

APLICACIÓN DEL MÉTODO GEOFÍSICO MAGNETOTELÚRICO EN UNA ZONA
UBICADA AL SUR DEL MUNICIPIO DE PAIPA, BOYACÁ.
APORTE A LA EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA.

LUIS ALEJANDRO SILVA BENAVIDES

DARLIN LORENA URIBE JOYA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA

2018

APLICACIÓN DEL MÉTODO GEOFÍSICO MAGNETOTELÚRICO EN UNA ZONA
UBICADA AL SUR DEL MUNICIPIO DE PAIPA, BOYACÁ.
APORTE A LA EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA.

LUIS ALEJANDRO SILVA BENAVIDES

DARLIN LORENA URIBE JOYA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE GEÓLOGO

Trabajo de grado en la modalidad de investigación

Energy and Other non Renewable Resources Research Group

DIRECTORA

ROCÍO DEL PILAR BERNAL OLAYA

PHD GEÓLOGA

CODIRECTOR

JOSÉ DAVID SANABRIA GÓMEZ

PHD FÍSICO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA

2018

DEDICATORIA

A mis padres, Paula y Mario, por guiarme en todas mis vivencias, por enseñarme que con esfuerzo, disciplina y honestidad, todo se puede lograr. Gracias por quererme, apoyarme y creer en mí.

A mis hermanas Jimena, Lina y Neida, por ser mis eternas amigas, mis confidentes y por ser mi apoyo incondicional.

A Tati, por alegrar mis días con su inocencia, por ser la inspiración para ser mejor persona.

Lorena

A mi familia, en especial a mi madre y a mi tita, Madeleyne y Zulnia, por el apoyo y la compañía durante toda mi vida, para lograr avanzar y salir adelante.

Alejandro

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos especialmente a nuestra directora Rocío Bernal Olaya, por su dedicación, su apoyo y las innumerables enseñanzas académicas y humanas que nos brindó a lo largo del proyecto. Sin ella hubiera sido imposible de realizar.

A la Universidad Industrial de Santander por permitir nuestra formación académica.

A los profesores de la Escuela de Geología, quienes compartieron su conocimiento con nosotros a lo largo de nuestra carrera universitaria.

A nuestro codirector, José David Sanabria, por su contribución en el préstamo del equipo de geofísica.

A los profesores Saith Khurama y Francisco Velandia, por sus observaciones y recomendaciones a lo largo del proyecto.

A Gilbert Fabián Rodríguez, del grupo de exploración de recursos geotérmicos del Servicio Geológico Colombiano, por su asesoría sobre el método magnetotelúrico.

Al estudiante de maestría Luis Carlos Prada, por su colaboración durante la toma y procesamiento de datos.

A Cristian Camilo Fuentes y Yamid Casanova, por su apoyo durante los días de campo, por su disposición y colaboración.

A los habitantes de las veredas aledañas al municipio de Paipa por su amabilidad e interés a la hora de tomar los datos.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. OBJETIVOS	23
2. MARCO GEOLÓGICO	24
3. DEFINICIÓN DE ESTRUCTURAS	28
3.1 CORTES GEOLÓGICOS	29
4. APLICACIÓN DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO	34
4.1 SEÑAL MAGNETOTELÚRICA	35
4.2 PRINCIPIOS DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO	36
4.3 INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA	37
5. METODOLOGÍA	39
5.1 DISEÑO DE LA ADQUISICIÓN	39
5.2 TOMA DE DATOS	43
6. RESULTADOS	46
6.1 DEFINICIÓN DE LA CALIDAD DE LOS DATOS TOMADOS	58
7. DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN	60
8. CONCLUSIONES	67
9. RECOMENDACIONES	69
BIBLIOGRAFÍA	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico de Paipa. (Modificado de INGEOMINAS, 2005)	19
Figura 2. A) Ubicación del departamento de Boyacá en Colombia. B) Ubicación de la plancha 171, así como de la zona de estudio (Cuadro amarillo). C) Zona de estudio (tomada y modificada de Velandia y Cepeda, 2004), con los perfiles en los que se hicieron las tomas de datos en campo (Pin amarillo). D) Leyenda geológica de las unidades aflorantes en la zona de estudio	25
Figura 3. Columna estratigráfica de unidades geológicas presentes en el área de estudio en relación con la resistividad de las rocas. Espesores tomados de Velandia, 2003; Díaz y Sotelo, 1995; Renzoni, 1981.....	27
Figura 4. Corte geológico A-A' (Localizado en la Figura 2C). Las líneas rojas localizan los puntos adquiridos con el método magnetotelúrico en campo. Unidad Cuaternaria Qhb, Cretácicas KPgg, Klt, Klp, Kpl, Kc, Kch y Jurásicas J-Pz, cuya equivalencia aparece en la Figura 3.	30
Figura 5. Corte geológico B-B' (Localizado en la Figura 2C). Fallas interpretadas mostradas en líneas negras continuas mientras las sugeridas están en líneas negras discontinuas. Las líneas rojas localizan los puntos adquiridos con el método magnetotelúrico en campo. Unidad Neógena NgQt, unidades Cretácicas KPgg, Klt, Klp, Kpl, Kc, Kch y Jurásicas J-Pz, cuya equivalencia aparece en la Figura 3. Nótese la ubicación de la Falla El Batán al tope de la unidad Kc.	31
Figura 6. Corte geológico C-C' (1) (Localizado en la Figura 2C). Fallas interpretadas mostradas en líneas negras continuas mientras las sugeridas están en líneas negras discontinuas. Las líneas rojas localizan los puntos adquiridos con el método magnetotelúrico en campo. Unidades Neógenas NgQv, NgQt, Cretácicas KPgg, Klt, Klp, Kpl, Kc, Kch, Ku y Jurásicas J-Pz, cuya equivalencia aparece en la Figura 3.	32
Figura 7. Corte geológico D-D' (1) (Localizado en la Figura 2C). Fallas interpretadas mostradas en líneas negras continuas mientras las sugeridas están en líneas negras discontinuas. Las líneas rojas localizan los puntos adquiridos con	

el método magnetotelúrico en campo. Unidad Cuaternaria Q, Neógena NgQt, Cretácicas KPgg, Klt, Klp, Kpl, Kc, Kch, Ku y Jurásicas J-Pz, cuya equivalencia aparece en la figura 3.	33
Figura 8. Modelo Directo (<i>Forward Model</i>) para el corte A-A', elaborado a través de la herramienta para Excel SEER (Scenario Evaluator for Electrical Resistivity). ...	40
Figura 9. Modelo Directo (<i>Forward Model</i>) 1D para la estación Paipa 009, con falla y sin falla, elaborado a través del Software Geowiz1DMT. Las gráficas en color amarillo corresponden de arriba hacia abajo a los valores de resistividad, fase e impedancia vs frecuencia. Las figuras en azul corresponden a la resistividad vs profundidad.	43
Figura 10. Esquema equipo Stratagem EH4. En la figura I se observa el receptor con todos los respectivos cables conectados al mismo, en la II un electrodo enterrado y el carrete con el cable que lo conecta al receptor, en la III una bobina, nivelada y cubierta por plástico, y en la IV, la consola, la batería, el cable naranja y el cable negro. El diagrama de la derecha es un diagrama esquemático de los elementos y su disposición en el sitio de medición.	45
Figura 11. Resultados MT 1D para el corte A-A' obtenidos con el equipo Stratagem EH4. En los gráficos superiores se muestran las mediciones de resistividad vs. profundidad. Los rombos azules muestran los valores medidos en dirección X mientras los rectángulos naranjas muestran los valores medidos en dirección Y. La profundidad alcanzada en estos perfiles fue hasta de 3 km.	48
Figura 12. Resultados MT 1D para el corte B-B' obtenidos con el equipo Stratagem EH4. En los gráficos superiores se muestran las mediciones de resistividad vs. profundidad. Los rombos azules muestran los valores medidos en dirección X mientras los rectángulos naranjas muestran los valores medidos en dirección Y. Nótese que las profundidades alcanzadas en estos perfiles fueron hasta de 3 km.	51
Figura 13. Resultados MT 1D para el corte C-C' (1) obtenidos con el equipo Stratagem EH4. En los gráficos superiores se muestran las mediciones de resistividad vs. profundidad. Los rombos azules muestran los valores medidos en	

dirección X mientras los rectángulos naranjas muestran los valores medidos en dirección Y. Nótese que la profundidad alcanzada en estos perfiles fue hasta de 600 m, y en algunos casos no se registraron valores útiles debido al ruido de los puntos de adquisición.	54
Figura 14. Resultados MT 1D para el corte D-D' (1) obtenidos con el equipo Stratagem EH4. En los gráficos superiores se muestran las mediciones de resistividad vs. profundidad. Los gráficos 12(1) - 12(2) y 15(1) - 15(2) muestran el mismo punto, tomado en dos mediciones debido a los problemas en la ganancia a la hora de obtener los datos. Los rombos azules muestran los valores medidos en dirección X mientras los rectángulos naranjas muestran los valores medidos en dirección Y. Nótese que la profundidad alcanzada en estos perfiles fue hasta de 2.5 km.	57
Figura 15. Comparación valores de Resistividad Aparente, Fase y Coherencia (De arriba hacia abajo) entre A) Estación Paipa 02 una estación de buena calidad de dato tomado y B) Estación Paipa 05 una de baja calidad de dato tomado. A mayor separación entre los rombos y los cuadrados entre las líneas, mayor incertidumbre presenta el registro, así como menor cantidad de datos (estación 5 en Resistividad Aparente).	58

LISTA DE ANEXOS

(Ver anexos adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en la Base de Datos de la Biblioteca UIS)

- Anexo 1. Corte geológico C-C' (2) (Localizado en la Figura 2C).
- Anexo 2. Corte geológico D-D' (2) (Localizado en la Figura 2C).
- Anexo 3. Forward Model A-A' resistividades ideales.
- Anexo 4. Forward Model B-B' resistividades ideales.
- Anexo 5. Forward Model B-B' resistividades esperadas.
- Anexo 6. Forward Model B-B' resistividades ideales.
- Anexo 7. Forward Model C-C' resistividades ideales.
- Anexo 8. Forward Model C-C' resistividades esperadas
- Anexo 9. Forward Model C-C' resistividades ideales con alteración por zona de falla.
- Anexo 10. Forward Model C-C' - Segunda opción, resistividades ideales.
- Anexo 11. Forward Model C-C' - Segunda opción, resistividades esperadas.
- Anexo 12. Forward Model D-D' resistividades esperadas.
- Anexo 13. Forward Model D-D' resistividades ideales con alteración por zona de falla.
- Anexo 14. Forward Model D-D' - Segunda opción, resistividades ideales.
- Anexo 15. Forward Model D-D' - Segunda opción, resistividades esperadas.
- Anexo 16. Forward Model 1D Corte A-A'.
- Anexo 17. Forward Model 1D Corte B-B'.
- Anexo 18. Forward Model 1D Corte C-C'.
- Anexo 19. Forward Model 1D Corte C-C' - Segunda opción.
- Anexo 20. Forward Model 1D Corte D-D'.
- Anexo 21. Forward Model 1D Corte D-D' - Segunda opción.
- Anexo 22. Bitácora de trabajo de campo, Paipa, septiembre del 2018.
- Anexo 23. Paipa-001.
- Anexo 24. Paipa-003.

Anexo 25. Paipa-004.
Anexo 26. Paipa-006.
Anexo 27. Paipa-007.
Anexo 28. Paipa-008.
Anexo 29. Paipa-009.
Anexo 30. Paipa-010.
Anexo 31. Paipa-011.
Anexo 32. Paipa-012 (1) y Paipa-012 (2).
Anexo 33. Paipa-013.
Anexo 34. Paipa-014.
Anexo 35. Paipa-015 (1) y Paipa-015 (2).

RESUMEN

Título: Aplicación del método geofísico magnetotelúrico en una zona ubicada al sur del municipio de Paipa, Boyacá. Aporte a la exploración geotérmica. *

Autores: Luis Alejandro Silva Benavides, Darlin Lorena Uribe Joya. **

Palabras clave: Magnetotelúrica, exploración geotérmica, anomalías resistivas, Paipa, falla.

La investigación se desarrolló en aproximaciones del sistema geotérmico de Paipa, Boyacá, utilizando el método geofísico magnetotelúrico (MT). El área de exploración se encuentra en el Altiplano Cundiboyacense en medio de la Cordillera Oriental de Colombia; en términos geológicos en el área afloran las rocas sedimentarias del Cretácico y Cenozoico predominantemente, estructuras falladas de tipo regional que son de gran importancia puesto que se encuentran fuertemente ligadas con la ubicación de las fuentes termales. La relación entre las estructuras y las fuentes termales, es información útil para entender su origen y naturaleza, además de su relación directa/indirecta con las zonas de cruce de fallas. Se instalaron 15 estaciones de magnetotelúrica, se hicieron mediciones con un promedio de 1200 conteos en la banda 3 del equipo, en puntos ubicados a partir de la interpretación de 4 perfiles geológicos.

La correlación entre los datos de magnetotelúrica y la descripción de las unidades geológicas, permitió establecer la relación entre los valores de resistividad y la litología de las unidades, se relacionan las resistividades bajas con rocas arcillo-líticas o presencia de fluidos, las resistividades intermedias representan rocas con mayor porosidad como las arenas y las altas resistividades con el basamento. La Falla El Batán se describe como la estructura más importante de la zona, ya que por sus anomalías resistivas, se considera como la zona de despegue por donde se da la mayor circulación de fluidos hidrotermales del sistema geotérmico. Por otra parte, se comprobó la influencia de elementos radioactivos presentes en las rocas y se descartó su relación como posible fuente de calor importante.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología, Directora: Rocio del Pilar Bernal Olaya, Geóloga PhD. Codirector: José David Sanabria, Físico PhD.

ABSTRACT

Title: Application of the magnetotelluric geophysical method in an area located south of the municipality of Paipa, Boyacá. Contribution to geothermal exploration.*

Authors: Luis Alejandro Silva Benavides, Darlin Lorena Uribe Joya. **

Keywords: Magnetotelluric, geothermal exploration, resistive anomalies, Paipa, fault.

The investigation was developed in approximations of the geothermal system of Paipa, Boyacá, using the magnetotelluric geophysical (MT) method. The exploration area is located in the Cundiboyacense Altiplano in the middle of the Eastern Cordillera of Colombia; in geological terms in the area the Cretaceous and Cenozoic sedimentary rocks appear predominantly, regionally faulted structures that are of great importance since they are strongly found linked with the location of the thermal springs. The relationship between structures and thermal sources is useful information to understand their origin and nature, as well as their direct / indirect relationship with fault crossing areas. 15 magnetotelluric stations were installed; measurements were taken with an average of 1200 counts in band 3 of the equipment, at points located from the interpretation of 4 geological profiles.

The correlation between the magnetotelluric data and the description of the geological units, allowed establishing the relationship between the values of resistivity and the lithology of the units, the low resistivities are related to arcillitic rocks or the presence of fluids, the intermediate resistivities represent rocks with greater porosity such as sands and high resistivities with the basement. The El Batán fault is described as the most important structure in the area, since its resistive anomalies, is considered as the take-off zone where the greatest circulation of hydrothermal fluids of the geothermal system occurs. On the other hand, the influence of radioactive elements present in the rocks was verified and their relationship was discarded as a possible source of important heat.

*Bachelor Thesis

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Geología, Directora: Rocio del Pilar Bernal Olaya, Geóloga PhD. Codirector: José David Sanabria, Físico PhD.

INTRODUCCIÓN

El sector energético en Colombia enfrenta un escenario en el que los combustibles fósiles cada vez son más limitados, y en el que, por lo tanto, las denominadas “energías renovables” son cada vez más emergentes, estas son obtenidas de fuentes naturales inagotables, como la eólica y la geotérmica.

Para el caso de estudio se describe un sistema geotérmico, en el que se realizan mediciones de magnetotelúrica para, a partir de la resistividad, estudiar la distribución de fluidos. La energía geotérmica presenta innumerables ventajas entre ellas el hecho de poder obtenerse a cualquier hora de manera continua con la planta adecuada, o mejorar la calidad de vida de las personas, inclusive llevar energía a sitios alejados de las grandes urbes, entre otras (Salazar *et al.*, 2017).

Los recursos geotérmicos son fuente de energía (térmica y eléctrica), de minerales y de agua. El conocimiento de estos recursos en Colombia es limitado, razón por la cual no se han desarrollado proyectos de aprovechamiento, con excepción de usos balnearios implementados en el municipio de Paipa, siendo este uno de los proyectos balneológicos más importantes del país (INGEOMINAS, 2005).

Los sistemas geotérmicos se desarrollan a lo largo de estructuras que permiten la inyección de fluidos hidrotermales, o la percolación de aguas meteóricas a grandes profundidades, permitiendo anomalías de calor y de resistividad eléctrica en el subsuelo (Georgsson, 2009). Algunos autores han sugerido que las variaciones de temperatura ocurren por el decaimiento radioactivo de elementos como el potasio, abundante componente de las rocas félsicas intrusivas (Alfaro, 2001) mientras que otros sugieren las variaciones de temperatura como resultado de la difusión del calor en agua meteórica percolada a lo largo de las fallas (Georgsson, 2009), pero la más importante generalmente consiste en una cámara magmática somera (Gupta, 2007). Para Paipa, la caldera Olitas y la zona de El Manzano sugieren la presencia de una cámara magmática, la cual se propone como una fuente de calor en la zona (Figura 1) (Alfaro, 2002a), la caldera está conectada por la Falla Paipa-Toca cuyo origen parece ser coetáneo con la

caldera, proponiéndose como el conducto principal de ascenso de fluido magmático (Moyano, 2015).

Los primeros estudios en la zona fueron realizados por Boussingault y Roulín, en 1849, quienes describieron la litología, la química de las fuentes termales y las unidades donde se encuentran. En 1929, Navia y Barriga proponen la presencia de un banco salino, afectando la composición de las aguas termales. Más adelante, Paipa es catalogada como un área de prioridad media-alta para la exploración geotérmica, requiriendo estudios más avanzados para su explotación (OLADE, CONTECOL, 1982; JAPAN CONSULTING INSTITUTE, 1983). Bertrami *et al.*, 1992, caracterizan el sistema determinando que la fuente de calor es magmática, que existe un reservorio permeable (Formación Une, Ku) y una capa sello arcillosa (Grupo Churuvita, Kch). Posteriormente, se han realizado estudios geoquímicos (Alfaro, 2002a, 2002b; Alfaro y Espinosa, 2004; González *et al.*, 2008), geológicos (Velandia, 2003; Cepeda y Pardo, 2004) y geofísicos (Vásquez, 2002, 2012; Moyano, 2010, 2015), que han ayudado a comprender mejor este sistema, y lograr un avance en la exploración del mismo. Con base en esos estudios, ha sido posible realizar un modelo preliminar del sistema geotérmico (FIGURA 1).

El método magnetotelúrico (MT) es un método geofísico pasivo que utiliza como fuente un amplio espectro de variaciones naturales magnéticas en la atmósfera que generan inducción electromagnética en el subsuelo. El método utiliza estas variaciones a partir de la medición sincrónica de los campos eléctricos y magnéticos inducidos en el subsuelo. El MT puede brindar resultados de resistividad desde los cientos de metros a decenas de kilómetros de profundidad. Como todo método geofísico, la profundidad que alcanzan estas ondas está relacionada con la longitud de onda utilizada (y consecuentemente su frecuencia) y con las propiedades físicas (la conductividad) de las unidades geológicas del subsuelo. Conociendo el comportamiento de las ondas electromagnéticas al propagarse al interior de la tierra, es posible correlacionar los contrastes de resistividad eléctrica con estructuras geológicas existentes.

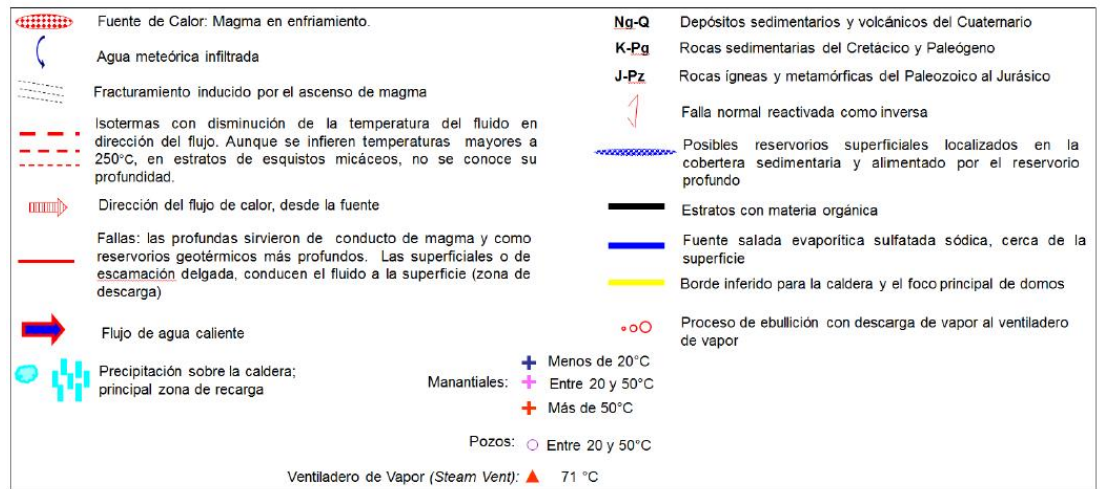
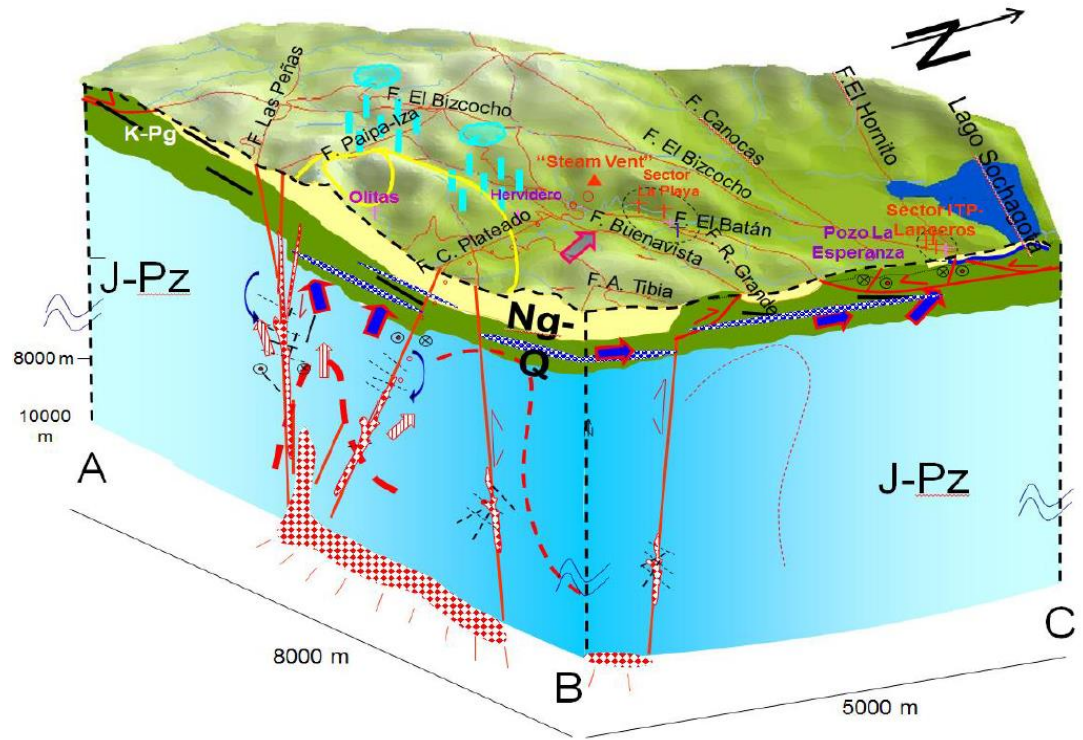


Figura 1. Modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico de Paipa. (Modificado de INGEOMINAS, 2005)

Las estructuras principales presentes en la zona de estudio corresponden a las fallas Canocas, El Bizcocho y El Batán, fallas de cabalgamiento cuyo rumbo coincide con el de la mayoría de estructuras en la Cordillera Oriental, con trazos sinuosos y discontinuos debido a su bajo buzamiento, y la deposición de unidades

Neógenas y Cuaternarias, tanto volcánicas como sedimentarias (Velandia, 2003). El trazo de fallas, y el cruce de las mismas (como la Falla El Batán con la Falla Rancho Grande, FIGURA 2) se relacionan con fuentes termales, ya que éstas aumentan la permeabilidad, generando una conexión de calor y así de transmisión de fluidos (Velandia, 2003). Finalmente, Alfaro, 2002a, mediante la aplicación del geotermómetro de cuarzo, infiere un gradiente geotérmico anómalo mayor a 70°C/Km, permitiendo clasificar la zona como hipertermal.

Actualmente el MT es utilizado en la exploración geotérmica debido a su capacidad de definir contrastes de resistividad a grandes profundidades, lo que permite definir los elementos del sistema geotérmico. En nuestro caso de estudio, se presenta un sistema geotérmico (FIGURA 1) identificando como fuente de calor una intrusión magmática dentro de la secuencia sedimentaria, donde el reservorio profundo y la infiltración meteórica están asociados a fallas distensivas que alcanzan el basamento metamórfico (Paipa-Iza y Cerro Plateado) (INGEOMINAS, 2005) mientras el flujo de agua caliente está asociado a fallas más someras, de escama delgada, (p. ej. las fallas El Batán y El Bizcocho) que configuran un abanico imbricado de cabalgamientos (Velandia, 2003). Aparte de existir evidencia de aguas termales en la zona, se sugiere la existencia de un sistema geotérmico, con un reservorio de porosidad primaria (Formación Une, Ku) presente dentro de la misma secuencia, presencia de acuíferos someros con porosidad secundaria (Formación Labor y Tierna, Klt) y una capa sello (Grupo Churuvita, Kch) (FIGURA 3). La zona de recarga se ubica en la Formación Une (Ku) y la de descarga se interpreta controlada por fracturamientos profundos orientados NE-SW, estructuras descritas posteriormente (Ferreira y Hernández, 1988).

En aras de contribuir con la exploración geotérmica del área cercana a Paipa, en este proyecto se propuso cotejar dos posibles factores para la generación de anomalías resistivas, la primera, la presencia de zonas de falla, y la segunda, la litología cortada por las zonas de falla. El contraste entre estos dos factores geológicos se hará a partir de un análisis litológico, estructural y geofísico del

sistema geotérmico en un área de 12km² alrededor de zonas de anomalías ya identificadas (Franco, 2012; Moyano, 2015; Rodríguez, 2015), a partir de 15 sondeos magnetotelúricos tomados a lo largo de 4 perfiles en la zona de estudio, para así determinar anomalías resistivas y determinar la relación de éstas respecto a las fallas y litologías encontradas.

ANOMALÍAS RESISTIVAS

Comúnmente las rocas presentan valores de resistividad altos, puesto que los principales constituyentes de las rocas (cuarzo, silicato) son aislantes. Los valores presentan variaciones en casos donde se observan minerales metálicos, alteraciones hidrotermales o donde haya circulación o acumulación de fluidos, ya que éste se comporta como un electrolito. La resistividad de las rocas tiene una relación directa con las propiedades que la caracterizan, estas son: la temperatura, presión, salinidad, porosidad, permeabilidad y alteración hidrotermal, descritas así:

Temperatura: La temperatura es un factor clave en la resistividad, al aumentar, mejora la conducción en el fluido de poro, se reduce la viscosidad del fluido, lo que ayuda en la movilidad de los iones (Hersir y Björnsson, 1991). Es de resaltar que esto se cumple a temperaturas por debajo del punto crítico, cuando éste se supera, se disminuye la permitividad del agua, lo que lleva a una disminución de iones en la solución (Wameyo, 2005).

Asimismo, la temperatura puede aumentar debido al decaimiento radiactivo de elementos como el uranio, el torio y el potasio, los cuales se encuentran significativamente en rocas graníticas (Prol, 1996), o semejantes, como pueden ser las brechas hidrotermales; áreas con abundante cantidad de estos elementos pueden presentar anomalías resistivas.

Presión: El aumento de presión conlleva a un aumento en la resistividad, puesto que se reduce el volumen de poro debido a la compresión. Por otro lado, el

aumento de presión, a medida que aumenta la temperatura, previene que haya evaporación del fluido (Wameyo, 2005).

Salinidad: Químicamente, la salinidad es muy importante, puesto que, al aumentar la cantidad de iones disueltos en el fluido, aumenta la conductividad del mismo. El aporte de iones puede darse directamente del fluido magmático, como de la disolución de minerales en la roca caja por donde pasa el fluido. La concentración de sales es utilizada en geotermometría, para determinar la temperatura aproximada, sin embargo, se puede ver afectada por la presencia de bancos salinos (Navia y Barriga, 1929; Alfaro, 2002a), que aumentan la cantidad de iones disueltos sin representar variaciones de temperatura.

Porosidad: La porosidad se define como la relación entre el espacio vacío respecto al volumen total de la roca. Un aumento de ésta indica un mayor espacio para que ocurra un fluido. Archie (1942), propone una ecuación donde la resistividad depende de la porosidad, mientras haya saturación de fluido.

Permeabilidad: Esta propiedad se asocia a la porosidad, dependiendo de la conexión entre los espacios de poro en la roca, lo que permite o no el movimiento del fluido a través de la misma. Otro factor que favorece la permeabilidad son las fracturas (porosidad secundaria), rasgos comunes en zonas geotérmicas (Wameyo, 2005).

Alteración hidrotermal: Debido a la interacción fluido-roca, la resistividad también se puede ver reducida por la presencia de minerales secundarios hidratados, como las arcillas. El proceso de alteración y el tipo de mineral de alteración dependen del tipo de mineral primario, composición química del fluido y de la temperatura (Wameyo, 2005). En un sistema geotérmico se tiene el siguiente esquema general de alteraciones: 50° - 100°C (muy poca alteración), 100° - 220°C (zeolitas de baja temperatura y esmectita, baja resistividad), 220° - 240°C (zona de mezcla de arcillas, presencia de esmectita y clorita, baja resistividad) y de 240°C en adelante predomina la clorita, aumentando un poco la resistividad ya que este mineral tiene los cationes en un enrejado cristalino (Wameyo, 2005).

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar variaciones de resistividad de zonas de falla con diferentes características geológicas en un área de 12 km² en cercanías del municipio de Paipa, Boyacá y, a partir de la interpretación de las mismas, establecer la relación con la información litológica y estructural.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar y describir la relación entre las zonas de falla y las anomalías de resistividad.
2. Sugerir el factor geológico que influye en la variación de las mediciones de resistividad entre las fallas El Batán, Canocas y El Bizcocho.
3. Comprobar la influencia de elementos radioactivos, presentes en las rocas, en las anomalías resistivas, como posible fuente de calor importante.

2. MARCO GEOLÓGICO

La zona seleccionada para el estudio tiene una extensión de 12 km², al sur del municipio de Paipa y hace parte del Altiplano Cundiboyacense en medio de la Cordillera Oriental de Colombia (zona axial). El área está incluida en la Plancha 171-Duitama de la cartografía geológica regional realizada por INGEOMINAS en trabajo de Renzoni y Rosas (1983), donde se muestran aflorando las rocas sedimentarias del Cretácico y Cenozoico predominantemente, así como las principales estructuras falladas de tipo regional.

La zona de interés está situada en cercanías de la vía Tunja-Sogamoso, en las veredas El Tunal y La Playa. Esta área se encuentra delimitada por las siguientes coordenadas: $Y_1 = 1'124.000$, $X_1 = 1'102.000$, $Y_2 = 1'126.000$ y $X_2 = 1'108.000$.

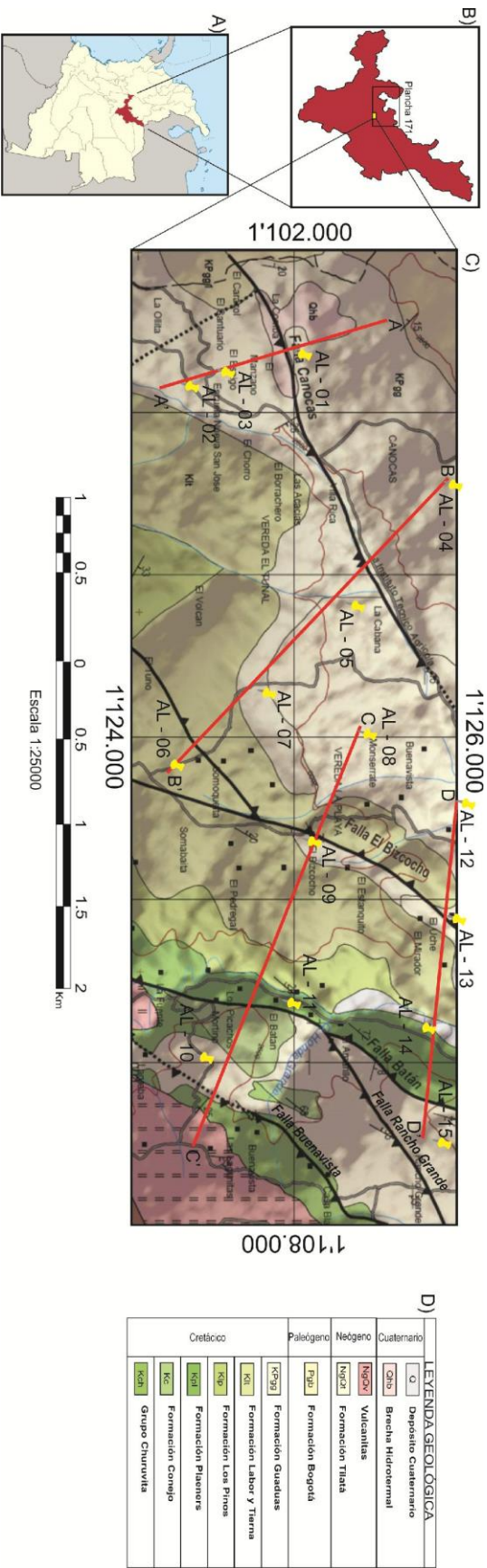


Figura 2.

Las formaciones geológicas presentes en el área de estudio son en su mayoría de tipo sedimentario con edades correspondientes al Cretácico (Grupo Churuvita (Kch), formaciones Conejo (Kc), Plaeners (Kpl), Los Pinos (Klp), Labor y Tierna (Klt) y Guaduas (KPgg)), compuestas de rocas y sedimentos de baja resistividad como shale, arcilla y limolita; rocas con alta capacidad de absorción de agua debido a su porosidad, lo que implica una alta saturación de fluidos y por lo tanto bajas resistividades eléctricas. Estas rocas son de origen marino (Jaramillo, 2001a). La presencia de evaporitas, como fuente de salinidad, se descarta, al no ser las reportadas en la zona de origen marino, ni del Cretáceo, ya que la thenardita es una evaporita no marina (Alfaro, 2002a). Sin embargo, Bertrami *et al*, 1992, la asumen como fuente de salinidad de las aguas termales, verificada por relación de Halógenos (Cl^- , F^- , B^-). El mapa geológico también muestra aflorando rocas del Paleógeno (Formación Bogotá (Pgb)) cuya litología corresponde con areniscas cuarzosas principalmente. Los valores de resistividad esperados para esta litología son medios a altos (100 - 500 Ohm.m), no obstante, no se podrá verificar ya que ninguna estación en ningún perfil mide la resistividad de dicha formación (FIGURA 2). Finalmente, se observan depósitos sedimentarios no consolidados del Neógeno y Cuaternario –predominantemente arenas, depósitos aluviales y lacustres (Cuaternario), así como depósitos y materiales volcánicos– predominantemente depósitos piroclásticos (Neógeno), cuyos valores de resistividad se espera varíen desde 20 hasta 300 ohm.m aproximadamente (Moyano, 2015). Los detalles de las unidades mencionadas se encuentran en la siguiente columna (FIGURA 3):

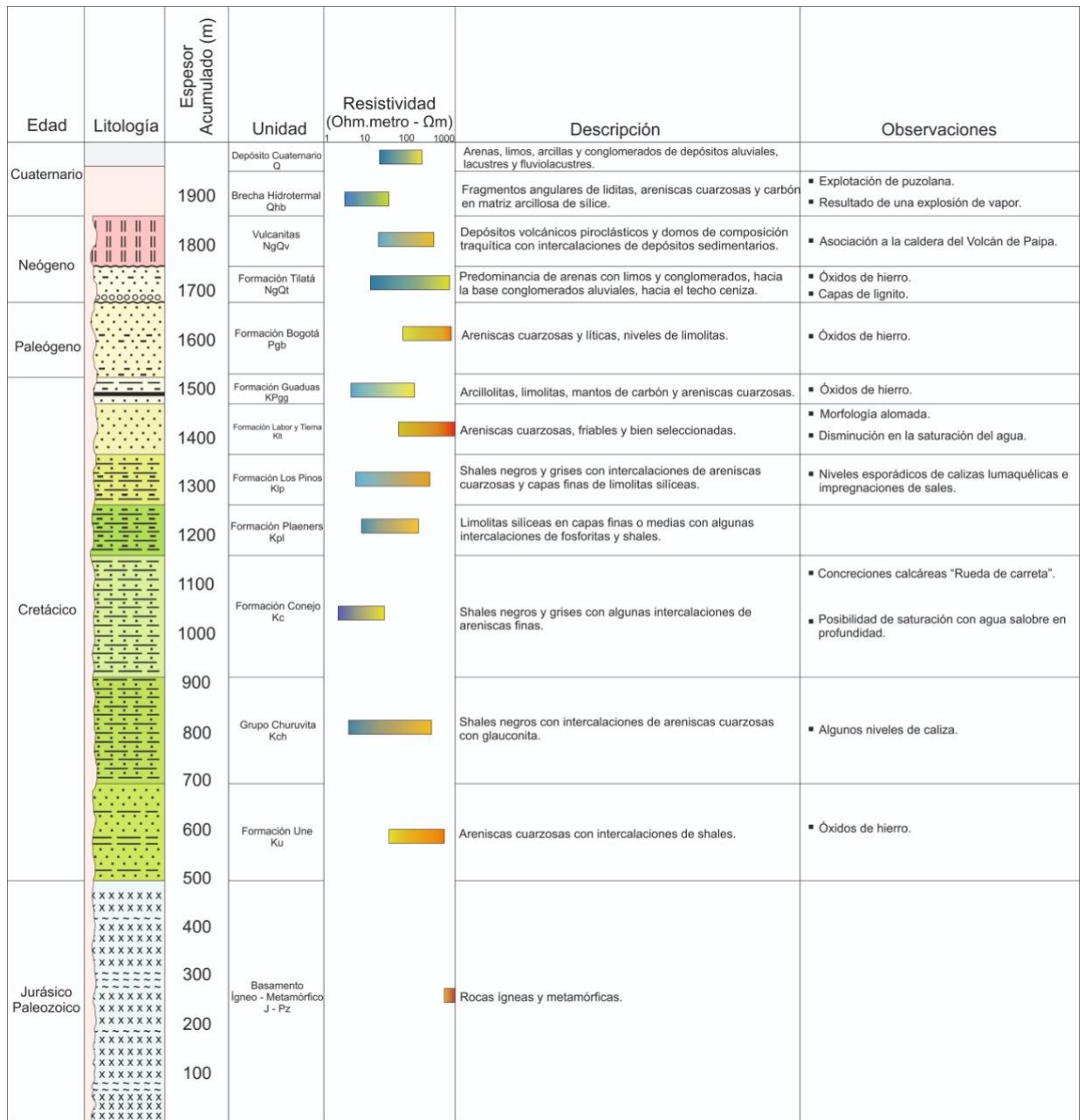


Figura 3. Columna estratigráfica de unidades geológicas presentes en el área de estudio en relación con la resistividad de las rocas. Espesores tomados de Velandia, 2003; Díaz y Sotelo, 1995; Renzoni, 1981.

3. DEFINICIÓN DE ESTRUCTURAS

La ubicación de las fuentes termales se encuentra estrechamente relacionada con la geología estructural de la zona, por lo que la identificación de la relación entre la ubicación de las fallas y las fuentes, es útil para determinar la presencia de mineralizaciones por flujos hidrotermales, las zonas de falla con mayor flujo termal activo, así como su conexión a la fuente de calor (Velandia, 2003).

En la zona de estudio predominan las fallas longitudinales con dirección NNE-NE, orientación paralela a la de la mayoría de estructuras en la Cordillera Oriental, incluso a las fallas regionales principales, Soápaga y Boyacá (Velandia, 2003). Las estructuras presentes en el área de estudio, de oriente a occidente, son:

Falla El Batán: Su nombre es dado por una zona de aguas termales conocida como El Batán, cerca de la vereda La Playa. Se trata de una falla inversa, con dirección NNE y vergencia NW, la cual pone en contacto la Formación Plaeners (Kpl) con el Grupo Churuvita (Kch) y Formación Conejo (Kc). A su vez, dos fallas satélites se encuentran al este, con una dirección similar, pero vergencia opuesta afectando las mismas litologías. Una de estas fallas continúa al sur, hasta inmediaciones de la caldera (Falla Buenavista, FIGURAS 1 Y 2), mientras que la segunda sólo ocurre en la zona (Falla Rancho Grande). La Falla El Batán es la estructura más importante, ya que se considera el despegue del abanico imbricado descrito en la zona, lo que sugiere su actividad continua y en gran manera la circulación de los fluidos hidrotermales a través de ella (FIGURAS 2C, 4, 5, 6 y 7).

Falla El Bizcocho: Falla inversa, con dirección NNE y vergencia NW que recibe su nombre gracias a una localidad por la que cruza, cerca de la vereda La Playa, la cual pone en contacto la Formación Guaduas (KPgg) con la Formación Labor y Tierna (Klt). Al igual que la Falla El Batán, una falla satélite se origina en la zona, con dirección NNE, la cual se extiende hacia el sur (hacia la caldera); el punto

donde se da la intersección entre la Falla El Bizcocho y su falla satélite es de interés también para toma de datos (FIGURAS 2C, 4, 5, 6 y 7).

Falla Canocas: Falla inversa con dirección NE y vergencia SE, la cual atraviesa a la Formación Guaduas (KPgg). Su trazo pasa por el sector de “El Durazno” (Ahora llamado El Manzano), donde las brechas hidrotermales (Qhb) se explotan para extraer puzolana (Velandia, 2003) (FIGURAS 2C, 4, 5, 6 y 7).

3.1 CORTES GEOLÓGICOS

Para definir las estructuras a estudiar en el experimento de magnetotelúrica se elaboraron seis secciones geológicas (2 posibles escenarios para las secciones C-C' y D-D') en áreas de interés que permitieran estudiar la relación de las zonas de falla con la litología, y la proximidad a las aguas termales, los trazos correspondientes se encuentran en la FIGURA 2C.

Corte A-A'

Se observa la secuencia Cretácica intruida por una brecha hidrotermal (Qhb), siendo el único corte con esta característica. Se estima que la Falla El Batán generó un desplazamiento en la misma, y la Falla Canocas facilitó su intrusión (FIGURA 4). La Falla El Batán fue interpretada como un despegue debido al trazo irregular en el mapa geológico que sugiere un bajo ángulo de buzamiento, además de las mediciones de campo colectadas por Velandia, (2003). El buzamiento de la Falla Canocas se sugirió a partir de la relación de corte observada en el mapa geológico (FIGURA 2; Velandia y Cepeda, 2004), así como de los perfiles resistivos realizados por Moyano, 2015, donde él infería la falla.



Figura 4. Corte geológico A-A' (Localizado en la Figura 2C). Las líneas rojas localizan los puntos adquiridos con el método magnetoteléurico en campo. Unidad Cuaternaria Qhb, Cretácicas KPgg, Klt, Klp, Kpl, Kc, Kch y Jurásicas J-Pz, cuya equivalencia aparece en la Figura 3.

Corte B-B'

Se observa que la Falla Canocas y la falla (satélite a la Falla El Bizcocho) afloran, mientras que la Falla El Batán, es plegada por una falla sugerida, de alto ángulo, que conecta con el despegue estructural pero no aflora en superficie. Los desplazamientos mostrados en la sección son bajos por lo que no se ponen en contacto diferentes unidades en la zona de falla (FIGURA 5).

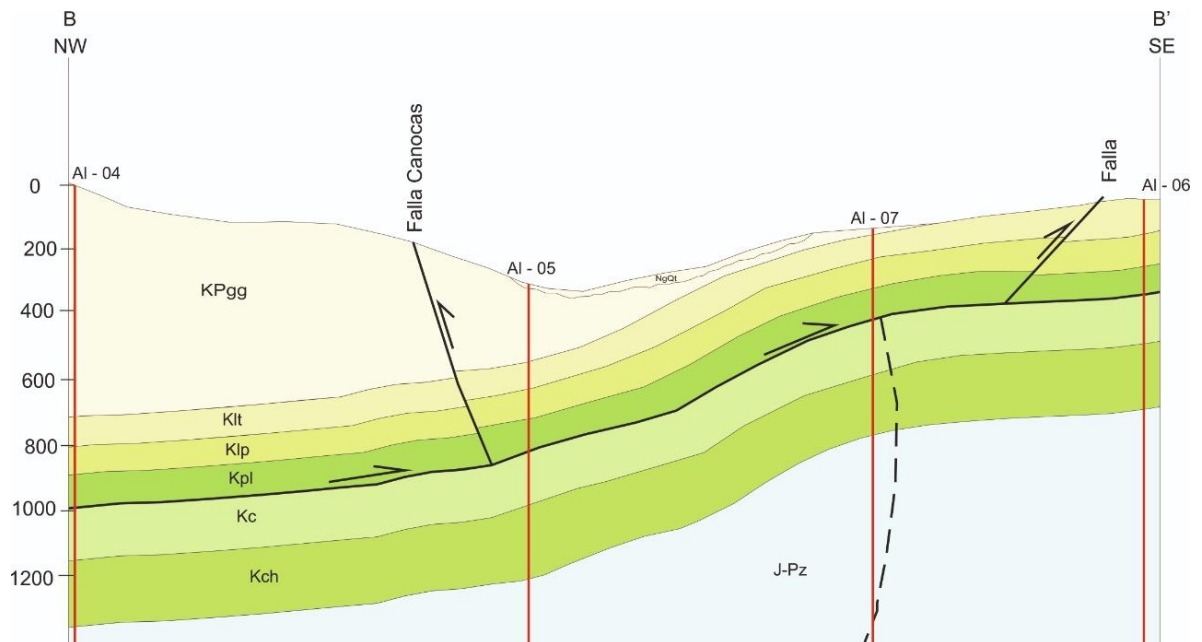


Figura 5. Corte geológico B-B' (Localizado en la Figura 2C). Fallas interpretadas mostradas en líneas negras continuas mientras las sugeridas están en líneas negras discontinuas. Las líneas rojas localizan los puntos adquiridos con el método magnetotelúrico en campo. Unidad Neógena NgQt, unidades Cretácicas KPgg, Klt, Klp, Kpl, Kc, Kch y Jurásicas J-Pz, cuya equivalencia aparece en la Figura 3. Nótese la ubicación de la Falla El Batán al tope de la unidad Kc.

Corte C-C'

Al NW, se observa un pop-up entre las fallas Canocas y El Bizcocho, fallas que afloran, así como la Falla El Batán, y la Falla Buenavista al SE, cubierta por la Formación Tilatá (NgQt). En la sección se interpreta otro despegue con vergencia este, el cual conecta con la Falla El Batán a profundidad. El cruce de fallas a profundidad sugiere un aumento de la permeabilidad de la zona de despegue, lo que en teoría haría de este punto una posible anomalía de resistividad. Se estima que más al norte, ese despegue aflora como satélite de la Falla El Batán, siendo denominado Falla Rancho Grande. Al SE, existe parte del depósito de vulcanitas (NgQv), provenientes de la caldera del Volcán de Paipa (FIGURA 6). La segunda versión de la sección se encuentra en el anexo 1. Se realizaron 2 modelos ya que

la complejidad del corte podía explicarse con diferentes interpretaciones, sin embargo, observando los modelos propuestos en Velandia y Cepeda, 2004, concluimos que la opción más probable es la mostrada en la FIGURA 6, teniendo en cuenta los factores estratigráficos y estructurales.

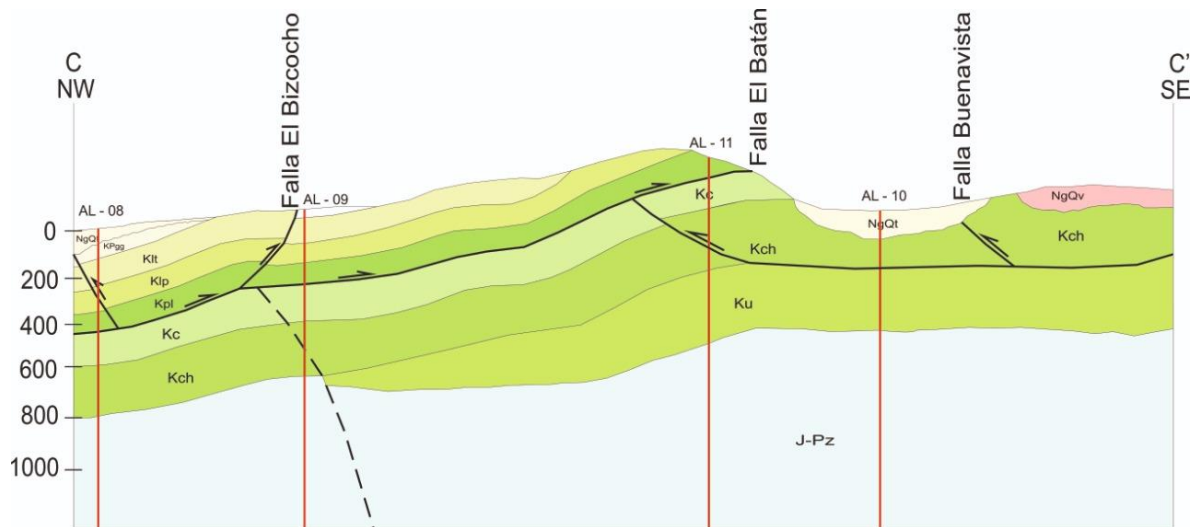


Figura 6. Corte geológico C-C' (1) (Localizado en la Figura 2C). Fallas interpretadas mostradas en líneas negras continuas mientras las sugeridas están en líneas negras discontinuas. Las líneas rojas localizan los puntos adquiridos con el método magnetotelúrico en campo. Unidades Neógenas NgQv, NgQt, Cretácicas KPgg, Klt, Klp, Kpl, Kc, Kch, Ku y Jurásicas J-Pz, cuya equivalencia aparece en la Figura 3.

Corte D-D'

Se observan estructuras tipo pop-up al NW, limitadas por la Falla El Bizcocho y un retrocabalgamiento de esta falla. Hacia el SE la Falla El Batán presenta un cambio de buzamiento, al cortar a lo largo del flanco de un pliegue que deforma toda la secuencia sedimentaria. Esta configuración fue inferida por los datos de rumbo y buzamiento que se encuentran registradas en la cartografía (Pardo, 2004; Velandia y Cepeda, 2004) cercanos al corte. En el mapa se observa un depósito Cuaternario (Q) sobre la Formación Los Pinos (Klp), así como la Formación Tilatá (NgQt) al SE y al NW. La Formación Une (Ku), reservorio interpretado del sistema

geotérmico (Alfaro, 2002a), aparece acuñándose contra una falla de alto ángulo sugerida a profundidad. Los desplazamientos interpretados en la Falla El Bizcocho son significativos, poniendo en contacto la Formación Tilatá (NgQt) con Plaeners (Kpl). La segunda versión de la sección se encuentra en el anexo 2.

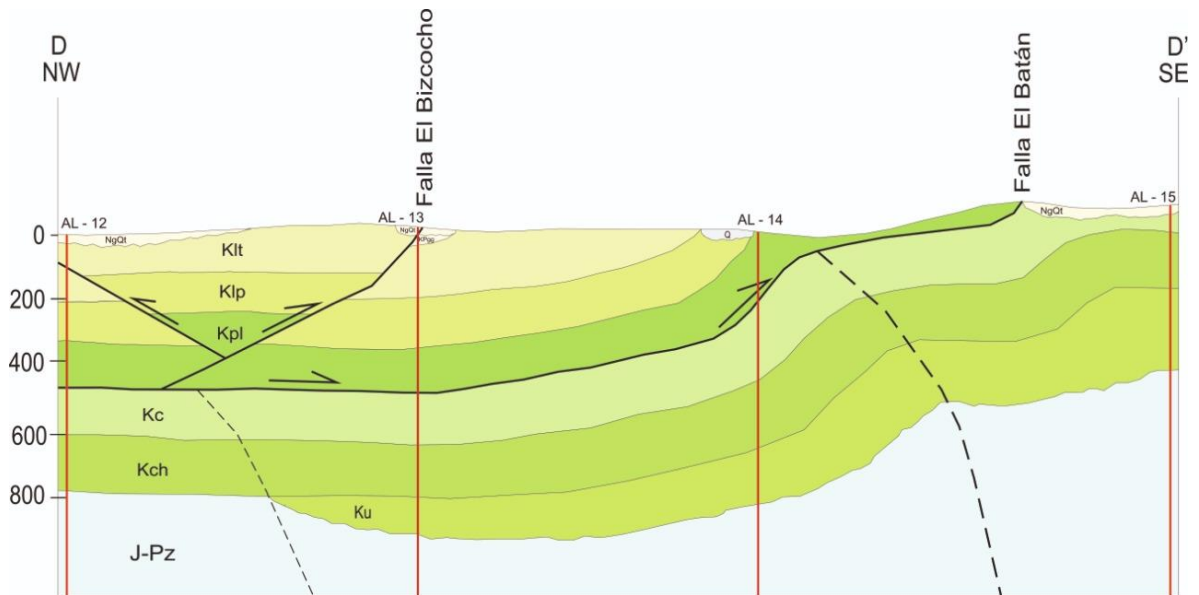


Figura 7. Corte geológico D-D' (1) (Localizado en la Figura 2C). Fallas interpretadas mostradas en líneas negras continuas mientras las sugeridas están en líneas negras discontinuas. Las líneas rojas localizan los puntos adquiridos con el método magnetotelúrico en campo. Unidad Cuaternaria Q, Neógena NgQt, Cretácicas KPgg, Klt, Klp, Kpl, Kc, Kch, Ku y Jurásicas J-Pz, cuya equivalencia aparece en la figura 3.

4. APLICACIÓN DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

El método magnetotelúrico (MT) es una técnica geofísica de exploración, que mide simultáneamente las variaciones de campo magnético (H) y el campo eléctrico (E), utilizando las variaciones naturales del campo electromagnético que fluye y se induce en el subsuelo a diferentes profundidades. La principal ventaja de este método es que se pueden alcanzar profundidades de exploración que van desde decenas de metros hasta el orden de kilómetros. Strangway *et al.* (1973) describen:

“Básicamente, la impedancia electromagnética - la relación entre campo eléctrico horizontal (E) en el suelo y el campo magnético ortogonal (H) - es medida a un número de frecuencias para producir las resistividades terrestres en función de la frecuencia, resultando en una forma de sondeo a profundidad.”

Este método permite obtener información de las propiedades geoeléctricas del subsuelo a partir de las fluctuaciones temporales del campo electromagnético natural generadas en la ionósfera, debido principalmente a la actividad solar. La conductividad eléctrica del suelo y la frecuencia de la onda electromagnética son los responsables de la distribución de los campos en el subsuelo, ya que los medios conductores atenúan las ondas electromagnéticas dificultando su penetración a profundidad, caso diferente al observado en medios resistivos. Además, como las frecuencias bajas se atenúan a mayor profundidad que las frecuencias altas, las medidas para diferentes frecuencias darán información de la distribución de resistividades a diferentes profundidades. Esta distribución es determinada por la relación entre las componentes de la variación del campo eléctrico y magnético (conductividad, frecuencia angular de propagación, permitividad dieléctrica, permeabilidad magnética).

El método magnetotelúrico fue utilizado por primera vez en 1950, y de ahí en adelante, se han realizado estudios, principalmente con bajas frecuencias, para investigar las diferentes resistividades del subsuelo a profundidad, ya sea en cuencas sedimentarias, como en la corteza y manto (Strangway *et al.*, 1973). Sin

embargo, Cagniard (1953), señala que este método también puede utilizarse en profundidades más someras, utilizando altas frecuencias. Al utilizar bajas frecuencias, hablamos de magnetotelúrica (MT), y al utilizar altas, de Audiomagnetotelúrica (AMT) (Tabla 1).

METODO	RANGO DE FRECUENCIAS	RANGO DE PERIODOS
MT	10^{-4} - 10 Hz	10^{-1} – 10^4 segundos
AMT	10 – 10.000 Hz	10^{-4} – 10^{-1} segundos

Tabla 1. Tabla de frecuencias, método magnetotelúrico, tomada de Moyano, 2015.

Una de las principales ventajas del método es el hecho de que sea de fuente natural, lo que lo hace más práctico en el terreno, donde la profundidad de investigación depende del tiempo de medición, y no hay configuraciones que impliquen cables extensos o fuentes de poder de gran tamaño.

4.1 SEÑAL MAGNETOTELÚRICA

Las señales de MT tienen origen en dos bandas de frecuencias características que se producen debido a distintos motivos. Una banda corresponde a bajas frecuencias (periodos largos) de las señales de las ondas electromagnéticas, en general inferiores a 1 Hz. Estas señales se originan a partir de la interacción del viento solar con el campo magnético de la Tierra, emitiendo corrientes de iones, que viajan por el espacio, perturbando el ambiente del campo magnético de la Tierra e induciendo ondas electromagnéticas de baja frecuencia, que se propagan en todo su volumen. Otra banda corresponde a las frecuencias altas (periodos cortos) mayores que 1 Hz, creadas por descargas eléctricas en la atmósfera, por lo general cerca del Ecuador, resultado de la interacción entre el plasma solar y el plasma de la atmósfera (Naidu, 2012). La señal creada por estas tormentas se desplaza alrededor de la Tierra, donde parte de la energía penetra hacia el interior. Entorno a la frecuencia de 1 Hz se generan datos de baja calidad atribuibles a mecanismos de origen inductivo (Egbert, 1997; Simpson y Bahr,

2005). Ambas bandas generadas (altas y bajas frecuencias) se propagan como ondas electromagnéticas, que producen variaciones de los campos eléctricos y magnéticos por inducción en los diferentes materiales del subsuelo. Los valores de cambio son pequeños, pero pueden ser medidos. Estas señales varían en amplitud durante horas, días o semanas.

En el equipo de MT usado, las frecuencias bajas correspondientes al rango de 0,1 a 75 Hz, clasificadas en la banda 3. En este proyecto se usó la banda 3 de muestreo, donde se realizaron en promedio 1200 conteos por estación, cada conteo efectuándose en un lapso de tiempo de 5,5 segundos. Esto quiere decir que cada muestra tenía una duración de 6600 segundos (2,75 horas) logrando obtener 15 perfiles de aproximadamente 1 a 3 kilómetros de profundidad, teniendo en cuenta que la densidad estadística de los datos permite establecer un régimen de alta calidad y confiabilidad de los datos.

4.2 PRINCIPIOS DEL MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

Los principios del método MT están basados en una serie de suposiciones que se consideran aplicables y que están fundamentadas en la inducción electromagnética (Simpson y Bahr, 2005). Estas suposiciones son:

- Se cumplen las ecuaciones electromagnéticas de Maxwell.
- La Tierra no genera energía electromagnética, sólo absorbe o disipa esta energía.
- Todos los campos pueden ser tratados de forma analítica y conservativa lejos de su fuente.
- Los campos electromagnéticos naturales utilizados, generados en la ionósfera (que están relativamente lejos de la superficie de la Tierra) pueden ser tratados como uniformes, planos, polarizados, que inciden sobre la Tierra de forma casi vertical. Esta suposición puede ser diferente en las regiones polares y ecuatoriales.

- El desplazamiento eléctrico es cuasi estático para períodos MT (rango de periodos comprendido entre los 10^{-5} s y los 10^5 s), por lo tanto, corrientes de desplazamiento variables en el tiempo (que surgen de efectos de polarización) son despreciables comparadas con variaciones en el tiempo de corrientes conductivas, que promueven la inducción electromagnética en la Tierra simplemente como un proceso de difusión.
- Cualquier variación en la permitividad eléctrica y en la permeabilidad magnética de las rocas se consideran despreciables comparado con las variaciones de conductividad de las rocas en su conjunto.

4.3 INDUCCIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Para poder estudiar la inducción electromagnética en la Tierra y la aplicación del método magnetotelúrico, es necesario conocer algunos aspectos básicos como:

Ecuaciones de Maxwell

Para comprender la propagación y la atenuación de tales ondas, es necesario usar las ecuaciones de Maxwell, ecuaciones que relacionan los vectores de campo eléctrico y magnético así:

$$1. \quad \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$2. \quad \nabla \times H = j_f + \frac{\partial D}{\partial t}$$

$$3. \quad \nabla \cdot D = n_f$$

$$4. \quad \nabla \cdot B = 0$$

Donde j_f es la densidad de corriente (A / m^2), E es la intensidad del campo eléctrico (V / m), B es la densidad de flujo magnético (Teslas [T]), H es la

intensidad del campo magnético (A / m), n_f es la densidad de carga (C / m^3) y D es el desplazamiento eléctrico (C / m^2).

La ecuación 1 es una afirmación matemática de la ley de Faraday según la cual existe un campo eléctrico en la región de un campo magnético variable en el tiempo (Chave y Jones, 2012).

La Ecuación 2 es una afirmación matemática de la ley de Ampère (teniendo en cuenta la corriente de desplazamiento $\partial D / \partial t$ de Maxwell), es decir, que un campo magnético se genera en el espacio por flujo de corriente y que los campos eléctricos son proporcionales a la corriente total (desplazamiento de conducción) en la región (Chave y Jones, 2012).

La ecuación 3 hace referencia a la ley de Gauss para campo eléctrico, la cual describe la relación entre el flujo de campo eléctrico y una superficie cerrada. En este caso, se encuentra en su forma diferencial, donde la divergencia del desplazamiento eléctrico o densidad del flujo eléctrico (D), es proporcional a la densidad de carga eléctrica (n_f) encerrada por la superficie (Chave y Jones, 2012).

La ecuación 4 se trata de la ley de Gauss para campo magnético, donde se expresa que la divergencia de flujo magnético (B) es cero o nula, ya que no salen ni entran vectores de campo, es decir, son trayectorias cerradas. Las líneas de campo van de norte a sur en el dipolo magnético, por lo que el flujo magnético no diverge (Chave y Jones, 2012).

Para la investigación de un sistema geotérmico como el descrito en el presente trabajo a través de métodos geofísicos, es necesario establecer los parámetros que pueden definir la variación de las diferentes propiedades físicas medidas, con el fin de entender la relación entre las anomalías medidas de estas propiedades y los elementos del sistema. Estos parámetros serán evaluados y descritos a lo largo del presente trabajo con el fin de establecer su relación con los aspectos geológicos y estructurales de la zona.

5. METODOLOGÍA

Teniendo como base la información geológica y geofísica de otros métodos recopilada sobre el área de estudio, se procedió al diseño de la adquisición y toma de datos de magnetotelúrica.

5.1 DISEÑO DE LA ADQUISICIÓN

Para la selección de los sitios de instalación de las estaciones de campo para la adquisición de datos de MT, se deben tener en cuenta aspectos básicos tales como la topografía y el espaciamiento de las estaciones. Cada estación debe localizarse en un área preferiblemente plana, alejada de cambios abruptos de pendiente, con unas dimensiones mínimas de 15x15 metros para la adecuada extensión e instalación de los electrodos para registro del campo eléctrico, debe ubicarse en lugares alejados de torres de líneas de corriente, cercas eléctricas, paso de vehículos, vías férreas, generadores o cualquier otra fuente que pueda generar ruido electromagnético.

En lo referente a la selección de estaciones, y al ser el objetivo de este proyecto el estudio de la relación de las fallas y litologías con las fuentes termales, se consideran las estructuras geológicas presentes en la zona, los espesores y cambios litológicos evidenciados en los cortes descritos anteriormente (FIGURAS 4, 5, 6, 7), también debe tenerse en cuenta la profundidad interpretada de zonas de despegue, la localización de áreas de recarga o de reservorio de aguas termales. Con anterioridad se plantean 16 modelos preliminares de resistividad, elaborados a través de la herramienta para Excel SEER (Scenario Evaluator for Electrical Resistivity) esto con el fin de evaluar las posibles respuestas resistivas de cada perfil diseñado.

Los modelos preliminares fueron elaborados teniendo en cuenta tres escenarios, el primero según la respuesta de resistividad ideal, es decir, el escenario donde las propiedades físicas de las rocas no han sido modificadas de ninguna forma

(ANEXOS 3, 4, 7, 10, 14), el segundo se realizó considerando cambios en la roca por la presencia de una zona de falla (ANEXOS 6, 9, 13), y en el último escenario se plantearon los valores de resistividad esperados teniendo en cuenta la profundidad de las diferentes unidades litológicas, las presencia de zonas de falla, los cambios composicionales descritos en la literatura, entre otras (FIGURA 8, ANEXOS 5, 8, 11, 12, 15). Estos últimos se consideran como los modelos más cercanos a los valores y perfiles esperados, en ellos se observa que en las unidades donde disminuye la saturación de agua (p. ej. Formación Labor y Tierna) los valores de resistividad aumentan, los niveles arenosos presentan mayor resistividad en comparación con los niveles arcillosos, también se observa que los valores cercanos a la superficie correspondientes al Cuaternario se encuentran en rangos de resistividad menores a 100 ohm.m y que las zonas de falla generan anomalías de baja resistividad en el rango de valores entre 5 – 20 ohm.m.

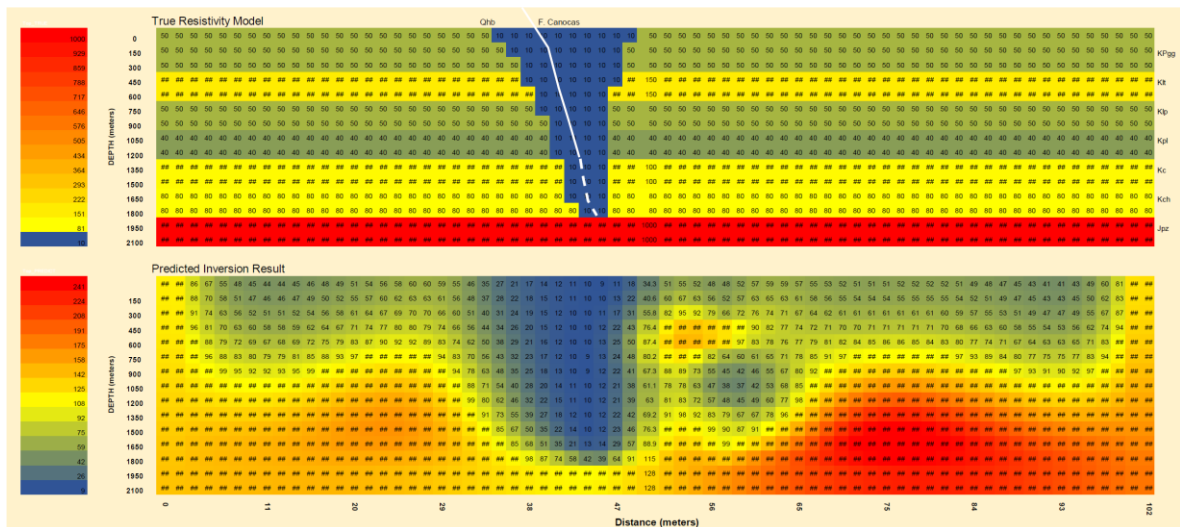


Figura 8. Modelo Directo (*Forward Model*) para el corte A-A', elaborado a través de la herramienta para Excel SEER (Scenario Evaluator for Electrical Resistivity).

MODELOS PRELIMINARES 1D

Teniendo en cuenta los valores de resistividad del tercer escenario descrito anteriormente, se elaboraron 15 perfiles de medición magnetotelúrica 1D a través

del software libre GeoWiz: Open Source 1D MT Modelling, el cual funciona a través de un algoritmo 1D de inversión, elaborado a través de Python (no descrito), esta herramienta permitió observar los resultados probables para cada estación planeada (ANEXO 16 para el corte A-A', ANEXO 17 para el corte B-B', ANEXO 18 y 19 para el corte C-C', ANEXO 20 y 21 para el corte D-D').

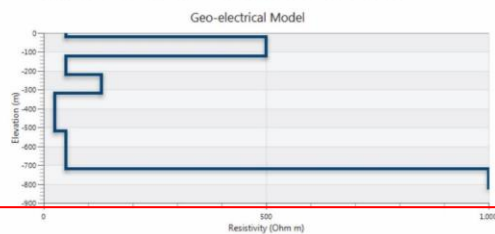
A partir de estos modelamientos encontramos que las unidades sedimentarias muestran valores de resistividad entre 1 – 1000 ohm.m, que varían a profundidad. Para el perfil A-A' (ANEXO 16) se esperan obtener valores de resistividad entre 50 – 500 ohm.m, teniendo los valores más altos a diferentes profundidades en cada punto de muestreo. En el punto 1 los valores más altos de resistividad muestran valores de 500 Ohm.m a 700 y 800 m. En el punto 2 estos rangos máximos se mantienen, pero se presentan a profundidades de 400 a 500 m, y en el punto 3 estos valores ocurren a esa profundidad, por otra parte, se espera una disminución en los valores de resistividad en la zona más cercana a la brecha hidrotermal. Para el perfil B-B' (ANEXO 17) se esperan obtener valores de resistividad entre 20 – 500 ohm.m, se observa una variación de resistividades en cada punto modelado, los correspondientes a las estaciones 4 y 6 presentan los valores más altos cercanos a los 500 ohm.m a profundidades entre 600 y 700 m y 0 y 100 m respectivamente, donde se ubicaría la Formación Labor y Tierna (Klt), los menores valores (de 20 a 50 Ohm.m) se relacionan con las unidades más arcillosas como las formaciones Plaeners (Kpl) y Los Pinos (Klp). Para el perfil C-C' se esperan obtener valores de resistividad entre 20 – 1000 ohm.m, se observa una variación de resistividades en cada punto modelado, los correspondientes a la estación 8 y 9 continúan la tendencia de registrar los valores más altos en la Formación Labor y Tierna (Klt) y los valores más bajos en la Formación Conejo (Kc), por otra parte, los puntos 10 y 11 presentan los valores más altos en la Formación Une (Ku) en contacto con el techo del Basamento Jurásico (J-Pz) y los valores más bajos para el Grupo Churuvita (Kch) cercanos a 50 ohm.m. Para el perfil D-D' se esperan obtener valores de resistividad entre 25 – 1000 ohm.m, se

observa una variación de resistividades en cada punto modelado, para el punto 12 la resistividad más baja corresponde a la zona de despegue de la Falla El Batán con un valor de 30 ohm.m, el punto intermedio es de 500 ohm.m y corresponde a la Formación Labor y Tierna (Klt) mientras que los valores cercanos a 1000 ohm.m se asocian al Basamento (J-Pz), para el punto 13 se tiene la resistividad más alta esperada que es 500 ohm.m, correspondiente a la Formación Labor y Tierna (Klt), la resistividad más baja corresponde a la zona de despegue de la Falla El Batán con un valor de 25 ohm.m, las demás unidades corresponden a valores entre 50 - 150 ohm.m, en el punto 14 los valores más altos corresponden a 50 - 150 ohm.m, a la Formación Conejo (Kc) y los más bajos de 25 ohm.m a la Formación Los Pinos (Klp), y finalmente, en el punto 15 se observa un intervalo entre 50 - 100 ohm.m para Formación Une (Ku) y valores cercanos a 1000 ohm.m asociados al Basamento (J-Pz).

Los modelos 1D permiten evaluar diferentes escenarios, esto con el fin de ver las diferentes respuestas de valores de resistividad según el caso; en la FIGURA 9, se observan dos escenarios, uno con la ausencia de fallas geológicas y otro con la presencia de fallas geológicas. Este modelo comparativo permite comprobar la relación entre la reducción de los valores de resistividad y la geología estructural, ya que en el recuadro rojo se ve como disminuyen los valores, varían de 600 ohm.m a 300 ohm.m, además el valor mínimo con la presencia de las estructuras es de 20 ohm.m y con ausencia de la misma es de 50 ohm.m.

PAIPA 009

MODELO SIN FALLA



MODELO CON FALLA

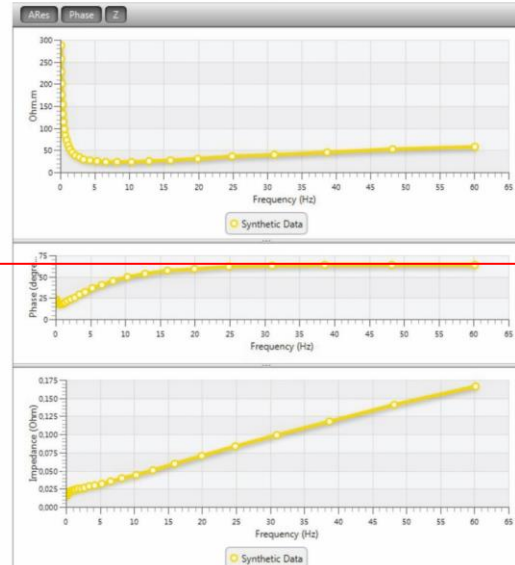
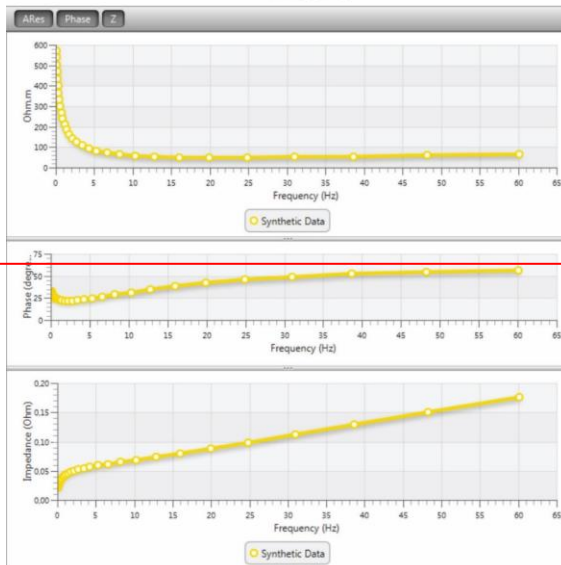
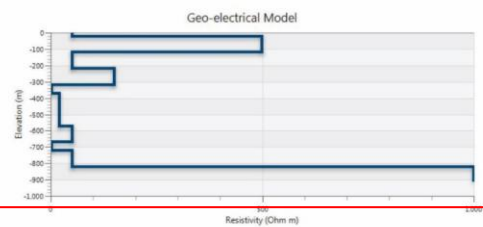


Figura 9. Modelo Directo (*Forward Model*) 1D para la estación Paipa 009, con falla y sin falla, elaborado a través del Software Geowiz1DMT. Las gráficas en color amarillo corresponden de arriba hacia abajo a los valores de resistividad, fase e impedancia vs frecuencia. Las figuras en azul corresponden a la resistividad vs profundidad.

5.2 TOMA DE DATOS

En el proyecto se utiliza el equipo STRATAGEM EH4, construido por la compañía estadounidense Geometrics, en asociación con Electromagnetic Instruments (EMI), integrado por una consola de comandos, un receptor y un transmisor con sus respectivas antenas. Se complementa con una batería de 12 V que alimenta la consola y su respectivo cable de poder, cuatro electrodos no polarizados de sulfato de cobre con cables telúricos de cien metros, un electrodo metálico con cable para polo a tierra, dos bobinas para medición de campo magnético modelo

BF10 con cables de diez metros, todo para ser conectado al receptor; el cual cuenta con un cable que lo conecta a la consola (FIGURA 10). Como material adicional, se contó con una cinta métrica de 50 metros, una pica, un teclado, un nivelador, envases con agua, brújula y GPS.

La instalación del equipo en cada estación consistió en posicionar el receptor en el punto de interés, siendo éste el origen de un plano cartesiano, en el que se colocan cuatro electrodos a 15 metros de longitud del receptor, dos en dirección NS y los otros dos EW, formando los dipolos eléctricos; para mejorar el contacto con el suelo, se entierran cerca de 20 centímetros y se humedece la base con agua salobre, para mantener las condiciones de medición estables. Posteriormente, se ubican las bobinas receptoras o sensores magnéticos, una paralela al eje Y (NS) y la otra al eje X (EW).

Tanto los electrodos como las bobinas son conectadas al receptor con sus respectivos cables, evitando que queden despegados del suelo para evitar vibraciones por efectos de movimiento con el aire, generando ruido (Moyano, 2015). Una vez instalado el equipo, se conecta el receptor a la consola mediante el cable naranja, la batería a la consola mediante el cable negro y el teclado.

Finalmente se procede a la toma de datos, la cual está especificada en el manual que trae el equipo, donde la cantidad de tiempo empleada depende de los conteos o pulsos que se tomen, así como de la frecuencia a utilizar. En este caso se adquirieron datos usando la banda 3 dada por el equipo (0.1 a 75 Hz), banda con la menor frecuencia posible de adquisición que nos permite tomar mediciones a mayor profundidad. Cada medición resulta de 1200 conteos en cada punto. El arreglo descrito nos permite medir las componentes horizontales del campo eléctrico (EX y EY) y las componentes horizontales del campo magnético (HX Y HY) para en el intervalo de frecuencias utilizado. La información es registrada en el equipo, puede imprimirse o descargarse a un computador portátil para su interpretación.

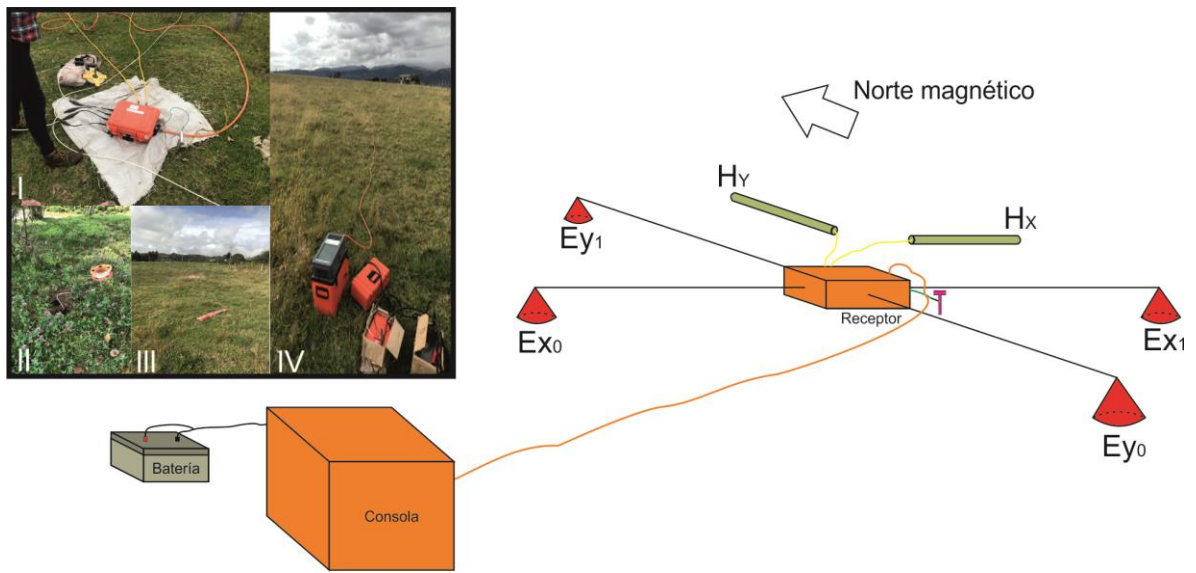


Figura 10. Esquema equipo Stratagem EH4. En la figura I se observa el receptor con todos los respectivos cables conectados al mismo, en la II un electrodo enterrado y el carrete con el cable que lo conecta al receptor, en la III una bobina, nivelada y cubierta por plástico, y en la IV, la consola, la batería, el cable naranja y el cable negro. El diagrama de la derecha es un diagrama esquemático de los elementos y su disposición en el sitio de medición.

6. RESULTADOS

Para este proyecto se realizaron 15 estaciones (Ver ANEXO 22. Bitácora de trabajo de campo, Paipa, septiembre del 2018) de adquisición de datos de magnetotelúrica, abarcando un rango de frecuencias desde 0.1 hasta 75 Hz, correspondientes a la banda 3 del equipo Stratagem EH4. El diseño de las estaciones fue descrito a detalle en el capítulo anterior; cabe resaltar que la dirección de los perfiles se centró en cortar el trazo de cada falla geológica, la distancia entre estaciones de medición fue de mínimo 0.5 Km hasta máximo 1 Km. Según la complejidad del perfil se estableció cuales necesitaban mayor densidad de sondeos para una mejor interpretación. Los resultados 1D se muestran en los perfiles geológicos interpretados de la siguiente manera:

PERFIL A-A'

El perfil A-A' tiene una longitud de 0.91 Km, corta perpendicularmente al trazo de la Falla Canocas (falla inversa con dirección NE), ubicándose en superficie sobre las unidades denominadas Brecha Hidrotermal (Qhb) y Formación Guaduas (KPgg). En este perfil se tomaron 3 estaciones MT, la estación 1 se ubica en el bloque yacente de la Falla Canocas, mientras que las estaciones 2 y 3 se ubicaron en el bloque colgante (FIGURA 11). La descripción de los resultados se hace a profundidad teniendo en cuenta como valor cero la superficie, por lo tanto, son valores que varían dependiendo de la topografía.

ESTACIÓN 1

Estación ubicada sobre la unidad descrita como Brecha Hidrotermal (Qhb), se describe una zona cubierta, en cercanías a la cantera El Manzano donde se extrae puzolana (materiales silíceos o aluminosilíceos a partir de los cuales se produce el cemento), este punto es de interés porque se ha descrito un enriquecimiento de

uranio en la brecha ya que puede generar una anomalía de calor de origen radioactivo (Prol, 1996).

En los valores registrados se observa un espacio sin datos hasta 150 metros de profundidad que se relaciona con la brecha hidrotermal descrita anteriormente. Posterior a esto, se observan valores entre 10-100 ohm.m en profundidades entre 150-700 metros, corresponden a la Formación Guaduas (KPgg), así mismo en la profundidad correspondiente a la zona de despegue no se observan datos registrados. El basamento Jurásico (J-Pz) muestra valores de resistividad más altos (500 -1000 ohm.m) a profundidades superiores a 1950 m de profundidad.

ESTACIÓN 2

Estación ubicada sobre la unidad descrita como Formación Guaduas (KPgg), se obtuvieron resultados que permiten ver la baja variación de resistividades de las unidades de la secuencia Cretácica con una tendencia de valores menores o iguales a 10 ohm.m. No se observa una anomalía de resistividad muy evidente. No se registra un cambio evidente entre los valores de la secuencia cretácica y el Basamento Jurásico (Jpz).

ESTACIÓN 3

La estación se desarrolló sobre la Formación Guaduas (KPgg), pero no se obtuvieron datos, debido a la presencia de ruido externo producto de las carreteras, viviendas y postes de baja tensión. La estación no registra datos confiables según los resultados de resistividad aparente, fase y coherencia (ANEXO 24).

Las resistividades encontradas en el perfil A-A' muestran valores de 1 – 100 ohm.m para las unidades sedimentarias en general, 1 – 10 ohm.m para las arcillosas, 10 – 100 ohm.m para las arenosas. Las máximas profundidades

correlacionan con el basamento Jurásico. La Brecha Hidrotermal (Qhb) mostró valores de resistividad 10 ohm.m. En este perfil, no se evidencia anomalía de resistividad relacionada con el trazo interpretado de la Falla El Batán.

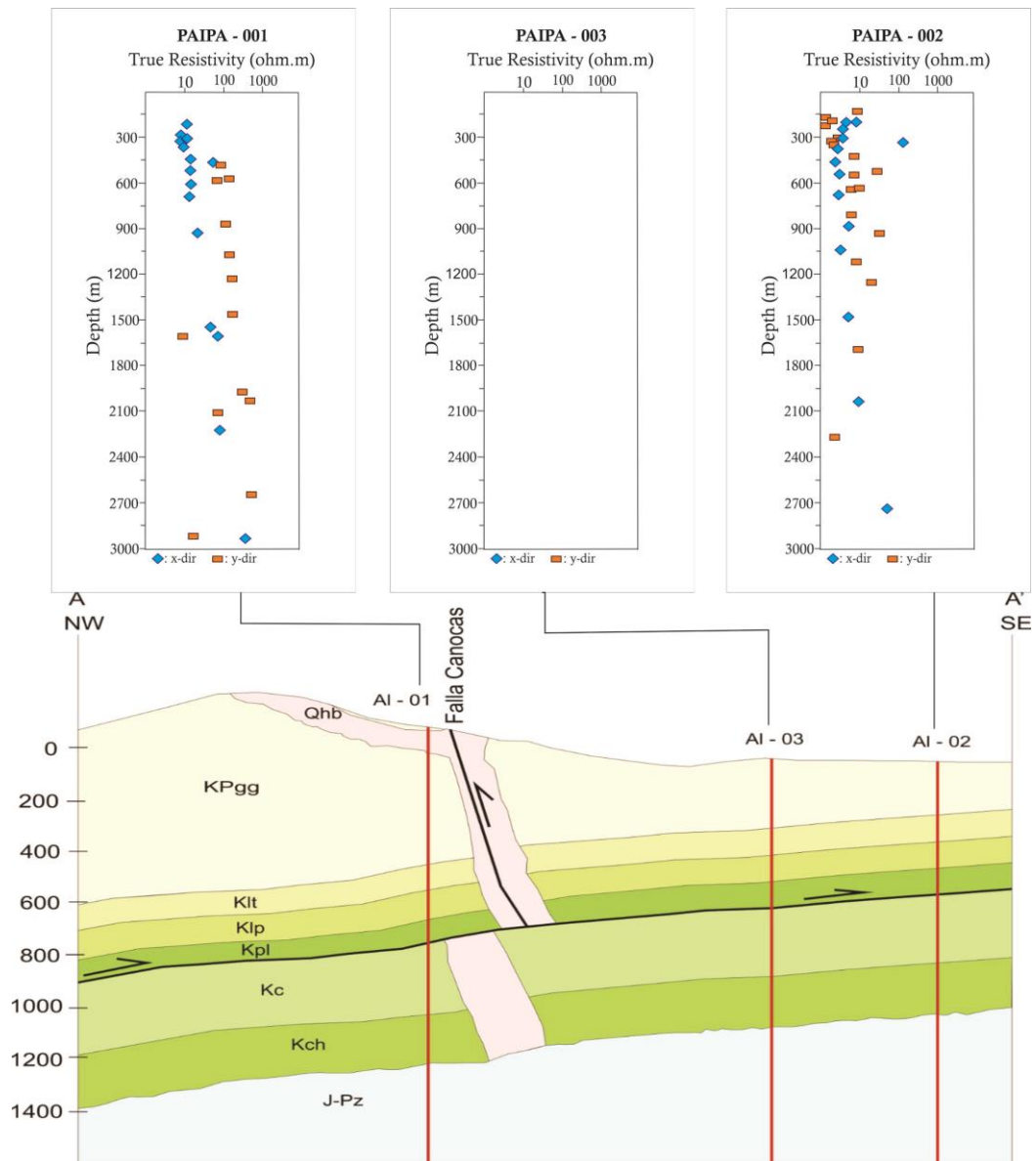


Figura 11. Resultados MT 1D para el corte A-A' obtenidos con el equipo Stratagem EH4. En los gráficos superiores se muestran las mediciones de resistividad vs. profundidad. Los rombros azules muestran los valores medidos en dirección X mientras los rectángulos naranjas muestran los valores medidos en dirección Y. La profundidad alcanzada en estos perfiles fue hasta de 3 km.

PERFIL B-B'

El perfil B-B' tiene una longitud de 2.68 Km, se desarrolla perpendicular al trazo de la Falla Canocas (falla inversa con dirección NE) y la falla satélite a la estructura El Bizcocho ubicándose en superficie sobre las unidades denominadas Formación Guaduas (KPgg), Formación Tilatá (NgQt), Formación Labor y Tierna (Klt); se tomaron 4 estaciones MT, la estación 4 se ubica en el bloque yacente de la Falla Canocas mientras que la estación 5 en el bloque colgante. La estación 6 se ubica en el bloque yacente de la falla satélite a la Falla El Bizcocho mientras que la estación 7 en el bloque colgante (FIGURA 12). La descripción de los resultados se hace a profundidad teniendo en cuenta como valor cero la superficie, por lo tanto, son valores que varían dependiendo de la topografía.

ESTACIÓN 4

Estación ubicada sobre la Formación Guaduas (KPgg), los valores registrados entre 300 – 1200 m de profundidad se asocian a la secuencia cretácica con valores entre 10-300 ohm.m, los valores más profundos que 1500 m de profundidad corresponden al Basamento Jurásico (J-Pz) con resistividad entre 100 - 700 ohm.m. No se observa la tendencia de valores esperados para la Falla El Batán.

ESTACIÓN 5

Estación ubicada sobre la Formación Tilatá (NgQt), en topografía de alta pendiente, se observan postes de corriente de baja tensión a aproximadamente 100 m. La estación no registra datos confiables según los resultados de resistividad aparente, fase y coherencia (FIGURA 15). El valor registrado a 700 m de profundidad se asocia con la zona de despegue de la Falla El Batán.

ESTACIÓN 6

Estación ubicada sobre la Formación Labor y Tierna (Klt), los valores registrados correspondientes a la secuencia cretácica varían entre 8 – 12 ohm.m, a 800 metros de profundidad se registra un valor anómalo que disminuye la resistividad antes registrada, se considera como el límite entre la secuencia cretácica y el Basamento Jurásico (J-Pz).

ESTACIÓN 7

Estación ubicada sobre la unidad descrita como Formación Guaduas (KPgg), los valores de la secuencia sedimentaria corresponden 8 - 300 ohm.m, a profundidades mayores de 900 m se observa el Basamento Jurásico (J-Pz) con resistividad entre 100 - 1000 ohm.m.

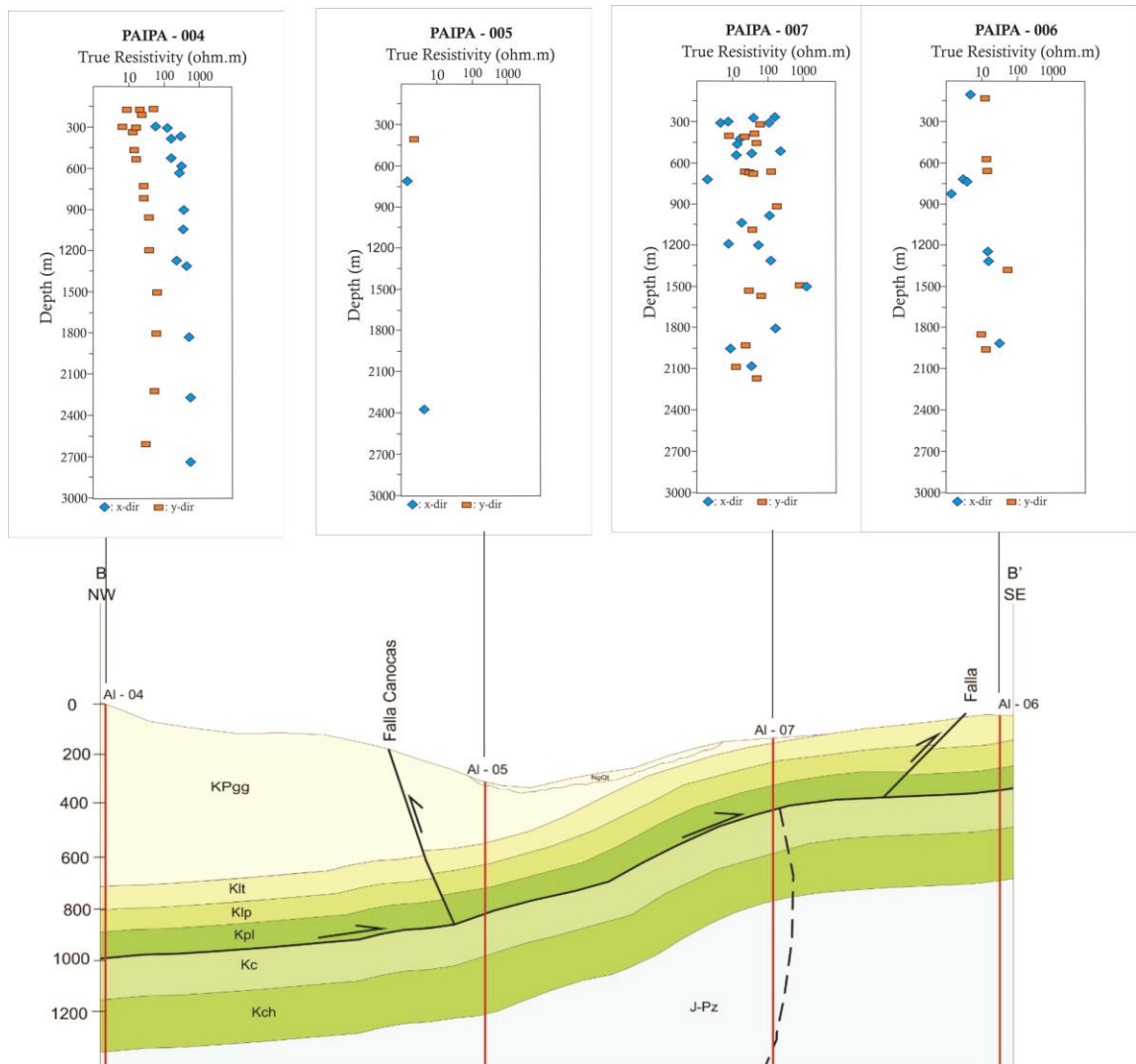


Figura 12. Resultados MT 1D para el corte B-B' obtenidos con el equipo Stratagem EH4. En los gráficos superiores se muestran las mediciones de resistividad vs. profundidad. Los rombos azules muestran los valores medidos en dirección X mientras los rectángulos naranjas muestran los valores medidos en dirección Y. Nótese que las profundidades alcanzadas en estos perfiles fueron hasta de 3 km.

PERFIL C-C'

El perfil C-C' tiene una longitud de 2.55 Km, se desarrolla perpendicular al trazo de las fallas El Bizcocho y El Batán (las dos estructuras se describen como fallas inversas con dirección NE) ubicándose en superficie sobre las unidades denominadas Formación Guaduas (KPgg), Formación Tilatá (NgQt), Formación Plaeners (Kpl). Se tomaron 4 estaciones MT, la estación 8 se ubica en el bloque colgante de la Falla El Bizcocho, mientras que la estación 9 se ubica en el trazo de la falla antes mencionada. La estación 10 se ubica en el bloque yacente de la Falla El Batán mientras que las estaciones 11 en el bloque colgante. La descripción de los resultados se hace a profundidad teniendo en cuenta como valor cero la superficie, por lo tanto, son valores que varían dependiendo de la topografía.

ESTACIÓN 8

Estación ubicada sobre la Formación Tilatá (NgQt), se realiza a aproximadamente 300 m de distancia de una torre de alta tensión, no se observan resultados, producto del alto ruido en la ganancia del campo magnético, esto se comprobó con los registros de resistividad aparente, fase y coherencia (ANEXO 28).

ESTACIÓN 9

Estación ubicada sobre la Formación Guaduas (KPgg), sobre la Falla El Bizcocho, los datos no se consideran confiables, resultado de problemas con el campo eléctrico correspondiente al eje Y al momento de tomar el registro, esto se comprobó con los registros de resistividad aparente, fase y coherencia (ANEXO 29). Los valores entre 300 - 600 m corresponden a la secuencia sedimentaria con valores entre 5 - 50 ohm.m, se destaca la cercanía a la Falla El Bizcocho y a la zona de despegue en este punto.

ESTACIÓN 10

Estación ubicada sobre la Formación Tilatá (NgQt), se observan problemas con el campo magnético al momento de tomar el registro, esto se comprobó con los registros de resistividad aparente, fase y coherencia (ANEXO 30). Un rasgo importante de la estación es la cercanía en sentido NW-SE de cruces de falla.

ESTACIÓN 11

Estación ubicada sobre la Formación Plaeners (Kpl) frente al Complejo Turístico La Playa (piscinas termales), se generan problemas de ruido en el campo magnético, esto se comprobó con los registros de resistividad aparente, fase y coherencia (ANEXO 31). Se asocian los valores obtenidos entre 1 - 5 ohm.m a la Formación Conejo (Kc), hasta 300 m de profundidad y el valor de 2 ohm.m se asocia al Grupo Churuvita (Kch) a 500 m de profundidad.

Las resistividades encontradas para el perfil C-C' muestran valores de 1 - 50 ohm.m para las unidades sedimentarias en general, 1 – 10 ohm.m para las arcillosas, 10 – 50 ohm.m para las arenosas. Se observa la zona de despegue de la Falla El Batán con valores de resistividad entre 5 - 50 ohm.m.

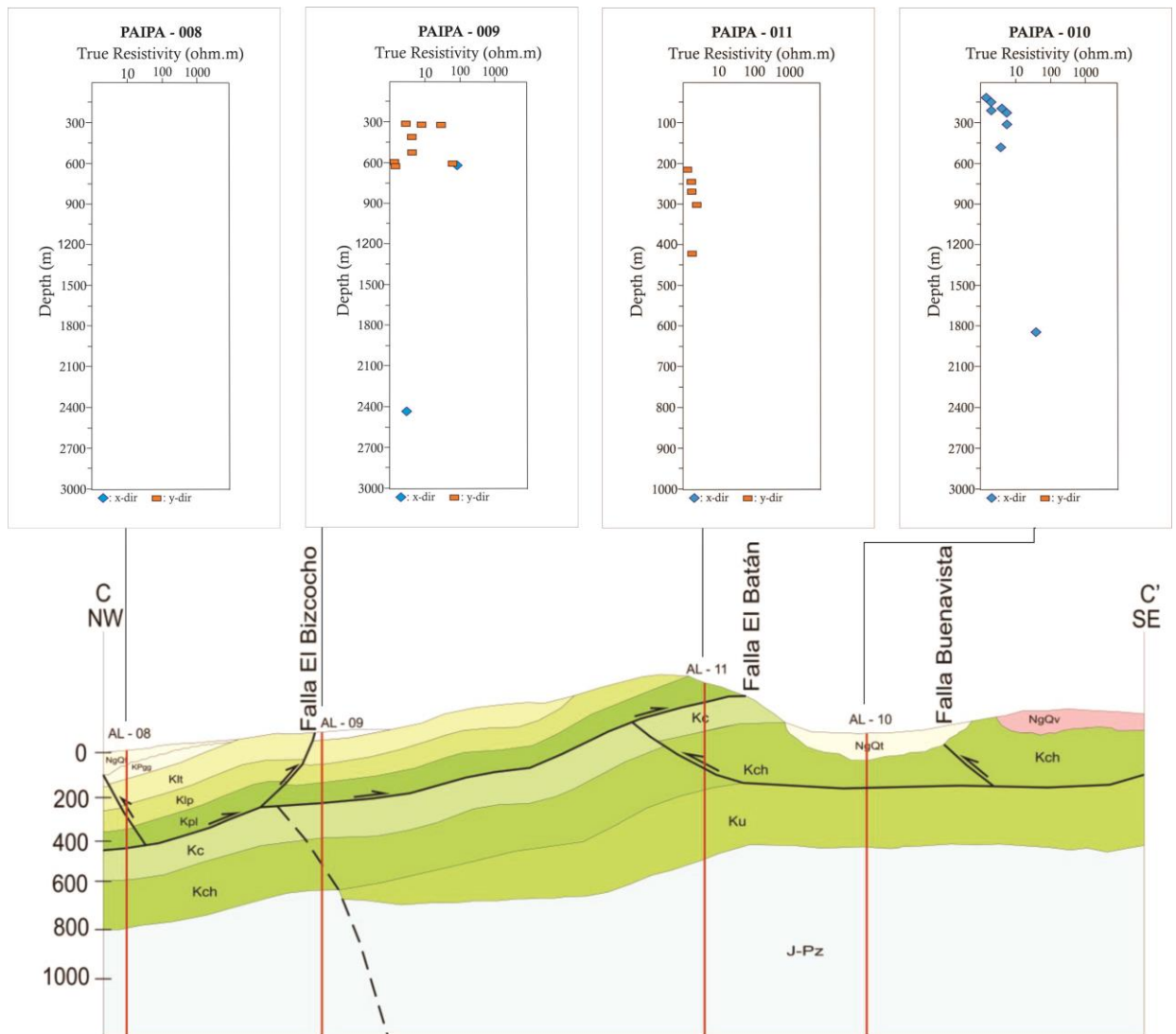


Figura 13. Resultados MT 1D para el corte C-C' (1) obtenidos con el equipo Stratagem EH4. En los gráficos superiores se muestran las mediciones de resistividad vs. profundidad. Los rombos azules muestran los valores medidos en dirección X mientras los rectángulos naranjas muestran los valores medidos en dirección Y. Nótese que la profundidad alcanzada en estos perfiles fue hasta de 600 m, y en algunos casos no se registraron valores útiles debido al ruido de los puntos de adquisición.

PERFIL D-D'

El perfil D-D' tiene una longitud de 2.17 Km, se desarrolla perpendicular al trazo de las fallas El Bizcocho y El Batán (las dos estructuras se describen como fallas inversas con dirección NE) ubicándose en superficie sobre las unidades denominadas como Formación Tilatá (NgQt) y Formación Plaeners (Kpl); se tomaron 4 estaciones MT, la estación 12 se ubica en el bloque colgante de la Falla El Bizcocho, mientras que la estación 13 se ubica en el trazo de la falla mencionada anteriormente. La estación 14 se ubica en el bloque colgante de la Falla El Batán mientras que la estación 15 en el bloque yacente. La descripción de los resultados se hace a profundidad teniendo en cuenta como valor cero la superficie, por lo tanto, son valores que varían dependiendo de la topografía.

ESTACIÓN 12

Estación ubicada sobre la Formación Tilatá (NgQt), se realiza en la parte posterior (SE) de la Subestación Eléctrica de Sochagota, donde se realizan dos registros, ya que se observa un error de aproximadamente 26% en los datos. Se considera como una estación descartable producto del alto ruido en la ganancia del campo magnético, comprobado con los registros de resistividad aparente, fase y coherencia (ANEXO 32). El valor obtenido a 500 m se asocia con la zona de despegue.

ESTACIÓN 13

Estación ubicada sobre la Formación Tilatá (NgQt), se registran valores altos en la ganancia del campo magnético. Se observa que los valores de la secuencia cretácica entre 150 - 600 m presentan valores cercanos a 10 ohm.m. A 300 m se observa una anomalía de resistividad correspondiente a la Formación Los Pinos (Klp), los valores son menores a 5 ohm.m. Los valores mayores a 900 m de profundidad se asocian al Basamento Jurásico (J-Pz).

ESTACIÓN 14

Estación ubicada sobre la Formación Plaeners (Kpl) en cercanías a aguas termales, esta unidad registra valores de 10 ohm.m a 150 m de profundidad, la secuencia sedimentaria restante registra valores cercanos a 20 ohm.m.

ESTACIÓN 15

Estación ubicada sobre la Formación Tilatá (NgQt), la unidad litológica de la cual se tiene el primer registro es la Formación Conejo (Kc) la cual registra valores de 1 - 10 ohm.m a profundidades entre 30 y 150 m, el Grupo Churuvita (Kch) el cual registra valores de 5 - 10 ohm.m en profundidades entre 150 y 300 m, la Formación Une (Ku) la cual registra valores de 8 - 12 ohm.m en profundidades entre 300 y 600 m.

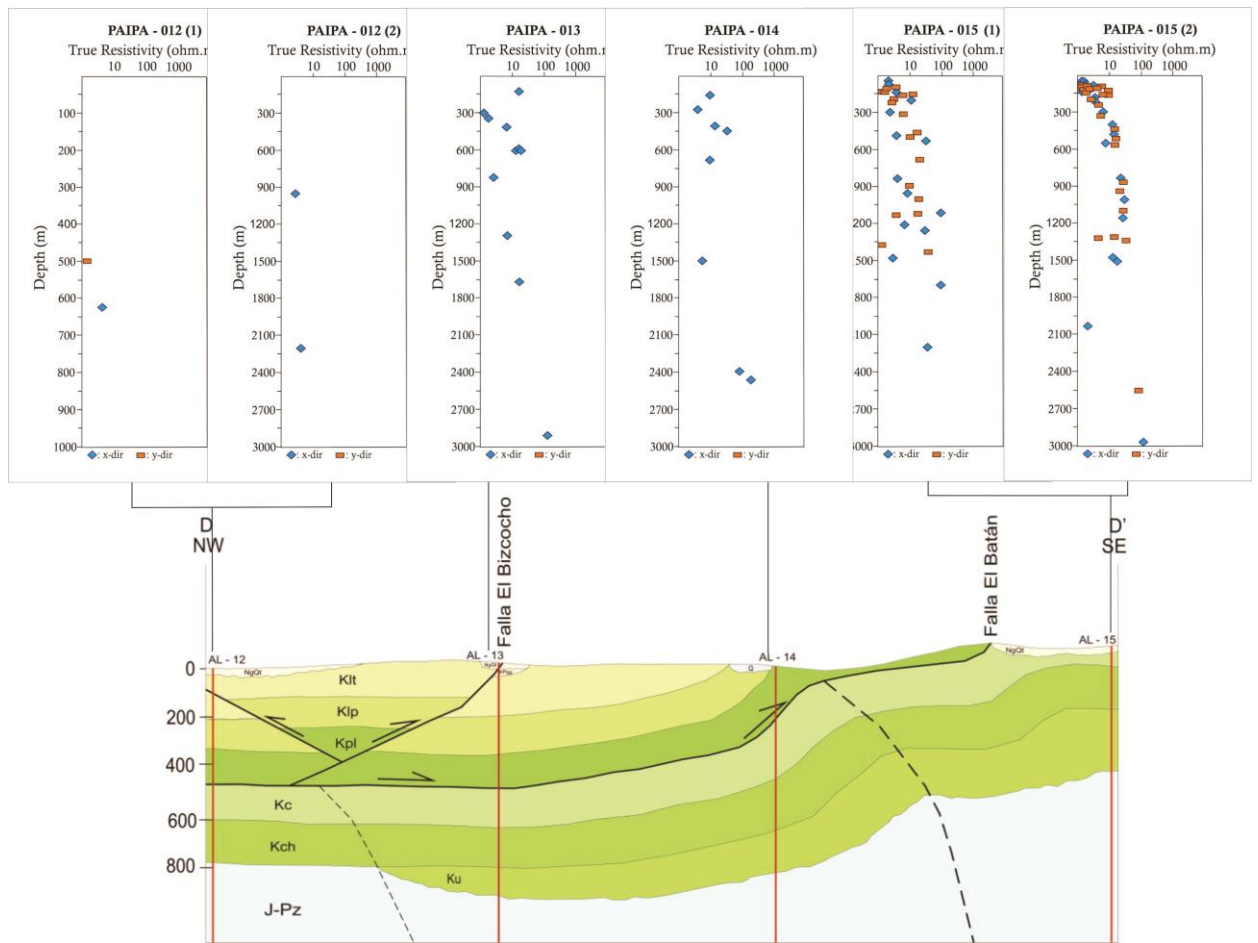


Figura 14. Resultados MT 1D para el corte D-D' (1) obtenidos con el equipo Stratagem EH4. En los gráficos superiores se muestran las mediciones de resistividad vs. profundidad. Los gráficos 12(1) - 12(2) y 15(1) - 15(2) muestran el mismo punto, tomado en dos mediciones debido a los problemas en la ganancia a la hora de obtener los datos. Los rombos azules muestran los valores medidos en dirección X mientras los rectángulos naranjas muestran los valores medidos en dirección Y. Nótese que la profundidad alcanzada en estos perfiles fue hasta de 2.5 km.

6.1 DEFINICIÓN DE LA CALIDAD DE LOS DATOS TOMADOS

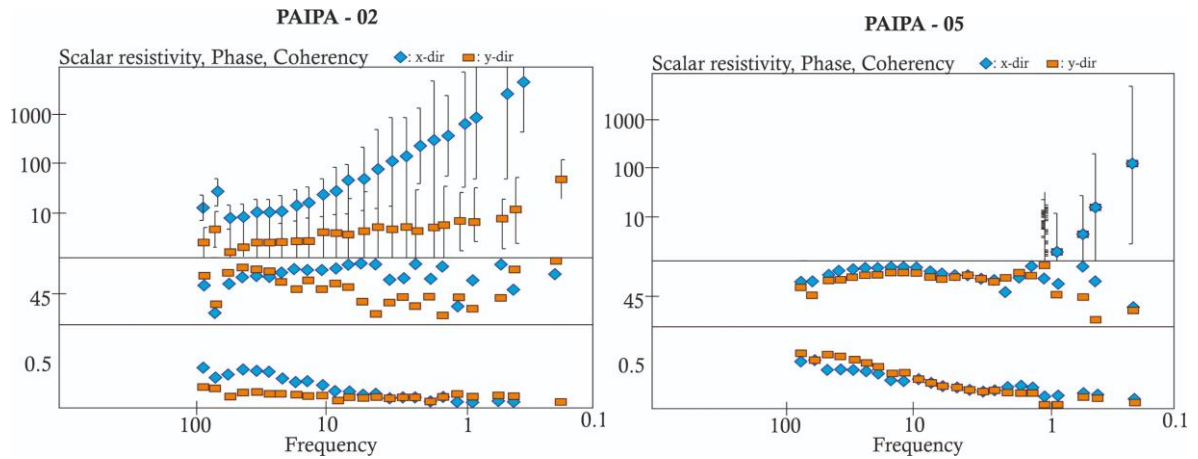


Figura 15. Comparación valores de Resistividad Aparente, Fase y Coherencia (De arriba hacia abajo) entre A) Estación Paipa 02 una estación de buena calidad de dato tomado y B) Estación Paipa 05 una de baja calidad de dato tomado. A mayor separación entre los rombos y los cuadrados entre las líneas, mayor incertidumbre presenta el registro, así como menor cantidad de datos (estación 5 en Resistividad Aparente).

Los valores de fase y coherencia son importantes, ya que estos indican qué tanta calidad posee el dato tomado. Lo ideal es que los datos en las direcciones X y Y no difieran en los valores calculados (FIGURA 15A) como se puede observar en la coherencia y fase de la estación 2. Sin embargo, los valores de ruido pueden generar errores, y por ende la no adquisición adecuada de valores de resistividad aparente, como es el caso de la estación 5 mostrada en la FIGURA 15B. Las líneas verticales indican la incertidumbre del dato, una desviación estándar calculada por el equipo.

Las certidumbres de los datos se clasifican en buena, satisfactoria, regular e inaceptable, para el caso del perfil A-A' se clasifican las estaciones 1 y 2 (ANEXO 23, FIGURA 15A) como buenos, mientras que la estación 3 (ANEXO 24) se clasifica como inaceptable, por otra parte, en el perfil B-B' tres estaciones se clasifican como buenos datos (ANEXOS 25, 26 Y 27) y un único dato

correspondiente a la estación 5 que se clasifica como inaceptable por la alta dispersión en los datos (FIGURA 15B), en el perfil C-C' los datos se clasifican como regulares (ANEXOS 28, 29, 30, 31) ya que presentan alta dispersión e incertidumbre pero generaron perfiles de resistividad vs profundidad , en el perfil D-D' se clasifican como buenos los datos de las estaciones 13 y 15 (ANEXOS 33 Y 35) ya que se observa alta densidad de datos y poca dispersión entre los mismos y los datos de las estaciones 12 y 14 se clasifican como regulares por su alta dispersión (ANEXOS 32 Y 34).

7. DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN

Una vez obtenidos los resultados 1D de cada estación, se asocian a los cortes geológicos previamente realizados para así ser interpretados y analizados. De manera general, en los resultados se observan los perfiles geológicos realizados, asociados a los perfiles de resistividad vs profundidad que brinda el equipo, para cada estación. En dichos perfiles, se observan dos símbolos, unos rombos (Azules) y unos rectángulos (Naranjas), resultado de la transformada de Bostick (Bostick, 1977), la cual es una ecuación donde se crea una distribución continua de la resistividad en función de la profundidad (Delgado *et al.*, 2001).

En el caso del corte A-A', en el cual se realizaron 3 estaciones, sólo 2 estaciones brindan resultados, esto debido a que en la tercera estación se realiza en cercanías de una escuela rural, hay presencia de carreteras y torres eléctricas de baja tensión lo cual genera ruido y no permite el adecuado procesamiento de los datos por parte del equipo. Se tiene la primera estación sobre la brecha hidrotermal, y cerca de la Falla Canocas, mientras que se realiza la segunda sobre la secuencia sedimentaria, con el despegue interpretado a una profundidad de 900 m aproximadamente (Falla El Batán). Las resistividades obtenidas mostraron valores similares para las diferentes litologías. Las variaciones de resistividad más grandes fueron observadas en cercanías a la falla el Batán, en el que se observa un aumento de resistividad y al tope del basamento. Dentro del basamento a profundidades mayores de 1600 m se observan variaciones que no se explican con el corte estructural.

Nuestras expectativas con este perfil eran las de encontrar anomalías de resistividad bajas por la generación de calor radioactivo en cercanías de la brecha hidrotermal. González *et al.*, en el 2008, realizaron la exploración de uranio en la región de Paipa, Iza, Pesca y Chivatá, donde una de las zonas de interés, es la Brecha Hidrotermal (Qhb) donde se tomó la medición, cerca de la cantera El Manzano, estipulando valores de concentración mayores a 100 ppm de uranio y 30 ppm de torio, así como valores altos de radioactividad (2000 - 7500 c/s);

González (2009), asocia contenidos de potasio del 1.5% a la Formación Guaduas (KPgg). Estos valores altos sugerirían que las reacciones exotérmicas por decaimiento radiactivo son comunes, lo que aumentaría el calor radiogénico y la temperatura, lo que podría llevar a generar anomalías resistivas. Sin embargo, los resultados del sondeo 2 muestran resistividades menores que el sondeo 1 (FIGURA 11), siendo el sondeo 1 adyacente a la brecha mientras el sondeo 2 está más alejado, por lo que se infiere que el calor producido no genera anomalías resistivas, o que la permeabilidad de las unidades cambió durante la intrusión, y el contenido de agua de las unidades adyacentes a la brecha es menor. En los modelos directos 2D se mostraba una anomalía de resistividad en la zona de falla. En el perfil medido, la Falla Canocas no muestra tal anomalía. Explicamos esta observación a partir de la ubicación del punto de muestreo ya que este mide la resistividad del bloque yacente, de una falla que buza hacia el SE. El sondeo 1 muestra una tendencia constante de la resistividad, mientras el sondeo 2 muestra resistividades menores, más variables, siendo las más bajas a 200 m de profundidad, sobre la Formación Guaduas (KPgg), e inclusive, valores menores a 10 ohm.m, resaltando que dicha tendencia se atribuye a la secuencia sedimentaria. Algunos contactos de la sección correlacionan con el techo y la base de intervalos de resistividad como el observado a 330 m, comparable con el despegue de la falla. La Falla El Batán a 500 m, y el tope del basamento a 1000 m de profundidad muestran en este sondeo altas resistividades. Teniendo en cuenta la litología, y las mediciones de resistividad, se sugiere que las resistividades en la Formación Guaduas (KPgg) son menores que las resistividades cercanas a la Brecha Hidrotermal (Qhb), posiblemente por variaciones de porosidad cercanas a la brecha hidrotermal o a la variación litológica de la Formación Guaduas en la que areniscas y arcillas han sido descritas.

Los valores definidos en la sección 1 (FIGURA 3) nos permiten sugerir cambios en la resistividad de diferentes unidades litológicas, sugiriendo mayor resistividad alrededor de la brecha hidrotermal, bajas resistividades (1 - 10 ohm.m) en las formaciones arcillosas, altas resistividades (10 – 150 ohm.m) en las zonas de

cercanas a la Falla el Batán y (200 - 500 ohm.m) en áreas cercanas al tope del basamento. Los efectos de la litología y las fallas del sistema en las anomalías de resistividad sugieren su contenido de fluidos. A partir de esta comparación de valores, podemos sugerir una menor concentración de fluidos cerca a la brecha hidrotermal, la Falla El Batán como el límite entre dos bloques de diferentes saturaciones de fluidos. Comparaciones con las otras secciones adquiridas nos permite definir la regularidad de estas observaciones en el área para entender el rol de las litologías y las fallas en la distribución de fluidos en una zona con potencial geotérmico.

En el corte B-B', se obtienen resultados en las 4 estaciones, siendo la de menor información la estación 5, con apenas 3 datos. Si comparamos el sondeo 2 con el sondeo 4, vemos que la transformada de Bostick muestra mayores valores de resistividad para la Formación Guaduas (KPgg), a la misma profundidad; asimismo, no se presentan anomalías resistivas, ni cerca al kilómetro donde se asume el despegue. Al observar la FIGURA 3, los datos teóricos de resistividad para la Formación Guaduas (KPgg) concuerdan con los valores registrados en los sondeos, evidenciando que un cambio en su composición (ya sea mayor contenido de areniscas o mantos de carbón en el sondeo 4 (FIGURA 12) o mayor contenido de arcillas y limos en el sondeo 2 (FIGURA 11)) puede dar diferentes respuestas resistivas. En el sondeo 5, a 750 m (dato de menor resistividad) estaría pasando el despegue teniendo en cuenta el corte propuesto (FIGURA 12), por lo que es correcto afirmar que ese bajo valor pueda deberse al tránsito de un fluido a esa profundidad; por otro lado, la Formación Conejo (Kc), caracterizada por su predominancia en shales y por estar saturada en agua (Moyano, 2015), podría generar también datos bajos de resistividad (FIGURA 3), y, al estar infrayaciendo al despegue, ese dato a 750 m en el sondeo 5 (FIGURA 12), podría también deberse a la presencia de esa formación, así como la cercanía a la intersección entre las fallas. Siguiendo al sondeo 6, siendo el que se encuentra más al SE en el corte, con el valor más bajo cerca de 800 m de profundidad, por lo que el despegue o la Formación Conejo (Kc) podrían estar pasando a esa profundidad

(Puede haber influencia de la falla que aflora cerca, así como el hecho de que el despegue se encuentre más somero). Esto también se corrobora en el sondeo 7, caracterizado por ser el más robusto en datos, donde el valor más bajo se encuentra cerca de 750 m, también pudiendo estar asociado al despegue planteado. Cabe resaltar que, a lo largo de este sondeo, se ve una tendencia media-alta de las resistividades y que datos resistivos bajos, para la Formación Conejo (Kc), no se aprecian en el Corte A-A' (FIGURA 11).

En el corte C-C', también se tuvo el problema del corte A-A', donde un sondeo no arrojó resultados directos (FIGURA 13). Observando el sondeo 9, entre 300 y 600 m, las resistividades bajas podrían deberse a la presencia de la Formación Conejo (Kc), que, como se mencionó anteriormente, ha sido interpretada como saturada con agua salobre (Moyano, 2015), o podría deberse al despegue, estando un poco más profundo que en el corte planteado. La anomalía baja de resistividad puede correlacionarse con la cercanía al cruce de falla, así como a la profundidad que se encuentra y la presencia de la Formación Conejo (Kc), donde, en el modelo 1D (FIGURA 9), observamos que estos factores influyen en la respuesta resistiva. En el sondeo 10, se observan valores menores de 10 ohm.m entre 150 y 300 m, donde, en la primera opción (FIGURA 13), concuerda con ese despegue que se conecta con la Falla El Batán hacia el NW. Por otro lado, en la opción 2 (ANEXO 1), se encontraría en la Formación Une (Ku), la cual se caracteriza con valores altos de resistividad, de 100 ohm.m en adelante (FIGURA 3; Moyano, 2015). Finalmente, en el último sondeo del corte, el número 11, hay valores bajos de resistividad entre 200 y 300 m de profundidad, donde se observa el despegue mencionado anteriormente, y la Falla El Batán (FIGURA 13), cuya profundidad de despegue es más somera en comparación con los cortes A-A' y B-B'; para la opción 2 del corte (ANEXO 1), se propone una falla de alto ángulo, que se cruza con la Falla El Batán, hacia la misma profundidad donde se observan las bajas resistividades. El cruce de fallas interpretado podría explicar la anomalía de resistividad ya que si ocurre generaría un aumento de permeabilidad, lo que mejora la movilidad del fluido, y haría que la tendencia resistiva disminuyera

(FIGURA 9), mostrando los valores bajos observados en el sondeo. Un poco más al sur de este sondeo (FIGURA 2), Velandia (2003), cartografía las fallas y la rotación de bloques, así como fuentes termales actuales, que se relacionan al cruce mencionado anteriormente, lo que se puede describir como una intersección de falla bloqueada (*Locked fault-intersection*), donde manifestaciones termales pueden darse en dichas uniones (Curewitz y Karson, 1997).

En el último corte, D-D', se tienen también 2 opciones de corte (FIGURA 14, ANEXO 2), 6 sondeos donde 2 estaciones tienen 2 sondeos. La razón por la cual se toman dos sondeos en 2 estaciones como estrategia es para controlar el ruido presente en la estación durante la adquisición, ya que estas no pudieron ser reubicadas debido al acceso restringido a otra área, sea por propiedad privada o por disposición del terreno. 2 sondeos con diferente cantidad de conteos se tomaron, para así contrastarlos, teniendo en cuenta la premisa de que, con menor cantidad de datos, habría menos datos erróneos y los resultados serían de mejor calidad. En el sondeo 12 (1 y 2), se recopilan 4 datos a diferente profundidad, donde un perfil llega hasta 1000 m y el otro hasta 3000 m, respectivamente, presentando valores menores a 10 ohm.m. En el primero (12 (1)), valores bajos de resistividad se observan a 500 y 650 m, donde se interpreta la Falla El Batán y la Formación Conejo (Kc), mientras que en el segundo sondeo (12(2)), a profundidades de 950 y 2250 m, se observa una anomalía de resistividad (menor a 10 ohm.m) que puede ser interpretada como la profundidad al tope del basamento. Sin embargo, las resistividades medidas en el basamento en otras secciones han sido más altas. Cabe resaltar que, en esta estación, debido a la cercanía con la subestación eléctrica, los datos erróneos dados por el equipo se acercan al 26%, lo que puede alterar los resultados en gran medida, y les quita confiabilidad. En el sondeo 13, el perfil muestra las resistividades más bajas a 300 m, lo que puede deberse a la presencia de la Falla El Bizcocho. Ese valor a esa profundidad, puede indicar un buzamiento mayor para esta falla en su último tramo. Para el sondeo 14, se observa un pequeño cúmulo de datos a los 300 m, donde se encuentra la menor resistividad de todo el perfil, lo que se puede deber a la

presencia de la Falla El Batán, encontrándose más somera, tal como lo muestra el corte, e incluso la Formación Conejo (Kc). Finalmente, en el sondeo 15 (1 y 2), se tiene un cúmulo más robusto que en el sondeo pasado de datos hasta los 300 m. Este punto es curioso ya que se encuentra entre las fallas El Batán y Rancho Grande, las cuales han presentado anomalías en sondeos anteriores (FIGURA 13); se encuentra la Formación Conejo (Kc) debajo de la Formación Tilatá (NgQt) (Opción 1, FIGURA 14), donde la Formación Conejo (Kc) se ha caracterizado por bajas resistividades (FIGURA 3) y la Formación Une (Ku) (Opción 2, ANEXO 2), que se ha caracterizado por presentar altas resistividades. El despegue que se observa en el corte C-C', que interseca con la Falla El Batán (FIGURA 13), habría aflorado más al SE del corte D-D', como la Falla Rancho Grande, aunque, observando la anomalía, podría creerse que la falla proviene de ese despegue y éste siga intersecándose con la Falla El Batán.

Los valores que alcanzaban a llegar al basamento, eran bajos, más bajos de lo esperado, por lo que podría ser gracias a fallas más profundas que generen esas bajas resistividades, como la falla inferida bajo el Pop-up en los cortes C-C' y D-D' (FIGURAS 13 Y 14, ANEXOS 1 Y 2). Cabe resaltar que en los sondeos 12 (2), 13 y 14, sólo se observan rombos azules en los datos, es decir, sólo la componente X pudo adquirir datos, seguramente por el ruido que había en la zona, el cual afectó más al dipolo NS y a la bobina Y.

Al observar los modelos directos (*Forward Modelos*) 1D (FIGURA 9, ANEXOS 16, 17, ... , 21) y los datos obtenidos de resistividad aparente, fase y coherencia (FIGURA 15, ANEXOS 23, 24, ... , 37) y los perfiles de resistividad vs profundidad (FIGURAS 11, 12, 13 Y 14), podemos ver que el modelo geoelectrico realizado en el software Geowiz1DMT difiere mucho de los datos tomados, al haberse utilizado los teóricos; por ejemplo, los datos de 500 ohm.m asignados a la Formación Labor y Tierna (Klt) (Moyano, 2015), no se observaron de manera clara. Recalcando en los modelos de resistividad aparente, fase e impedancia, vemos también que la resistividad aparente difiere de la arrojada por el equipo, pero en la fase,

observamos que se encuentra entre 50 y 25 grados, así como en los datos obtenidos, por lo que se pueden correlacionar de buena manera.

8. CONCLUSIONES

A través de las 15 estaciones de magnetotelúrica integradas con la interpretación geológica y los modelos preliminares elaborados, se describe que:

Las resistividades bajas se relacionan con rocas arcillo-líticas, las resistividades intermedias representan rocas con mayor porosidad como las arenas y las altas resistividades marcan el basamento, aunque no fueron valores tan altos como los descritos en la literatura.

Se comprobó la influencia de elementos radioactivos presentes en las rocas y se descartó su relación con la generación de anomalías de resistividad.

La Falla El Batán se encuentra como despegue y es importante en este sistema, ya que, por las anomalías resistivas, es posible que fluido hidrotermal circule, aunque varía un poco la profundidad respecto a los modelos propuestos.

La litología y las estructuras influyen en las anomalías de resistividad, sin embargo, cuando se contrastan, observamos que el factor estructural tiene mayor jerarquía, haciéndolo un blanco sumamente importante en la exploración geotérmica.

La Formación Conejo (Kc), por su litología y cercanía al despegue, así como la propiedad atribuida de saturación de agua salobre, presenta valores bajos de resistividad, principalmente en los cortes C-C' y D-D'.

El cruce de fallas se correlaciona con anomalías bajas de resistividad, como en el caso del sondeo 11, y correlacionando con litología, se considera el mejor sitio para la exploración, entender esta zona, o este comportamiento de las fallas, podría llevar a proyectos más avanzados y puntuales.

Las anomalías estuvieron relacionadas con los estudios geoquímicos, geológicos y geofísicos descritos anteriormente, mostrando rasgos característicos de un sistema geotérmico, desde materiales con baja resistividad (arcillas) como resistividades intermedias, que se pueden asociar a reservorio geotérmico, aunque estudios anteriores afirman que es la Formación Une, en nuestro caso, esta formación estaba a profundidad y en la minoría de datos, por lo que no podemos corroborar esa afirmación.

9. RECOMENDACIONES

En vista del progreso en la exploración geotérmica, puntualmente en la zona de Paipa, se recomienda, primeramente, dar mayor capacitación a las personas en la utilización del método, de manera que más personas lo conozcan y adquieran la capacidad de aplicarlo.

Por otro lado, Utilizar CSAMT (Controlled Source Audio Magnetotellurics), para así obtener información a menor profundidad, de mejor calidad, y puede ser correlacionada con los datos ya existentes. Asimismo, tomar mediciones de las diferentes formaciones en distintos puntos, para verificar si los valores de resistividad de las rocas se mantienen en otras zonas, o si por la escala, sólo se midió en áreas donde hay flujo de agua caliente.

Finalmente, aplicar otros métodos geofísicos y relacionar los resultados, para tener información más detallada de la zona.

BIBLIOGRAFÍA

ALFARO, C., 2001. Geoquímica de las fuentes termales del área de Paipa – Iza. Resumen de compilación de información. INGEOMINAS. Informe interno. 16 pp.

ALFARO, C., 2002a. Geoquímica del sistema geotérmico de Paipa. Informe Interno. INGEOMINAS. 43 pp.

ALFARO, C., 2002b. Estudio Isotópico de aguas del área geotérmica de Paipa. Informe Interno. INGEOMINAS. 15 pp.

ALFARO, C., ESPINOSA, O., 2004. Sondeo preliminar de Radón en el área geotérmica de Paipa. Informe Interno. INGEOMINAS. 34 pp

ARCHIE, G., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Tran. AIME, 146, 54-67 pp.

BERTRAMI, R., CAMACHO, A., DE STEFANIS, L., MEDINA, T., ZUPPI, G., 1992. Geochemical and isotopic exploration of the geothermal area of Paipa, Cordillera Oriental, Colombia. Estudios geotérmicos con técnicas isotópicas y geoquímicas en América Latina. OIEA. 457 p. Viena.

BOSTICK, F., 1977. A simple almost exact method of magnetotelluric analysis. In: WARD, S. (ed.), Workshop of Electrical Methods in Geothermal Exploration, University of Utah. U.S. Geological Survey.

BOUSSINGAULT, J. B., ROULÍN, F. D., 1849. Viajes Científicos a los Andes Ecuatoriales. Librería Castellana. Traducción J. Acosta. 322 pp. Paris.

CAGNIARD, L., 1953. Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting: Geophysics. Vol, 18. 605 pp.

CEPEDA, H., PARDO, N., 2004. Vulcanismo de Paipa. INGEOMINAS. Informe Interno. 101 pp.

CHAVE, A., JONES, A., 2012. The magnetotelluric Method, Theory and Practice, 1st edition. Cambridge

CUREWITZ, D., KARSON, J., 1997. Structural settings of hydrothermal outflow: Fracture permeability maintained by fault propagation and interaction. Journal of Volcanology and Geothermal Research. Vol 79, 149-168 pp.

DELGADO, O., CAMPOS, O., URRUTIA, J., ARZATE, J., 2001. Occam and Bostick 1-D inversion of magnetotelluric sounding in the Chicxulub impact crater, Yucatán, Mexico. Universidad Nacional Autónoma de México. Revista Geofísica Internacional. Vol. 40, No. 4, 271-283 pp.

DÍAZ, J., SOTELO, C., 1995. Análisis estructural de la falla de Boyacá en un área al oeste de los municipios de Paipa-Duitama. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

EGBERT, G., 1997. Robust multiple-station magnetotelluric data processing. Geophysical Journal International. Vol., 130, No. 2.

FERREIRA, P., HERNÁNDEZ, R., 1988. Evaluación Geotérmica en el Área de Paipa, Basada en Técnicas Isotópicas, Geoquímica y Aspectos Estructurales. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias. Trabajo de de Grado. 125 p. Bogotá.

FRANCO, J., 2012. Prospección geoeléctrica en los alrededores del volcán de Paipa-Boyacá. Investigación y exploración de recursos geotérmicos: área recursos del subsuelo. Informe técnico. Servicio Geológico Colombiano.

GEORGSSON, L., 2009. Geophysical methods used in geothermal exploration. United Nations University - Geothermal Training Programme.

GONZÁLEZ, L., VÁSQUEZ, L., MUÑOZ, R., GOMES, HERNÁN., PARRADO, G., VARGAS, S., 2008. Exploración de uranio en Paipa, Iza, Pesca, Chivata (Boyacá). Exploración de recursos energéticos. INGEOMINAS. Informe final. 151 pp.

GONZÁLEZ, L., 2009. Uranium exploration in Paipa and Iza area, Colombia: A preliminary report of new contributions. Uranium raw material for the nuclear fuel cycle: exploration, mining, production, supply and demand, economics and environmental issues (URAM - 2009). 11 pp.

GUPTA, H., 2007. Geothermal Energy: An Alternative Resource For the 21st Century. Elsevier.

HERSIR, G., BJÖRNSSON, A., 1991. Geophysical exploration for geothermal resources. Principles and applications. UNU-GTP, Iceland, report 15, 94 pp.

INGEOMINAS, 2005. Modelo conceptual preliminar del sistema geotérmico de Paipa.

JAPAN CONSULTING INSTITUTE, 1983. Feasibility study report of geothermal power plant for Instituto Colombiano de Energía Eléctrica (Electrificadora de Boyacá). 74 p. Bogotá.

JARAMILLO, L., 2001a. Compilación de información geológica de la zona de Paipa-Iza. INGEOMINAS. Informe Interno. No publicado.

MOYANO, I., 2010. Exploración geoelectrica (Sondeos Eléctricos Verticales y tomografías eléctricas) en el área geotérmica de Paipa (Boyacá). INGEOMINAS.

MOYANO, I., 2015. Modelamiento de estructuras geotérmicas ocultas a partir de la interpretación de anomalías magnetotelúricas de resistividad en la región de Paipa, Boyacá, Colombia. MSc. tesis. Universidad Nacional de Colombia.

NAIDU, D., 2012. Deep crustal structure of the Son - Narmada - Tapti Lineament, Central India. India.

NAVIA, A., BARRIGA, A., 1929. Informe sobre las aguas termominerales de Paipa, Colombia. Gobernación de Boyacá. Imprenta Nacional. 76 pp. Bogotá.

OLADE, ICEL, Geotérmica Italiana y CONTECOL, 1982. Estudio de reconocimiento de los recursos geotérmicos de la República de Colombia. Informe final. 455 p. Bogotá.

PARDO, N., 2004. Mapa geológico de vulcanitas de Paipa. planchas 171 y 191. Escala 1:25.000. INGEOMINAS. Bogotá.

PROL, R., 1996. El calor de la tierra. Quinta reimpresión. 55 pp. Ciudad de México.

RENZONI, G., ROSAS, H., 1983. Mapa Geológico Plancha 171-Duitama. Escala 1:100.000. INGEOMINAS. Bogotá.

RENZONI, G., 1981. Geología del Cuadrángulo J-12 Tunja. Boletín Geológico Vol. 24, 2, pp. 31-48. Bogotá.

RODRÍGUEZ, G., 2015. Determinación de la estructura resistiva del subsuelo a partir de registros magnetotelúricos para la caracterización del sistema geotérmico del municipio de Paipa. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Tesis.

SALAZAR, S., MUÑOZ, Y., OSPINO, A., 2017. Analysis of geothermal energy as an alternative source for electricity in Colombia. Geothermal Energy. Vol 5, No. 27.

SIMPSON, F., BAHR, K., 2005. Practical Magnetotellurics. Universität, Göttingen. 270 pp.

STRANGWAY, D., SWIFT, C., HOLMER, R., 1973. The application of Audio-frequency magnetotellurics (AMT) to mineral exploration. Geophysics. Vol 38, No. 6, 1159 pp.

VÁSQUEZ, L., 2002. Exploración geofísica con el método electromagnético en el municipio de Paipa. Informe Interno. INGEOMINAS. 16 pp.

VÁSQUEZ, L., 2012. Aplicación geofísica de métodos potenciales en el área geotérmica Paipa-Iza. Servicio Geológico Colombiano.

VELANDIA, F., 2003. Informe técnico - Cartografía geológica y estructural sector sur del municipio de Paipa. INGEOMINAS. Bogotá. 32 pp.

VELANDIA, F., CEPEDA, H., 2004. Mapa Geológico - Geología sector del sur del municipio de Paipa (Boyacá), Planchas 171 y 191. INGEOMINAS. Bogotá.

WAMEYO, P., 2005. Magnetotelluric and transient electromagnetic methods in geothermal prospecting, with examples from Menengai, Kenya. Report 21. Geothermal training in Iceland 2005. UNU-GTP, Iceland, 409 - 439 pp.