

APLICACIÓN DE UNA METODOLOGÍA DE PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE INFORMACIÓN MAGNETOTELÚRICA SOBRE VARIOS PERFILES LOCALIZADOS EN LA ZONA OCCIDENTAL DEL VOLCÁN NEVADO DEL RUÍZ - COLOMBIA

Oscar Eduardo Rojas Sarmiento^{1,2}

Forma de citar: Rojas-Sarmiento, O.E. 2014. Aplicación de una metodología de procesamiento e interpretación de información magnetotelúrica sobre varios perfiles localizados en la zona occidental del volcán Nevado del Ruíz - Colombia. Boletín de Geología, 36(1): 57-70.

RESUMEN

Este trabajo está enmarcado dentro de un proyecto de investigación geotérmica cofinanciado por ISAGEN y COLCIENCIAS denominado “Modelación de la Estructura Resistiva del Subsuelo a Partir de Sondeos Magnetotelúricos en Áreas Geotérmicas De Colombia, Caso Nevado Del Ruíz”, en el cual a través de un acuerdo de cooperación entre la Universidad Autónoma de México (UNAM), el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y el Centro Internacional de Física (CIF), se ha adquirido información magnetotelúrica compuesta de 105 sondeos localizados al occidente del Nevado del Ruíz. En este trabajo se ilustra la aplicación de una metodología de procesamiento y modelamiento con base en 58 sondeos asociados a cinco (5) perfiles.

La selección de los perfiles se realizó siguiendo criterios como alta densidad de estaciones, proximidad a un pozo perforado en la zona y la posibilidad de atravesar algunas de las estructuras geológicas de superficie más relevantes. En el procesamiento de la información de campo se han utilizado los software SSMT2000 y MTEDITOR de la casa Phoenix Geophysics, en los cuales están programados los algoritmos básicos de procesamiento tales como la transformación al dominio de las frecuencias, el cálculo de los espectros cruzados y auto espectros y la función de transferencia magnetotelúrica; de esta manera es posible obtener como un primer resultado los sondeos magnetotelúricos (MT) expresados en valores de resistividades aparentes y fases para cada frecuencia.

Para la etapa de modelamiento se utilizó el software WinGLink de la casa Geosystem. Como primera aproximación se realizaron inversiones 1D. Se utilizó el invariante del tensor de impedancias con el algoritmo de Bostick (transformada de Bostick), con el algoritmo de Occam y adicionalmente con el modelo discreto de capas de resistividades. Tras un análisis de la dimensionalidad se pasó a la inversión 2D. El procedimiento consistió en rotar el tensor de impedancias a los ejes principales (como primera aproximación) para los perfiles orientados NW (MT 1 y MT 2) y SW (MT 3) y rotar el tensor en dirección E-W para los perfiles orientados N-S (MT 4 y MT 5), selección hecha a partir de la direccionalidad del strike regional encontrado. Para los modelos 2D se usaron los dos modos electromagnéticos (TE y TM) simultáneamente en el proceso de inversión. Finalmente se obtuvieron modelos de resistividad eléctrica a lo largo de los cinco perfiles magnetotelúricos en donde se puede observar que son más precisos los modelos 2D debido a la alta complejidad de la zona (puesto que se aproximan mejor a la información presente en los sondeos).

Palabras Clave: Estructura Resistiva, Procesamiento, Modelamiento, Perfiles MT, Rotación del tensor MT.

¹ Servicio Geológico Colombiano, CIF. orojas@sgc.gov.co

² Centro Internacional de Física (CIF).

APPLICATION OF THE METHODOLOGY OF PROCESSING AND INTERPRETATION OF MAGNETOTELLURIC INFORMATION ON VARIOUS PROFILES LOCATED IN THE WESTERN AREA OF THE NEVADO DEL RUIZ VOLCANO - COLOMBIA.

ABSTRACT

This work is framed within a geothermal research project cofinanced by ISAGEN and COLCIENCIAS called "Modeling Subsurface Structure Resistive From Surveys Magnetotelluric In Geothermal Areas Of Colombia, Case Nevado Del Ruiz" In which through a cooperative agreement between the Universidad Autónoma de México (UNAM) the Servicio Geológico Colombiano (SGC) and the Centro Internacional de Física (CIF) has been acquired magnetotelluric information composed of 105 soundings located to west of the Nevado del Ruiz. This paper illustrates the application of a methodology for processing and modeling based on 58 soundings associated with five (5) profiles.

The selection of the profiles was performed using criteria such as high density of stations, proximity to a well drilled in the area and the possibility of crossing some of the surface geological structures most relevant.

In the data field processing, the SSMT2000 and MTEDITOR software were used, both from the Phoenix Geophysics House, which are programmed in the basic processing algorithms such as transformation to the frequency domain programmed, the cross spectra and auto spectra, and magnetotelluric transfer function; thus is possible to obtain as a first result the MT (magnetotelluric) soundings values expressed in apparent resistivities and phases for each frequency.

For the modeling state we used the winGlink software from the Geosystem house. As a first approximation 1D inversion were made. The invariant curve of the impedance tensor with Bostick algorithm (Bostick Transform), with Occam algorithm and additionally with the model resistivities discrete layers were used. After an analysis of the dimensionality is passed to the 2D inversion. The procedure consisted of rotating the impedances tensor to the main axes (as a first approximation) for profiles oriented NW (MT 1 and MT 2) and SW (MT 3) and rotate the tensor in EW direction for profiles oriented NS (MT 4 and MT 5), selection made from regional strike directionality found.

For the 2 models, two electromagnetic modes (TE and TM) simultaneously in the inversion process were used. Finally, electrical resistivity models were obtained along five magnetotelluric profiles where we can observe that 2D models are more accurated due to the high complexity of the area (as best approach to information present in soundings).

Keywords: Structure resistive, Processing, Modeling, Profiles MT, Rotation MT tensor.

INTRODUCCIÓN

Como parte de la transferencia tecnológica del proyecto sobre el sistema geotérmico del volcán Nevado del Ruiz-Colombia, se ha planteado un ejercicio de aplicación del método magnetotélúrico sobre cinco perfiles MT, en donde inicialmente se reunió información básica acerca del método cuyo propósito es poder definir una metodología de procesamiento que sirva de base para ilustrar las etapas, los criterios involucrados en el análisis de la información, y sus respectivos resultados.

El método magnetotélúrico ha sido la aplicación geofísica reciente más utilizada en la caracterización geofísica de los sistemas geotérmicos, además en prospección minera de recursos metálicos, esto debido

a la posibilidad de identificar la mayor parte de los elementos que componen dicho sistema, tales como la capa sello, la fuente de calor y el reservorio geotérmico, diferenciados por sus contrastes de resistividad eléctrica. Éste es un método electromagnético de fuente natural que mide las variaciones temporales en la superficie de la Tierra de las componentes del campo electromagnético. Según Corbo (2006) el campo medido se compone de dos rangos de frecuencias principalmente, las frecuencias audiomagnetotélúricas que van desde los 10.000 Hz – 1 Hz y las frecuencias magnetotélúricas que van desde 100 Hz – 0,0001 Hz. Las fuentes que generan los campos electromagnéticos en el subsuelo están asociadas principalmente a los fenómenos de interacción entre el viento solar y la magnetósfera de La Tierra (fuente de bajas frecuencias) y a las tormentas

eléctricas (tempestades meteorológicas) que ocurren en la atmósfera del planeta (fuente de altas frecuencias).

Este trabajo tiene como propósito describir las etapas, parámetros y resultados de la aplicación de una metodología de procesamiento y modelamiento de datos magnetotéluricos sobre la estructura del Volcán Nevado del Ruiz-Colombia, que sirva como proceso de análisis y, adicionalmente, determine secciones de resistividad eléctrica que aporten a la definición del sistema geotérmico y a la estructura resistiva asociado a dicha estructura volcánica.

MARCO TEÓRICO

Procesamiento de Información Magnetotelúrica

Estimación Robusta del tensor de transferencia Magnetotelúrica

Según Smirnov (2003) el sistema lineal que se quiere resolver, en el espacio de frecuencias, se expresa como:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

Donde $Z = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix}$ representa el tensor de impedancias magnetotelúricas cuyas componentes son funciones complejas. La relación entre el campo magnético variable como fuente y el campo eléctrico variable como respuesta del medio se puede obtener por medio de la impedancia electromagnética de éste, descrita como un tensor por su carácter vectorial. Esta ecuación se cumple pues para cada frecuencia las incógnitas son las ocho componentes (4 reales y 4 imaginarias) del tensor de impedancias.

Al usar mínimos cuadrados en su solución (método estadístico de estimación clásico), dicho resultado tendría una robustez de cero (alta sensibilidad a efectos puntuales lo cual no es conveniente por la naturaleza de la señal); por otra parte, un procesado “robusto” realiza una estimación más estable ante la presencia de puntos muy sesgados (baja sensibilidad a efectos puntuales); así, un algoritmo alternativo que proporciona robustez es el denominado Estimador de Mediana Repetida de Siegel (1982), cuyo punto de estabilidad de 50% es el más alto posible; el cual se expresa como:

$$T_n^{(j)} = \text{med}_{i_1} \left\{ \dots \left\{ \text{med}_{i_{p-1}} \left\{ \text{med}_{i_p} \left\{ \Theta^{(j)}(i_1, \dots, i_p) \right\} \right\} \right\} \dots \right\} \quad (2)$$

Siendo $T_n^{(j)}$ la estimación de los componentes del tensor de impedancias; donde $\Theta^{(j)}(i_1, \dots, i_p)$ es el j-ésimo

componente del vector de dimensión p de parámetros en búsqueda en el sistema lineal, inequívocamente determinado por un número p de observaciones y $i=1, \dots, n$ son el índice de observaciones.

Dimensionalidad de la estructura geoelectrica

Según Corbo (2006) para la determinación de la dimensionalidad geoelectrica existen diferentes procedimientos matemáticos cuya base en común es el análisis del tensor de impedancias; cuando el método es aplicado en un ambiente unidimensional, el tensor es de la siguiente forma:

$$Z_{1D} = \begin{pmatrix} 0 & Z_{xy} \\ -Z_{xy} & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

Para un ambiente bidimensional o 2D, cuando los ejes del sistema coordenado se alinean paralelo (x) y perpendicular (y) al rumbo de la estructura, el tensor se define de la siguiente forma:

$$Z_{2D} = \begin{pmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

En tanto que en un ambiente geológico tridimensional, el tensor de impedancias es:

$$Z_{3D} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Adicionalmente, existe otra función de transferencia magnetotelúrica denominada Tipper, que relaciona la componente vertical del campo magnético con sus componentes horizontales:

$$H_z = (T_x \ T_y) \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (6)$$

Según Corbo (2006) su aplicación fundamental radica en la resolución de ambigüedades en la determinación de la dirección de la estructura geoelectrica.

Interpretación de sondeos magnetotelúricos

Algoritmos de inversión 1D

Dentro de los diferentes enfoques de inversión 1D se discuten los más utilizados y actualmente accesibles en el software de modelamiento (inversión); estos son la transformada de Bostick y el algoritmo de Occam.

Transformada de Bostick

Según Delgado et al. (2001) la transformada de Bostick crea básicamente una distribución continua de la

resistividad en función de la profundidad propuesta por Bostick (1977) como:

$$\rho(z) = \rho_a(\omega) \left(\frac{\pi}{2\phi(\omega)} - 1 \right) \quad (7)$$

$$Z = \sqrt{\frac{\rho_a(\omega)}{\mu\omega}} \quad (8)$$

Donde ϕ es la fase, μ es la permeabilidad magnética del vacío y ω es la frecuencia angular. Los valores de ρ_a corresponden a las profundidades esperadas de semi espacios isotrópicos y homogéneos de resistividad aparente para cada valor de frecuencia.

Algoritmo de Occam

Según Constable (1987) este algoritmo tiene la ventaja de que obtiene modelos suavizados con el fin de evitar una sobre interpretación de los datos, proceso logrado a partir del concepto de aspereza, que se define como la integral del cuadrado de derivada de las resistividades () respecto a la profundidad z así:

$$R_1 = \int \left(\frac{dm}{dz} \right)^2 dz \quad (9)$$

En el caso discreto puede calcularse como

$$R_1 = \sum_{i=2}^N (m_i - m_{i-1})^2 \quad (10)$$

Donde m_i es la resistividad de la capa i y N el número de capas.

El problema inverso se resuelve buscando el modelo de resistividades que hace mínimo R_1 (modelo más suavizado posible) con la condición de que ajuste los datos suficientemente. Se resuelve mediante el método de los multiplicadores de Lagrange. El funcional a minimizar es:

$$X^2 = R_1 + \lambda \sum_{j=1}^M \frac{d_j - [F_j(m)]^2}{q_j^2} \quad (11)$$

Donde λ es el multiplicador de Lagrange, d_j son los datos, $F_j(m)$ la respuesta del modelo m , M el número de datos y q_j es el error estimado del j -ésimo dato.

Algoritmo de inversión 2D

Para las bajas frecuencias registradas por el método magnetotelúrico (< 10000 Hz) se puede asumir una fuente alejada que genera ondas planas con polarización elíptica e incidencia normal sobre la superficie terrestre. Con esta hipótesis cuando el modelo es 2D y por

tanto el tensor de impedancias es de la forma de (4); las ecuaciones de Maxwell se pueden desacoplar en dos modos de polarización: El modo TE (transverso eléctrico) y el modo TM (transverso magnético), de esta forma se obtiene:

Resistividad aparente para el modo TE

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{\langle E_x \rangle}{\langle H_y \rangle} \right|^2 \quad (12)$$

Donde $\langle E_x \rangle$ es la amplitud del campo eléctrico en la dirección de x y $\langle H_y \rangle$ la del campo magnético en dirección y , para cada frecuencia angular ω .

Y la resistividad aparente del modo TM:

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{\langle E_y \rangle}{\langle H_x \rangle} \right|^2 \quad (13)$$

Donde $\langle E_y \rangle$ y $\langle H_x \rangle$ son las amplitudes de los campos eléctrico y magnético en dirección y y en dirección x respectivamente para cada frecuencia angular. Los campos eléctricos y magnéticos son calculados de forma simultánea a partir del registro de las series temporales, los cuales son discretizados por medio de la función de Hanning o una función rectangular. Así, la solución del problema inverso se puede expresar para cada resistividad aparente (y fase) como la solución m del siguiente sistema lineal:

$$d = F(m) + e \quad (14)$$

Donde d es el vector de datos, m es el vector de parámetros del modelo, e es el vector de error y F es una función de cálculo del modelo directo compuesto por las ecuaciones de maxwell de forma diferencial para un modelo de Tierra bidimensional (2D) (Rodi and Mackie, 2001), el cual es resuelto de forma numérica por medio de diferencias finitas.

Dicha solución se alcanza bajo el condicionamiento de una función objetivo obtenida por Tikhonov and Arsenin (1977) cuyo resultado se denomina como "solución regularizada", la cual plantea una función a minimizar expresada como:

$$\psi(m) = (d - F(m))^T V^{-1} (d - F(m)) + \lambda m^T L^T L m \quad (15)$$

Donde λ es el parámetro positivo de regularización, es la matriz asociada a la varianza del vector error e , L generalmente está relacionado con la matriz de diferenciación de segundo grado, el cual arroja como resultado cuando el modelo de bloques es uniforme el

valor de como el laplaciano de Log p ; el último término de la función objetivo se conoce como un estabilizador de la función sobre el modelo espacial propuesto.

METODOLOGÍA

El muestreo de las componentes electromagnéticas para un punto en la superficie se hizo en función del tiempo según el rango de frecuencias a medir. La geometría del arreglo está definida por dos dipolos eléctricos ubicados perpendicularmente N-S y W-E y tres bobinas magnéticas, dos horizontales en las direcciones N-S y W-E y una en dirección vertical. El objetivo de este arreglo es poder registrar las variaciones temporales del campo electromagnético mientras se difunde en la Tierra (mecanismo de atenuación de la energía electromagnética en la materia). De esta manera 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 y vertical (Z) que pueden definir completamente los componentes del tensor de impedancias y de las funciones de transferencia geomagnética. La información se registra en el campo en forma de series de tiempo. El procesamiento posterior consistió en primer lugar en realizar un control de la calidad del registro (chequeo de la polaridad de las bobinas, de los archivos de configuración de adquisición y de las series de tiempo), a continuación transformar las series de tiempo al dominio de las frecuencias, calcular las componentes del tensor a través de un procesamiento robusto para obtener la resistividad aparente y fase, y aplicar criterios de interpretación partiendo del análisis de distorsiones y de la dimensionalidad y direccionalidad del medio, cuyo resultado es la generación de secciones de resistividad 1D y 2D.

Los criterios de selección de los perfiles fueron procurar una alta densidad de estaciones, la proximidad al pozo Nereidas-1 perforado al suroccidente del área de los sondeos y la posibilidad de atravesar algunas de las estructuras geológicas superficiales más relevantes. El procedimiento de procesamiento e interpretación descrito es una contribución a otras alternativas de procesamiento y modelamiento disponibles en la literatura.

Localización

El área donde se efectuaron las mediciones de magnetotelúrica está ubicada en la Cordillera Central de Colombia, al occidente del volcán Nevado del Ruiz. Este edificio volcánico hace parte del arco volcánico actual de la Cordillera Central, el cual está relacionado a la subducción de la Placa de Nazca bajo el Bloque

Norte de los Andes (Meissner *et al.*, 1977; Cediél *et al.*, 2003). Este arco volcánico que tiene como edificios extremos el volcán Machín, al sur, y el volcán Cerro Bravo, al norte, separados entre sí alrededor de 68 km, ha sido denominado Complejo Volcánico Ruiz-Tolima. El volcán Nevado del Ruiz se encuentra a 24,5 km al sur del Cerro Bravo.

El complejo volcánico Ruiz-Tolima forma el eje altitudinal de dicha cordillera y sus productos cubren de manera discontinua el basamento metamórfico, definido como Complejo Cajamarca y cuya edad ha sido determinada como Paleozoico inferior (Nelson, 1962; Mosquera *et al.*, 1998; González, 2001). Las rocas que forman este basamento corresponden a esquistos cuarzo-alumínicos, intercalados con esquistos cuarzo-sericiticos grafitosos y cuarcitas (Nelson, 1962; Mosquera *et al.*, 1998; González, 2001). Al W y NW del volcán Nevado del Ruiz, el Complejo Cajamarca se encuentra intruido por los pórfidos dacíticos del Stock de Manizales, de edad Paleoceno (González, 2001; Monsalve y Méndez, 1997).

Los sondeos de magnetotelúrica se efectuaron en el lado occidental de la estructura volcánica del Nevado del Ruiz, sobre los productos volcánicos y sobre los esquistos cuarzo-sericiticos grafitosos del Complejo Cajamarca. La distribución de los sondeos estuvo condicionada por el relieve que forman los productos volcánicos y las rocas metamórficas, fuertemente disectados por corrientes que descienden del edificio volcánico hacia el W para tributar al río Cauca.

La ubicación espacial de los sondeos adquiridos por la UNAM, el SGC y el CIF, y la ubicación de los cinco perfiles analizados en este trabajo se puede observar en la FIGURA 1. El análisis se llevó a cabo en cada perfil. La ubicación y dirección del perfil MT1 (FIGURA 1) se escogió con el fin de integrar la información del pozo existente y que sirviera de amarre de los modelos de resistividad en los primeros 1.000 m. Por esta razón se consideró el inicio del perfil muy cerca del pozo y se extendió hacia el noroccidente coincidiendo con los demás sondeos. La ubicación del perfil MT2 (FIGURA 1) se escogió con el objetivo de poder intersectar al perfil MT1 y que a su vez tuviera una dirección cercanamente perpendicular al perfil MT1. Para el perfil MT3 (FIGURA 1) la ubicación se escogió con el objetivo de poder intersectar al perfil MT1 y MT2 en el punto donde se encuentra el sondeo NR11. Este sondeo presenta la ventaja de estar situado en el centro de la zona y resultó con datos excelentes, libres de ruido, posibilitando así un mejor análisis del comportamiento de la resistividad hacia la parte más cercana del

basamento aflorante o complejo Cajamarca (bajo el sondeo NR 21C y NR 37), teniendo en cuenta que esta zona se encuentra más alejada del sistema volcánico en estudio. La orientación y ubicación de los perfiles

MT4 y MT5 se definió (FIGURA 1) con el propósito de atravesar las estructuras geológicas superficiales más relevantes en dirección N-S y que presentaran un elevado número de sondeos.

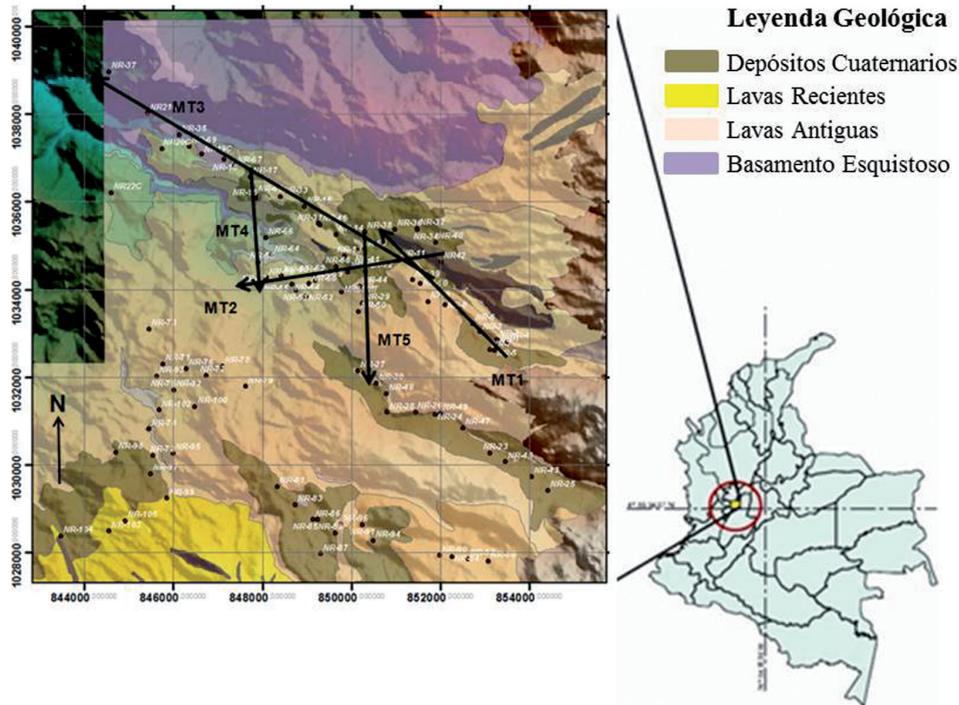


FIGURA 1. Ubicación aproximada de los perfiles MT1, MT2, MT3, MT4 y MT5 en líneas negras, en colores coberturas geológicas, los colores oscuros y claros de los extremos occidentales y orientales son las elevaciones que van de menor a mayor respectivamente y los puntos negros con rellenos rojo son las estaciones MT.

Procesamiento

En esta etapa se utilizaron los *software* de procesamiento SSMT2000 y MTEEDITOR de Phoenix Geophysics. Para cada uno de los sondeos se tuvo en consideración los siguientes parámetros de procesamiento:

- Generación de cuatro frecuencias por octava a partir de las series temporales.
- Usar el campo magnético local H como referencia para la función de coherencia.
- Utilizar la función de coherencia múltiple con un cutoff de 0,9 en la determinación del tensor de impedancias.
- Utilizar la función de varianza de la resistividad aparente con un cutoff de 0,9 en la determinación de la resistividad aparente.

Una vez se han procesado los sondeos, se obtiene el tensor de impedancias y a continuación se realiza el análisis de la dimensionalidad de la estructura de resistividad eléctrica, mediante el método de Bahr

(1991). En el caso de que aparezca una dirección dominante se escoge ésta como dirección de strike y se calculan las curvas de resistividad aparente y fase para los modos TE y TM. Para estos perfiles el resultado del análisis de Bahr se resume en las TABLAS 1, 2, 3, 4, 5 y 6.

TABLA 1. Descripción de los perfiles de resistividad.

Perfil	Sondeos	Dirección
MT1	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,38,39	N 50° W.
MT2	11,12,40,42,53,54,55,56,57,62,68,70	S75°W
MT3	11,14,15,17,18,19,21,31,33,35,37,63,65,67,69	N60°W
MT4	16,17,55,56,58,64,65,66	N-S
MT5	12,13,27,29,30,38,41,44,50,63	N-S

TABLA 2. Direccionalidad y dimensionalidad obtenida (Método de Barh, 1991) para los sondeos del perfil MT1 a partir del análisis de los componentes del tensor de impedancias.

Rango de frecuencias	Dimensionalidad	Ejes principales	Profundidad estimada
10500Hz-640Hz	3D	Todas las direcciones excepto en los sondeos 8 y 9 (homogéneos)	0m a 80m
640Hz-1Hz	2D	Eje principal sobre el cuadrante NW (entre 15° y 70°)	80m-800m
1Hz-0,1Hz	2D	Eje principal sobre el N-N20°W sobre los sondeos 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 y eje principal sobre el N-N20°E sobre los sondeos 8, 9, 10, 11	800m-2.000m
0,1Hz-0,001Hz	2D	Eje principal sobre el N-N20°W sobre los sondeos 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 y eje principal sobre el N-N20°E sobre los sondeos 8, 9, 10, 11	2.000m-15.000m

TABLA 3. Direccionalidad y dimensionalidad obtenida (Método de Barh, 1991) para los sondeos del perfil MT2 a partir del análisis de los componentes del tensor de impedancias.

Rango de frecuencias	Dimensionalidad	Ejes principales	Profundidad estimada
10500Hz-10Hz	2D	Eje principal al N N45°-70°W	20m- 800m
10Hz-0,1Hz	2D	Eje principal al N N45°-70°W	800m-2000m
0,1Hz-0,015Hz	2D-3D	Eje principal al N N45°-70°W	2.000m-10.500m

TABLA 4. Direccionalidad y dimensionalidad obtenida (Método de Barh, 1991) para los sondeos del perfil MT3 a partir del análisis de los componentes del tensor de impedancias.

Rango de frecuencias	Dimensionalidad	Ejes principales	Profundidad estimada
10500Hz-10Hz	2D	Eje principal al N N45°-70°W	20m- 800m
10Hz-0,1Hz	2D	Eje principal al N N45°-70°W en los sondeos 64, 14, 31, 65, 69 y 35 y eje principal al N 30° E en los sondeos 11, 15, 19, 21 y 37	800m-2.500m
0,1Hz-0,001Hz	2D-3D	Eje principal al N N45°-70°W en los sondeos 64, 14, 31, 65, 69 y 35 y eje principal al N 30° E en los sondeos 11, 15, 19, 21 y 37	2.500m-15.000m

TABLA 5. Direccionalidad y dimensionalidad obtenida (Método de Barh, 1991) para los sondeos del perfil MT4 a partir del análisis de los componentes del tensor de impedancias.

Rango de frecuencias	Dimensionalidad	Ejes principales	Profundidad estimada
10500Hz-10Hz	2D	Eje principal al N N45°-80°W	20m- 800m
10Hz-0,1Hz	2D	Eje principal al N N45°-80°W	800m-2.500m
0,1Hz-0,015Hz	2D-3D	Eje principal al N N45°-80°W	2.500m-10.500m

TABLA 6. Direccionalidad y dimensionalidad obtenida (Método de Barh, 1991) para los sondeos del perfil MT5 a partir del análisis de los componentes del tensor de impedancias.

Rango de frecuencias	Dimensionalidad	Ejes principales	Profundidad estimada
10500Hz-10Hz	2D	Eje principal al N N50°-75°W	20m- 800m
10Hz-0,1Hz	2D	Eje principal al N N45°-80°W	800m-2.500m
0,1Hz-0,015Hz	2D-3D	Eje principal al N N50°-75°W	2.500m-10.500m

Modelamiento

Una vez han sido procesados y corregidos los sondeos magnetotelúricos de las distorsiones galvánicas *Static Shift*, el siguiente proceso es la inversión de las curvas de resistividad aparente y fase usando el *software* WinGLink de Geosystem SRL. Antes de llevar a cabo el proceso de inversión, es necesario aplicar un método de análisis dimensional y direccionalidad del medio con el objetivo de seleccionar el algoritmo de inversión adecuado, 1D, 2D o 3D que mejor represente al medio. El método utilizado aquí es el de Barh (1991), en el cual se calculan y grafican todos los elementos de la matriz de transferencia magnetotelúrica y, de acuerdo con el patrón mostrado, se clasifican en 1D, 2D o 3D.

En la interpretación (inversión) 1D y 2D se han utilizado los algoritmos ofrecidos por el programa de interpretación WinGLink, los cuales son Bostick, Occam y discreto de capas para el análisis 1D; y el algoritmo de Randy Mackie (Geosystem SRL, 2008; Rodi and Mackie, 2001) para el análisis 2D. En la inversión 1D como 2D es necesario definir los parámetros más adecuados dependiendo del set de datos y los objetivos propuestos. A continuación se muestran dichos parámetros en términos generales:

Modelos 1D

En el modelamiento 1D se ha seleccionado el invariante (Geosystem SRL, 2008) del tensor de impedancias. Esta curva tiene la propiedad de que no cambia con la dirección de rotación del tensor de impedancias y, por este motivo es considerada en la bibliografía como la impedancia efectiva del medio.

Los modelos de Occam y de Bostick son modelos de resistividades muy suavizados, lo cual pueden o no corresponder a una distribución geológica real que normalmente consiste en un paquete formado por diferentes tipos de rocas que han sido depositadas y modificadas en diferentes tiempos y bajo diferentes factores. Por esta razón es interesante el modelo discreto de capas que representa distribuciones de resistividad mucho más contrastantes y discretas que los modelos suavizados de Bostick y Occam.

Modelos 2D

Para el cálculo de los modelos de resistividad 2D se ha utilizado el algoritmo de Randy Mackie (Geosystem SRL, 2008), aplicando como una primera aproximación la rotación del tensor de impedancias según los ejes principales (direcciones ortogonales donde las impedancias se hacen máxima y mínima). Se han

utilizado los siguientes parámetros para cada uno de los modos electromagnéticos:

- Frecuencias entre 1000 Hz y 0,001 Hz
- Valores interpolados entre décadas: 5 frecuencias
- Valor de τ de 2 y 3 (Factor de suavizado bajo)
- Valor de Error de base de 1.5 %

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se han obtenido secciones de resistividad 1D y 2D para cada uno de los cinco perfiles analizados. En general, en cada uno de ellos se pueden apreciar las diferencias entre un algoritmo y otro aún bajo un mismo análisis dimensional (caso 1D). Para las secciones 2D se puede apreciar un comportamiento similar donde principalmente se observan variaciones en la geometría y profundidades de los cuerpos modelados.

En esta aplicación, el análisis dimensional apunta en todos los perfiles a un medio 2D cumpliéndose el caso de la ecuación 4; sin embargo se determinaron modelos 1D adicionalmente como ejercicio de comparación.

Para el perfil MT1 en el análisis 1D, el modelo obtenido de Bostick (FIGURA 2) presenta un RMS de 11.85 % mientras que el modelo de Occam (FIGURA 3) presenta un RMS de 9,65 %, en tanto que el modelo 2D (FIGURA 4) presenta un RMS de 8,51 %; en todos se observa la presencia de un cuerpo conductor profundo de dimensiones importantes que varía de geometría dependiendo del algoritmo de inversión utilizado.

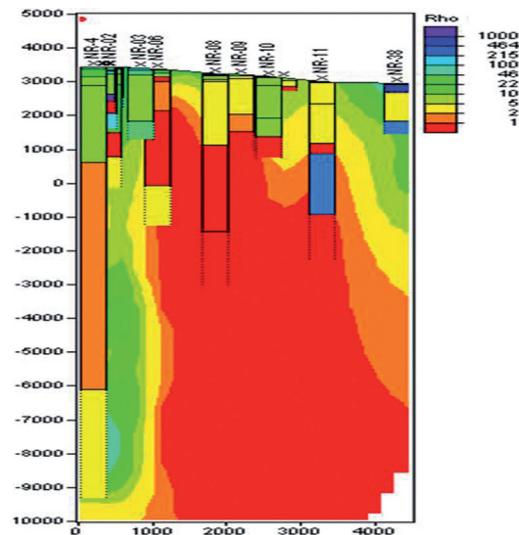


FIGURA 2. Sección de resistividad de Bostick 1D de los sondeos del perfil MT1 rotados a los ejes principales, generada a partir de la inversión del invariante o impedancia efectiva y la fase, y superpuestos como columnas los modelos de capas 1D. Rho (ohm.m). Profundidad (m).

De forma similar se observa en el perfil MT2 que el análisis 1D de Bostick (FIGURA 5) presenta un RMS de 9,72 %, mientras que el modelo de Occam (FIGURA 6) presenta un RMS de 10,59 %, en tanto que el análisis 2D (FIGURA 7) presenta un RMS de 8,26 %; en los

tres modelos se observa el mismo conductor en la parte oriental del perfil (coincidente con el cuerpo conductor en MT1) y hacia la parte occidental una zona de alta conductividad somera sobre un cuerpo de profundidad media de alta resistividad.

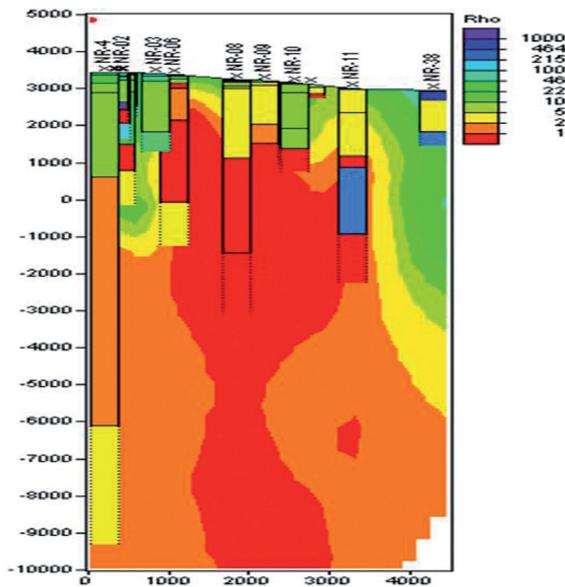


FIGURA 3. Sección de resistividad de Occam 1D de los sondeos del perfil MT1 rotados a los ejes principales, generada a partir de la inversión del invariante o impedancia efectiva y la fase, y superpuestos como columnas los modelos de capas 1D. Rho (ohm.m). Profundidad (m).

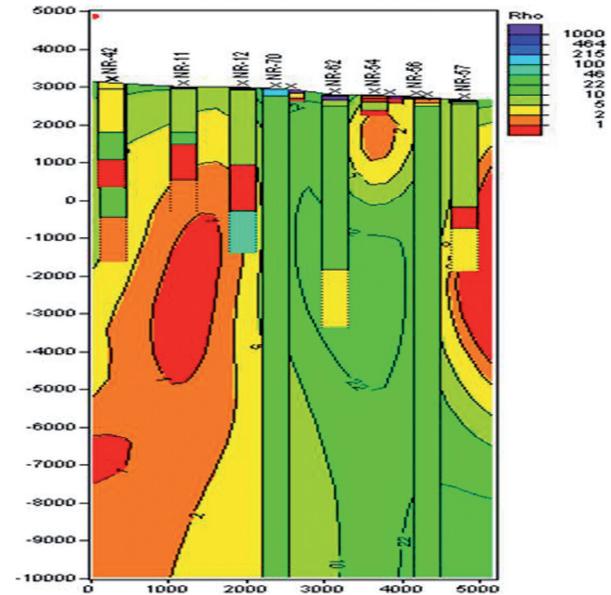


FIGURA 5. Sección de resistividad de Bostick 1D de los sondeos del perfil MT2 rotados a los ejes principales, generada a partir de la inversión del invariante o impedancia efectiva y la fase, y superpuestos como columnas los modelos de capas 1D. Rho (ohm.m). Profundidad (m).

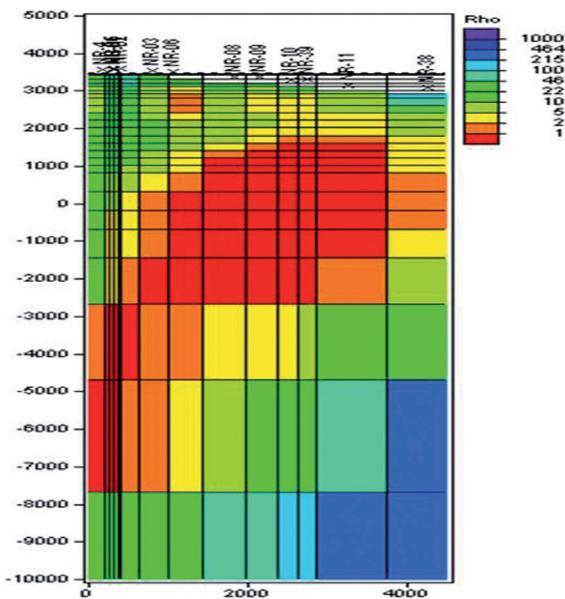


FIGURA 4. Sección de resistividad 2D de los sondeos del perfil MT1 rotados a los ejes principales, generada a partir de la inversión de los modos TE y TM con el algoritmo suavizado creado por Randy Mackie. Rho (ohm.m). Profundidad (m).

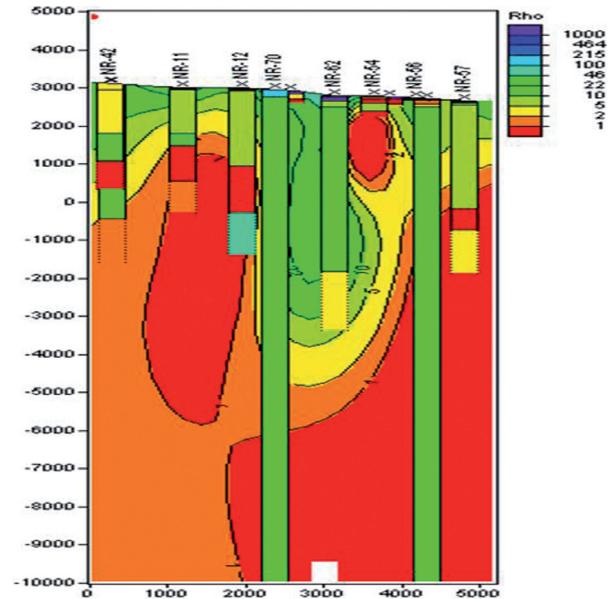


FIGURA 6. Sección de resistividad de Occam 1D de los sondeos del perfil MT2 rotados a los ejes principales, generada a partir de la inversión del invariante o impedancia efectiva y la fase, y superpuestos como columnas los modelos de capas 1D. Rho (ohm.m). Profundidad (m).

De forma similar se observa en el perfil MT3 que el análisis 1D de Bostick (FIGURA 8) presenta un RMS de 10,37 %, mientras que el modelo de Occam (FIGURA 9) presenta un RMS de 12,81 %, en tanto que el análisis

2D (FIGURA 10) presenta un RMS de 9,76 %; en los tres modelos se encuentra un cuerpo resistivo de grandes dimensiones debajo de una zona de alta conductividad superficial con una importante extensión lateral.

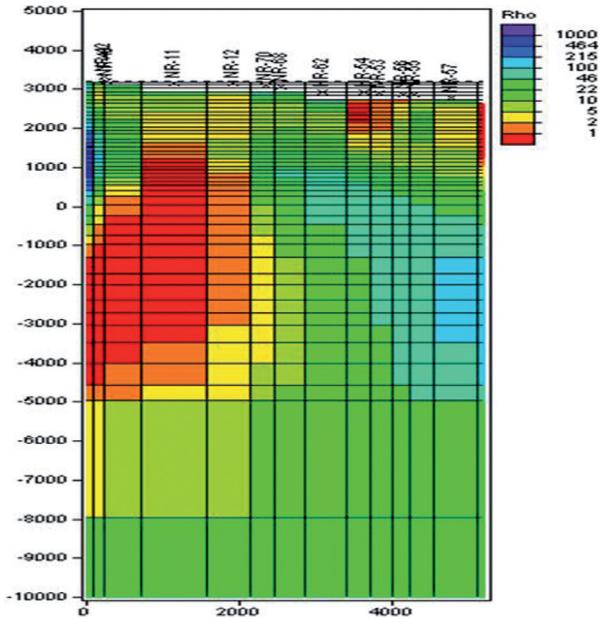


FIGURA 7. Sección de resistividad 2D de los sondeos del perfil MT2 rotados a los ejes principales, generada a partir de la inversión de los modos TE y TM con el algoritmo suavizado creado por Randy Mackie. Rho (ohm.m). Profundidad (m).

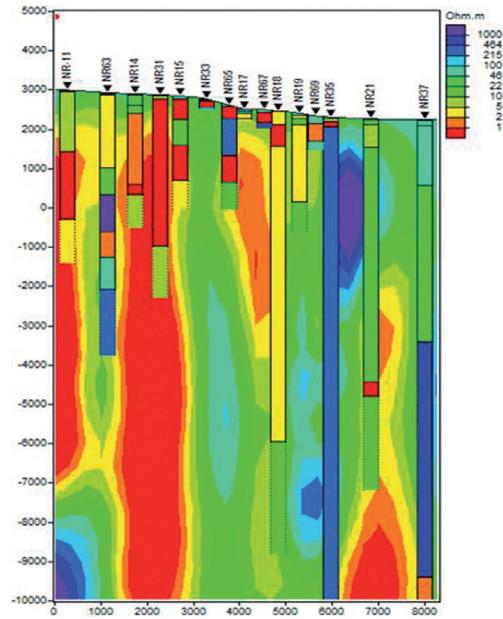


FIGURA 9. Sección de resistividad de Occam 1D de los sondeos del perfil MT3 rotados a los ejes principales, generada a partir de la inversión del invariante o impedancia efectiva y la fase, y superpuestos como columnas los modelos de capas 1D. Rho (ohm.m). Profundidad (m).

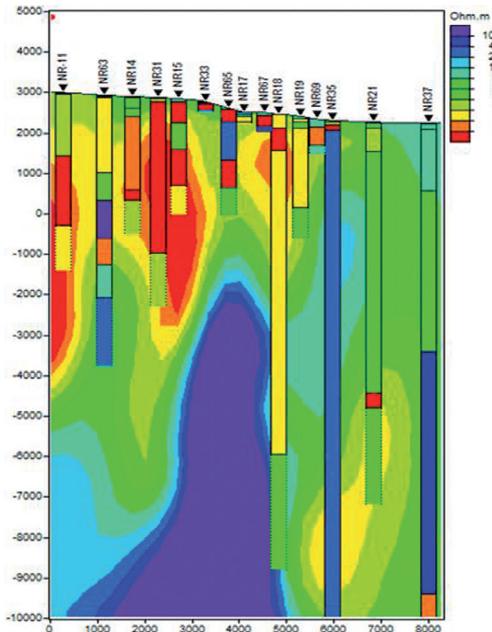


FIGURA 8. Sección de resistividad de Bostick 1D de los sondeos del perfil MT3 rotados a los ejes principales, generada a partir de la inversión del invariante o impedancia efectiva y la fase, y superpuestos como columnas los modelos de capas 1D. Rho (ohm.m). Profundidad (m).

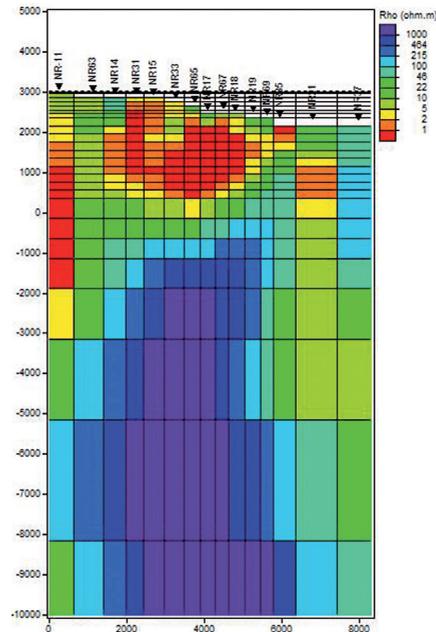


FIGURA 10. Sección de resistividad 2D de los sondeos del perfil MT3 rotados a los ejes principales, generada a partir de la inversión de los modos TE y TM con el algoritmo suavizado creado por Randy Mackie. Rho (ohm.m). Profundidad (m).

Para el perfil MT4 se aprecia un cuerpo conductor de grandes dimensiones presente en el análisis 1D de Bostick (FIGURA 11) con RMS de 10,41 % y en el análisis de Occam (FIGURA 12) con RMS de 13,53 % donde ha predominado la fase de la señal, en tanto que para el análisis 2D (FIGURA 13) con un RMS de 11,58 % se observa un cuerpo resistivo de gran tamaño y profundidad, debajo de una zona de alta conductividad somera.

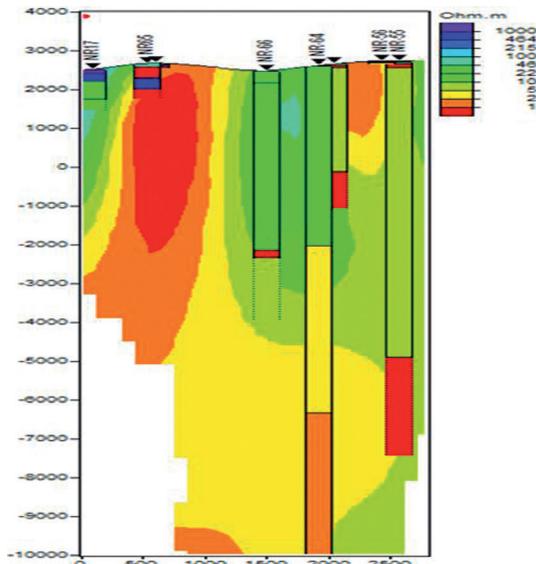


FIGURA 11. Sección de resistividad de Bostick 1D de los sondeos del perfil MT4 rotados al E-W, generada a partir de la inversión del invariante o impedancia efectiva y la fase, y superpuestos como columnas los modelos de capas 1D. Rho (ohm.m). Profundidad (m).

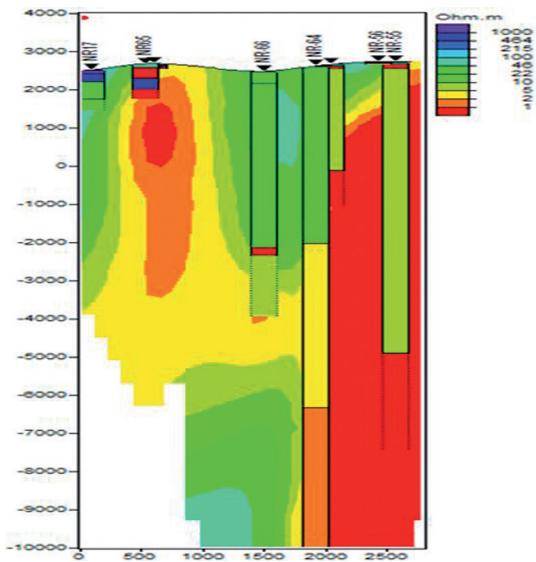


FIGURA 12. Sección de resistividad de Occam 1D de los sondeos del perfil MT4 rotados al E-W, generada a partir de la inversión del invariante o impedancia efectiva y la fase, y superpuestos como columnas los modelos de capas 1D. Rho (ohm.m). Profundidad (m).

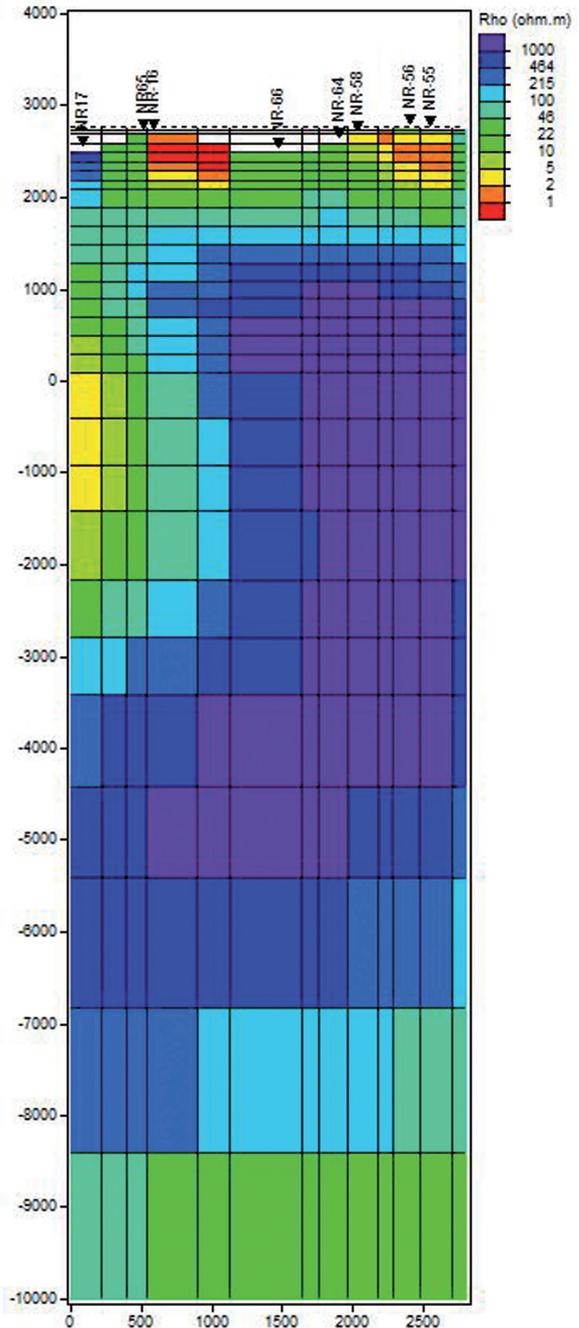


FIGURA 13. Sección de resistividad 2D de los sondeos del perfil MT4 rotados al E-W, generada a partir de la inversión de los modos TE y TM con el algoritmo suavizado creado por Randy Mackie. Rho (ohm.m). Profundidad (m).

Para el perfil MT5 se observan en los modelos 1D de Bostick (FIGURA 14) con RMS de 14,92 % y de Occam (FIGURA 15) con RMS de 12,57 %, como también en el análisis 2D (FIGURA 16) con RMS de 9,93 % un cuerpo conductor importante con extensión lateral considerable, debajo de una zona resistiva somera hacia la parte sur del perfil.

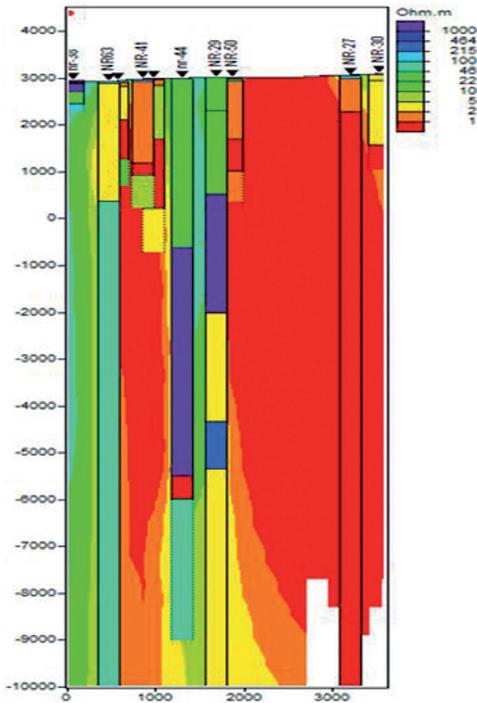


FIGURA 14. Sección de resistividad de Bostick 1D de los sondeos del perfil MT5 rotados al E-W, generada a partir de la inversión del invariante o impedancia efectiva y la fase, y superpuestos como columnas los modelos de capas 1D. Rho (ohm.m). Profundidad (m).

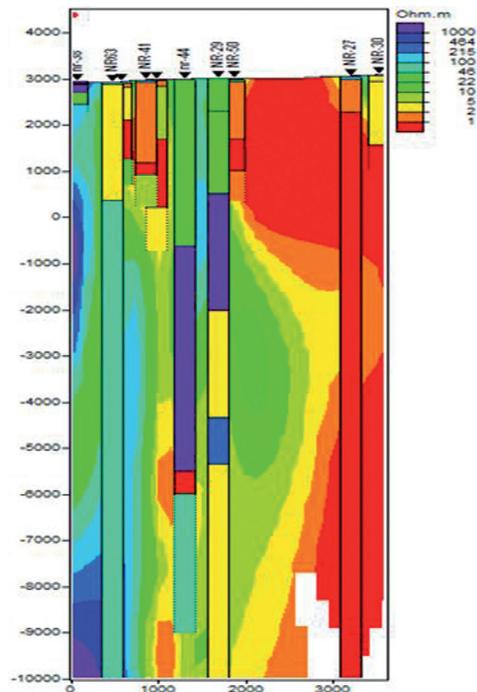


FIGURA 15. Sección de resistividad de Occam 1D de los sondeos del perfil MT5 rotados al E-W, generada a partir de la inversión del invariante o impedancia efectiva y la fase, y superpuestos como columnas los modelos de capas 1D. Rho (ohm.m). Profundidad (m).

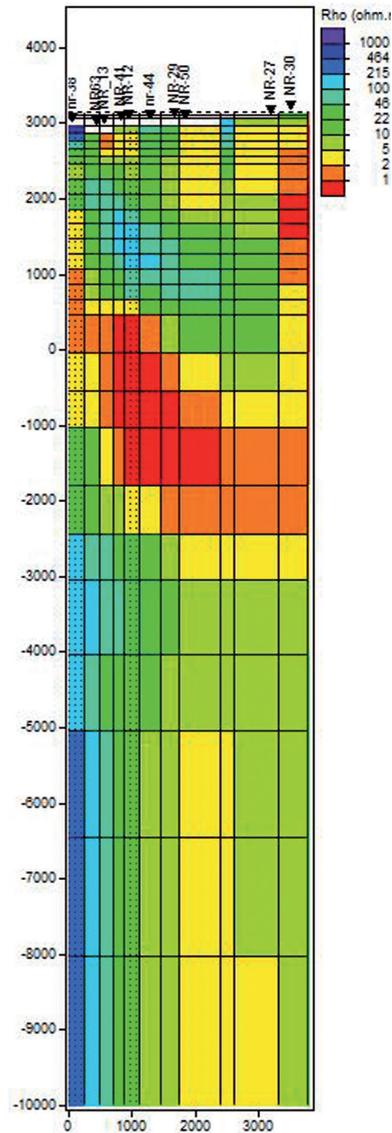


FIGURA 16. Sección de resistividad 2D de los sondeos del perfil MT5 rotados al E-W, generada a partir de la inversión de los modos TE y TM con el algoritmo suavizado creado por Randy Mackie. Rho (ohm.m). Profundidad (m).

CONCLUSIONES

El análisis de la información magnetotelélica está enfocada en dos etapas fundamentales que son: 1) La determinación de la resistividad aparente para cada frecuencia y, 2) La adecuada interpretación (aplicación de un algoritmo de inversión acorde con dimensionalidad y consistencia con las curvas de campo) de las curvas de resistividad aparente y fase.

En la segunda etapa de análisis (modelación o inversión de datos) el proceso de mayor sensibilidad en la generación de los modelos de inversión es el ajuste

de las curvas de resistividad, en donde se corrigen los efectos galvánicos, dependiendo del buen resultado de esta etapa se obtendrán modelos inversos 1D y 2D estables ante cambios en los parámetros de inversión.

De acuerdo con el análisis de dimensionalidad y direccionalidad, los modelos 2D se aproximan más a la distribución de la resistividad del medio, sin embargo en este estudio particular se ha encontrado que en algunos perfiles el análisis 1D logra definir de una manera muy cercana la geometría de las anomalías vistas en las curvas de resistividad aparente.

De las secciones de resistividad se puede concluir la presencia de un cuerpo conductivo de gran importancia de carácter profundo localizado en la parte S-E del área, sobre los perfiles MT1, MT2 y MT5, también se observa un cuerpo resistivo de gran tamaño y profundidad hacia el sector N-W del área, sobre los perfiles MT3 y MT4, una zona de alta conductividad somera y relativamente continua lateralmente ubicada sobre la zona central del estudio, sobre una zona de resistividad media.

AGRADECIMIENTOS

Durante el desarrollo de este trabajo fue muy importante todo el apoyo recibido por parte del Servicio Geológico Colombiano, especialmente por parte de Claudia Alfaro por su gran aporte en la orientación y supervisión del trabajo, Dr. Geol. Jaime A. Romero León por su revisión, sugerencias y aportes a nivel geológico a la versión concluida de este documento, también a Patricia Ponce, Adriana Ortega e Ismael Moyano por su valioso aporte en el procesamiento y modelamiento de datos magnetotéluricos. Adicionalmente al grupo de la UNAM de México por sus cursos de capacitación acerca del método magnetotélurico, en especial al Profesor Jorge Arzate y finalmente al Profesor Jaume Pous de la Universidad de Barcelona por su pertinente revisión y sugerencias a la versión concluida.

REFERENCIAS

Bahr K., 1991. Geological noise in magnetotelluric data: a classification of distortion types. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 66: 24-38.

Bostick, F.X. 1977. A simple almost exact method of magnetotelluric analysis. In: Ward, S. (ed.), *Workshop of Electrical Methods in Geothermal Exploration*, Univ. of Utah, Res. Inst., U.S. Geol. Surv.

Cediel, F., Shaw R.P., and Cáceres, C. 2003. Tectonic Assembly of the Northern Andean Block, in C.

Bartolini, et al, Eds., *The Circum-Gulf of Mexico and the Caribbean: Hydrocarbon habitats, basin formation and plate tectonics: AAPG Memoir 79: 815-848.*

Constable, S.C. 1987. Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52 (3): 289-300.

Corbo, F. 2006. Modelo geofísico del acuífero guaraní: zona comprendida entre Uruguay y Argentina. Tesis de maestría en Geofísica Universidad Autónoma de México.

Delgado, O., Campos, O., Urrutia, J., and Arzate, J. 2001. Occam and Bostick 1-D inversion of magnetotelluric sounding in the Chicxulub impact crater, Yucatan Mexico. *Universidad Nacional Autónoma de México. Revista Geofísica Internacional*, 40: 277.

González, H. 2001. Geología de las Planchas 206 Manizales y 225 Nevado del Ruiz. Memoria explicativa. Publicación Digital INGEOMINAS.

Meissner, R.O., Flueh, E.R., Stibane, F., y Berg, E. 1977. Dinámica del límite de placas activo en el SW de Colombia de acuerdo a recientes mediciones geofísicas, en *Transición Océano-Continente en el Suroeste de Colombia*, eds Ramirez, J.E. y Aldrich, L.T., Instituto Geofísico - Universidad Javeriana, Bogota, Colombia, pp. 169-198,

Monsalve, M.L., y Méndez, R. 1997. Geología superficial del área geotérmica de Nereidas (Nevado del Ruiz) INGEOMINAS. Manizales, 21p.

Mosquera, D., Marín, P., Vesga, C., y González, H. 1998. Geología de la Plancha 225 Nevado del Ruiz. Esc. 1:100.000. INGEOMINAS.

Nelson, W.H. 1962. Contribución al conocimiento de la Cordillera Central de Colombia: Sección Ibagué y Armenia. *Boletín Geológico, INGEOMINAS*, 10 (1-3): 161-202.

Rodi, W., and Mackie, R. 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 66 (1): 174-187.

Siegel, A.F. 1982. Robust regression using repeated medians. *Biometrika*, 69: 242-244.

Smirnov, M. 2003. Magnetotelluric data processing with a robust statistical procedure having a high

*Aplicación de una metodología de procesamiento e interpretación de información magnetotélúrica sobre
varios perfiles localizados en la zona occidental del volcán Nevado del Ruiz - Colombia*

breakdown point. Department of Earth Sciences,
Uppsala University, Geophysics, 152: 1–7.

Tikhonov, A. N. and Arsenin, V. Y., 1977, “Solution of
Ill-Posed Problems”, Winston & Sons, Washington, DC

Trabajo recibido: diciembre 21 de 2012

Trabajo aceptado: diciembre 16 de 2013