a partir de un “Smooth” o suavizado de las curvas, con el propósito que el programa pueda calcular una curva invariante que sea base para modelaje 1-D. Con las componentes suavizadas, se procedió a realizar el modelado 1-D, en primer lugar, se corrió un modelo sugerido y posteriormente se ajustó de tal forma que fuera concordante con las condiciones del modelo de detalle u “Occam”. Al alcanzar un modelo que satisficiera la condición de similitud entre ambos modelos se procedió a guardar el modelo y exportarlo para realizar la interpretación cualitativa de los modelos en busca de comportamientos que sugirieran la existencia de la unidad acuífera.

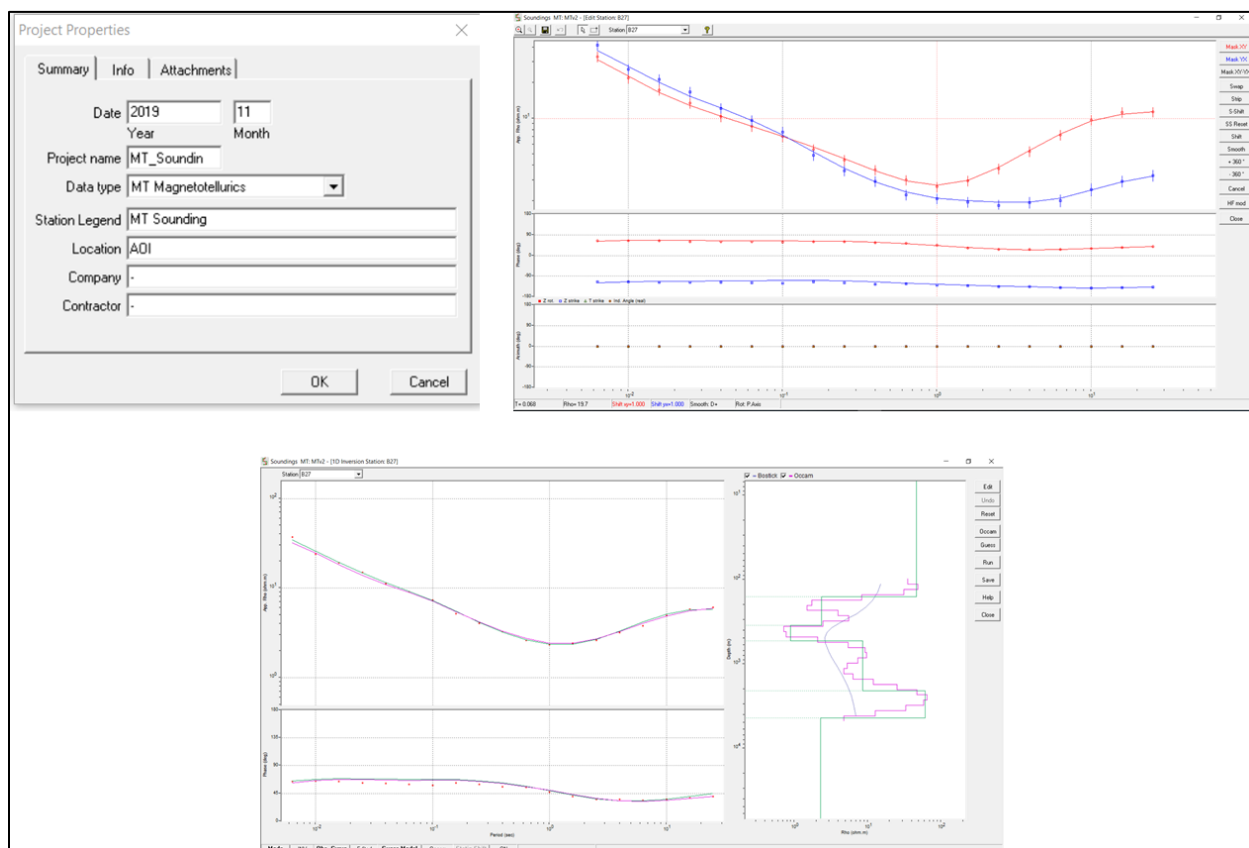


Figura 10. Rutina de creación de base de datos, procesamiento previo (smooth) y modelaje 1-D para datos MT en WingLink

Creación de Modelos 1-D, 2-D y vista en Planta

Los modelos 1-D al ser interpretados se consiguió observar el comportamiento de la anomalía de resistividad que puede ser vinculada al acuífero intermedio, conociendo que los registros de pozos identificaban a dicho acuífero en el rango de 400 a -350 msnm y teniendo el modelo de capas de detalle Occam se identificó el techo, fondo y por ende conocer el espesor de la unidad acuífera basada en la información de resistividad eléctrica. Dichos datos se colectaron en una hoja de cálculo con el fin de crear una grilla con los valores de profundidad a los que se encontraban el techo del acuífero y de esa manera generar un mapa de isocontornos que nos permitiría ver la distribución de este y como varía su profundidad o existencia en diferentes puntos del sistema geotérmico de interés.

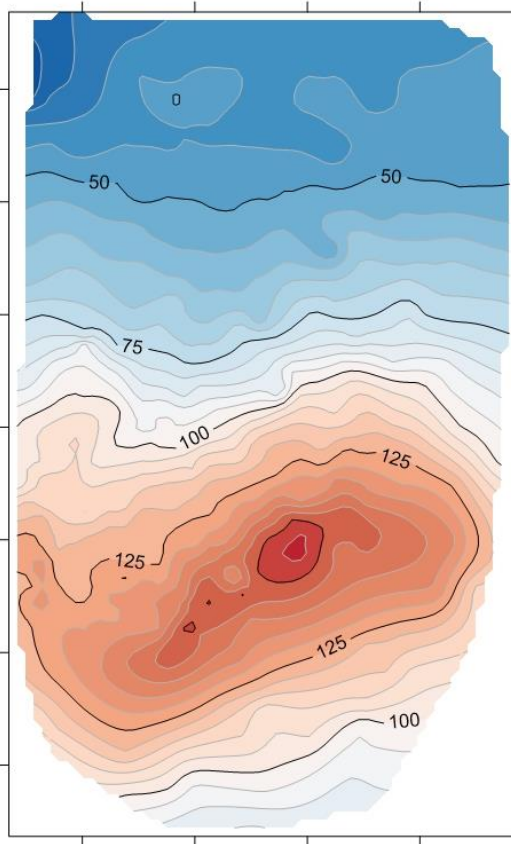
Los datos compilados posteriormente fueron mapeados usando la herramienta Surfer 13, generando así mapas de isocontornos y distribuciones en 3-D aprovechando la densidad de puntos con los que se contaba. Con esta información se analizó el comportamiento de la existencia, geometría, espesores y correlación estratigráfica del acuífero de interés.

7.1.2. Datos Gravimétricos

El uso de datos gravimétricos en un inicio se propuso para realizar modelaje en 2-D de perfiles que atravesaran a lo largo y ancho del sistema geotérmico, sin embargo, la idea se modificó y se implementó su uso para la delimitación de estructuras que pudieran delimitar o generar flujos preferenciales de las diferentes unidades acuíferas. El set de datos utilizados para el análisis gravimétrico corresponde a la grilla de exploración del sistema geotérmico de interés, con alrededor de 687 puntos de gravedad obtenidos en diferentes campañas. A los datos se les realizó las correcciones correspondientes tales como de marea, deriva del instrumento, por latitud, aire libre, de terreno y por densidades, obteniendo así el valor de la Anomalía de Bouguer (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**(izq)) para cada punto en cuestión.

Los resultados fueron mapeados utilizando Surfer 13, posteriormente a los datos de Anomalía de Bouguer, se les realizó un filtrado por primera derivada horizontal (Figura 11 (derecha)), con el fin de determinar lineamientos o estructuras que estuvieran influenciando el sistema geotérmico de interés. A partir de esto, se identificaron ciertas anomalías que pueden asociarse a lineamientos tales como fallas o bordes caldericos, los cuales fueron posteriormente cotejados con los mapas estructurales generados durante exploraciones geológicas en la zona.

ANOMALÍA DE BOUGUER



PRIMERA DERIVADA HORIZONTAL

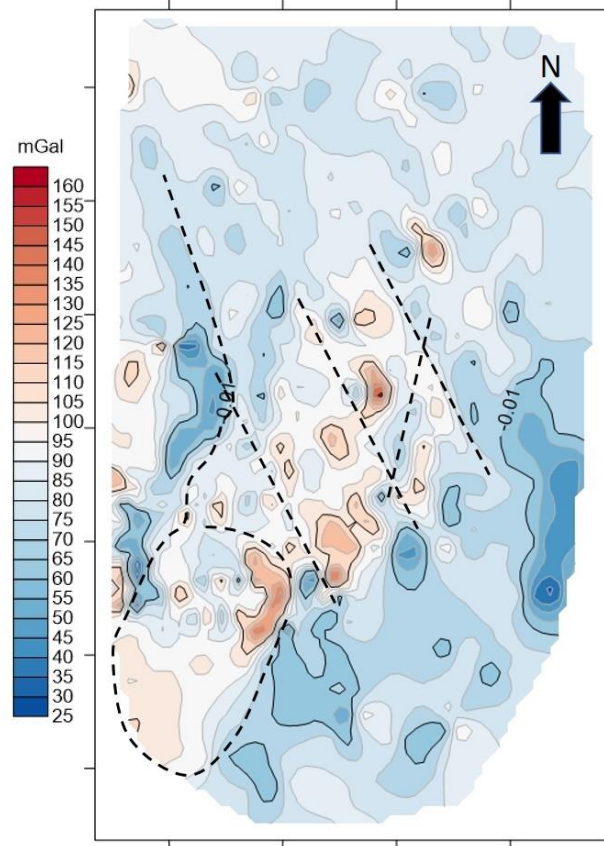


Figura 11. Mapa de anomalía de Bouguer (Izq) y mapa de primera derivada horizontal (der) del sistema geotérmico de interés

7.2. CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA

La correlación estratigráfica fue una de las partes más importantes en la investigación, principalmente porque es a partir de la información proporcionada por los materiales geológicos que se puede asociar la capacidad de retención de fluidos en estos mismos. El método utilizado para realizar la correlación estratigráfica consistió en revisar los reportes de perforación de los pozos que sugerían la existencia del acuífero e inventariar los materiales asociados a las profundidades en donde el acuífero intermedio se encontraba.

Los registros de perforación permitieron a su vez la creación de columnas estratigráficas que sirvieron como guía para conocer la distribución de los materiales y de esta manera analizar el comportamiento de los modelos de resistividad 1-D de los datos MT y corroborar que los materiales asociados al acuífero intermedio tengan congruencia con la interpretación realizada.

Para la correlación estratigráfica se utilizaron los pozos 2, 4, 5, 7, 12, 14, 17 y 18. Habiéndose identificado la litología vinculada al acuífero intermedio a profundidades variables entre 400 a - 350 msnm.

7.3. INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN GEOFÍSICA-GEOLÓGICA

El último paso para obtener un modelo preliminar del acuífero intermedio fue realizar la integración de los datos utilizados para la investigación, para ello se realizó una superposición de datos a partir de Surfer en el cual se desplegaron los mapas de isocontornos del tope y fondo del acuífero, el mapa de primera derivada horizontal de gravimetría y el mapa de estructuras geológicas del sistema geotérmico. Con esto se creó la propuesta preliminar de la geometría del acuífero, los razonamientos de los cambios en las profundidades de los techos y espesores de este y la propuesta de la dirección de flujo preferencial.

8. ANÁLISIS DE DATOS

El procesamiento de los datos geofísicos y la correlación con la información litoestratigráfica permitió profundizar en el análisis de las condiciones del acuífero intermedio del sistema geotérmico de interés, aportando así una explicación preliminar de las características principales del acuífero. En los siguientes apartados se dará detalle de los resultados obtenidos posterior al procesamiento de los datos geofísicos.

8.1. DATOS MT

Los 34 sondeos MT fueron estudiados uno por uno con el objetivo de identificar un comportamiento en los estratos generados por el modelo de detalle Occam; en el caso particular de los sondeos B08, B15, B27 y B32, B46, B47, B48 y B62 se logró apreciar un patrón de resistividades característico que sugirió la correlación y existencia del acuífero en estos sondeos (Figura 12 y Figura 13). Los estratos correspondientes al acuífero intermedio suponen rangos de resistividades que rondan los $10 - 20 \Omega \cdot m$ y cuyos materiales según la correlación estratigráfica corresponden a unidades intercaladas de tobas líticas y lavas andesíticas fracturadas. Estos estratos de resistividad relacionada a acuíferos pueden ser fácilmente identificados al estar ubicados de manera posterior a un segmento de resistividades bajas ($< 6 \Omega \cdot m$) asociados a una unidad de arcillas que componen el conductivo del sistema geotérmico. El espesor sugerido por el análisis de los modelos 1-D sugiere que este ronda entre 75 – 500 m en promedio.

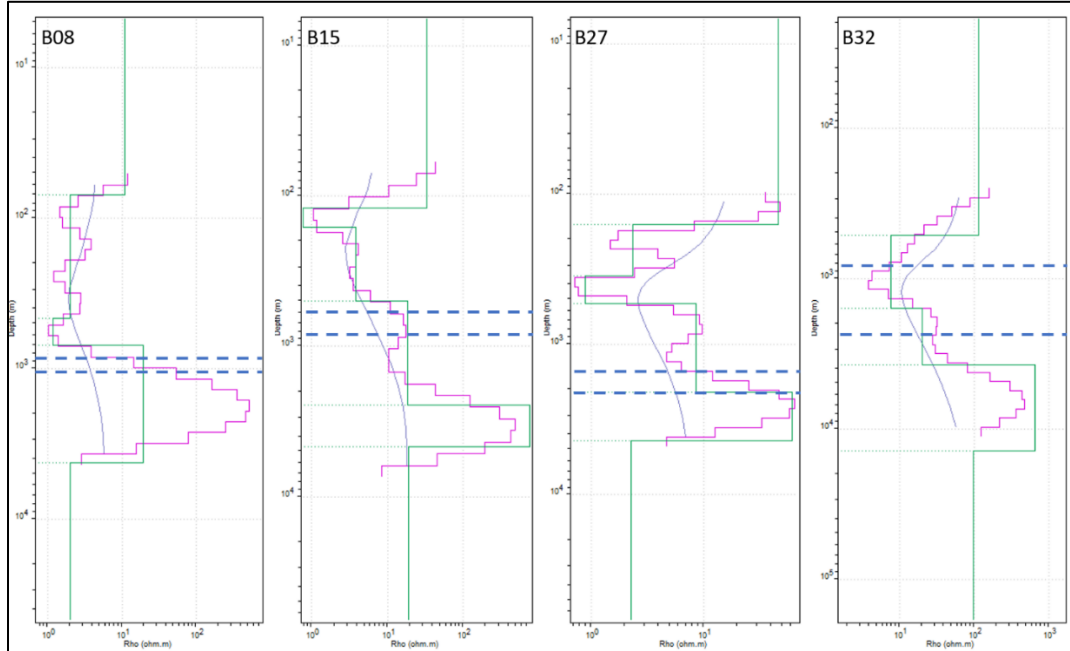


Figura 12. Sondeos “B” MT en los que se identificó un patrón de resistividades característicos en donde se puede identificar las resistividades asociadas al acuífero intermedio. La línea punteada delimita el techo y el fondo de la unidad acuífera

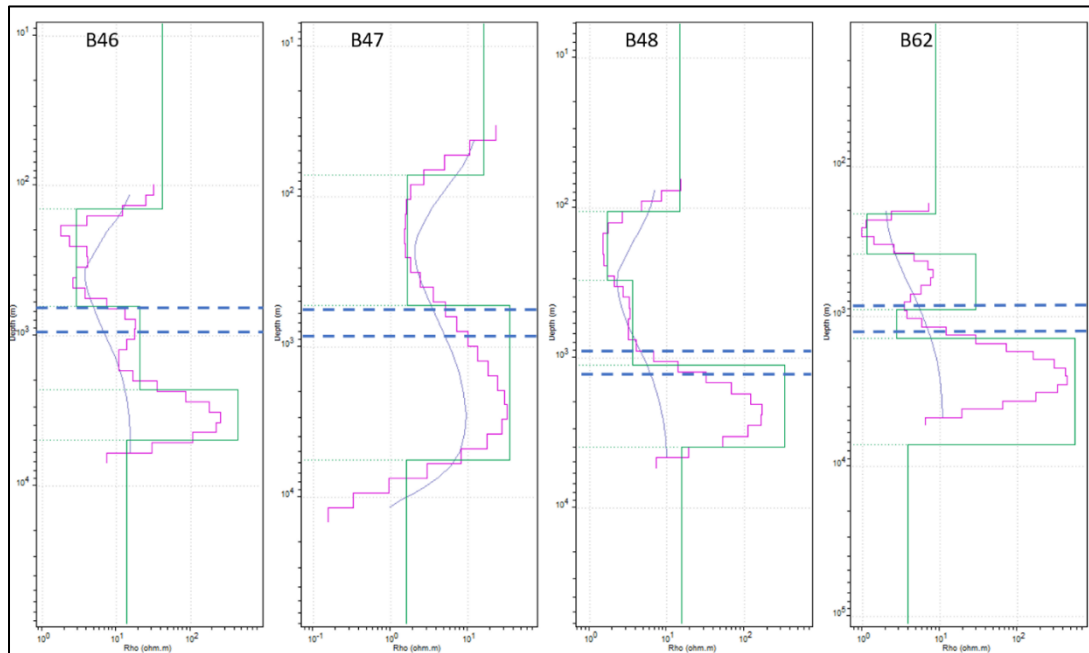


Figura 13. Sondeos “B” MT en los que se identificó un patrón de resistividades característicos en donde se puede identificar las resistividades asociadas al acuífero intermedio. La línea punteada delimita el techo y el fondo de la unidad acuífera

Los modelos discretos para los sondeos previamente mostrados constan de 5 – 6 grandes capas, que describen un comportamiento de materiales resistivos superficiales, una capa intermedia de resistividades variables, una capa conductiva, el segmento donde se ubica el acuífero intermedio, una capa de relativas altas resistividades y una capa relacionada al basamento.

Por otro lado, se interpretaron los sondeos MTB26, 27, 36 y 40, estos a diferencia de los sondeos B, muestran un comportamiento diferente en su modelo discreto y también en el modelo Occam. En el modelo discreto, se identifican de 3 – 4 capas de resistividad que van desde resistivo, pasando por un segmento conductivo y luego a una capa de resistividades relativas altas, donde se identifica y correlaciona con la estratigrafía el acuífero intermedio. No obstante, los valores vinculados a la resistividad y los materiales continúan siendo congruentes con los asociados a los sondeos B.

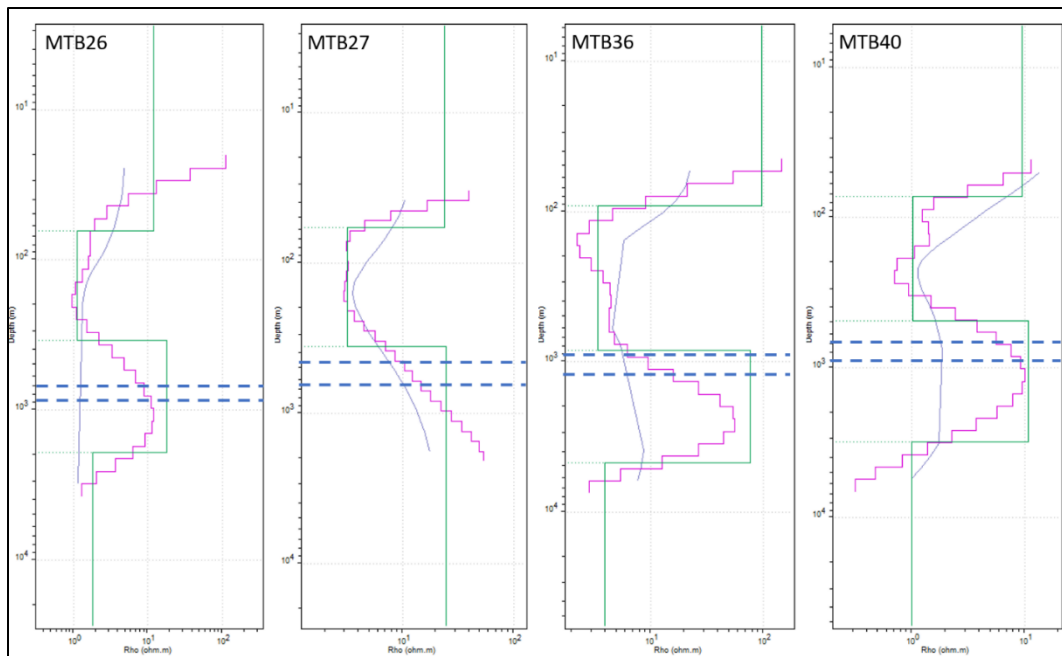


Figura 14. Sondeos “MTB” MT en los que se identificó un patrón de resistividades características en donde se puede identificar las resistividades asociadas al acuífero intermedio. La línea punteada delimita el techo y el fondo de la unidad acuífera.

Con el resto de los sondeos se realizó el mismo análisis con el fin de crear una matriz que contuviera la información de la elevación sobre el nivel del mar donde se ubicaba el techo del acuífero y la resistividad asociada con el fin de crear un mapa de isocontornos que ayudara a determinar la geometría y secciones en las cuales el acuífero se encuentre influenciado por estructuras relacionadas al sistema geotérmico de interés.

Con información compilada, se apreció que el techo del acuífero dentro del área de influencia de los sondeos MT analizados ronda entre los 550 y -550 msnm, con resistividades asociadas promedio entre 10 – 20 $\Omega \cdot m$. La Figura 15 presenta cómo es la distribución de elevaciones del techo del acuífero, en la cual se aprecia que el segmento más al Sur posee las zonas donde el acuífero se encuentra sobre el nivel del mar, a excepción de un segmento al Este donde se aprecia un hundimiento o descenso en la altura del techo de este. Según los sondeos se mueven hacia el Norte el techo del acuífero va bajando en su nivel respecto al nivel medio del mar, siendo así la región Norte donde se tiene el techo del acuífero a alturas de hasta -500 msnm.

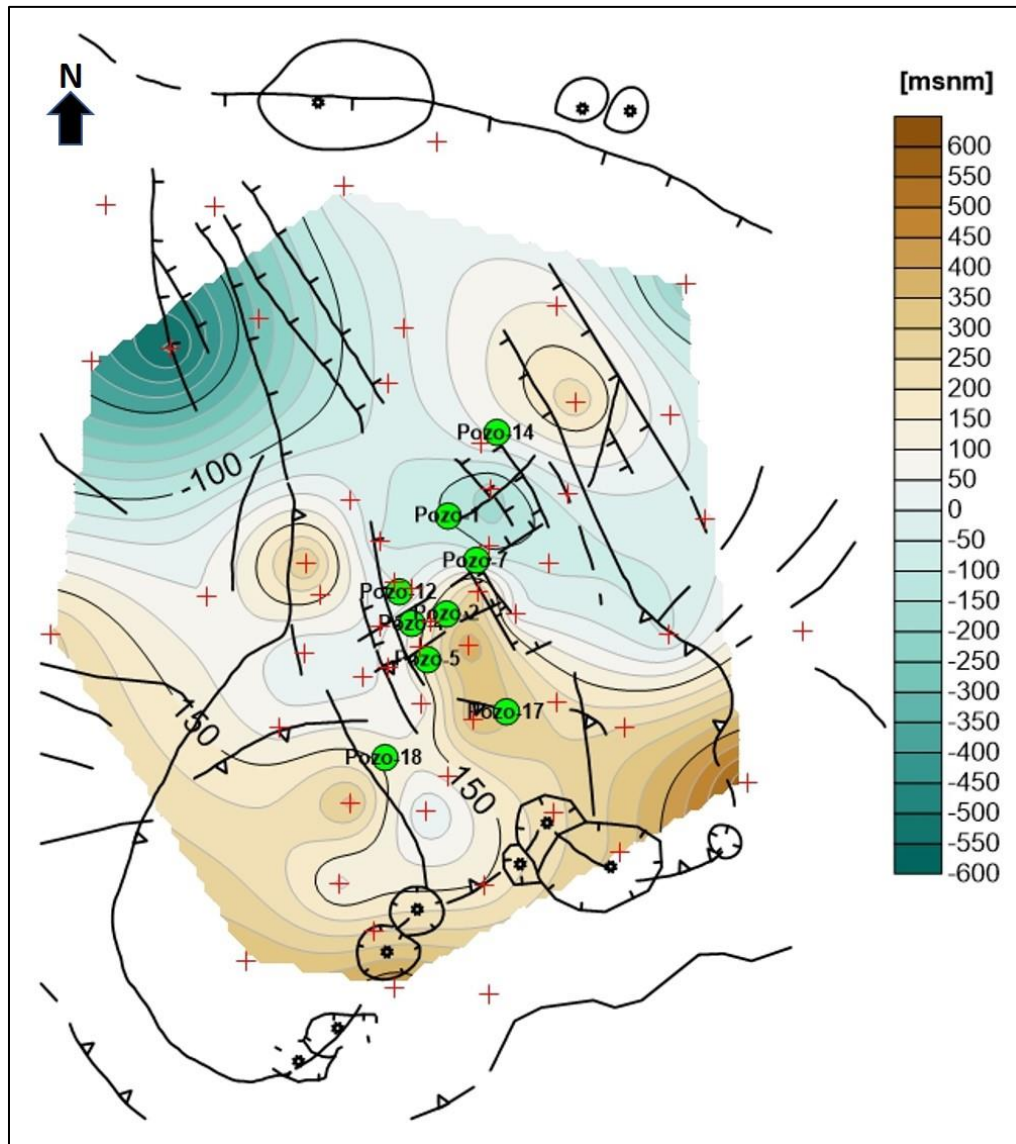


Figura 15. Distribución espacial del techo del acuífero intermedio del sistema geotérmico de interés

De la misma manera, se procedió a compilar la elevación correspondiente al fondo o base del acuífero intermedio. Los resultados muestran que existen regiones donde el fondo se encuentra mucho más cercano al nivel del mar, y que la zona NE del sistema cuenta con profundidades mayores de la base del acuífero (Figura 16). En la región central del área de interés se detallan elevaciones más altas, lo que sugiere que el espesor en esa región es menor. Respecto al comportamiento de vinculación estructural se aprecia una correlación entre las posibles estructuras que predominan en el techo del acuífero como en la base de este.

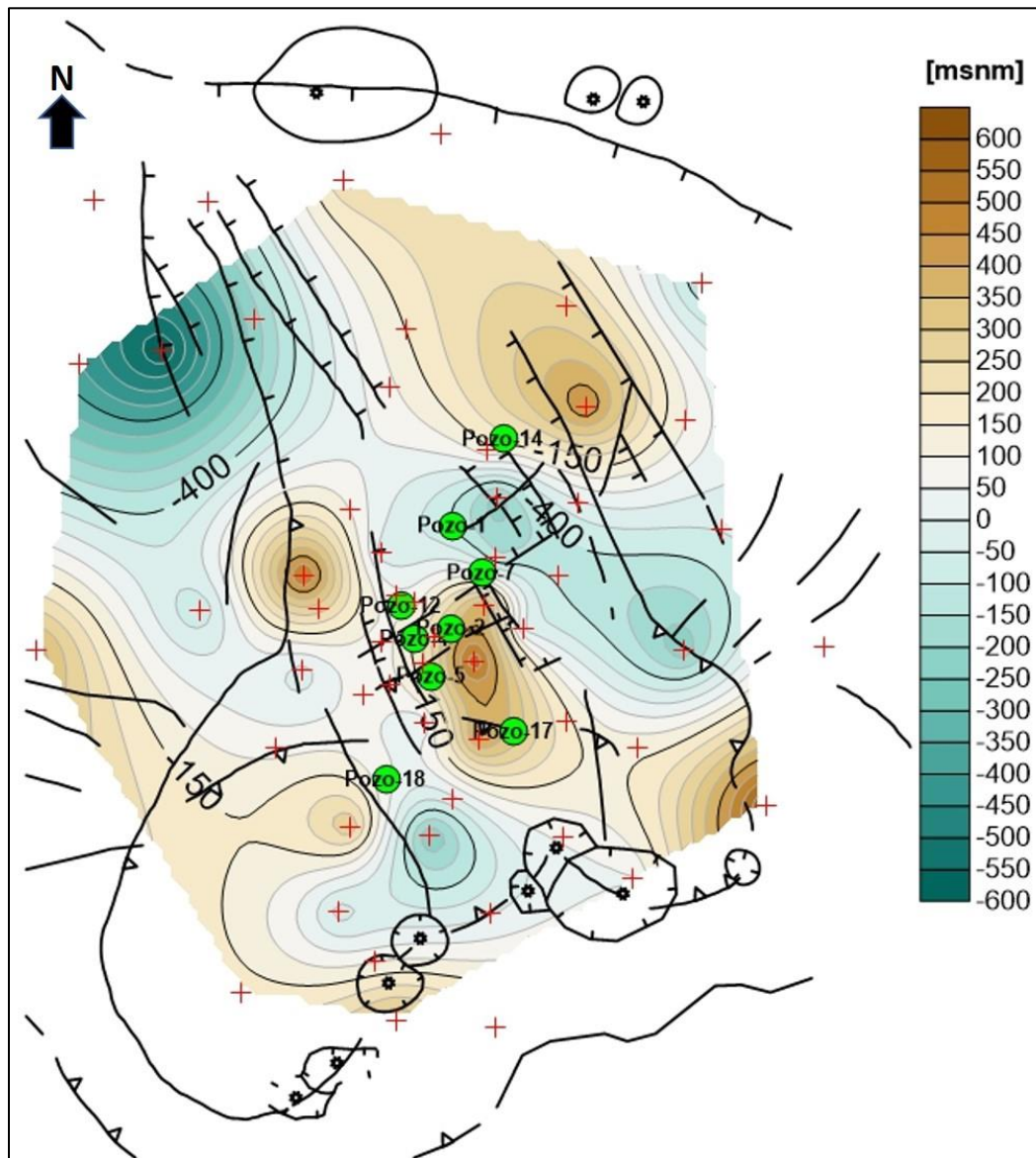


Figura 16. Distribución espacial de la base del acuífero intermedio del sistema geotérmico de interés.

Teniendo mapeada la distribución del techo y la base podemos generar un modelo que represente la variación del espesor en las diferentes regiones del área de interés. Obteniendo así que el espesor mínimo del acuífero se enfoca en la parte central del sistema con valores aproximados de 58 m, y espesores máximos de 570 m correspondientes a la región Sur del sistema geotérmico. La Figura 17 representa el espesor del acuífero en las diferentes zonas del área de interés.

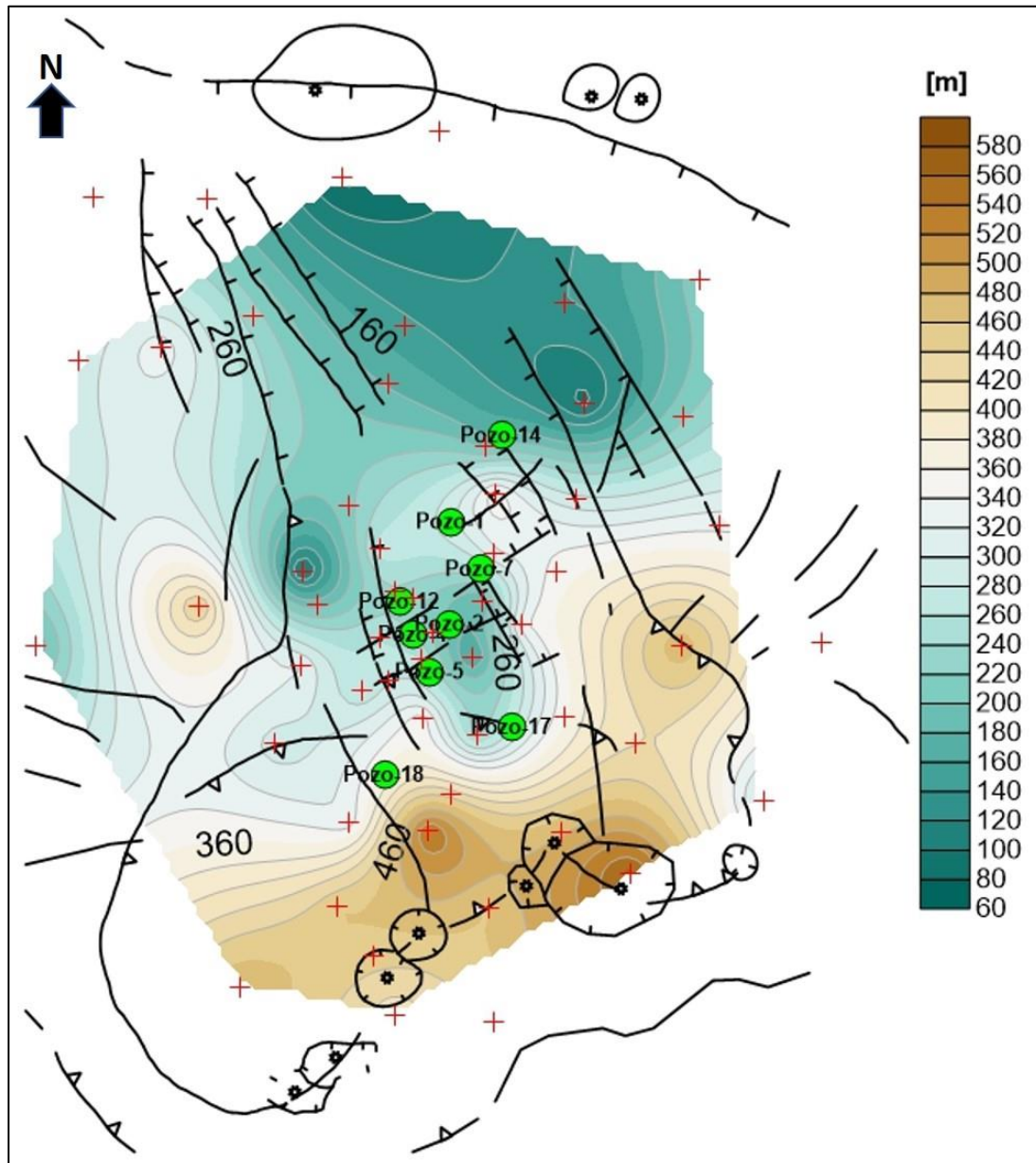


Figura 17. Superposición de mapas de Techo y Base del acuífero intermedio para determinación de espesor del acuífero

8.2. DATOS GRAVIMÉTRICOS

Las anomalías gravimétricas en la región presentadas por el mapa de anomalía de Bouguer del área de estudio aporta muy poca información para la determinación de estructuras es por ello que la elaboración del mapa de primera derivada horizontal Figura 18(a) aporta de gran manera una idea sobre la distribución de lineamientos o estructuras en la zona.

La interpretación preliminar del mapa de primera derivada permite apreciar al menos tres segmentos de lineamientos con orientación NW – SE en la parte central del área del sistema geotérmico de interés; además, en el segmento SW se puede interpretar en conjunto con información de elevación del área una estructura similar a una caldera, la cual realiza un cierre cercano a la región donde se tiene el primer lineamiento de la zona central del sistema geotérmico. En la zona Norte del área de estudio se aprecia un lineamiento con orientación casi E – W que supondría el borde de la región del graben central de El Salvador.

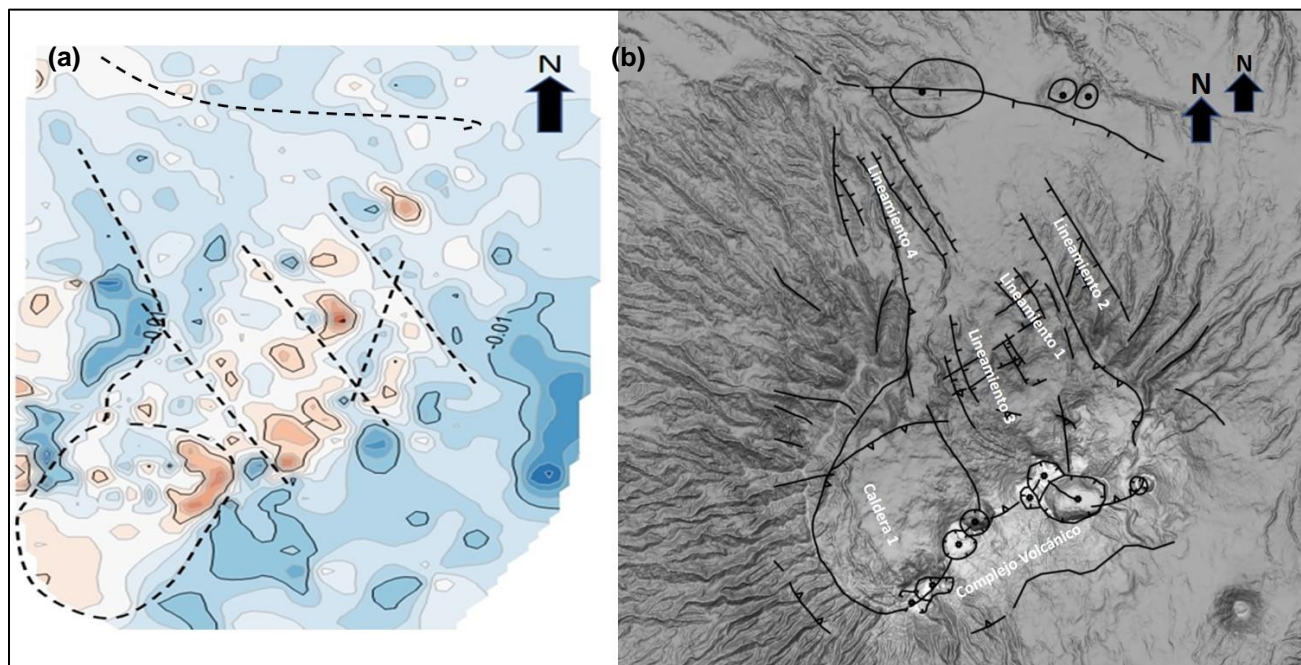


Figura 18. Correlación de los lineamientos identificados con el mapa de primera derivada de gravimetría y el mapa estructural de la región de estudio

Al correlacionar los resultados de la anomalía gravimétrica con el filtro de primera derivada con el mapa estructural generado durante los estudios geológicos del sistema geotérmico (Figura 18(b)) se puede apreciar que los lineamientos remarcados por gravimetría coinciden hasta cierto punto con los identificados en campo. La propuesta de la ubicación de la caldera en el segmento SW del área de interés se confirma también. En la zona central del área de estudio las

características del fallamiento permiten apreciar la formación de una especie de graben de pequeñas dimensiones, coincidente con los altos valores de anomalía en el mapa de primera derivada.

La ubicación de los lineamientos coincide con las regiones en donde se da una variación en la profundidad del techo del acuífero. Explicando de esa manera el súbito cambio de nivel al Este de la región central del sitio de interés. Mientras tanto, en el extremo Norte el comportamiento de descenso del nivel del techo del acuífero podría asociarse también al fallamiento que existe en esa región, además del efecto topográfico propio de la zona.

8.3. INTEGRACIÓN DE RESULTADOS DE INTERPRETACIÓN DATOS GEOFÍSICOS

El análisis de los datos gravimétricos, electromagnéticos y la correlación estratigráfica de los materiales vinculados al acuífero intermedio permitieron generar un modelo simplificado del acuífero en cuestión. La Figura 19 presenta la distribución de la profundidad del techo del acuífero intermedio, además de su relación con las estructuras geológicas que en conjunto con la gravimetría se identificaron.

Un análisis rápido de los resultados integrados es que la variación del techo del acuífero se debe principalmente a las estructuras de tipo falla normal en diferentes puntos y regiones del sistema geotérmico. Así, se puede apreciar que en la región central cercano al lineamiento 1 en donde se forma un pequeño graben el nivel del techo del acuífero tiene valores por debajo de los 0 msnm, sugiriendo que la estructura ha provocado un descenso de la unidad que se categoriza como acuífero intermedio.

Por otra parte, las regiones que quedan en la zona de techo de la falla, el tope del acuífero se mantiene por encima del nivel medio del mar, siendo más evidente en la región SW y E del sistema de interés. En la región Norte, donde los valores de la profundidad del techo del acuífero son los menores, se aprecia que esa región está influenciada por un sistema de fallas que generarían un escalonamiento que generaría en consecuencia un descenso de la unidad geológica vinculada al acuífero.

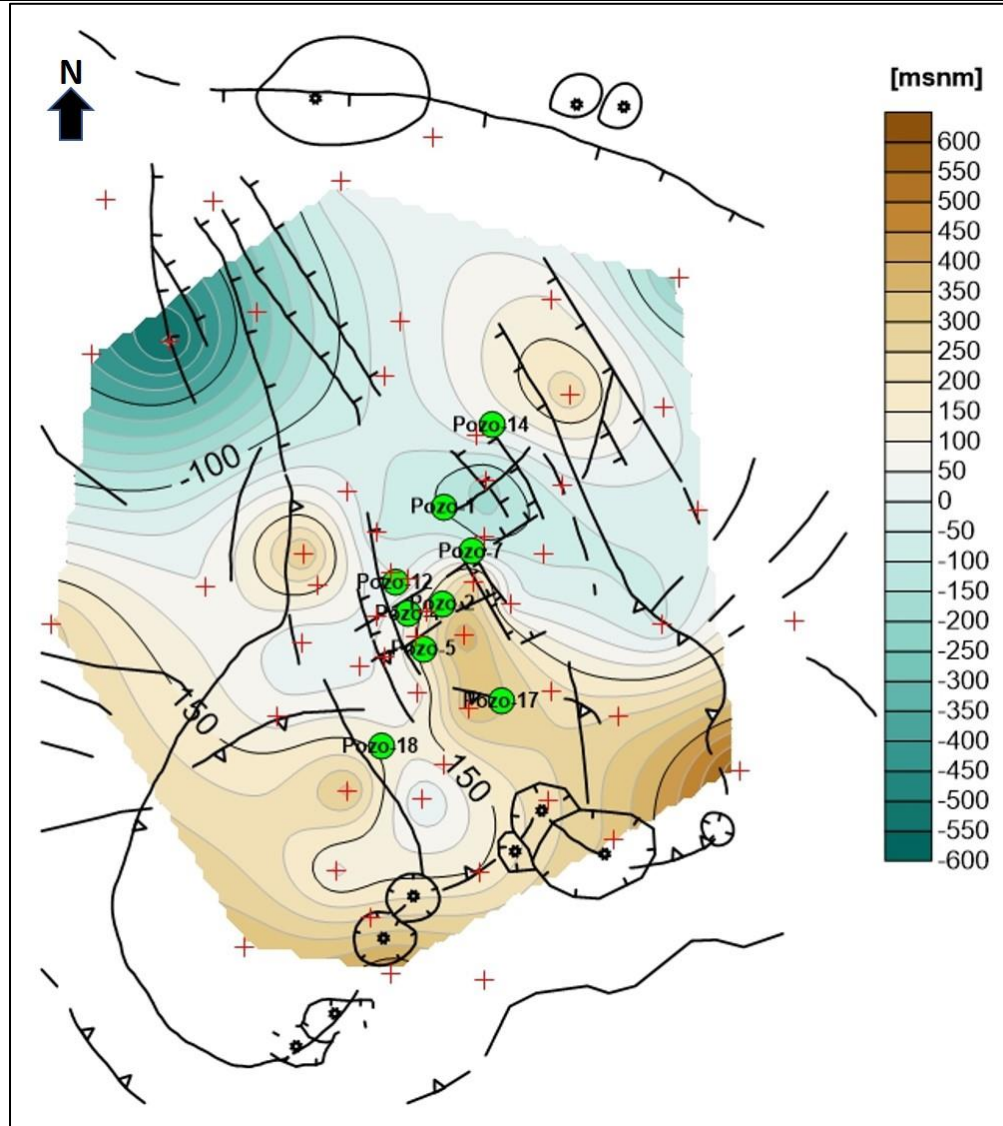


Figura 19. Integración de mapa de distribución de profundidad del techo del acuífero y estructuras geológicas predominantes de la zona.

El espesor del acuífero Figura 20 también se ve influenciado por las estructuras. Teniendo que, en la región central (lineamiento 1 y 3), a pesar de estar a un nivel más alto respecto al nivel del mar, el acuífero posee menos espesor, contrario a las regiones donde los esfuerzos locales no presentan mayor influencia en el movimiento de las unidades litoestratigráficas. El posible motivo de la disminución del acuífero podría relacionarse al nivel de fracturamiento que se genera por el movimiento favorecido por las fallas, estas fracturas pueden irse rellenando de materiales más arcillosos o consolidarse de tal manera que las características permeables de la unidad litológica sean modificadas.

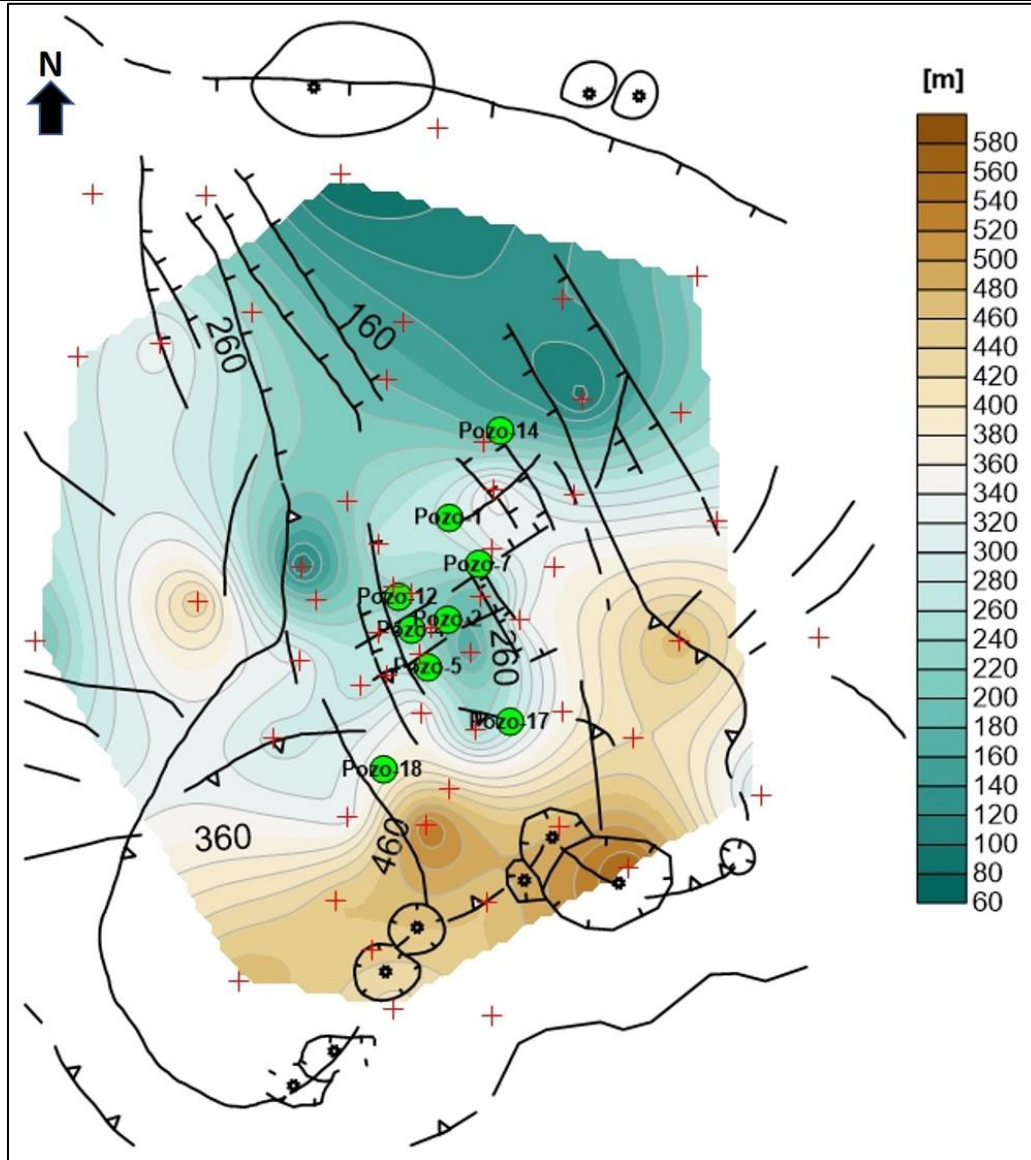


Figura 20. Distribución del espesor del acuífero intermedio, integrado con estructuras geológicas predominantes en la zona de interés.

9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A partir de la información procesada e interpretada se puede realizar una propuesta de distribución del acuífero intermedio del sistema geotérmico de interés, principalmente basado en la identificación de la anomalía geofísica de resistividad eléctrica (materiales con resistividades de entre $10 - 20 \Omega \cdot m$ que subyacen una capa de materiales conductivos) y la identificación de los materiales asociados a las zonas de pérdidas parciales o totales registrados en la perforación

de pozos correspondientes principalmente a secuencias de basaltos y andesitas fracturadas y tobas líticas ácidas.

La Figura 21 presenta la propuesta basada en los criterios anteriormente mencionados, focalizándose principalmente en 3 regiones (área azul, roja y amarilla), las 3 zonas representan regiones donde el acuífero se ha logrado correlacionar con información de pozos y que a su vez se ven influenciados por estructuras geológicas, el área azul vinculada al lineamiento 3, presenta características de distribución más homogéneas, teniendo valores de techo del acuífero cercanas a 200 msnm, a su vez, esta está limitada al Este por los bordes del lineamiento 3. Una segunda zona de propuesta es la región amarilla, delimitada por las estructuras del lineamiento 1, en el sector cercano al pozo 4, 7 y 14 en donde se aprecia la profundización del techo del acuífero, esto se ha asociado al fallamiento existente en la zona, que por su propia dinámica ha hecho que el material haya descendido hasta 150 metros respecto al nivel del mar. Y por último la región roja, limitada por el lineamiento 2, donde los valores de resistividad vinculados al acuífero intermedio dan indicios de la existencia de este, además, la profundidad del techo de la unidad acuífera es bastante similar a la que existe en la zona azul. Estas tres regiones son las que suponen mayores condiciones para la existencia de un acuífero intermedio en el sistema geotérmico.

En la figura 22, los pozos (círculos verdes) que aparecen en el mapa, son aquellos que han permitido apreciar la secuencia estratigráfica que puede ser asociada al acuífero intermedio, a excepción del pozo 18. La dirección de flujo preferencial puede asumirse de Sureste a Noroeste, ayudado por el efecto de la topografía y la distribución de los materiales correspondientes al acuífero.

El comportamiento de la resistividad en profundidad se puede observar en el modelo 2-D de la Figura 23, el cual es una representación de un perfil N – S que atraviesa la zona de pozos y la región donde se tiene mayor cantidad de sondeos MT (Figura 22). En el perfil se realiza la propuesta de delimitación del techo y la base del acuífero intermedio, además de añadir de manera inferida la existencia de las fallas que atraviesan el mismo perfil y su movimiento relativo. La dirección de flujo preferencial puede asumirse de Sureste a Noroeste, ayudado por el efecto de la topografía y la distribución de los materiales correspondientes al acuífero. En el modelo los isocontornos de resistividad asociados al acuífero son de entre $7 - 17 \Omega \cdot m$ un valor similar al propuesto a partir de los modelos 1-D Occam de detalle, coincidiendo en gran medida con las profundidades asociadas al acuífero intermedio basadas en la estratigrafía.

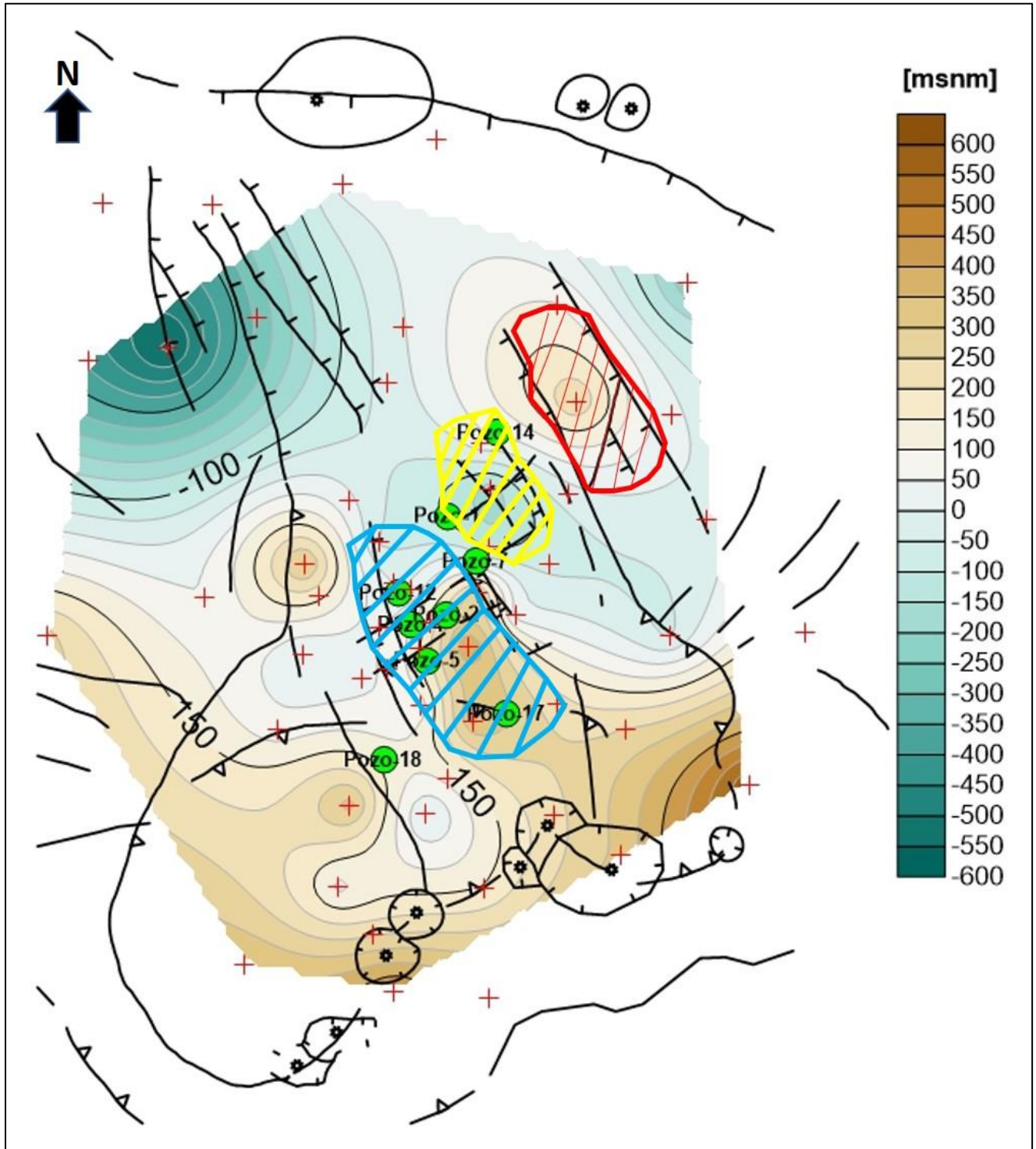


Figura 21. Propuesta de distribución del acuífero intermedio basado en información estratigráfica y de anomalías 1-D de MT

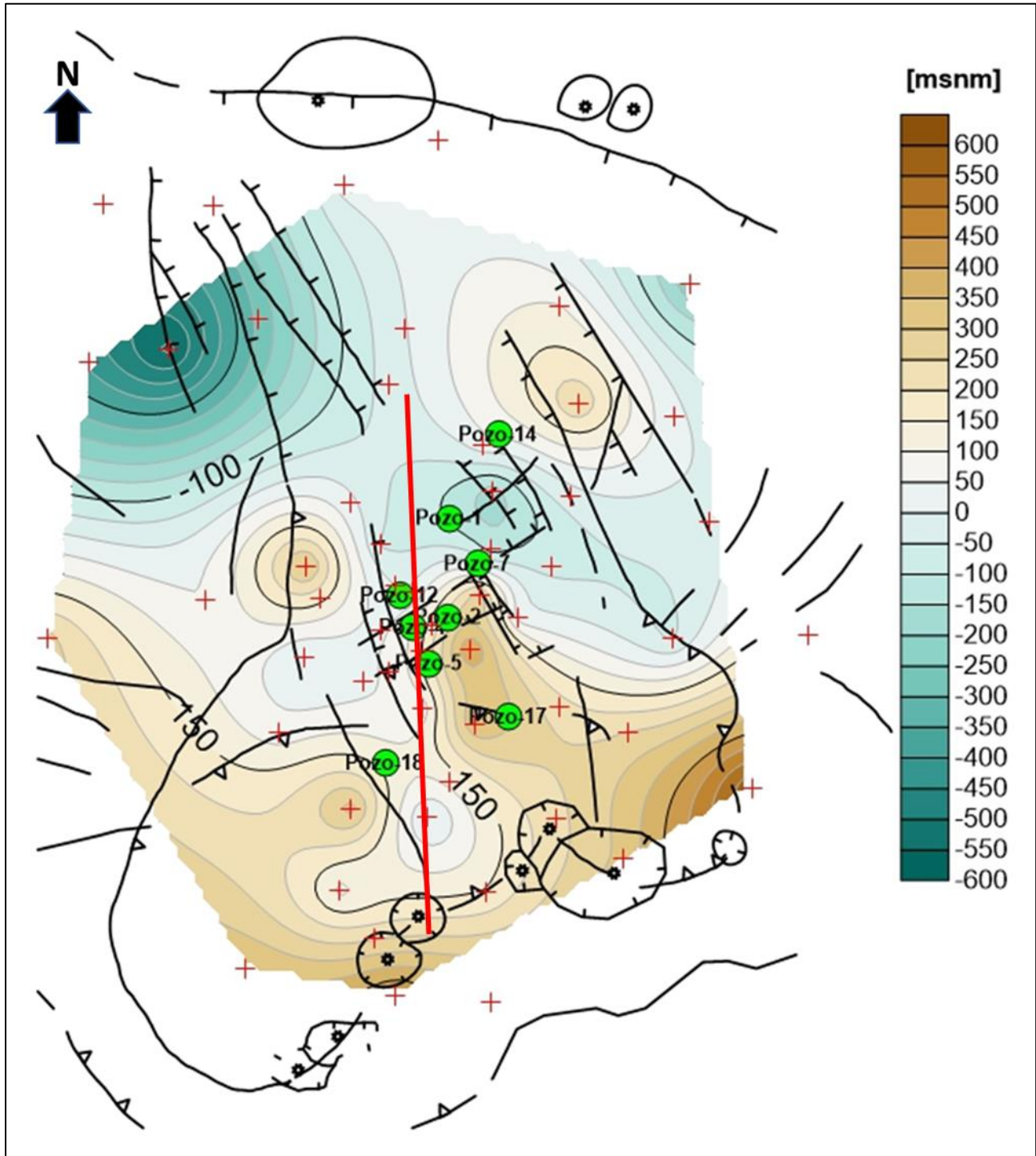


Figura 22. Perfil propuesto (línea roja) N-S para modelo de resistividades 2-D con base a los datos de MT

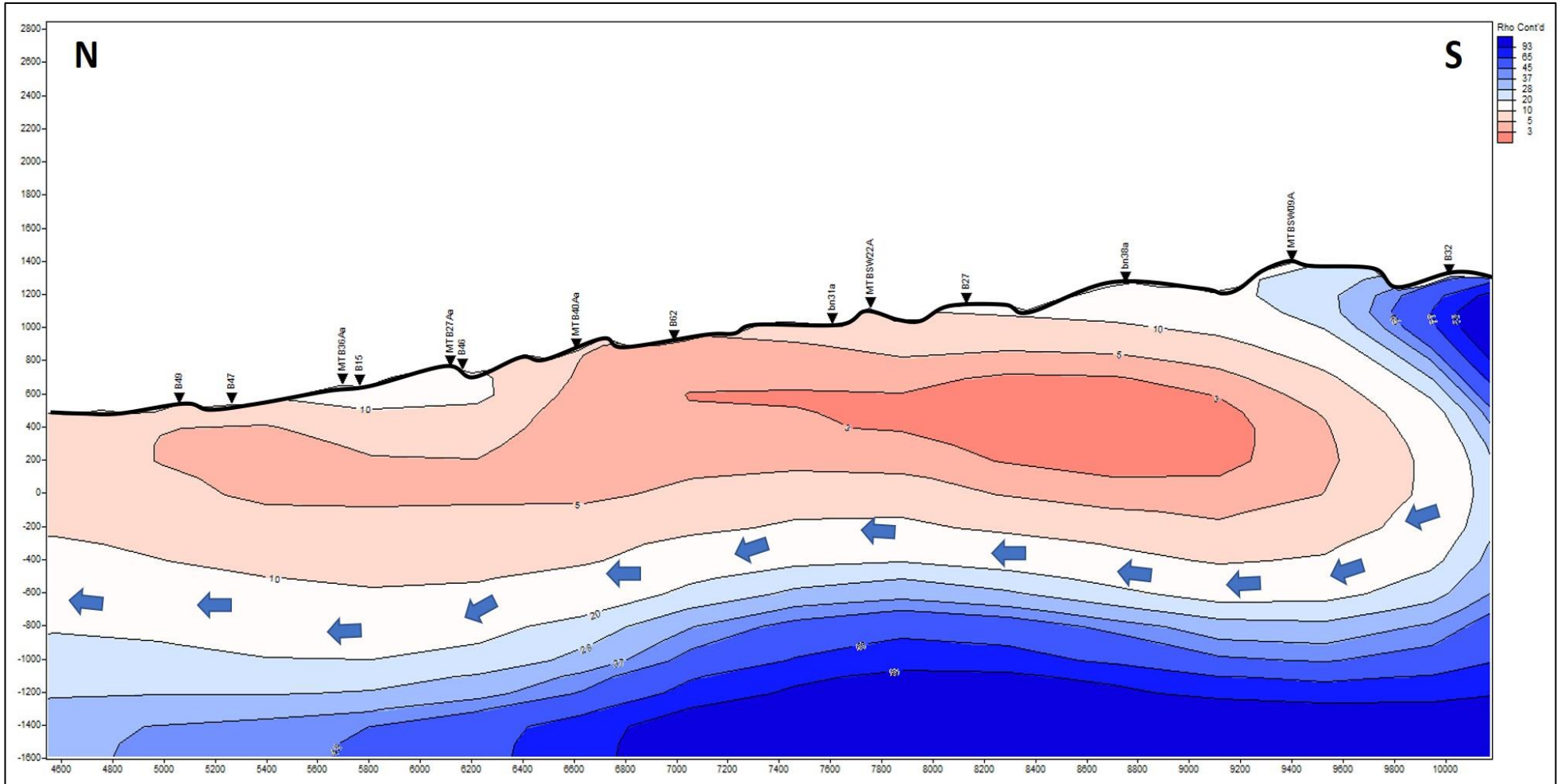


Figura 23. Perfil 2-D del comportamiento de la resistividad en profundidad (isocontornos); patrón de flujo preferencial de los fluidos (simbolizado por las flechas azules).

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El procesamiento, análisis e interpretación de los datos geofísicos, estratigráficos y estructurales del sistema geotérmico de interés dan indicios que la distribución del acuífero intermedio de dicho campo se encuentra sectorizado y delimitado por sistemas de fallas.
- Se identifican por lo menos 3 regiones donde ha sido posible correlacionar las anomalías geofísicas:
 - Zona 1, ubicada en la región central del sistema geotérmico, limitada por las estructuras vinculadas al “lineamiento 1” que asemeja un pequeño graben, su techo se ubica entre 0 a -250 msnm, elevaciones más bajas que las otras zonas de interés, y posee un espesor de entre 200 - 320 m.
 - Zona 2, vinculada y restringida por el sistema de fallas del Este o “lineamiento 2”, la ubicación del techo del acuífero en esta zona ronda los 50 a 150 msnm y posee un espesor de entre 80 - 160 m, siendo la zona de interés con menor espesor; su localización ha sido inferida con base al análisis de los sondeos MT.
 - Zona 3, vinculada y limitada por el sistema de fallas “lineamiento 3”, donde el techo del acuífero se encuentra en promedio a -50 a 300 msnm, y posee espesores entre 180 a 300 m, en las cercanías del pozo 2 y al Sur del pozo 17 respectivamente, es la sección con mayores dimensiones relacionadas al acuífero intermedio.
- Los materiales asociados al acuífero se caracterizan como intercalaciones o secuencias de lavas basalto-andesíticas o andesíticas con tobas líticas ácidas a intermedias. El espesor de estos materiales es variable y por lo tanto lo es el espesor del acuífero, rondando entre valores de 60 m al NE del pozo 7, hasta 450 en la región al SW del pozo 17.
- El análisis de datos gravimétricos confirman la existencia de lineamientos que se asocian a sistemas de fallas de tipo normal que funcionan como controlador de la distribución de los materiales; el mapa de primera derivada muestra un valor máximo en la zona donde se forma un pequeño graben en la zona al SW del Pozo 14. Debido a la dinámica que estas estructuras generan que se tiene una distribución heterogénea del acuífero, teniendo así la ubicación del techo de este entre -350 a 450 msnm.
- Los materiales asociados al acuífero tienen un comportamiento de resistividades que rondan los 10–20 $\Omega \cdot m$ según los modelos 1-D de detalle (Occam) de datos MT. Estos materiales se encuentran subyaciendo en su mayoría de registros a una capa conductiva asociada a materiales arcillosos o con alta alteración hidrotermal. El modelo 2-D de resistividades

mostradas en un perfil N – S confirma la distribución de las resistividades y las profundidades asociadas al acuífero intermedio siendo congruentes con las propuestas de estudios geológicos.

- La dirección de flujo preferencial es SW – NE, predominado por la topografía y las estructuras geológicas del sistema que encausan los fluidos a esa dirección.

11. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo del personal del Diplomado en Geotermia para América Latina (DGAL), LaGeo, UNU-GTP y UES, los cuales aportaron los datos y programas necesarios para la interpretación de la información.

Un agradecimiento a los colegas del área de Geofísica de LaGeo, con especial énfasis al Lic. Pedro Santos por compartir su conocimiento en el uso de datos electromagnéticos, al Lic. José Rivas por sus consejos en el área de gravimetría y correlación con la información MT, al Lic. Álvaro Campos por su disponibilidad constante ante cualquier consulta.

Además, un especial agradecimiento al Sr. Marco Tulio del centro de documentación de LaGeo por ayudarme a encontrar la información bibliográfica y técnica necesaria para realizar diferentes análisis.

Y por último, y no menos importante, a los compañeros del DGAL con los que compartimos experiencias y consejos para desarrollar la investigación.

Gracias a todos.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDA. (2011). *Mapa Hidrogeológico de El Salvador*. San Salvador.
- Árnason. (2007). Geothermal exploration and development of the Hengill high - temperature field (presentation). *Short course II on surface exploration for geothermal resources*, 29.
- Astier, J. L. (1975). *Geofísica Aplicada a la Hidrogeología*. Madrid: Paraninfo.
- Bosse, H. R., Schmidt-Thomé, M., & Merino, A. (1978). *Mapa Geológico de El Salvador*. San Salvador: Instituto Geográfico Nacional de El Salvador.
- Comeau, M. J. (2015). *Electrical Resistivity Structure of the Altiplano-Puna Magma Body and Volcan Uturuncu from Magnetotelluric Data*. Alberta: University of Alberta.
- Georgsson, L. S. (2009). Geophysical Methods used in Geothermal Exploration. *Fourth Short Course on Exploration for Geothermal Resources*.
- LaGeo. (2012). *Integración de Datos Geocientíficos: Modelo Conceptual Campo Geotérmico II*. Informe Técnico, Santa Tecla.
- Milsom, J., & Eriksen, A. (2013). *Field Geophysics*. Wiley - Blackwell.
- Monteiro Santos, F. A., Sultan, S. A., Represas, P., & El Sorady, A. L. (2006). Joint inversion of gravity and geoelectrical data for groundwater and structural investigation: application to the northwestern part of Sinai, Egypt. *Geophysics J. International*, 705 - 718.
- Reynolds, J. M. (2011). *An introduction to applied and environmental geophysics*. Wiley - Blackwell.
- Schwarzacher, W. (1975). Chapter 12 Stratigraphical Correlation. *Sedimentation Models and Quantitative Stratigraphy*, 321-348.
- Sheriff, R. E. (2002). *Encyclopedic Dictionary of Applied Geophysics* (Fourth ed.). Tulsa, Oklahoma, United States of America: Society of Exploration Geophysics (.).
- SNET, S. N. (s.f.). *Perfiles Climatológicos del departamento de Usulután*. San Salvador.
- Spichak, V., & Manzella, A. (2009). Electromagnetic sounding of geothermal zones. *Journal of Applied Geophysics*, 459 - 478.

Sundararajan, N., Sankaran, S., & Al-Hosni, T. K. (2012). Vertical electrical sounding (VES) and multi-electrode resistivity in environmental impact assessment studies over some selected lakes: a case study. *Environmental Earth Science*, 881 - 895.

Telford, W. M., Geldart, L. P., & Sheriff, R. E. (1990). *Applied Geophysics* (Second ed.). Cambridge, Estados Unidos: Cambridge University Press.