

# APLICACIÓN DE MÉTODO TEM PARA EVALUAR CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLOGICAS DE ACUIFERO CON SALMUERAS DE LITIO

Santiago Perdomo\*; Ignacio Borsani \*\*

\* Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. Paseo del Bosque s/n (B1900), La Plata, Argentina. E Mail: perdomo.geofisica@gmail.com

\*\* Geoaustral. Calle 493 1865, (B1897) La Plata, Argentina.

## Resumen

En este trabajo se presentan los primeros resultados de una prospección con el método TEM en un salar maduro de la provincia de Jujuy, donde se midieron sondeos TEM para determinar los contrastes de conductividad eléctrica que presentan las diferentes formaciones. La distribución de los sondeos responde a la necesidad de estudiar las variaciones laterales y en profundidad de las capas de interés, cubriendo la mayor superficie posible del área de interés. Los métodos TEM se basan en el estudio de la conductividad eléctrica del subsuelo a través de la inducción de corriente y campo magnético desde la superficie. Los primeros resultados permitieron correlacionar sectores de muy baja resistividad hasta los 300 m de profundidad, que estarían caracterizando formaciones saturadas con agua de elevada salinidad, que correspondería a niveles de interés productivo. En algunos sectores se observa una interrupción de estas zonas conductivas, que podrían atribuirse a un aporte de agua con menor salinidad y/o a un cambio en la litología. El método TEM ha demostrado ser aplicable en la exploración de salmueras de litio hasta una profundidad de 400 m, permitiendo reconocer unidades de interés. Con estos resultados preliminares es posible planificar la ubicación de perforaciones exploratorias en lugares de interés, optimizando costos de logística, traslado y ejecución.

**Palabras Claves:** Geofísica, TEM, Salar, Litio, Hidrogeología.

## Abstract

This work presents the first results of a TEM survey in a mature salt flat in the province of Jujuy, where TEM stations were measured to determine the contrasts in electrical conductivity presented in different formations. Data points were placed in order to identify possible lateral and depth variations of the layers of interest, and also covering the total surface of the area of interest. TEM methods are based on the study of electrical conductivity of the subsurface through the induction of electric current and magnetic fields from the surface. First results allowed us to recognize high conductivities zone up to 300 m deep, which characterize formations saturated with water of high salinity, which would correspond to layers with productive interest. In some lines, an interruption of these conductive zones is observed, which could be attributed to a contribution of water with lower salinity and a change in lithology. The TEM method has proven to be applicable in the exploration of lithium brines to a depth of 400 m, allowing the recognition of units of prospective interest. With these preliminary results it is possible to plan the location of exploratory drilling in places of interest, optimizing logistics, transport and execution costs.

**Keywords:** Geophysics, TEM, Salar, Lithium, Hydrogeology.

## INTRODUCCIÓN

La exploración de litio resulta importante para el desarrollo económico de Argentina por su importante demanda como materia prima y su rol en una transición energética hacia el aprovechamiento de las energías renovables y la reducción en el consumo de combustibles. El litio es un mineral clave en la fabricación de baterías recargables de iones de litio utilizadas en muchos productos electrónicos, incluidos los vehículos eléctricos.

Sin embargo, la exploración de salares y ambientes hipersalinos es compleja desde el punto de vista geofísico, debido principalmente a que las condiciones geológicas de cada sitio son diferentes y podrían condicionar la aplicabilidad de algunas metodologías. Para esto es necesario conocer en detalle las ventajas y desventajas de cada técnica. Existen numerosos aportes a la exploración geofísica en salares a través de informes técnicos inéditos y los NI 43-101 publicados por empresas del sector. Los métodos eléctricos más tradicionales como los sondeos eléctricos verticales han demostrado buenos resultados en la caracterización de salmueras de litio (Perdomo *et al.*, 2022), al igual que métodos más costosos como la sísmica de reflexión (Grosso *et al.*, 2022).

En este trabajo se presentan los primeros resultados de una prospección con el método TEM en un salar maduro de la provincia de Jujuy, donde se midieron 58 sondeos TEM para determinar los contrastes de conductividad eléctrica que presentan las diferentes formaciones. La distribución de los sondeos responde a la necesidad de estudiar las variaciones laterales y en profundidad de las capas de interés, cubriendo la mayor superficie posible del área de interés.

### Area de estudio

El área de estudio se ubica en el salar Salinas Grandes, ubicado al este de la Puna Argentina en la provincia de Jujuy, a una altitud de 3400 m sobre el nivel del mar (m s.n.m.), en el denominado triángulo del Litio (Figura 1). Salinas Grandes es uno de los salares más grandes de Argentina, se trata de un salar inmaduro (Houston *et al.*, 2011), formado por sedimentos clásticos aluviales de diferente granulometría desde arcillas y limos en la parte superior, hasta arenas y conglomerados en profundidad.

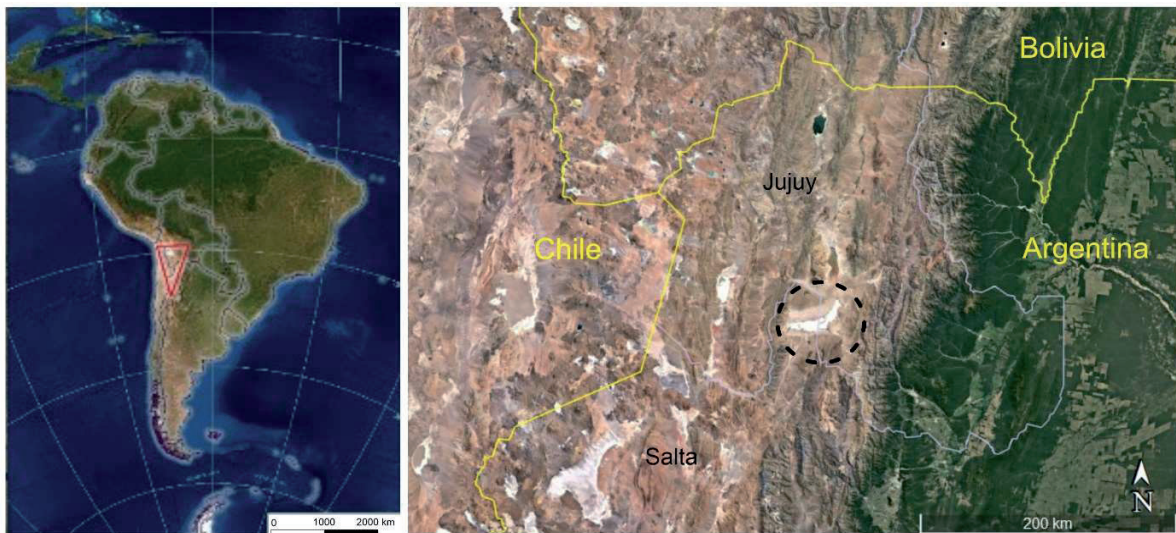


Figura 1. Ubicación del salar Salinas Grandes en la provincia de Jujuy, Argentina.

Una descripción de los antecedentes geológicos de la cuenca Salinas Grandes puede encontrarse en Murray (2012). Aquí se realiza una breve síntesis para poner en contexto los resultados de la prospección geofísica.

Las rocas más antiguas corresponden a los sedimentos del Precámbrico y Cámbrico metamorfizados de la formación Puncoviscana, areniscas silicoclásticas del Grupo Mesón, y

areniscas y lutitas del Grupo Santa Mónica. Afloramientos por fallas de estas unidades pueden encontrarse al sur y este del salar.

Areniscas, limolitas, margas y carbonatos continentales del Cretácico al Paleoceno (subgrupos Pirgua, Balbuena y Santa Bárbara y grupo Orán) están en contacto con las unidades más antiguas del Cámbrico al Precámbrico en las montañas al este del salar.

En las cadenas montañosas al oeste del salar afloran sedimentos marinos, lavas y unidades subvolcánicas del Cámbrico al Ordovícico. Estas unidades están recubiertas por areniscas de la Formación Vizcachera del Oligoceno-Mioceno y secuencias clásticas, evaporíticas y piroclásticas de la Formación Pastos Chicos del Mioceno.

Los sedimentos cuaternarios son de origen clásticos (arenas, gravas y limolitas) y completan las partes bajas de la cuenca del salar. El salar propiamente dicho ocupa la parte central de la cuenca.

## MATERIALES Y METODOS

Los métodos electromagnéticos (EM) consisten en estudiar la inducción que se genera en el subsuelo cuando se genera un campo magnético primario (inductor) en la superficie. El principio físico del método es bastante sencillo y se basa en el campo magnético que se genera en un área cuando se hace circular una corriente variable en una bobina o arrollado de cable. Cuando la corriente se interrumpe de manera instantánea se genera una fuerza electromotriz (fem) que se transmite al subsuelo, esa corriente induce campos magnéticos en la estructura del subsuelo y a través de la bobina receptora se mide el decaimiento del campo magnético inducido. Este proceso se repite varias veces en ciclos de diferente polaridad para medir la respuesta del subsuelo, y luego se obtiene una curva de resistividad aparente en función del tiempo, similar a la curva que se obtendría con un sondeo eléctrico vertical (SEV).

El instrumento utilizado fue un ABEM Walk TEM 2, con un arreglo central de dos antenas cuadradas, la receptora de 8 m de lado y la transmisora de 200 m de lado (Figura 2).

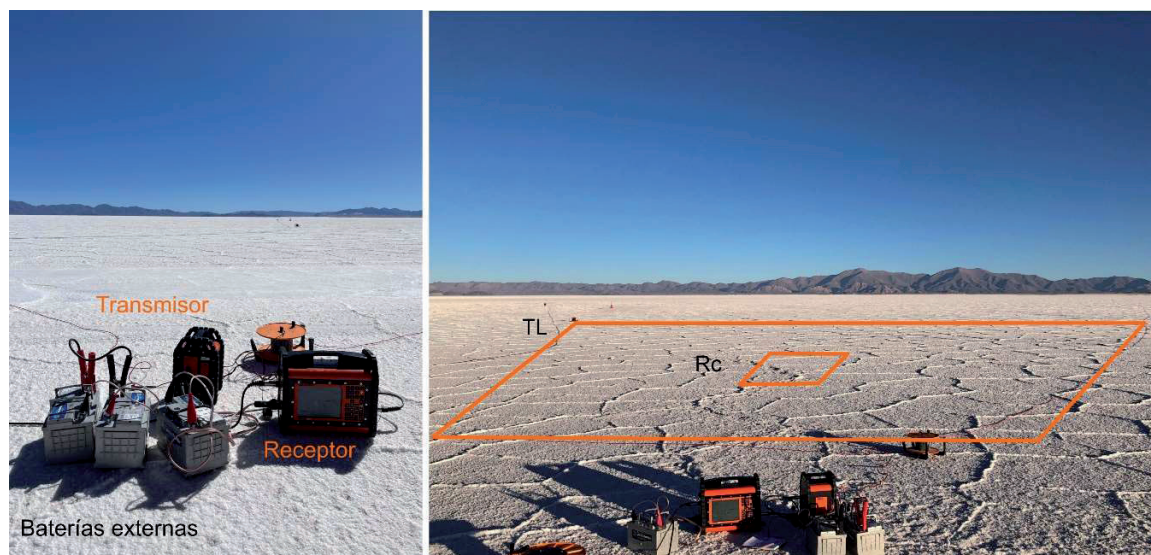


Figura 2. Instrumental de campo y armado de las bobinas transmisora y receptora.

Luego de efectuadas las mediciones el instrumento tiene la posibilidad de hacer un procesamiento rápido de los datos, en donde comienza una inversión iterativa con un modelo inicial en 1D (propone un modelo de variación de resistividad con la profundidad). En caso de realizar varias estaciones siguiendo una dirección específica es posible integrar los resultados en forma de un perfil 2D de resistividad, y también es posible extender los resultados a un 3D si se miden varios perfiles de manera paralela. Este procesamiento es necesario hacerlo en el gabinete, una vez finalizada las tareas de campo.



Las principales limitaciones del método TEM son: la sensibilidad a ruidos electromagnéticos (cañerías metálicas, alambrados, líneas de tensión eléctrica y otras fuentes de electricidad), en estos casos simplemente tenemos que alejarnos de estas fuentes de ruido. La profundidad de exploración está condicionada por la conductividad eléctrica de las capas del subsuelo, al igual que los métodos de geoelectrica con corriente continua. Este método no es el más adecuado para mapear o estudiar capas de alta resistividad como gravas, arenas o basamento consolidado. Por último, el método TEM resuelve geometrías 1D en cada estación, es por esta razón que cualquier desviación en las condiciones geológicas sobre esta suposición, puede llevar a resultados inadecuados.

Tienen la ventaja de tener una mínima perturbación del terreno debido a que no es necesario que haya contacto de alguna parte del instrumental o la energización, y es muy simple el armado de los arreglos para hacer las mediciones. Además, tiene la particularidad de ser sensible a la respuesta de cuerpos conductivos, por esta razón puede complementarse muy bien con otras técnicas convencionales como la geoelectrica y la polarización inducida. Otra importante ventaja es que si las condiciones del medio son favorables puede alcanzar profundidades de exploración del orden de los 500 a 1000 m con arreglos de 200 m de lado en algunos minutos

## RESULTADOS

En la perforación de referencia utilizada se describen limos arcillosos para los primeros 70 m con intercalaciones de gravas a los 10 m profundidad y arenas a las 40 m. Estos niveles tienen un espesor inferior a los 5 m. Luego entre los 70 y 136 m se observa la presencia de arenas con intercalaciones de poca potencia (menos de 2 m) de limos arcillosos a los 80 m y de gravas a los 110 m de profundidad. Desde los 136 m hasta los 270 m aparecen sedimentos de gravas con intercalaciones de arenas a los 190 y 250 m de profundidad, nuevamente estas no presentan un espesor mayor a los 5 m.

Se midieron 7 estaciones TEM siguiendo una dirección norte - sur, desde la zona central del salar hacia el borde del salar. Los modelos 1D propuestos para cada estación permitieron identificar las variaciones en de la resistividad en profundidad (Fig. 3).

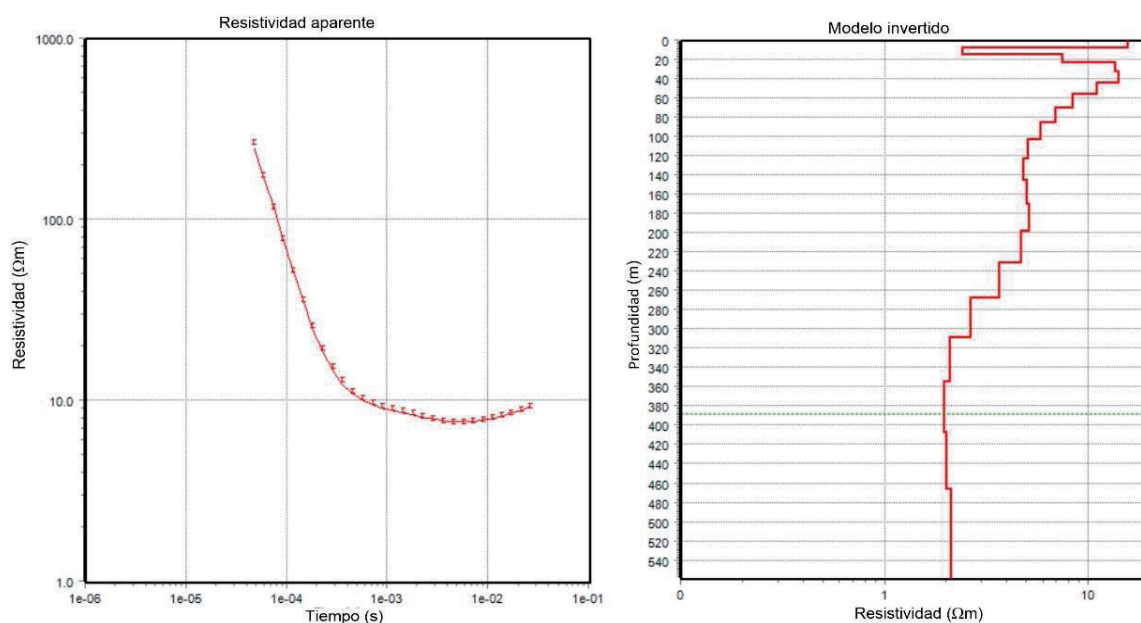


Figura 3. Curva de campo y modelo de resistividad invertido.

Fue posible detectar una zona de resistividad baja (alta conductividad) superficial para los primeros metros del subsuelo, en la zona norte que correspondería a la salmuera del nivel freático. Luego se observa una zona de resistividad intermedia a alta (10 a 30  $\Omega$ m) que podría

atribuirse a los sedimentos limo arcillosos observados en la perforación de referencia. Por debajo de los 100 m de profundidad se ha detectado una zona de baja resistividad que podría interpretarse gravas y arenas con salmuera debido a la alta conductividad esperada.

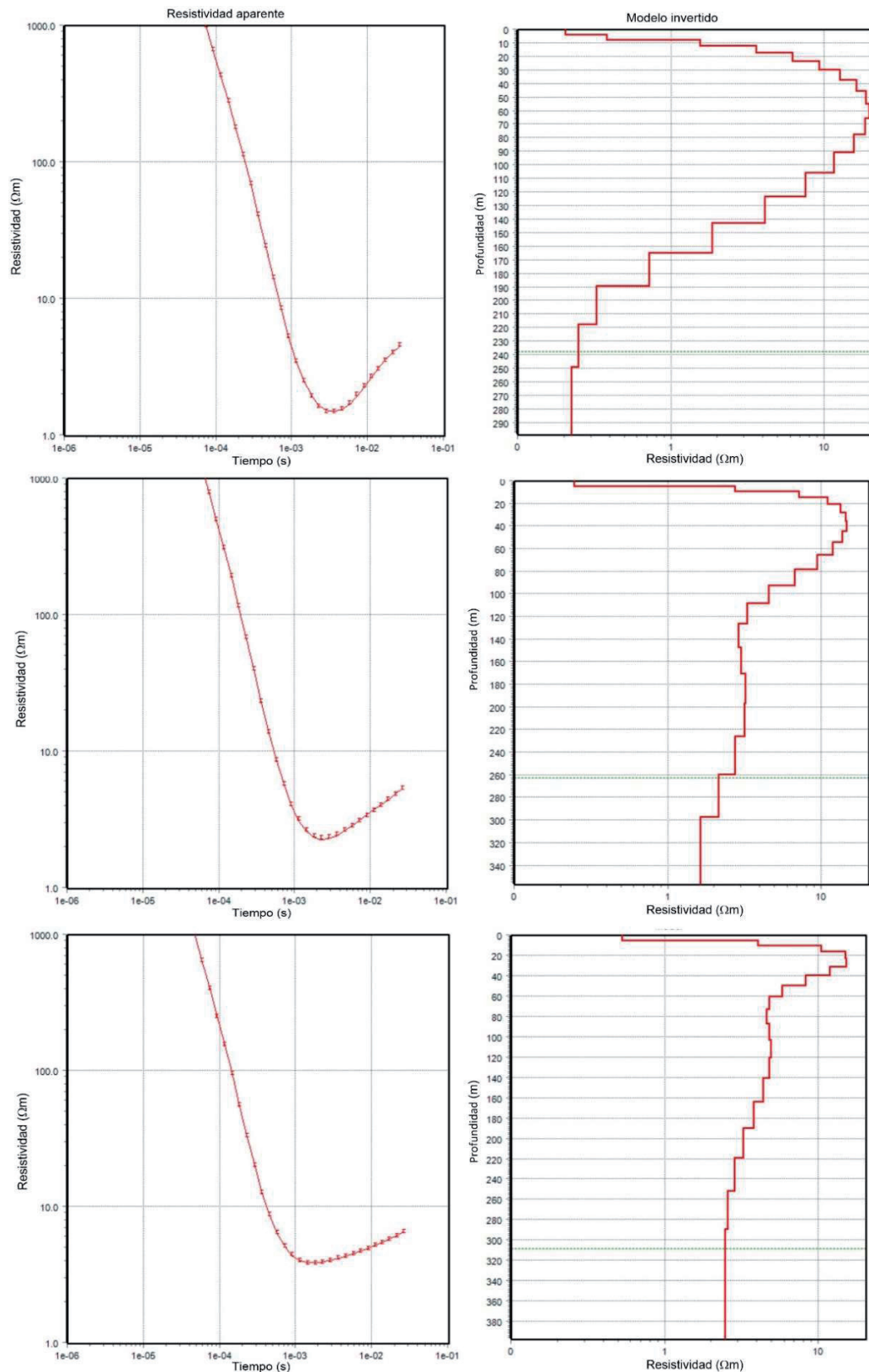


Figura 4. Curvas de campo y modelos de resistividad invertido.

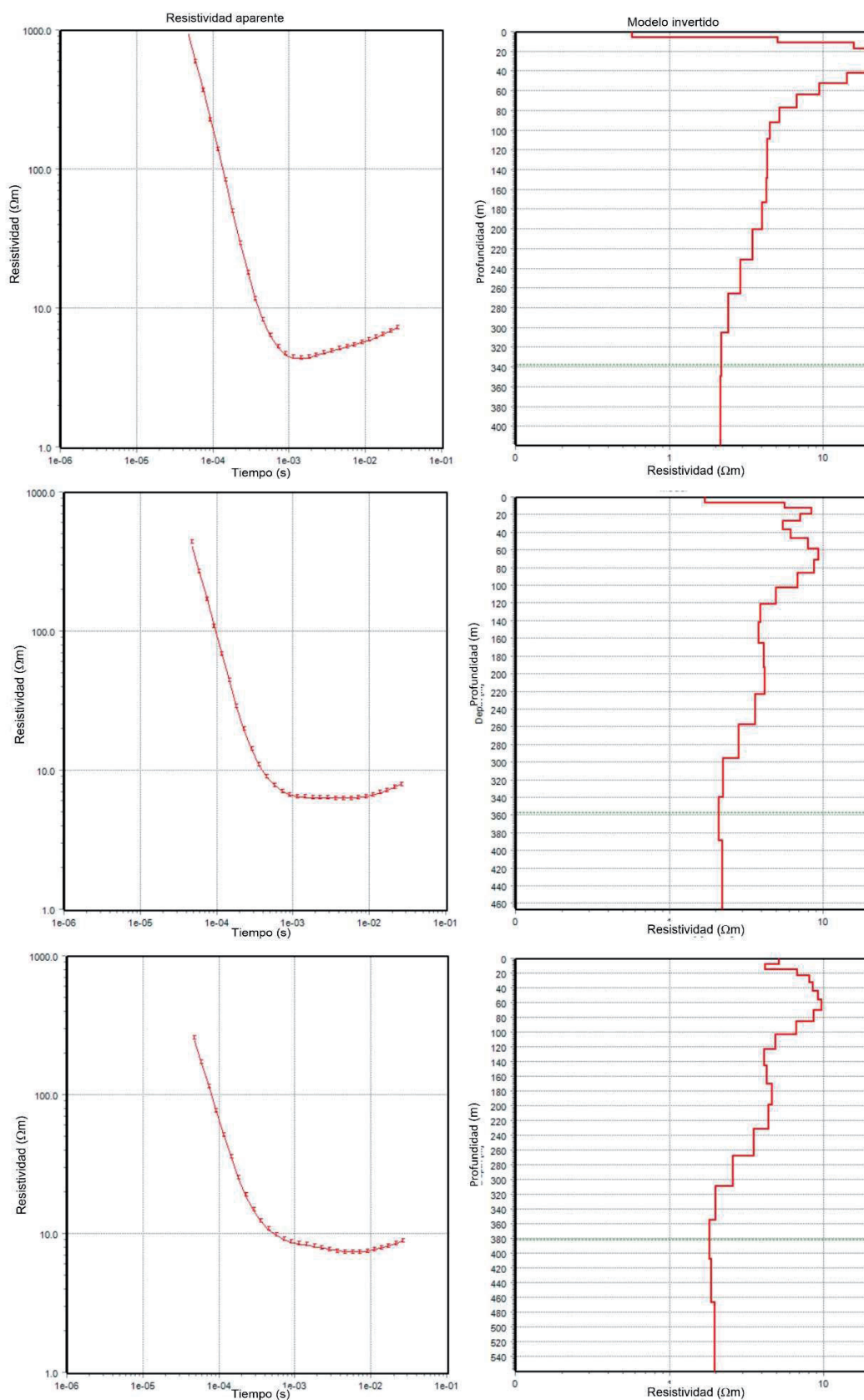


Figura 5. Curvas de campo y modelos de resistividad invertido.

Cuando se analiza la correlación entre estaciones TEM (Figura 6) pueden verse variaciones laterales de los valores de conductividad presentes en la sección. Estas podrían interpretarse como cambios en la granulometría de sedimentos finos saturados y sedimentos gruesos saturados, que responderían a la heterogeneidad dentro de las formaciones aluviales propias de la interdigitación de diferentes conos aluviales con aportes de flujos sedimentarios variables según el área. A su vez, en los primeros 50 m de profundidad ocurre la interacción agua dulce – agua salada, por esta razón las variaciones de resistividad estarían mostrando el comportamiento eléctrico de esta zona y es posible definir la extensión lateral y en profundidad de la misma.

La variación de resistividad en profundidad (por debajo de los 3300 m de elevación), se observa principalmente en la zona de gravas, y sería posible atribuirles a un cambio en la conductividad eléctrica de la salmuera.

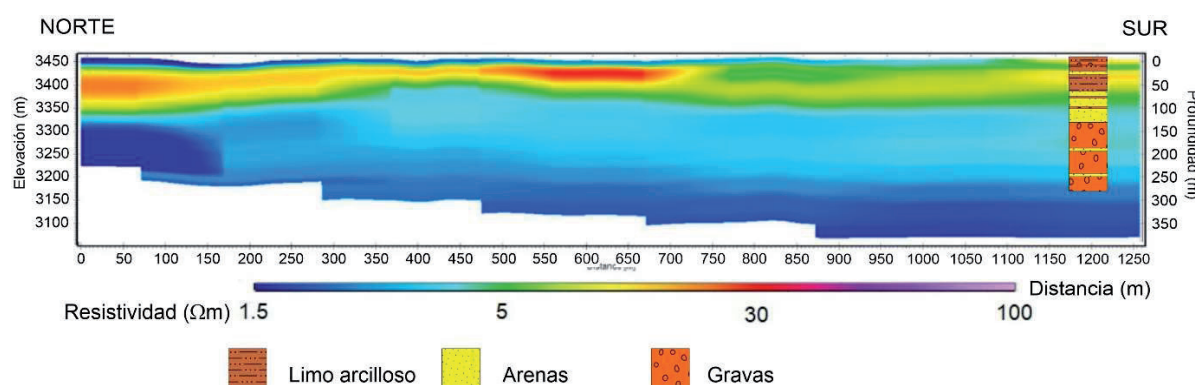


Figura 6. Modelos de resistividad y velocidad sísmica en el pozo de referencia.

## CONSIDERACIONES FINALES

Los trabajos de prospección geofísica mediante el método TEM se desarrollaron en una zona del salar Salinas Grandes en la provincia de Jujuy, Argentina. El objetivo de este trabajo es mostrar los primeros resultados de una técnica indirecta para la exploración del subsuelo en salares, debido a que la alta conductividad que puede esperarse en estos sitios podría limitar la aplicación de algunos métodos tradicionales como los SEV.

En Curcio et al. (2022) se menciona que algunos métodos geofísicos no serían “efectivos en términos de profundidad de exploración, sensibilidad a las variaciones laterales”, sin embargo, los resultados obtenidos, a partir de la metodología planteada demuestran que las condiciones de los salares son diferentes y que es posible tener buenos resultados si las condiciones son favorables. Es importante mencionar que cada metodología tiene ventajas y limitaciones, y en caso de poder aplicar más de una técnica en forma complementaria resulta una estrategia de trabajo recomendable que depende de la inversión económica y la proyección de cada proyecto.

En este trabajo con la metodología TEM, se ha realizado una evaluación preliminar de una zona de interés y se ha podido explorar hasta 400 m de profundidad. Se ha observado una buena correlación entre estaciones adyacentes y se ha podido confirmar la continuidad lateral de zonas de baja resistividad que podrían constituir reservorios de salmueras y posiblemente contener litio en niveles profundos. Además, las variaciones observadas en la dirección vertical podrían atribuirse al límite agua dulce - agua salada en la parte más somera, y a cambios en la conductividad eléctrica de la salmuera a mayor profundidad (200 m). A partir de estos resultados se propone la ejecución de perforaciones que contribuyan a mejorar el modelo conceptual del sitio, y a la realización de ensayos con packers para aislar niveles de interés y correlacionar con los modelos geofísicos. Se recomienda también la construcción de pozos exploratorios para ampliar el conocimiento e identificar y cuantificar recursos de litio en la cuenca.

## REFERENCIAS

- Curcio, A., Chanampa, E., Cabanillas, L. and Piethe R.** (2022) Geophysical lithium exploration in Argentina: State of the art, multiphysics integration and future directions. 11° Congreso de exploración y desarrollo de hidrocarburos. Geofísica, Sesiones Generales. p 399-422.
- Grosso, S., Clerici, H., Soubies, E., Carstens, G. y Pérez W.** (2022) Primera sísmica de reflexión realizada para exploración de litio en Tres Quebradas, Catamarca. 11° Congreso de exploración y desarrollo de hidrocarburos. Geofísica, Sesiones Generales. p 399-422.
- Houston, J., Butcher, A., Ehren, P., Evans, K., and Godfrey, L.** (2011) The Evaluation of Brine Prospects and the Requirement for Modifications to Filing Standards. Economic Geology. V 106, p 1225-1239.
- Murray, B. (2012)** Technical Report on the Salinas Grandes Project, Jujuy Province, Argentina. NI 43-101 report prepared for Orocobre Ltd, April, 2012.
- Perdomo, S., Schalamuk, I., Lopez, V., Azarevich, M.** (2022) Exploración de salmueras de litio mediante sondeos eléctricos verticales y técnicas geoquímicas en un salar de Catamarca, Argentina. 11° Congreso de exploración y desarrollo de hidrocarburos. Geofísica, Sesiones Generales. p 385-397.