



**TEMA DEL ARTÍCULO:** Ciencia y tecnología

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

**Alejandro Silva<sup>1</sup>, Lorena Uribe<sup>2</sup>, Rocío  
Bernal-Olaya<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. E-mail: [lsilva1996@hotmail.com](mailto:lsilva1996@hotmail.com)

<sup>2</sup> Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. E-mail: [lorena\\_u11@hotmail.com](mailto:lorena_u11@hotmail.com)

<sup>3</sup> Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. E-mail: [rbernal@uis.edu.co](mailto:rbernal@uis.edu.co)

**RESUMEN**

Se instalaron 15 estaciones de magnetotelúrica, en aproximaciones del sistema geotérmico de Paipa, Boyacá, en las que se hicieron mediciones en un rango de frecuencias entre 0.1 y 75 Hz, en puntos ubicados a partir de la interpretación de 4 perfiles geológicos de aproximadamente 1.5 km de longitud.

El área de exploración se encuentra en el Altiplano Cundiboyacense en medio de la Cordillera Oriental de Colombia (zona axial) a una altitud promedio de 2600 m.s.n.m. En términos geológicos en el área afloran rocas sedimentarias del Cretácico y Terciario predominantemente, fallas de cabalgamiento con rumbo NE y NNE que mantienen una coherencia con las estructuras regionales. Estas estructuras son de gran importancia puesto que definen la posición de las fuentes termales. Sin embargo, tal relación entre las estructuras y las fuentes termales, y su importancia vs. las variaciones

litológicas observadas en la zona, y la posición de las posibles fuentes magmáticas, aún no ha sido claramente entendida.

A partir de los datos obtenidos y la descripción de las unidades geológicas presentes en la zona, se establecieron valores de resistividad para cada litología involucrada. Se relacionan entonces las resistividades bajas con rocas arcillolíticas, las resistividades intermedias con arenas saturadas de fluidos y las altas resistividades con el basamento Jurásico que está compuesto por rocas ígneas y metamórficas. La Falla El Batán se describe como la estructura más importante de la zona, ya que, por sus anomalías resistivas, que muestran valores bajos (Menores a 10 ohm.m), 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 una posible fuente de anomalías de resistividad importante.

Más estudios deber hacerse para entender el efecto de los intrusivos en la generación de calor a través de reacciones exotérmicas.

**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



**RENAG**  
REUNION NACIONAL DE GEOTERMIA

**Bogotá**  
**2018**



ASOCIACIÓN GEOTÉRMICA COLOMBIANA

ventajas entre ellas 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 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). 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 (Alfaro, 2002a), la caldera estaría conectada por la Falla Paipa-Toca con la fuente de calor cuyo origen parece ser coetáneo con la caldera, proponiéndose como el conducto principal de ascenso de fluido magmático (Moyano, 2015).

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.

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 las 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).

Actualmente el método magnetotelúrico 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 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 geológico, estructural y geofísico del sistema geotérmico en un área de 12km<sup>2</sup> 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.

## MARCO GEOLÓGICO

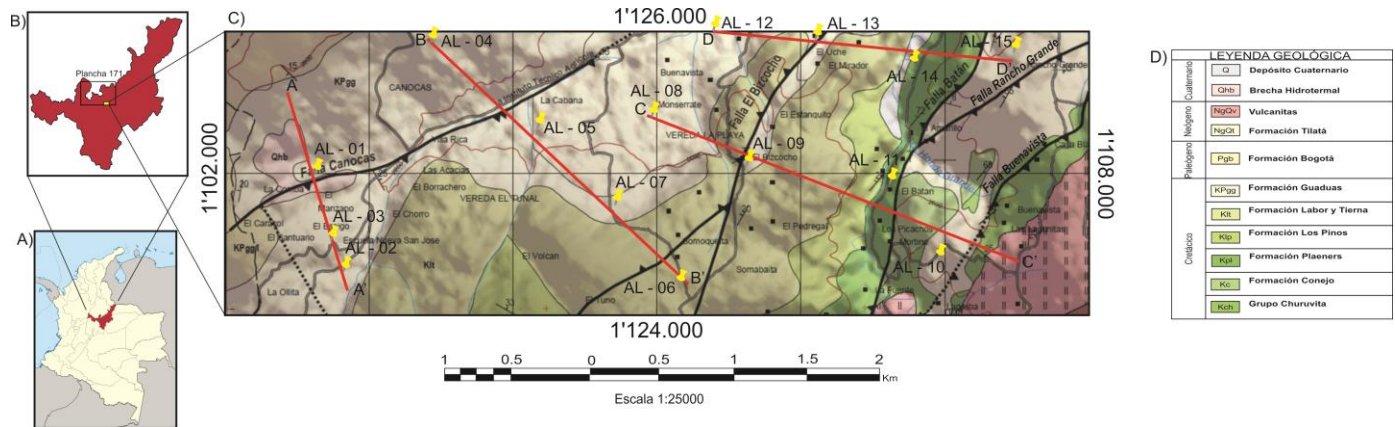
La zona seleccionada para el estudio tiene una extensión de 12 km<sup>2</sup>, al sur del municipio de Paipa y hace parte del Altiplano Cundiboyacense en medio de la Cordillera Oriental de Colombia (zona axial). El área está incluida en la Plancha 171-Duitama de la cartografía geológica regional (Renzoni y Rosas, 1983), donde se muestran aflorando rocas sedimentarias del Cretácico y Terciario predominantemente, así como las principales estructuras falladas de tipo regional (FIGURA 1).

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 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). Del Terciario, afloran la Formación Bogotá (Pgb) y la

Formación Tilatá (NgQt), donde predominan las areniscas, con intercalaciones de limolitas.



**Figura 1:** 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 Pardo, 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.

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) cuyas resistividades son en teoría bajas.

## GEOLÓGÍA ESTRUCTURAL

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). A continuación, se describen las fallas de interés para el proyecto:

**Falla El Batán:** 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), 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.

**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).

**Falla Canocas:** Falla inversa con dirección NE, con 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).

## METODOLOGÍA

Luego de revisar la literatura escrita en el sector, y definir un esquema del sistema geotérmico del área, se definen, a partir de cortes geológicos estructurales realizados por los autores, 15 puntos de muestreo para utilizar el método magneto telúrico. 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 la frecuencia determina la magnitud de la impedancia de resistividad en cuerpos inductores, y la conductividad define la atenuación de 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 las propiedades del subsuelo que incluyen la conductividad, permitividad dieléctrica, y permeabilidad magnética.

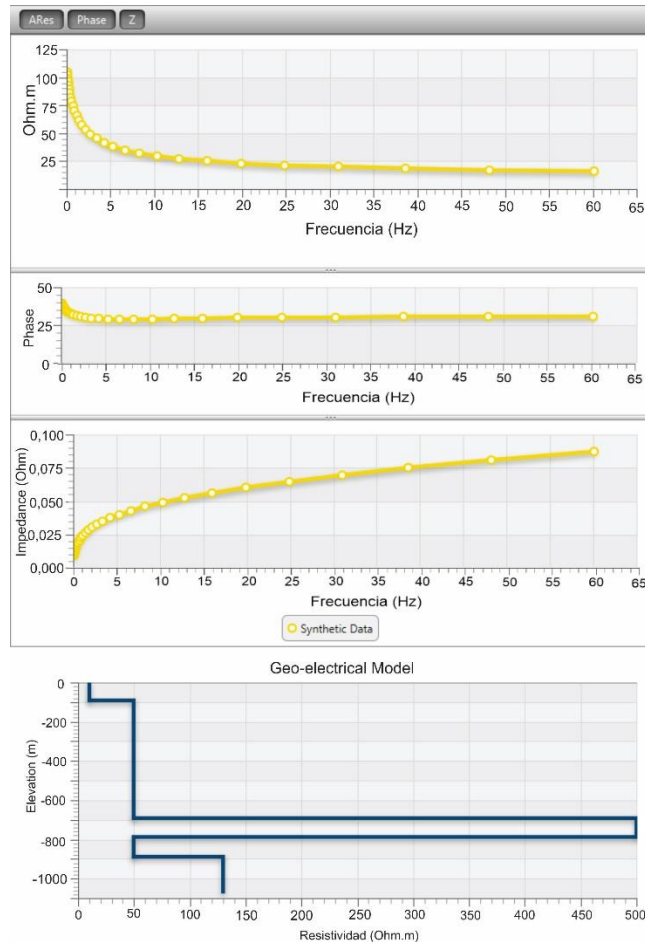
La geometría del arreglo está definida por cuatro electrodos ubicados en los cuatro puntos cardinales y dos bobinas magnéticas ubicadas de forma paralela a los ejes X y Y, de esta forma se pueden obtener los componentes del campo eléctrico en dirección N-S y W-E y los componentes del campo magnético N-S, W-E. Para la medición se utilizó el equipo STRATAGEM EH4, en las frecuencias bajas correspondientes al rango de 0,1 a 75 Hz,

clasificadas en la banda 3. Se realizaron en promedio 1200 conteos por estación, cada conteo efectuándose en un lapso de tiempo de 5,5 segundos. Cada muestra tenía una duración de 6600 segundos (2,75 horas) logrando obtener 15 perfiles de aproximadamente 1 a 3 kilómetros de profundidad. La densidad estadística de los datos permite establecer un régimen de alta calidad y confiabilidad de los datos.

Por otro lado, se realizaron 4 perfiles estructurales para definir la adquisición de los datos (FIGURAS 1C, 3). Como parte del diseño de adquisición de datos, se realizaron Modelos Directos (FM - *Forward Model*), con valores teóricos para definir la capacidad del método para establecer contrastes entre diferentes litologías y la zona de falla. En el modelo directo (FIGURA 2) correspondiente al punto 1 de la sección A-A' ubicado en la FIGURA 3, se observa de arriba hacia abajo, resistividad aparente (tomada de Moyano, 2015), fase e impedancia vs frecuencia (curvas amarillas) y un modelo geoeléctrico (resistividad vs profundidad, gráfica de líneas azules). En la gráfica de fase, se observa una leve variación entre 50 y 25 grados en los primeros 10 Hz, de ahí en adelante se ve casi constante a 25 grados; en la impedancia, existe un aumento exponencial hasta alrededor de 10 Hz y de ahí en adelante un aumento lineal. Asimismo, en este punto, se observa de forma sucesiva que los valores más altos de resistividad son de 500 Ohm.m a 700 y 800 m. Como el ejemplo mostrado está cerca a la brecha hidrotermal (FIGURA 3), se espera una disminución en los valores de resistividad en la zona más cercana a la brecha hidrotermal. Los valores entre 0 – 50 Ohm.m corresponden a las unidades más arcillosas (Formación Guaduas (KPgg, Formación Los Pinos (Kpl)), mientras que los valores entre 50 - 500 Ohm.m corresponden a las unidades más arenosas (Formación Labor y



Tierna (Klt), observando un contraste marcado de resistividades.



**Figura 2: Modelo Directo (Forward Model) 1D para la estación magnetotélúrica 1 localizada en el Corte A-A', elaborado a través del Software Geowiz1DMT.**

## RESULTADOS

Los resultados adquiridos durante la fase de campo muestrearon la resistividad de los perfiles estructurales sugeridos, en los que aparecían los bloques yacientes y colgantes de las fallas principales aflorantes en la zona. La distancia entre estaciones de medición fue de mínimo 0.5 Km hasta máximo 1 Km. En este resumen

presentamos uno de los perfiles para describir parte de las observaciones principales.

La figura 3 muestra los resultados 1D de cada estación, asociados al corte geológico. En las mediciones 1D 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).

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 3). 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.

En la estación 1, 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), siendo de interés porque se ha descrito un enriquecimiento de uranio en la brecha, que puede generar una anomalía de calor de origen radioactivo (Prol, 1996). Se registran valores de 10 ohm.m hasta los 450 m (Formación Guaduas, KPgg), las formaciones Labor y Tierna (Klt) y Los Pinos (Klp), entre 450 y 650 m, registran valores entre 10 y 100 ohm.m. La Formación Conejo (Kc) y el Grupo Churuvita (Kch) registran valores de 100 ohm.m entre 900 y 1500 m. El basamento registra valores más altos a profundidades mayores de 1950 m.



Por otro lado, en la estación 2, ubicada sobre la Formación Guaduas (KPgg), se obtuvieron resultados que permiten ver la baja variación de resistividades de las unidades de la secuencia Cretácica. La unidad litológica más superficial es la Formación Guaduas (KPgg) la cuál registra valores de 10 ohm.m en profundidades de hasta 450 m, la Formación Labor y Tierna (Klt) registra valores de 10 ohm.m en profundidades entre 450 y 600 m, las formaciones Los Pinos (Klp) y Plaeners (Kpl) registra valores de 10 ohm.m en profundidades entre 600 m y 900 m, la Formación Conejo (Kc) registra valores de 10 – 50 ohm.m en profundidades entre 900 y 1200 m, el Grupo Churuvita (Kch) registra valores de 10 ohm.m en profundidades entre 1200 y 1500 m.

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.

## DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN

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). 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.

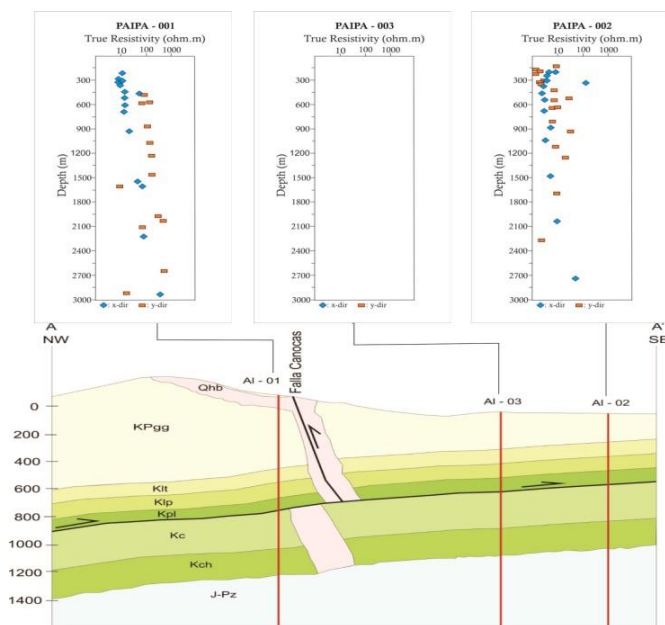


Figura 3: Resultados MT 1D para el corte A-A' obtenidos con el equipo Stratagem EH4. La profundidad alcanzada en estos perfiles fue hasta de 3km.

Sin embargo, los resultados del sondeo 2 muestran resistividades menores que el sondeo 1 (FIGURA 3), 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.

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). 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 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.

## CONCLUSIONES

A través de las 15 estaciones de magnetotelúrica integradas con la interpretación geológica y los modelos preliminares elaborados, se describen los rangos de resistividades correspondientes a las diferentes unidades estratigráficas y a las zonas de falla. Las unidades arcillosas presentan valores de resistividad bajas que varían entre 1-10 ohm.m, las unidades arenosas entre 10 - 50 ohm.m. Comparando estos valores con los esperados en el modelo directo, observamos que son valores mucho menores posiblemente porque la zona de estudio corresponde a la parte con más saturación de fluidos, esto es evidenciado por la presencia de manantiales.

La litología y las estructuras influyen en las anomalías de resistividad, las cuales se observaron a lo largo de los perfiles; al observar esto, y que efectivamente las estructuras presentan anomalías, teniendo en cuenta el factor de permeabilidad, serían un blanco sumamente importante en la exploración geotérmica.

Las anomalías estuvieron relacionadas con los estudios geoquímicos, geológicos y geofísicos descritos anteriormente (Alfaro, 2002a; Velandia, 2003; Franco, 2012; Moyano, 2015), mostrando rasgos característicos de la parte superior del sistema geotérmico, donde existe flujo de fluidos calientes produciendo resistividades menores que las esperadas para rocas sedimentarias de las litologías descritas. Se comprobó la influencia de elementos radioactivos presentes en las rocas observando un aumento de resistividad, sugiriendo que la brecha hidrotermal pudo haber cambiado las características de las rocas aledañas –disminuyendo su porosidad, o que la brecha hidrotermal ocurrió en una zona de variación facial de las unidades sedimentarias.





## REFERENCIAS

- Alfaro, C.: *Geoquímica del sistema geotérmico de Paipa*. Informe Interno. INGEOMINAS. pp 43. (2002a.)
- Bostick, F.: *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. (1977).
- Delgado, O., Campos, O., Urrutia, J., Arzate, J.: *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. (2001).
- Franco, J.: *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. (2012).
- Georgsson, L.: *Geophysical methods used in geothermal exploration*. United Nations University - Geothermal Training Programmed. (2009).
- González, L., Vásquez, L., Muñoz, R., Gomes, H., Parrado, G., Vargas, S.: *Exploración de uranio en Paipa, Iza, Pesca, Chivata (Boyacá)*. Exploración de recursos energéticos. INGEOMINAS. Informe final. pp 151. (2008).
- Jaramillo, L.: *Compilación de información geológica de la zona de Paipa -Iza*. INGEOMINAS. Informe Interno. No publicado. (2001a).
- Moyano, I.: *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. (2015).
- Pardo, N.: *Mapa geológico de vulcanitas de Paipa. planchas 171 y 191. Escala 1:25.000*. INGEOMINAS. Bogotá. (2004).
- Prol, R.: *El calor de la tierra*. Quinta reimpresión. 55 pp. Ciudad de México. (1996).
- Renzoni, G., Rosas, H.: *Mapa Geológico Plancha 171-Duitama. Escala 1:100.000*. INGEOMINAS. Bogotá. (1983).
- Rodríguez, G.: *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. (2015).
- Salazar, S., Muñoz, Y., Ospino, A.: *Analysis of geothermal energy as an alternative source for electricity in Colombia*. Geothermal Energy. Vol 5, No. 27. (2017).
- Velandia, F.: *Informe técnico - Cartografía geológica y estructural sector sur del municipio de Paipa*. INGEOMINAS. Bogotá. pp 32. (2003).