

PROSPECCIÓN MAGNETOTELÚRICA PARA EXPLORACIÓN DE ZONAS DE FAJA PLEGADA- CUENCA NOROESTE

Cristian Jesús Alberto Ortiz¹, Juan Andrés Bascur², Laura Mariana Longo¹

1: YPF, cristian.j.a.ortiz@ypf.com, laura.longo@ypf.com

2: Wellfield, jbascurneococoliso@gmail.com

Palabras claves: Magnetotelúrica, Faja plegada, Resistividad aparente

ABSTRACT

Magnetotelluric prospection for exploration of folded belt areas - northwest basin

The study area is located in the northeast of the province of Salta, near the Aguas Blancas town. The structural complexity, typical of areas of folded belt, makes it difficult to obtain an adequate seismic image, which leads to other geophysical methods becoming important. Therefore, a profile of magnetotelluric (MT) stations was acquired, with the purpose of complementing the preexisting information, and evaluating the performance of the method as a technique for prospecting hydrocarbons in complex zones that are at the same time environmentally and logistically sensitive. 30 linearly arranged stations, spaced 500 m, were used. The location of the profile was chosen in such a way that it passes through an available well. In each station the time fluctuations of the components of the total surface electromagnetic fields (Ex, Ey, Hx, Hy and Hz) during a minimum of 18 hours in a frequency range of 10 KHz to 0.001 Hz were measured. Interpretative parameters and pseudosections of apparent resistivity and phase characteristic of the method were analyzed. This helped to understand the shapes of the structures, and later the 2D resistivity profile of the subsurface was obtained. The analysis of these data, integrated with the information of resistivity logs measured in wells and lithological description, gravimetry, seismic and structural models has allowed the construction of a reliable 2D geophysical model of the internal structure of the area.

INTRODUCCIÓN

Entre el 18 de marzo y 10 de abril de 2017 se llevó a cabo un estudio magnetotelúrico (MT) en la Cuenca Noroeste. Este método mide las variaciones temporales del campo electro magnético natural a través de sensores distribuidos sobre la superficie. Los datos MT fueron registrados en el rango de 10 kHz a 0,001 Hz. Los datos registrados fueron procesados para obtener las funciones de transferencia de magnetotelúrica: Tensor de Impedancia y Función de transferencia Geomagnética (Tipper) que describen la distribución de resistividad eléctrica del subsuelo.

A partir de los datos MT se invirtieron secciones verticales de resistividad eléctrica utilizando inversión 2D con el código Winklink (Rodi & Mackie, 2001), cuyos resultados fueron analizados en conjunto con los registros de pozos y gravimetría.

Esta técnica permitió obtener información de la configuración resistiva del subsuelo, el cual se caracteriza por presentar estructuras complejas.

Marco geológico del área de estudio

Según Starck *et al.*, 2005, la configuración estructural presente del área se debe principalmente al accionar de la tectónica andina. Las diferentes fases compresivas andinas plegaron y fallaron el prisma sedimentario de la mitad occidental de la cuenca, involucrándolo en el Orógeno Andino. La mitad oriental de la cuenca fue poco afectada por la tectónica andina y permanece, casi sin deformar, en el subsuelo del antepaís.

En las latitudes correspondientes al área de estudio, el Orógeno Andino presenta un piedemonte externo caracterizado por una tectónica de lámina delgada (“thin skin”) conocido como Sierras Subandinas. Al oeste del mismo, en una situación más interna, se desarrolla la Cordillera Oriental, con un estilo de lámina gruesa (“thick skin”).

Las Sierras Subandinas (Fig. 1) consisten en una faja plegada y corrida y en superficie se componen principalmente de unos 7 trenes estructurales positivos orientados en dirección SSO-NNE y de gran desarrollo longitudinal. Cada uno de estos trenes está conformado por anticlinales más o menos fallados en su flanco que involucran a las distintas unidades del Carbónico al Terciario, que se acomodan sobre un núcleo conformado por las pelitas de la Fm. Los Monos fuertemente deformadas. Los anticlinales superficiales se encontraban despegados por encima de estructuras positivas desarrolladas en niveles silúricos y devónicos.

Se reconocen los siguientes niveles que corresponden a un modelo estructural:

- i- Basamento estructural: comprende las unidades anteriores al Silúrico y no participa de la deformación.
- ii- Nivel estructural inferior: comprende unidades del Silúrico y el Devónico Medio (Fm. Kirusillas, Santa Rosa, Icla, Huamampampa y parte de Los Monos) que conforman las estructuras profundas. Está limitada por niveles de despegue localizados en la Fm. Kirusillas y base de Los Monos.
- iii- Nivel estructural intermedio: compuesto por la parte media de Los Monos y está limitada por niveles de despegue. Es responsable del desacople entre las estructuras profundas y superficiales. Alta deformación, se llega a triplicar el espesor estratigráfico de la Fm. Los Monos.
- iv- Nivel estructural superior: Comprende todas las unidades desarrolladas por encima del nivel de despegue localizado en la parte alta de la Fm. Los Monos. Conforman las unidades aflorantes.

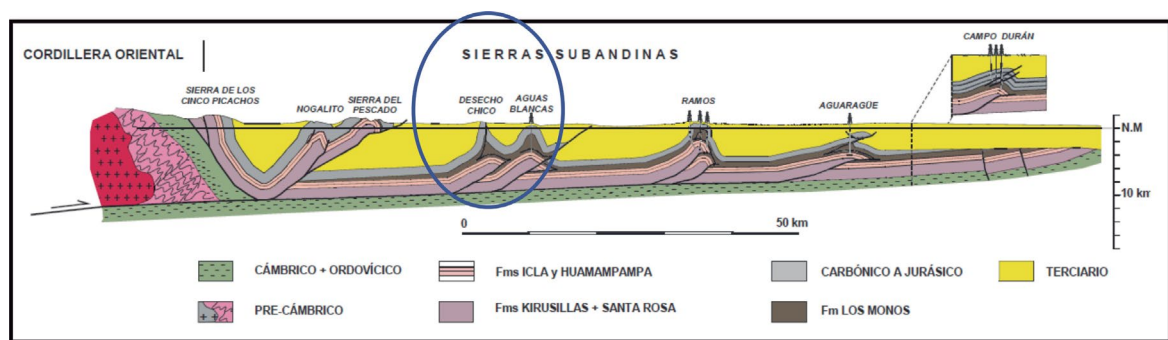


Figura 1. Corte estructural O-E de las Sierras Subandinas (tomado de Starck *et al.*, 2005). En óvalo azul se marca la zona de estudio.

METODOLOGÍA

Adquisición

La adquisición del perfil magnetotelúrico se llevó a cabo por la empresa Wellfield S.A a pedido de YPF S.A. Se registraron 30 estaciones espaciadas 500 metros ubicadas linealmente. En cada punto de MT se registraron las series de tiempo de las tres componentes del campo magnético (H_x , H_y y H_z) y las dos componentes horizontales del campo eléctrico, (E_x y E_y), durante un mínimo de 18 horas. Se utilizaron 5 sistemas MTU (Phoenix Geophysics) sincronizados por vía GPS y operados por 2 cuadrillas de personal.

Procesamiento y análisis de las respuestas magnetotelúricas

Las series temporales obtenidas se transformaron al dominio de la frecuencia y se calcularon las funciones de transferencia de MT (Vozoff 1972): Tensor de Impedancias $[Z]$ y Vector Tipper T en un rango de frecuencia de 0,001 Hz - 10 kHz. Con las componentes de $[Z]$ se calcularon las curvas de resistividad aparente y fase (Fig. 2) para todas las estaciones, y parámetros interpretativos de dimensionalidad y orientación.

Las componentes del tensor de impedancias $[Z]$ son magnitudes complejas, que establecen la relación entre las componentes horizontales del campo eléctrico (E_x , E_y) y la intensidad magnética (H_x , H_y). A la relación entre la componente E_x y H_y se la denomina modo transversal eléctrico (TE) y a la de E_y con H_x modo transversal magnético (TM). Partiendo la expresión polar de $[Z]$ se puede calcular la resistividad aparente y la fase para ambos modos. Las curvas rojas representan resistividad aparente y fase para el modo TE, y las azules representan las del modo TM (Fig. 2).

La separación en las curvas nos permite hacer un análisis preliminar de la dimensionalidad del medio, ya que ante la presencia de curvas separadas se puede inferir dimensionalidad 2D. Es decir, variación de la resistividad en 2 direcciones.

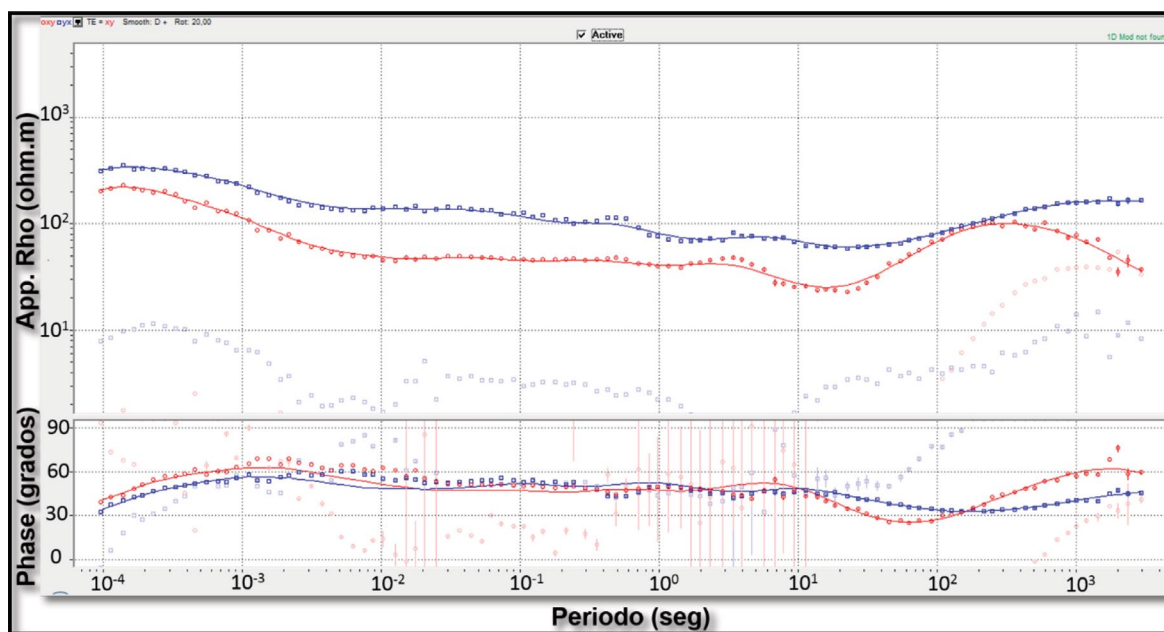


Figura 2. Curvas de resistividad y fase para los Modos TE (rojo) y TM (azul) (Estación 1).

La dimensionalidad (1D, 2D o 3D) y orientación de las estructuras detectadas con MT se estudiaron a través del comportamiento de las curvas de resistividad aparente, fase y de los parámetros interpretativos. Dentro de estos últimos, se calculó el valor de tensor de fase (Caldwell *et al.*, 2004), para cada estación a diferentes frecuencias, representados mediante elipses en la Fig. 3 junto con los valores de Beta Skew identificados en escala de colores.

El tensor de fase se calcula como: Tensor de fase = $\text{real}[Z] - i \cdot \text{imag}[Z]$. El tensor de fase se representa gráficamente construyendo una elipse cuyas coordenadas se obtienen multiplicando un vector de rotación por el tensor de fase. El valor del Beta skew se calcula a partir de los invariantes del tensor de fase, y representa el ángulo entre el eje principal de la distribución si fuera simétrica (puro 2D) y el eje de la distribución real no-simétrica.

El análisis del tensor de fase presenta resultados similares al resto de los parámetros interpretativos utilizados en este trabajo (vectores de inducción de la función Tipper, Phase sensitive Skew). En la Fig. 3 para la banda de frecuencias de 1 Hz a 10 KHz se observa un comportamiento mayormente 1D donde las elipses presentan una forma casi circular. Entre las estaciones P21-P18 y P35-P07 se detectan dos estructuras verticales cuya gráfica del tensor fase tiene forma elipsoidal y los valores de beta menores a los $\pm 3^\circ$, lo cual indicaría comportamientos 2D/3D que interrumpen la zona de comportamiento 1D. Por debajo de 1Hz se observa comportamiento 2D, 2D/3D y 3D.

En el histograma de la Fig. 4 se puede ver la orientación de los tensores de fase con dimensionalidad 2D y 2D/3D, donde se observa un máximo para los 20° NE el cual corresponde a las elipses situadas entre las estaciones P21-P18 y P35-P07, para frecuencias entre 1 Hz y 10 KHz. Este ángulo se utilizó como rumbo eléctrico en el proceso de los datos ya que describe la

orientación para la mayoría de los datos con comportamiento 2D. Se puede observar otro máximo alrededor de los 80° NE asociado a los tensores de fase de los datos MT de mayor profundidad donde la dimensionalidad tiende a ser 3D ($\beta > 3^\circ$) y su orientación tiende a desviarse del rumbo eléctrico.

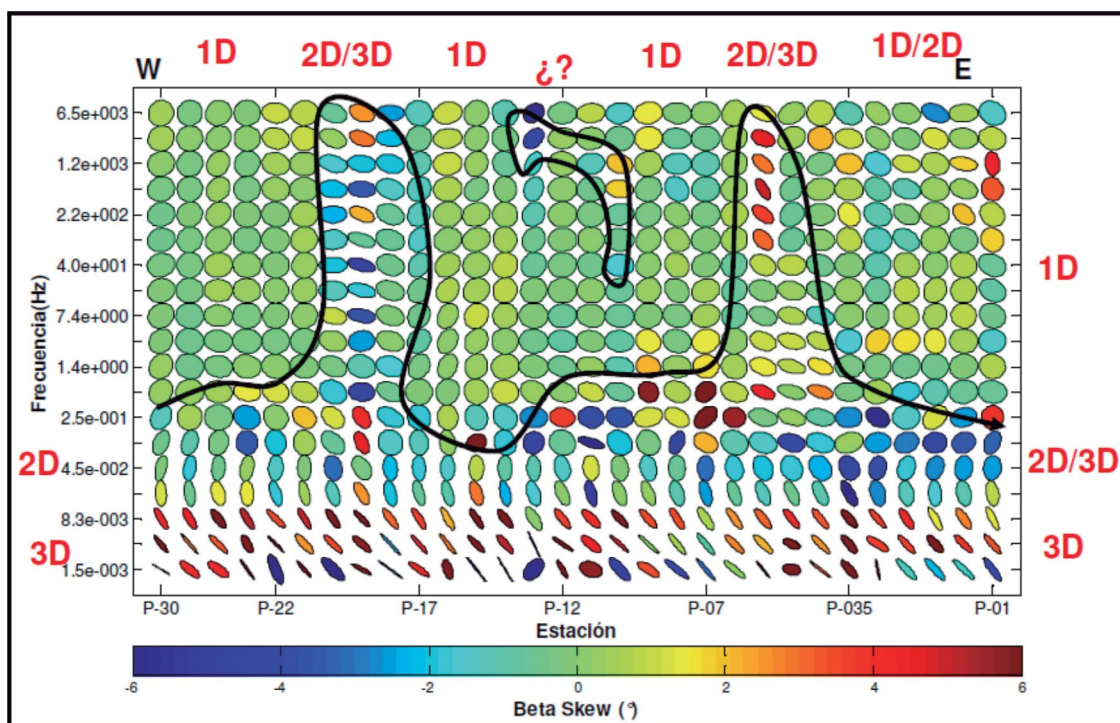


Figura 3. Tensor de fase representado por elipses y valores de beta skew (°) para las estaciones.

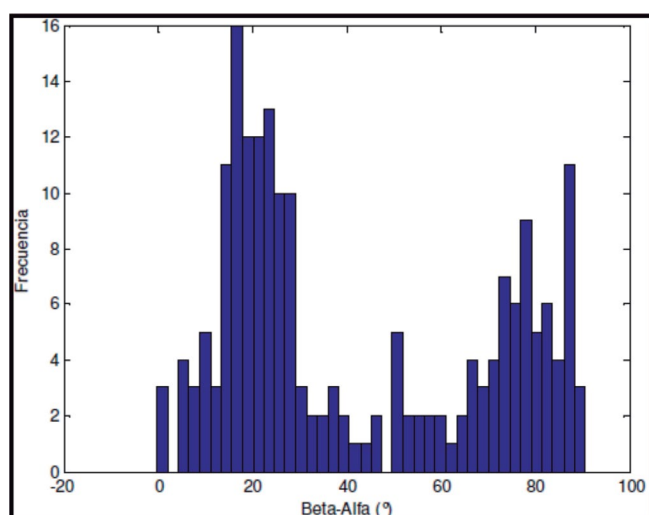


Figura 4. Histograma de orientaciones de tensores de fase con dimensionalidad 2D.

Pseudosecciones de resistividad aparente – datos observados

En las Figs. 5 y 6 se presentan los datos de resistividad aparente y fase, calculados a partir de los datos de campo, correspondientes al modo TE y TM.

En el modo TE el campo eléctrico es paralelo al rumbo eléctrico y las corrientes circulan por el centro de las estructuras, mientras que en el modo TM el campo eléctrico es perpendicular al rumbo eléctrico y por esto las corrientes pasan por estructuras de diferentes resistividades. Este fenómeno en general permite que en el modo TM se tenga una mejor resolución de los contrastes laterales de resistividad mientras que en el modo TE se observan características generales.

En las secciones de resistividad aparente y las secciones de fase podemos realizar la interpretación de posibles estructuras, ya que la presencia de bajos valores de resistividad se ven acompañados de aumentos de fase y viceversa.

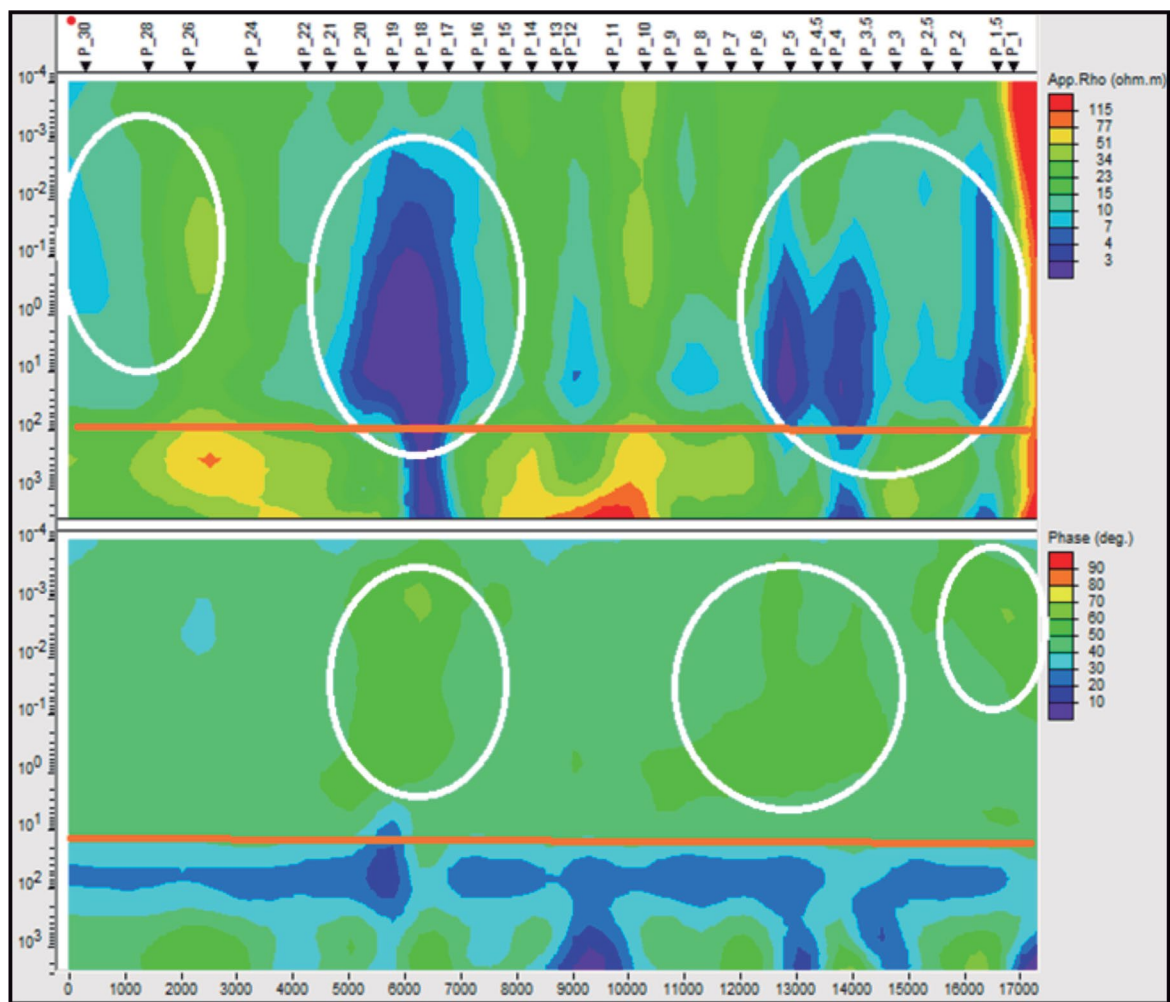


Figura 5. Pseudosecciones de resistividad aparente y fase para el dato observado. Modo TE.

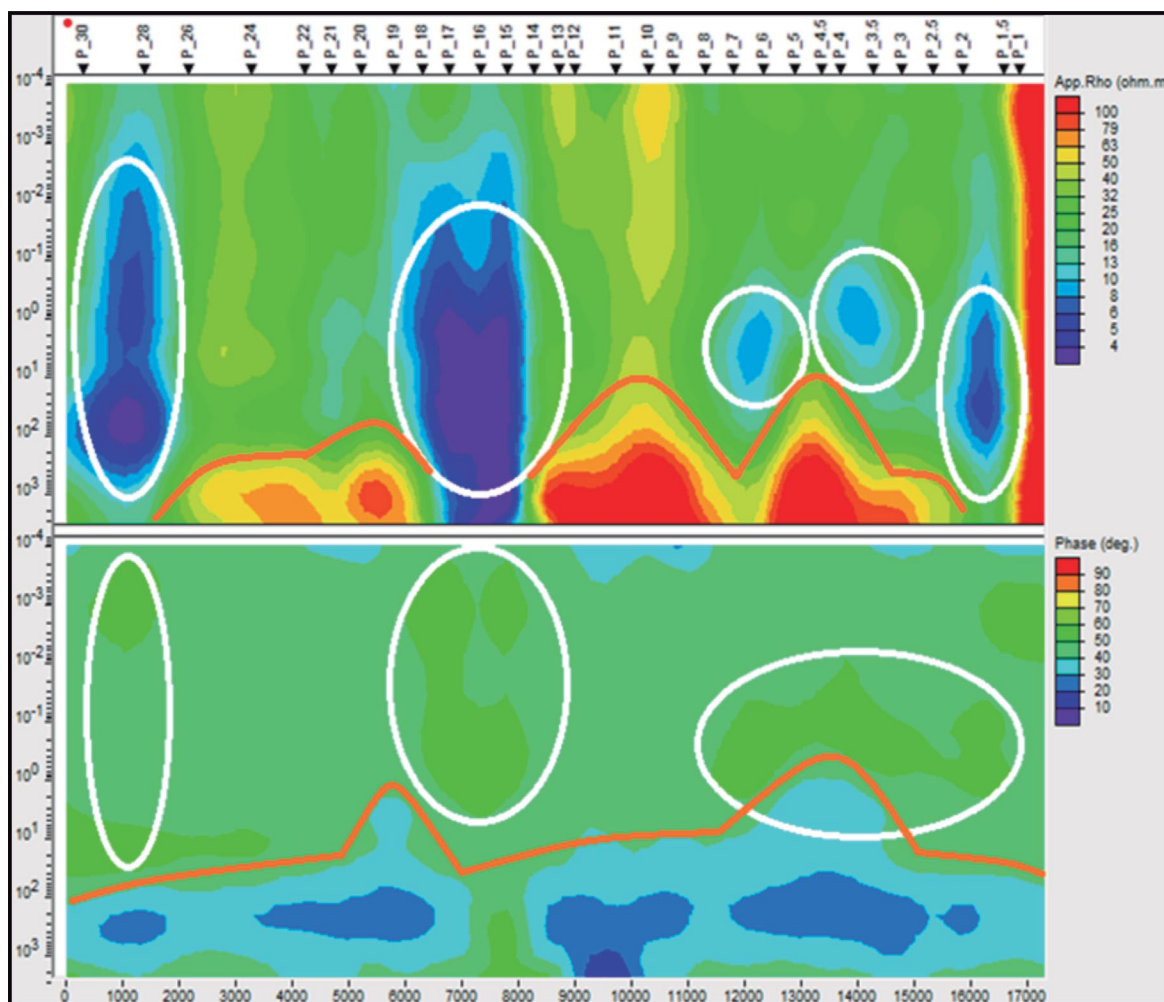


Figura 6. Pseudosecciones de resistividad aparente y fase para el dato observado. Modo TM.

En estas secciones podemos observar la presencia de algunas estructuras. Para los altos periodos, por encima de 101 s podemos ver un aumento de la resistividad y su correspondiente disminución de fase para ambos modos de polarización. Esto se puede asociar al basamento, el cual se señala con la línea naranja. También se pueden ver algunas estructuras con valores de resistividad bajos, para periodos bajos y medios desde 10^{-4} hasta 101 s. Estas se aprecian en ambos modos, teniendo mejor definición en el modo TM que resuelve mejor el contraste lateral de resistividades. Estas se señalizan mediante las elipses blancas. Finalmente, se pueden ver estructuras con valores de resistividad más altos que ascienden desde el basamento y se introducen entre las estructuras más conductivas. Este comportamiento se observa en la fase que disminuye su valor imitando la forma que se observa en el perfil de resistividad. Estas características en los perfiles podrían estar asociadas a estructuras de plegamiento. Estas estructuras se señalan en ambas secciones con las líneas de color naranja. El modo TM define mejor la forma de la estructura que el modo TE (donde la línea naranja que marca el basamento es horizontal), debido a su mejor resolución lateral. Este mismo comportamiento se observó en los otros parámetros interpretativos.

Inversión 2D de las respuestas magnetotelúricas

La inversión es un procedimiento matemático que permite obtener información de las distribuciones de las propiedades físicas (en este caso resistividad eléctrica) del subsuelo a partir de los datos medidos. Se comienza con un modelo de resistividades del subsuelo al cual se le calcula sus curvas de resistividad aparente y fase, y se compara con los datos medidos en campo. Luego el modelo de resistividades va cambiando de manera que el desajuste entre las curvas de resistividad aparente y fase calculadas y medidas sea cada vez menor. Es un proceso iterativo que tiene como objetivo encontrar un modelo que minimice el desajuste entre los datos medidos y los datos sintéticos.

Para efectuar la inversión 2D de los datos de MT obtenidos, se utilizó el programa WingLink que aplica el algoritmo de inversión 2D de Rodi y Mackie (2001), el mismo resuelve la función objetivo regularizada (Tikhonov y Arsenin, 1977) con el método de Gradiente Bi-Conjugado No-lineal. Los datos de entrada fueron las curvas de resistividad aparente y fase medidos en las estaciones.

Se invirtieron los modos de TE y TM en conjunto y Tipper en el rango de frecuencia entre 10 kHz a 0.001 Hz considerando 5 frecuencias por década. Los modos TE y TM se rotaron 20° NE, que es la dirección de rumbo eléctrico que se interpretó a partir del análisis dimensional discutido previamente y de las observaciones de campo.

El modelo inicial consistió en un subsuelo con resistividad constante de 100 ohm.m, con la intención de no forzar al modelo, con una grilla con celdas que varían de 100 m a 500 m en dirección horizontal y en la vertical varían entre 0 y 1 km.

En la Tabla 1, se muestran los parámetros utilizados en la inversión 2D.

Parámetros de Inversión	
Banda de frecuencia	10 ⁴ a 0.001 Hz
Suavizado aplicado	D+
Frecuencias por década	5
Tau (τ)	De 3 a 1
Error piso para fase	5%
Error piso resistividad aparente	5%

Tabla 1. Parámetros para la inversión 2D de MT.

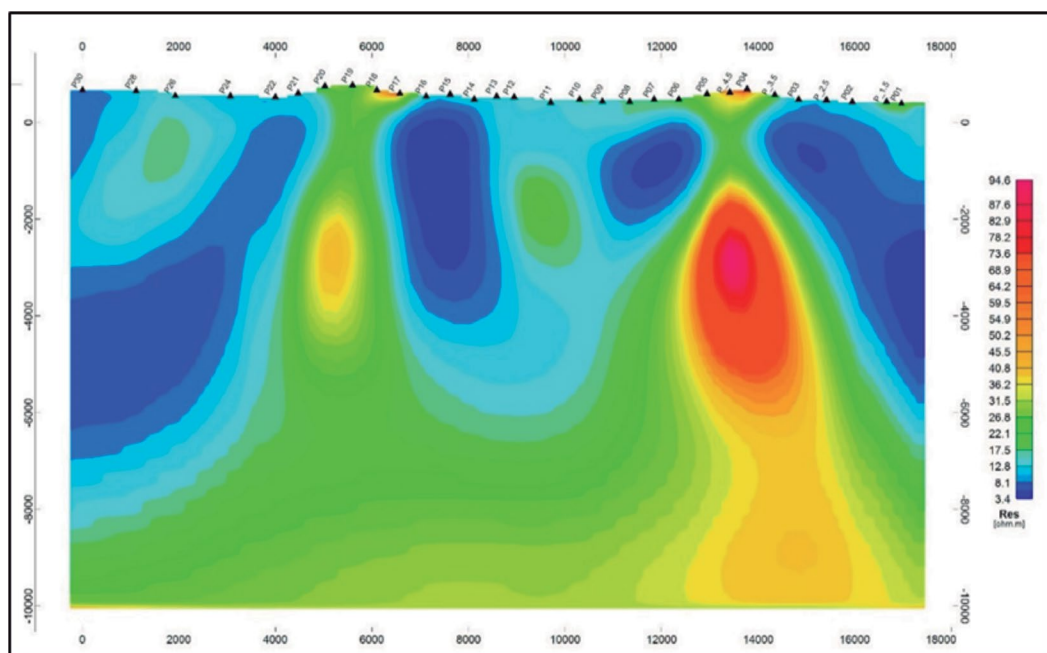


Figura 7. Perfil de resistividades suavizado resultante de la inversión 2D. Distancia en ejes horizontal y vertical está dado en metros.

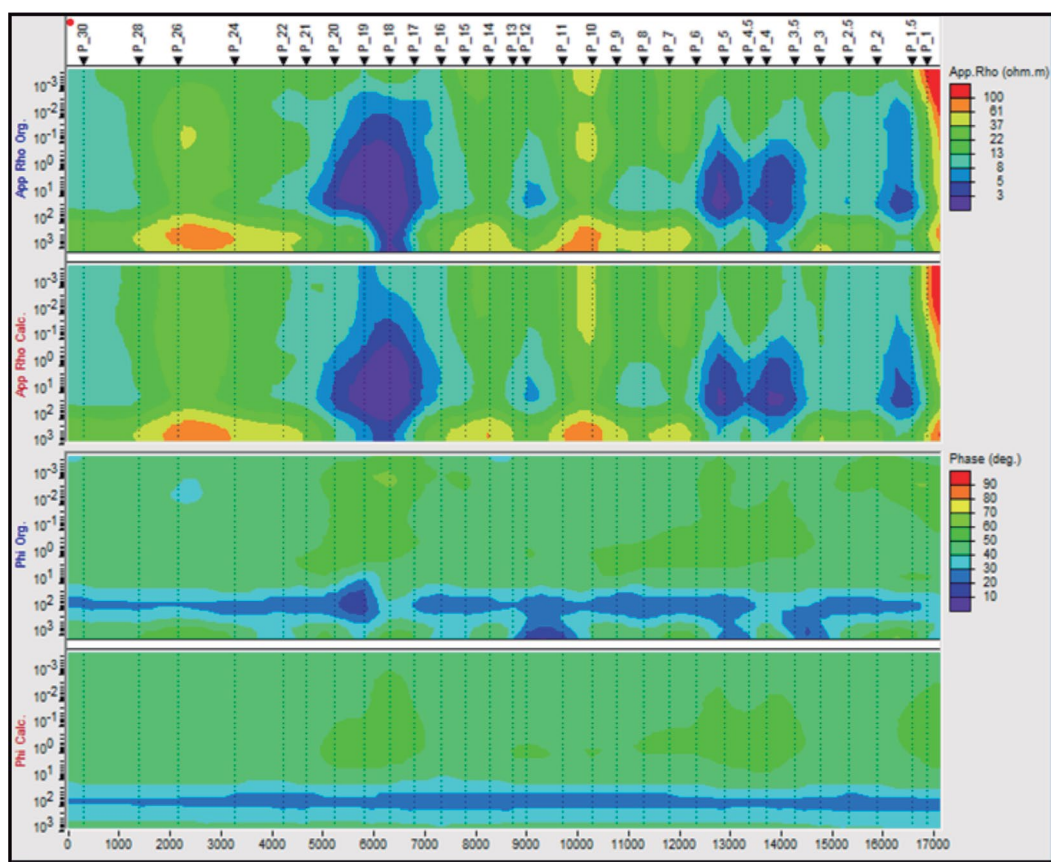


Figura 8. Pseudosecciones de los datos medidos y de los calculados a través del proceso de inversión 2D para el modo Transversal Eléctrico. En el borde izquierdo se puede observar que las pseudosecciones de resistividad aparente y fase originales están mencionadas en color azul mientras que las calculadas a partir del proceso de inversión 2D lo están con color rojo.

La inversión de la línea abarcó todas las estaciones de registro. El ajuste con los datos medidos fue 1.624 RMS. La norma de datos de la función objetivo se utiliza para reportar el ajuste que logran las respuestas del modelo invertido con los datos medidos y es un indicador de la confiabilidad de modelo obtenido. Este indicador se reporta en unidades de RMS (root mean square) e indica cuantas veces cabe el error base de los datos en la diferencia promedio entre datos medidos y respuestas calculadas del modelo. El ideal de un proceso de inversión es encontrar un modelo cuyas respuestas produzcan un ajuste de 1 RMS con respecto a los datos medidos.

El perfil de resistividades suavizado se muestra en la Fig. 7. Las Figs. 8 y 9 corresponden a las pseudosecciones de resistividad aparente y fase de los modos TE y TM, respectivamente, de las respuestas del modelo y de los datos medidos en campo.

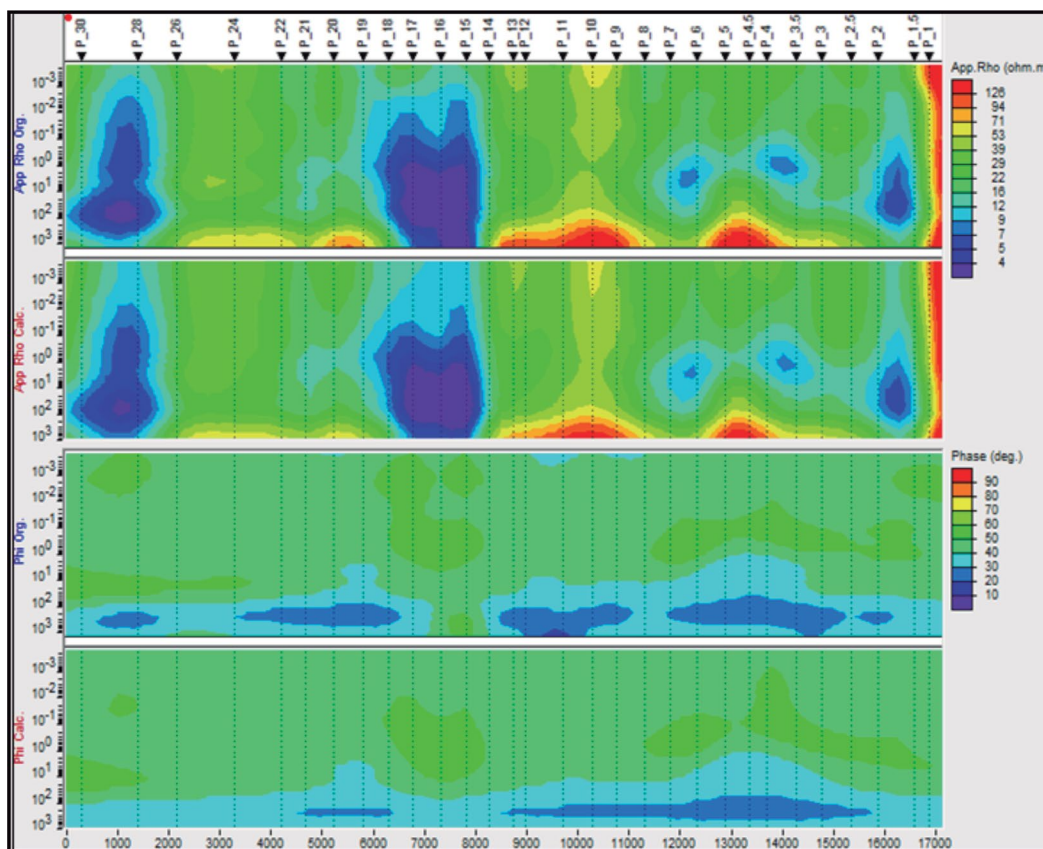


Figura 9. Pseudosecciones de los datos medidos y de los calculados a través del proceso de inversión 2D para el modo Transversal Magnético. En el borde izquierdo se puede observar que las pseudosecciones de resistividad aparente y fase originales están mencionadas en color azul mientras que las calculadas a partir del proceso de inversión 2D lo están con color rojo.

RESULTADOS

Interpretación

En esta sección se analizan e interpretan los resultados de MT junto con la información de

pozos, datos de gravedad adquiridos en el área y cortes estructurales (Fig. 10). La Fig. 11 es una imagen en planta de la ubicación del perfil MT.

Tanto los parámetros interpretativos como las pseudosecciones (análisis de datos MT) muestran un comportamiento 1D en zonas someras, con ascenso de dos estructuras de comportamiento 2D, mas resistivas, desde el basamento, entre las estaciones P21-P18 y P35-P07, donde se encuentran

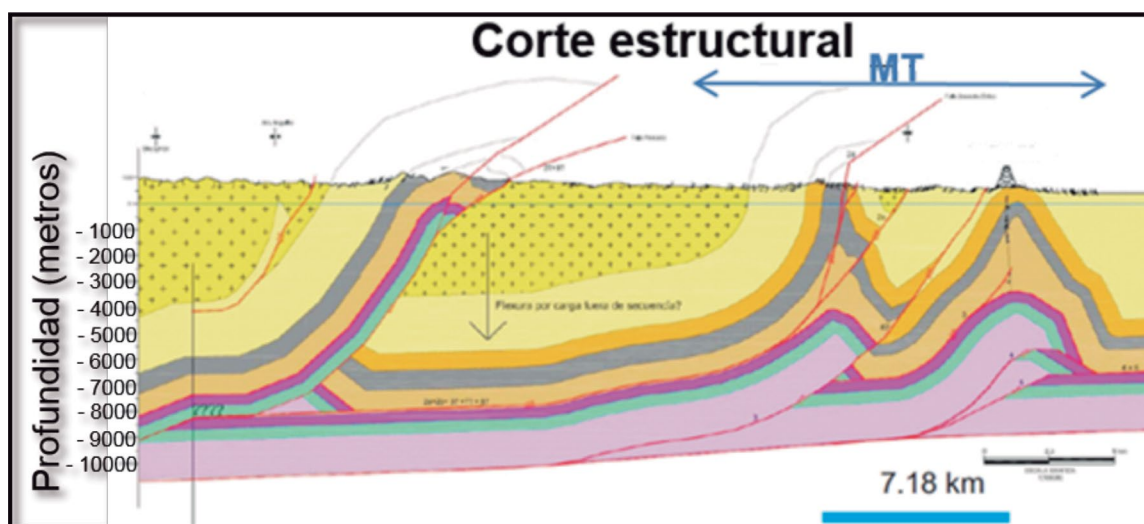


Figura 10. Corte Estructural provisto por el geólogo estructuralista del área. En color azul se puede ver la superposición del perfil MT sobre el corte.

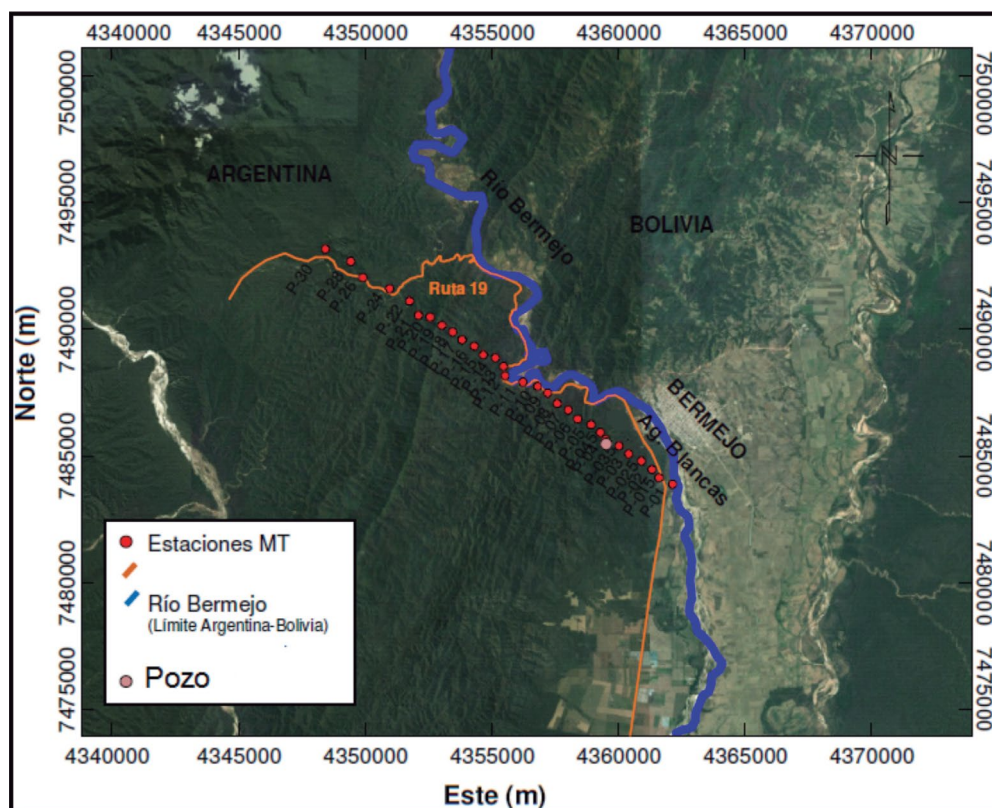


Figura 11. Ubicación del perfil MT (Campo Inchauspe, Zona 4)

los puntos más altos de la topografía (zonas de pliegue). En el modelo de resistividades invertido (Fig. 7) estas dos estructuras se observan como cuerpos de alta resistividad (>50 ohm.m) que se extienden verticalmente desde el basamento hacia la superficie. Estas estructuras de alta resistividad se asociarían con los pliegues anticlinales de Desecho Chico y Aguas Blancas (Fig. 1). El aumento de resistividad daría cuenta del ascenso de las formaciones profundas con mayor resistividad hacia la superficie, producto del plegamiento.

Entre las estructuras de alta resistividad verticales, se observan valores bajos de resistividad que corresponderían a las formaciones más jóvenes que conformarían la cuenca. Dentro de éstas, se aprecian algunas variaciones laterales de resistividad que podrían reflejar la acción de algunas fallas, por ejemplo, bajo la estación P11.

Bajo los 8000 m de profundidad se observa un aumento de resistividad a lo largo de todo el perfil que indicaría el contacto con el basamento. Por otro lado, los parámetros interpretativos de la Figura 3, sugieren que a esa profundidad los datos tienen un comportamiento 3D, y por lo tanto la metodología de inversión 2D no es la adecuada para trabajar en este caso.

La Fig. 12 es una imagen de la línea sísmica cercana al perfil MT, procesada en tiempo. Se puede observar que la calidad no es óptima debido al plegamiento de la zona, lo que provoca falta de definición en las estructuras detectadas.

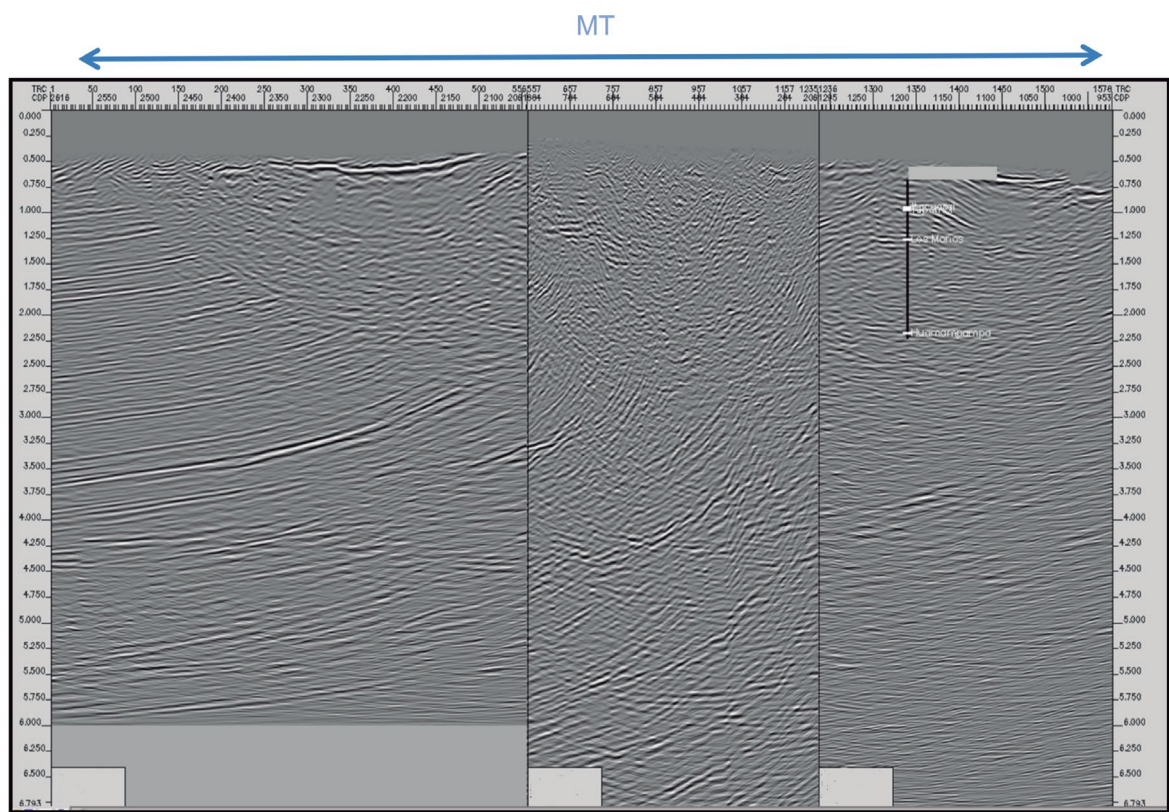


Figura 12. Línea sísmica procesada en tiempo.

A pesar de que el modelo invertido MT presenta menor resolución con contactos más suavizados que la sísmica de reflexión, puede resolver fácilmente estructuras con alto ángulo de inclinación o verticales no observables con la sísmica. Las Figs 12 y 13 son un ejemplo de esta situación para los pliegues de la Sierra Subandina.

En la Fig. 13 se muestra la sección de resistividades invertida 2D interpretada usando los pases formacionales observados en el pozo que está sobre el perfil. Para ello se asociaron valores promedio de las resistividades de las unidades con los observados en la sección MT (Tabla 2). Se identificaron 4 interfases de comportamiento resistivo diferenciado.

La interfase 1 es la más somera y contiene valores de resistividad entre 17,5 a 30 ohm.m. En los registros de pozo se ve que esto corresponde a la formación Tranquitas cuya resistividad promedio es de 25 ohm.m. La interfase 2 tiene valores entre 10 y 17 ohm.m y comienza a los 787m (MD). En los registros se observa un valor promedio de 19.3 ohm.m que corresponde a la formación Tarija. La tercer interfase de la sección de resistividades posee un valor entre 20 y 35 ohm.m y se encuentra a los 1533 m (MD) que corresponde a la formación Itacuami y Tupambi. La cuarta y última capa que se puede distinguir en el perfil de resistividades tiene un valor mayor a 60 ohm.m y corresponde a las formaciones Los Monos, Huamampampa sin poder definir la profundidad contacto entre ambas.

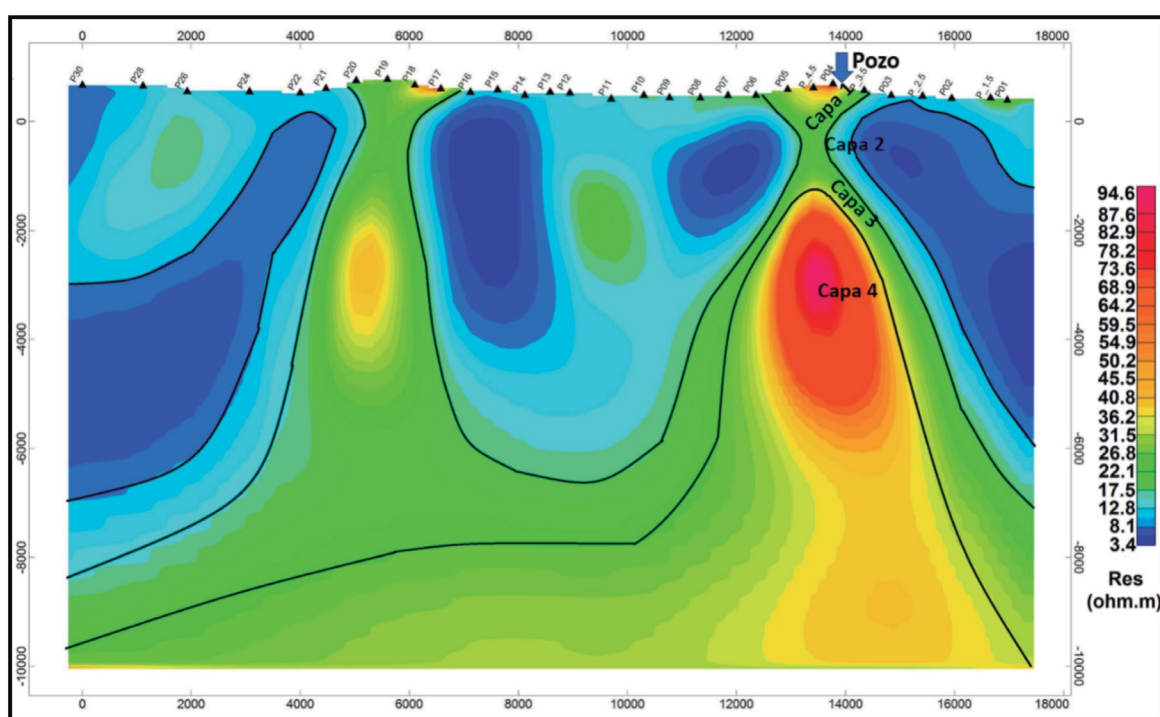


Figura 13. Inversión 2D interpretada teniendo en cuenta los datos de pozo.

Unidad	MD (m)	Resistividades Pozo (ohm.m)	Resistividades MT (ohm.m)
Tranquitas	0	25.3	Capa 1: 17.5 a 30
Tarija	787		
Itacuami	1488	19.3	Capa 2: 10 a 17
Tupambi	1533		
Los Monos	2130	40	Capa 3: 20 a 35
Huamampampa	4073	60.5	Capa 4: >60
Fondo	4210	128	

Tabla 2. Pases formacionales en el pozo y valores de resistividad obtenidos del perfil y del modelo de MT.

Partiendo de la geometría de las estructuras obtenida por el método de inversión MT 2D, se realizó un modelo gravimétrico 2D para evaluar la respuesta del método y buscar consistencia en los resultados.

En la Fig. 14 se puede observar el modelo gravimétrico cuya geometría es igual al modelo MT. Los datos de densidades fueron tomados de los perfiles de pozo. La curva continua de color negro es la respuesta gravimétrica de la anomalía residual de Bouguer calculada para el modelo, mientras que la línea punteada corresponde a la anomalía residual de Bouguer calculada para el dato medido (dato aéreo, densidad de corrección = 2,67 g/cm³, el método para calcular la

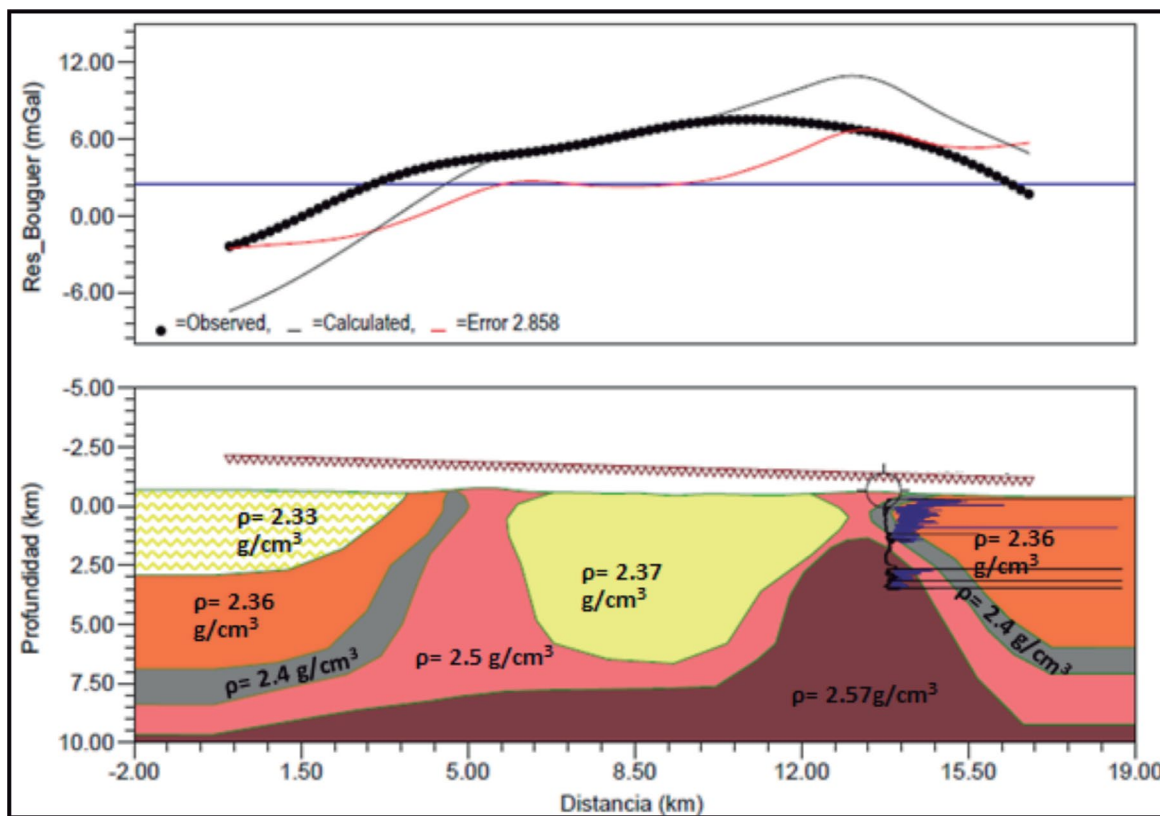


Figura 14. Modelado gravimétrico 2D a partir del modelo derivado del perfil magnetotelúrico. El perfil tiene orientación NO-SE

anomalía residual fue continuación ascendente). La curva roja es el error, cuyo valor RMS es 2.858 mGal. Para mejorar el ajuste entre las curvas del dato medido y calculado por el modelo, se realizó otra inversión MT partiendo de un nuevo modelo inicial al de la inversión anterior (el cual tiene una grilla homogénea de 100 ohm.m). Para ello se buscó una geometría del subsuelo consistente con los datos MT y que mejore el ajuste gravimétrico.

Se partió del modelo inicial mostrado en la Fig. 15, el cual se construyó teniendo en cuenta el perfil estructural, para darle su forma y los datos de pozo para asignar los valores de resistividad. Se consiguió el modelo de resistividades del subsuelo de la Fig. 16.

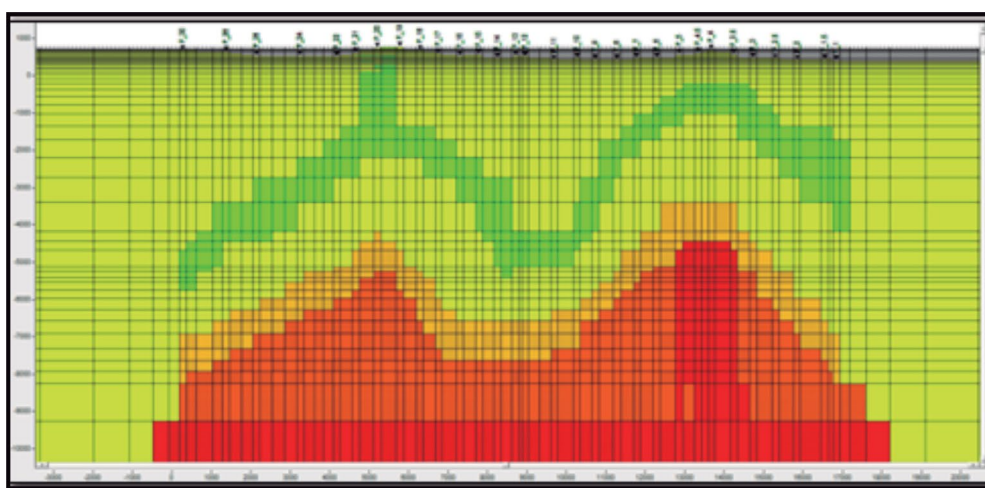


Figura 15. Modelo inicial utilizado para la segunda inversión.

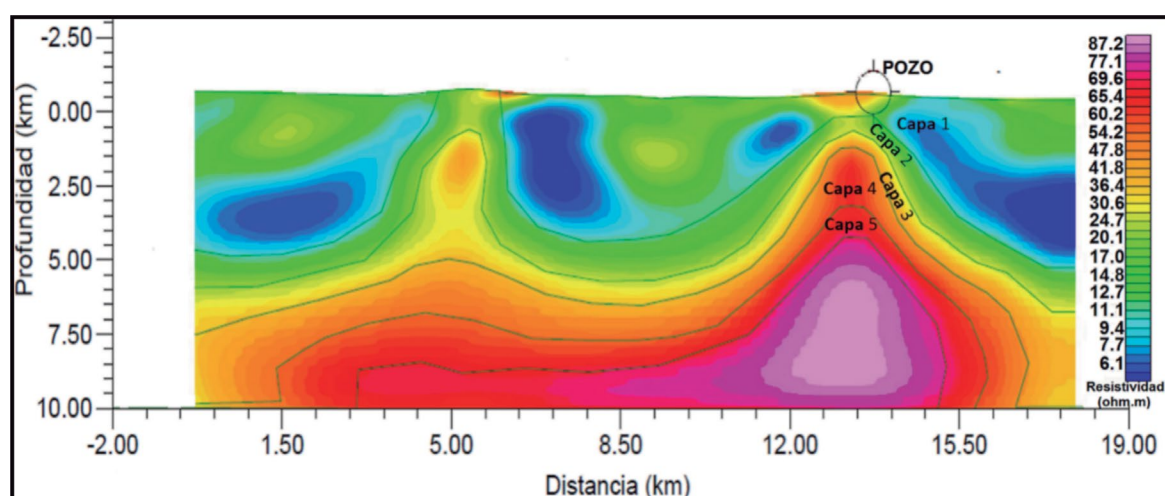


Figura 16. Segundo modelo de inversión 2D interpretada teniendo en cuenta los datos de pozo.

Unidad	MD (m)	Resistividades Pozo (ohm.m)	Resistividades MT (ohm.m)
Tranquitas	0	25.3	Capa 1: 17.5 a 30
Tarija	787		
Itacuami	1488	19.3	Capa 2: 15 a 20
Tupambi	1533		
Los Monos	2130	40	Capa 3: 30 a 45
Huamampampa	4073	60.5	Capa 4: 45 a 65
Fondo	4210	128	Capa 5: > 65

Tabla 3. Pases formacionales en el pozo y valores de resistividad obtenidos del perfil y del modelo de MT.

En la Tabla 3 se detallan los valores de resistividad obtenidos en el modelo MT. La interfase 1, la más somera, contiene valores de resistividad entre 17,5 a 30 ohm.m. La misma, se extiende lateralmente a lo largo de toda la línea. En los registros de pozo se ve que esto corresponde a la Formación Tranquitas cuya resistividad promedio es de 25 ohm.m. La interfase 2 tiene valores entre 15 y 20 ohm.m y comienza a los 787 m (MD). En los registros se observa un valor promedio de 19.3 ohm.m. que corresponde a las Formación Tarija. La tercer interfase de la sección de resistividades posee un valor entre 30 y 45 ohm.m y comienza a los 1533 m (MD) que corresponde a la Formación Itacuami y Tupambi, y para los registros el valor es 40 ohm.m. La cuarta capa que se puede distinguir en el perfil de resistividades tiene un valor entre 45 y 65 ohm.m y corresponde a la Formación Los monos, que en los perfiles tiene un valor de 60 ohm.m. La quinta capa podría asociarse a Huamampampa cuyo valor promedio en los perfiles es de 128 ohm.m y para el MT está por encima de los 65 ohm.m.

Se siguió la metodología usada anteriormente, y se construyó un modelo de gravedad que imitó la estructura obtenida en el perfil MT, y luego se realizó el modelado gravimétrico. La Fig. 17 muestra los resultados obtenidos.

Los datos de densidades fueron tomados de los perfiles de pozo. La curva continua de color negro es la respuesta gravimétrica de anomalía residual de Bouguer calculada para el modelo, mientras que la línea punteada corresponde a la anomalía residual de Bouguer calculada para al dato medido (se usaron los mismos parámetros que en el modelado anterior). La curva roja es el error, cuyo valor RMS es 0.445 mGal. El valor disminuyó considerablemente respecto al modelo anterior, mientras que el ajuste de MT es prácticamente el mismo en ambos modelos, 1.624 para el primero, y 1.65 para el segundo.

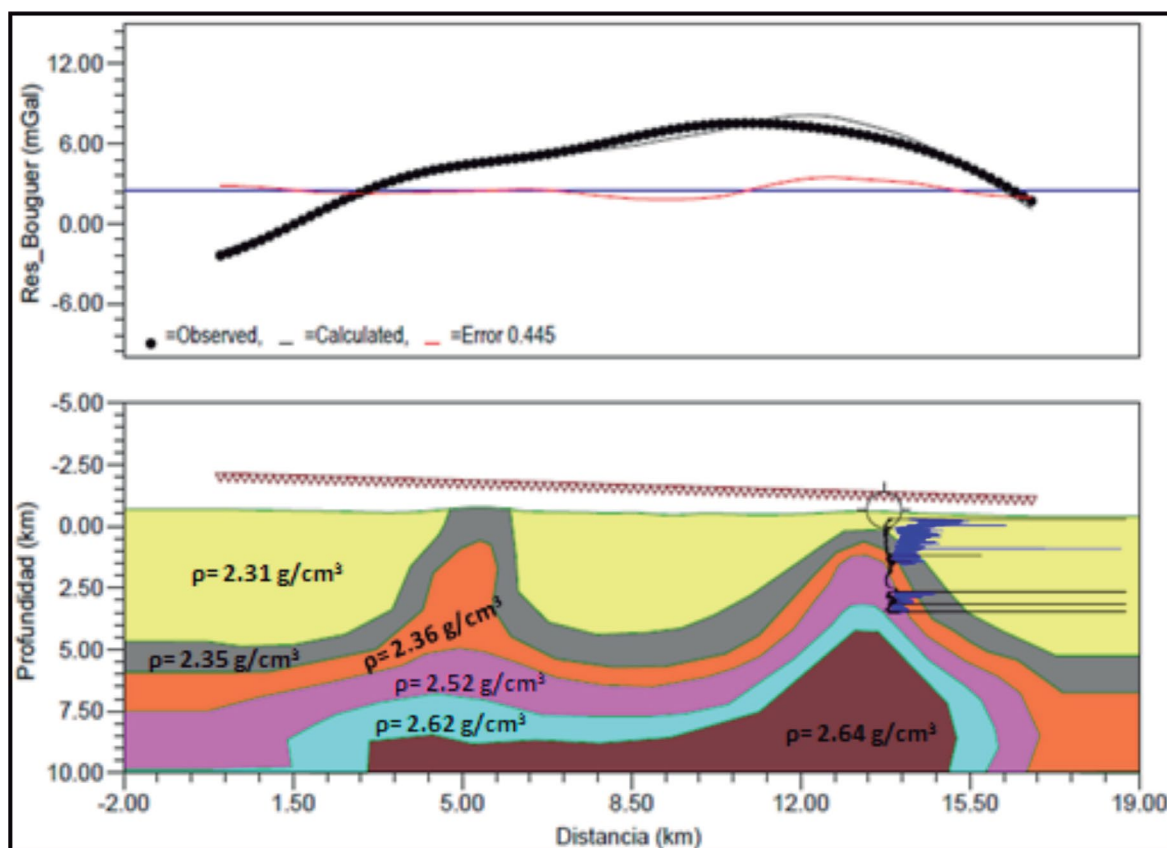


Figura 17. Modelado gravimétrico 2D a partir del modelo derivado del segundo perfil magnetotelúrico. El perfil tiene orientación NO-SE.

CONCLUSIONES

La aplicación de MT permitió obtener un modelo de resistividad 2D de la estructura regional del área. Este modelo permite observar dos zonas de pliegues (Desecho Chico y Aguas Blancas) con estructuras de alta inclinación que la sísmica del área resolvió con baja definición.

El modelo de resistividad obtenido con MT permite distinguir al menos cuatro capas que contrastan con resistividad eléctrica diferente. Comparado con pozos, se interpretan las formaciones asociadas a estas. La primera capa contiene a la formación Tranquitas. La segunda contiene a la formación Tarija. La tercera corresponde a las formaciones Itacuami y Tupambi. La cuarta incluye a las formaciones Los Monos, Huamampampa y basamento. Estas cuatro capas corresponderían a la mínima estratigrafía que sería posible de detectar con el método MT en la Sierra Subandina.

El método MT es un método apto para complementar los estudios de exploración, ya que puede aplicarse en áreas de mayor complejidad estructural que la sísmica de reflexión y tiene un menor costo.

Integrando la información disponible (por ej: Gravimetría y perfiles de pozos) para complementar la interpretación y procesamiento de datos MT se puede mejorar considerablemente los resultados. Un ejemplo, es la mejora obtenida con el segundo modelo de inversión 2D de este trabajo, el cual integra adicionalmente la información de geología y geofísica disponible.

Para los casos donde se detecta dimensionalidad 3D sería conveniente realizar una inversión 3D que resolvería más adecuadamente la estructura del subsuelo. El estudio desarrollado en el presente trabajo fue una prueba piloto, para evaluar el desempeño de la técnica y planificar una posible futura adquisición.

Para extraer el máximo provecho de la técnica MT sería conveniente adquirir estaciones en una grilla 2D, con la que se podría realizar Inversiones 3D, y así obtener un cubo de resistividades del terreno.

REFERENCIAS CITADAS

- Bahr, K. (1988). Interpretation of the magnetotelluric impedance tensor: regional induction and local telluric distortion. *J. Geophys.* 62: 119-127.
- Starck, D., Schulz, A. & Cohe, C., 2005, Entrampamientos de hidrocarburos en el carbónico y el terciario subandino de la cuenca noroeste (Cuenca de Tarija), Conference paper, mayo 2005.
- Vozoff, K., 1972, The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins, *Geophysics*, 37, 98-141.
- Rodi, W. y Mackie, R. 2001. Nonlinear conjugated gradient algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics* 66: 174-178.
- Tikhonov, A. N.; V. Y. Arsenin (1977). *Solution of Ill-posed Problems*. Washington: Winston & Sons.
- Caldwell, G. Bibby, H.m Brown, C., 2004, The magnetotelluric phase tensor, *Geophysical Journal International* 158(2):457-469.