



Tomografía de resistividad eléctrica aplicada a la prospección de agua subterránea en un sector costero del sudoeste bonaerense, Argentina

Electrical resistivity tomographies applied to groundwater prospection in a coastal sector of the southwest of Buenos Aires, Argentina

Ruffo, Andrés G.^{1,2} - Rey, Matías^{1,2} - Albouy, E. René^{2,3}
Giorgi, Juan Manuel^{2,3} - Carrica, Lucía^{2,3} - Bastianelli, Nerea^{2,3}

Recibido: 24 de marzo de 2022 • Aceptado: 02 de septiembre de 2022

Resumen

El sector costero del sudoeste bonaerense, de clima árido a semiárido, presenta como rasgo distintivo una cadena de dunas litorales. Este cordón psamítico aloja un acuífero libre portador de agua apta para el consumo humano, siendo la única fuente de abastecimiento para las localidades del área. El objetivo del presente estudio es identificar las condiciones geológicas del subsuelo, que determinan la calidad y cantidad de agua subterránea disponible para el consumo, por medio de la utilización de tomografías de resistividad eléctrica. La metodología aplicada consistió en la realización y parametrización de tomografías de resistividad eléctrica del subsuelo en distintos sectores del cordón costero, junto con la interpretación de las imágenes de resistividad eléctrica generadas, teniendo en cuenta aspectos geológicos, geomorfológicos e hidrogeológicos. Como resultados, se destaca la identificación, en las imágenes generadas, de rasgos litológicos y estratigráficos íntimamente relacionados tanto con los parámetros hidráulicos del acuífero, como con las variaciones de calidad química del agua. En este sentido, se infirió la presencia de paleocauces y variaciones laterales litológicas, entre otros aspectos. La parametrización del método permite definir intervalos de resistividades correlacionables con las características hidrogeológicas de la cadena de médanos. Se concluye que la metodología aplicada es de gran utilidad para el conocimiento geológico e hidrogeológico del subsuelo y proporciona datos precisos y de gran utilidad para la explotación racional del acuífero y la proyección de obras de captación de agua subterránea.

Palabras clave: Dunas Costeras, Hidrogeología, Prospección, Tomografías de resistividad eléctrica.

1. CONICET, CCT Bahía Blanca, Argentina
 2. Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur, San Juan 670, Bahía Blanca, Argentina.
 3. CGAMA-CIC. San Juan 670, Bahía Blanca, Argentina.
- andres.ruffo@uns.edu.ar

Abstract

The coastal sector of southwestern Buenos Aires, with an arid to semi-arid climate, is characterized by a chain of coastal dunes. This psammitic dune chain hosts a free aquifer that

carries water suitable for human consumption, being the only source of supply for the localities of the area. The objective of this study is to identify the geological conditions of the subsurface, which determine the quality and quantity of groundwater available for human consumption, through the use of electrical tomographies. The applied methodology consisted on the execution and parameterization of electrical tomographies of the subsurface in different sectors of the coastal chain, together with the interpretation of the electrical resistivity images generated, taking into account geological, geomorphological and hydrogeological aspects. As a result, the identification, in the generated images, of lithological and stratigraphic features closely related both to the hydraulic parameters of the aquifer and to the variations in the chemical quality of the water stands out. In this sense, the presence of paleochannels and lithological lateral variations, among other aspects, was interpreted. The parameterization of the method allows to define intervals of resistivities correlatable with the hydrogeological characteristics of the chain of dunes. It is concluded that the applied methodology is very useful for the geological/hydrogeological knowledge of the subsurface and provides accurate and useful data for the rational exploitation of the aquifer and the planning of groundwater catchment works.

Keywords: Coastal Dunes, Electrical resistivity tomography, Hydrogeology, Prospecting.

INTRODUCCIÓN

El agua es un bien escaso e indispensable para la vida humana y de gran importancia en el desarrollo socioeconómico de una región. La cadena de dunas costeras del sudoeste bonaerense configura un acuífero detrítico, que aloja agua dulce de excelente calidad fisicoquímica, resultando la única fuente de consumo disponible para las poblaciones del sector. Este cuerpo psamítico se encuentra suprayaciendo depósitos finos, litológicamente clasificados como loess, portadores de agua subterránea con mayor contenido en sales y variados contenidos de oligoelementos indeseados como Flúor y Arsénico. El contraste litológico de los sedimentos que componen la columna estratigráfica, sumado a la variación de salinidad del agua en profundidad, hacen de la prospección geoelectrica una metodología ideal a la hora de definir los sectores y las profundidades más propicias para efectuar captaciones de agua.

El método geoelectrico permite determinar la resistividad aparente del subsuelo, por medio de la inyección de corriente eléctrica en un conjunto de electrodos (electrodos de corriente)

hincados en la superficie del terreno y la posterior lectura de la diferencia de potencial en otro conjunto de electrodos (electrodos de potencial). El valor de la resistividad se encuentra influenciado por las características litológicas del perfil atravesado, su estructura, el grado de humedad de los sedimentos y la salinidad del fluido alojado, entre otros aspectos (Orellana, 1972).

La técnica multielectrónica aplicada en esta investigación, denominada tomografía de resistividad eléctrica (ERT por su sigla en inglés), permite realizar la inyección de corriente y posterior lectura de la diferencia de potencial. Se basa en la modelización 2D de la resistividad del terreno mediante técnicas numéricas, permitiendo así obtener las variaciones de resistividad del subsuelo tanto en profundidad como lateralmente, generando una imagen de resistividad eléctrica (IRE) en dos dimensiones (Loke, 2004).

De esta manera, el objetivo del presente trabajo es identificar las características geológicas del subsuelo, las cuales condicionan la calidad y cantidad de agua subterránea disponible para el consumo humano, por medio de la utilización de ERT.

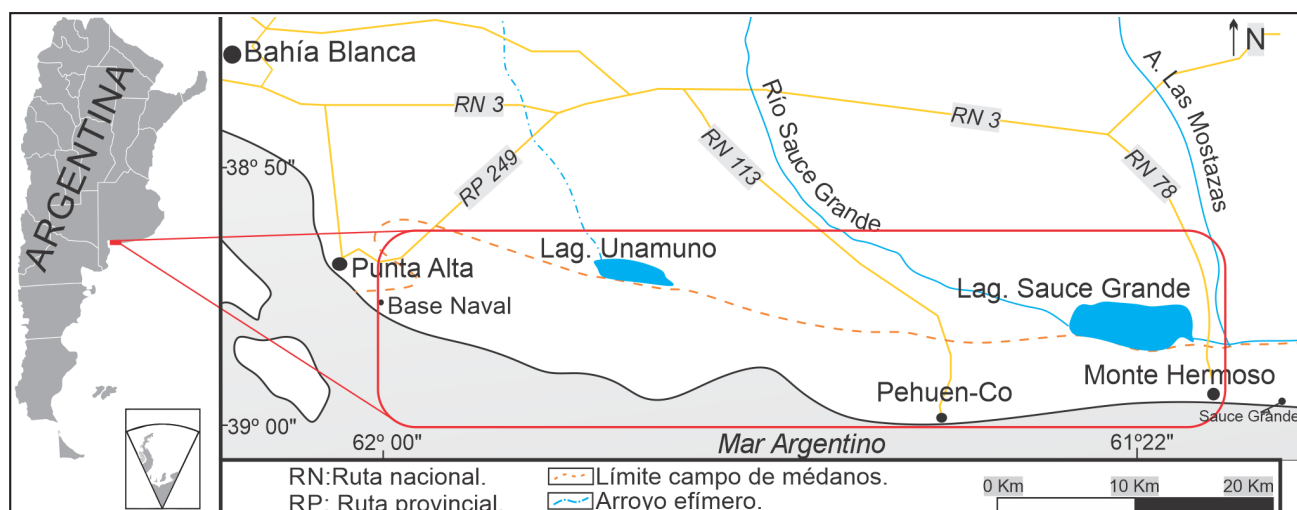


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

ÁREA DE ESTUDIO Y CLIMA

El área de estudio se ubica en el sector costero del sudoeste bonaerense, sobre la cadena de dunas psamíticas, entre las ciudades de Punta Alta, en el partido de Coronel de Marina Rosales, incluyendo a la villa balnearia de Pehuen C6 y la ciudad de Monte Hermoso, cabecera del partido hom6nimo (Figura 1). Estas dos 6ltimas se abastecen 6nicamente de agua subterránea.

Utilizando los 6ndices climáticos de *Thornthwaite* (1948) el clima de la regi6n se clasifica como C1 d B'2 a', es decir sub-h6medo mesotermal. La temperatura media anual ronda los 14,7 °C, siendo la media m6nima de 7 °C en el mes de Julio y la media m6xima de 27 °C en Enero. La precipitaci6n media anual es de 732 mm (1982-2017), presentando m6ximos en Marzo (89 mm) y m6nimos durante el mes de Junio (31 mm) (*Ruffo et al., 2021*).

GEOLOGÍA E HIDROGEOLOGÍA

Los sedimentos y rocas que afloran en el sector costero de la Provincia de Buenos Aires, est6n vinculados gen6ticamente con las variaciones del nivel del mar, sucedidas durante el Pleistoceno-Holoceno, encontr6ndose dep6sitos tanto continentales como marinos (*Aramayo et al., 2002*).

A los efectos del presente trabajo, la geología del sector puede simplificarse de la siguiente manera: iniciando la secuencia se encuentran variados dep6sitos finos, en general loessicos correspondientes a la Fm. Monte Hermoso, de edad pliocena (*Zavala, 1993*) correlacionables con los sedimentos pampeanos definidos por *Fidalgo et al. (1975)*. Suprayaciendo lo anterior, en proximidades a la l6nea litoral se encuentra depositada una secuencia arenosa rica en conchillas, interpretadas como dep6sitos de playa, sobre la cual se encuentra la cobertura psamítica moderna, compuesta de arenas finas a medias.

El acuífero libre del cual se abastecen las poblaciones del sector se encuentra alojado en las arenas que forman el cord6n costero (*Regi6n Costera, seg6n la clasificaci6n de Regiones Hidrogeol6gicas propuesta por Auge, 2004*). La morfología del manto freático tiende a copiar de forma suave las caracteristicas topogr6ficas del relieve, identific6ndose dos sistemas de flujo.

El primero, de car6cter local y somero, presenta flujos radiales divergentes con sectores de descarga locales en los bajos topogr6ficos de interduna. Un rasgo distintivo de estos sectores es la formaci6n de pequeñas lagunas u "ojos de agua", resultantes del afloramiento del nivel freático (*Ruffo et al. 2021*). El segundo sistema, m6s profundo, responde a las pendientes regionales con direcci6n norte sur, descargando en el mar argentino. Dicho acuífero libre, se emplaza sobre una capa de limos lo6ssicos (Fm. Monte Hermoso/Sedimentos Pampeanos) de comportamiento acuífero/acuitardo, con aguas de mayor tenor salino, actuando como hidroapoyo del sistema (Figura 2).

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de trabajo consistió en la b6squeda de informaci6n antecedente del 6rea, conjuntamente con campañas geofísicas y trabajos de gabinete.

Como base para esta investigaci6n, se realizaron ERT. Para la ejecuci6n del m6todo se utiliz6 un resistiv6metro autom6tico ARES (GF Instruments), el cual posee 48 electrodos, con un espaciamiento m6ximo de 5 m entre ellos y es energizado por una fuente externa (batería). Esta unidad es la encargada de verificar el estado de las conexiones, ejecutar a partir de los requerimientos preestablecidos la secuencia de medidas y almacenar los resultados.

Los arreglos electr6dicos utilizados fueron Schlumberger y Wenner, con progresivas (l6nea recta entre el primer y 6ltimo electrodo) de 235 m de longitud. Las profundidades m6ximas de exploraci6n rondaron entre 45 a 47 m.

Para efectuar la parametrizaci6n del m6todo aplicado, se realiz6 una ERT en un sector cuya columna estratigr6fica era conocida a trav6s de recortes de perforaci6n, como as6 la posici6n del nivel freático y la salinidad del agua. De esta manera, se logró darle un sentido geol6gico/hidrogeol6gico a las resistividades reales del subsuelo.

Tomando como base los datos anteriormente mencionados, se realizaron cuatro ERT en sectores espec6ficos de la cadena de m6danos (Figura 3).

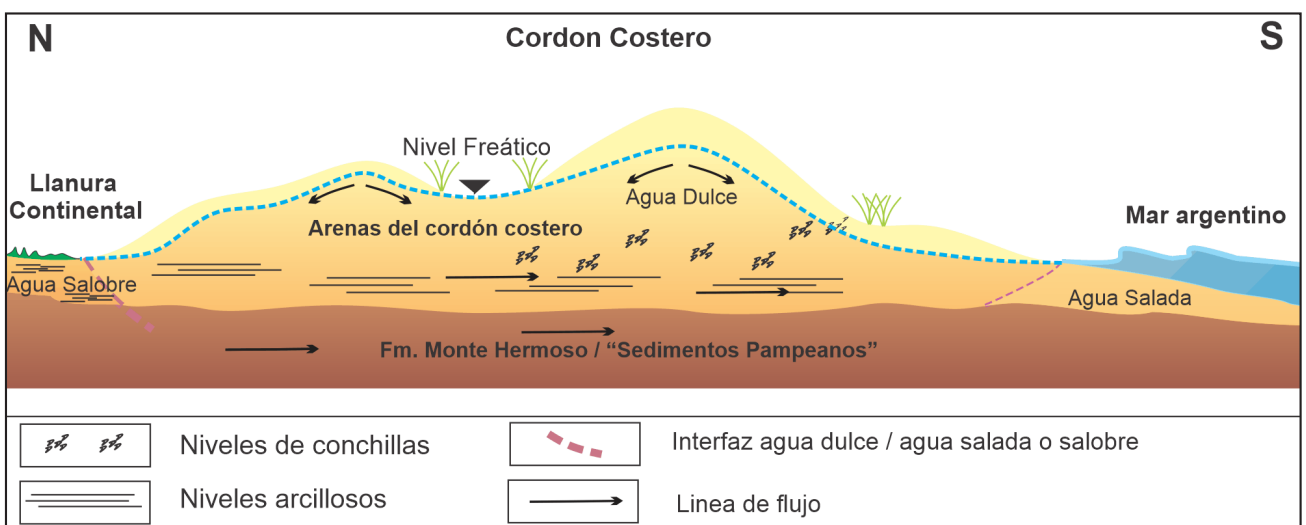


Figura 2. Perfil hidrogeol6gico simplificado del sector costero (*Ruffo et al., 2021*).

En el área correspondiente la villa balnearia de Pehuen C6 se plantearon tres ÉRT, la primera de ellas (ERT A) en el límite entre la cadena de médanos y la llanura agrícola ganadera, la segunda (ERT B) en un sector próximo a perforaciones de referencia y la tercera (ERT C), ubicada a escasos metros frente costero. En el área de Punta alta se planteó la cuarta y última ÉRT en un sector donde el acuífero presenta agua dulce, pero de mayor salinidad que en el sector de Pehuen C6.

En gabinete, los datos de campo fueron invertidos utilizando el programa Res2dinv de GEOTOMO (Løke, 2004). Este permite mediante algoritmos de inversión y análisis de los datos de campo, generar un modelo de resistividad real, el cual se grafica como una IRE.

RESULTADOS

La primer ÉRT, realizada en la localidad de Monte Hermoso (Figura 4), permitió parametrizar la metodología aplicada respecto a la geología e hidrogeología del área. En la imagen de resistividad eléctrica se logró definir la zona no saturada, con resistividades

mayores a 120 $\Omega.m$ y la zona saturada con resistividades entre 10 y 120 $\Omega.m$. Se pudo constatar que, en la zona saturada, los valores de resistividad menores a 20 $\Omega.m$ corresponden a depósitos loésicos de los sedimentos pampeanos, portadores de agua cuya conductividad eléctrica (CE) superan los 1500 $\mu S/cm$. Los valores de resistividad comprendidos entre 20 y 120 $\Omega.m$ pertenecen a depósitos arenosos, saturados con agua dulce (CE 700 $\mu S/cm$), con un espesor aproximado de 15 m.

La primera de ellas (A), ubicada en el sector límite entre la llanura pampeana y la cadena de médanos permitió identificar, como rasgo sobresaliente, un sector de interfaz o cuña salobre generada entre el agua dulce del acuífero psamítico y el agua salobre de la llanura circundante, tanto longitudinalmente como en profundidad (Figura 5). Este hecho resulta coherente con el modelo teórico de flujo planteado en la Figura 2.

En una segunda ÉRT (B), realizada sobre el límite norte del ejido urbano de Pehuen C6, se observaron esquemas de resistividad eléctrica interpretados como paleocauces, rellenos con arenas gruesas y gravas. Esto resulta coincidente con depósitos

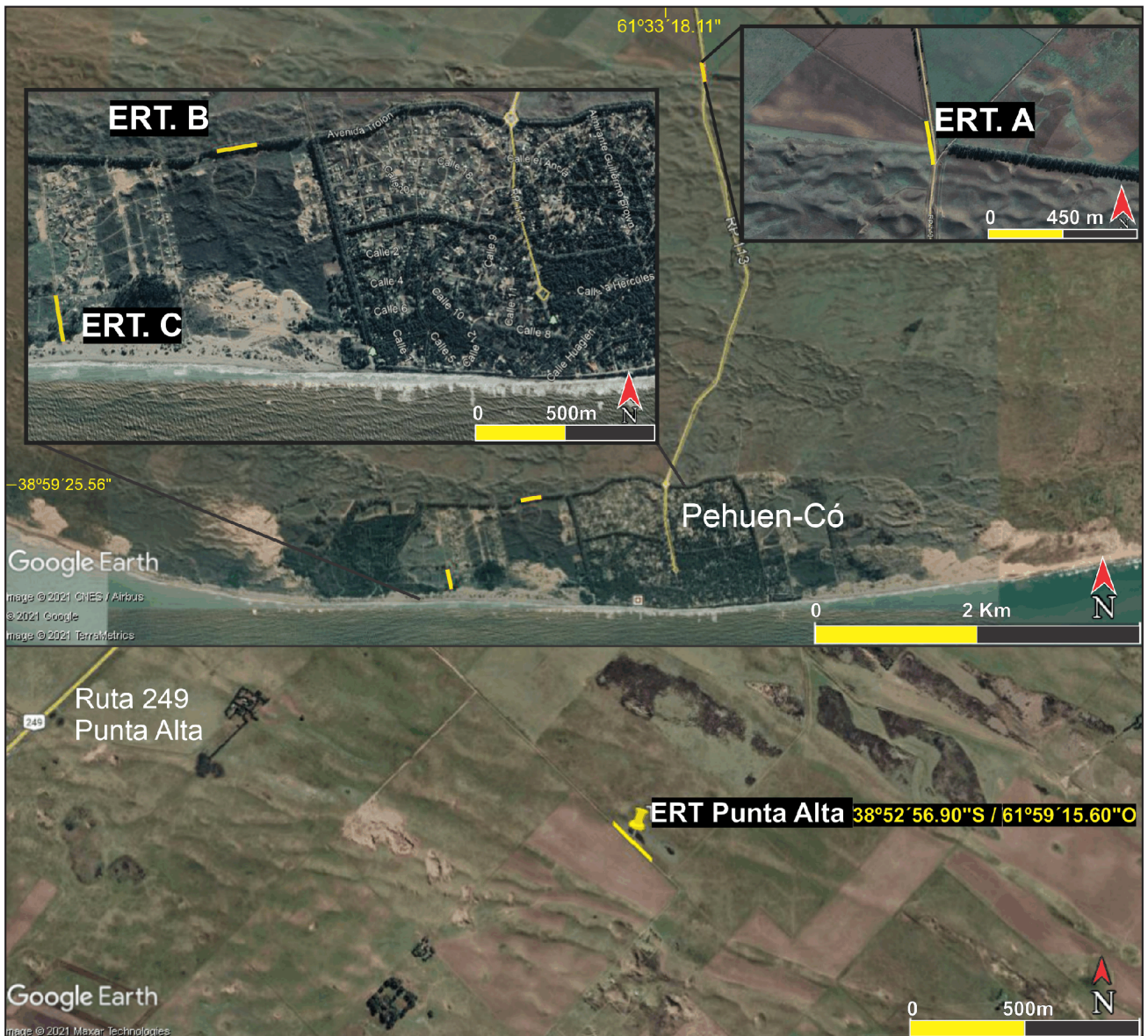


Figura 3. Ubicación de las ÉRT realizadas.

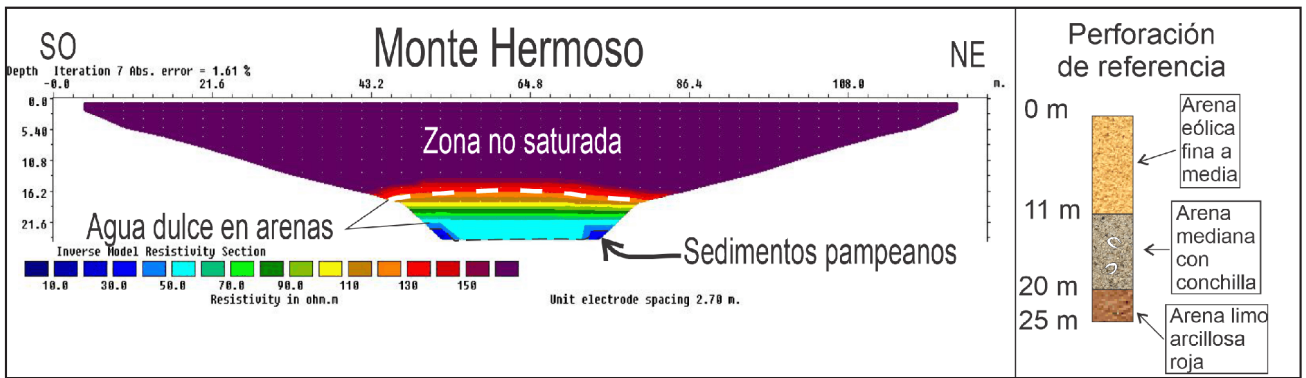


Figura 4. Imagen de resistividad eléctrica parametrizada con la columna estratigráfica del sector (arreglo eléctrico Wenner).

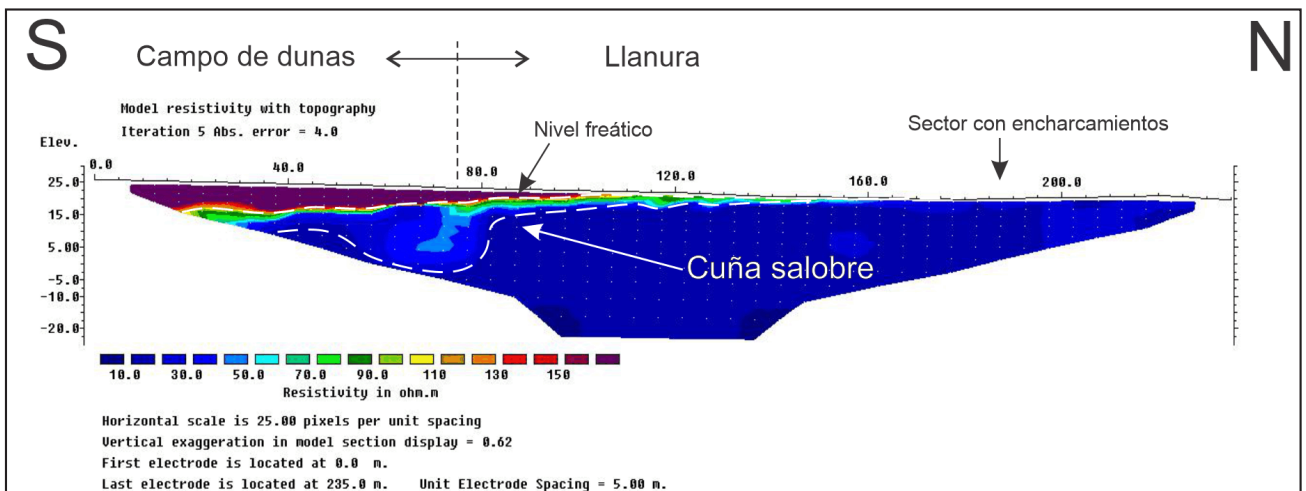


Figura 5. Imagen de resistividad eléctrica A (arreglo eléctrico Wenner). Limite campo de dunas-Llanura pampeana.

fluviales, ricos en materiales gruesos, expuestos tanto en el sector de playa como en excavaciones realizadas en la llanura. Dichos paleocauces se ven limitados por materiales de resistividades menores, interpretados como arenas finas a limosas en base a recortes de perforaciones próximas (Figura 6).

La tercer ERT del sector, se realizó perpendicularmente a la línea de costa, iniciando en el médano frontal y concluyendo unos 235 m en dirección norte. En ella fue posible identificar una zona no saturada de aproximadamente 5 m. A su vez, el espesor saturado con agua dulce alcanzó los 30 m, sin reconocerse una interfaz agua dulce agua salada entre el acuífero psamítico y el mar (Figura 7).

A su vez una cuarta ERT de 235 m de extensión fue llevada a cabo en el sector oeste del área de estudio, límite físico de la cadena medanosa y próximo a la ciudad de Punta Alta (Figura 8).

La particularidad de esta, es la presencia de un nivel conductor ($8 \Omega.m$ en promedio) entre los 2 m y 13 m debajo del nivel del terreno, no reconocido en las otras ERT realizadas en la cadena de médanos (tomando en consideración las bajas resistividades observadas, la escala de colores utilizada para interpretar la IRE difiere de los casos anteriores).

Debido a que las perforaciones existentes en el sector, que alumbraban dicho nivel, extraen agua dulce ($1800 \mu S/cm$), se procedió a obtener muestras de sedimento mediante la utilización de una "Pala Helix", con el fin de analizar el factor litológico en la respuesta eléctrica.

Los sedimentos que componen los primeros 3 m de la columna estratigráfica (límite útil de la pala helix empleada) corresponden a arenas medias a finas, mal seleccionadas, con un importante contenido de arcillas blanquecinas. A partir de los 2 m bajo el nivel del terreno se reconoció el nivel freático, siendo evidente la presencia de arcillas en el sedimento por el comportamiento plástico del mismo.

En laboratorio se pudo observar que, si bien la mineralogía es similar al resto de las arenas observadas en el cordón costero, el contenido de arcillas blanquecinas y de textura pulverulenta en seco no había sido reconocida en los otros sitios estudiados. La muestra reaccionó rápida y enérgicamente al agregarle ácido clorhídrico (al 10%), haciendo evidente un elevado contenido de carbonatos.

De esta manera la conductividad eléctrica del nivel analizado podría deberse, en mayor medida, a factores litológicos y no a la salinidad del agua alojada en el acuífero.

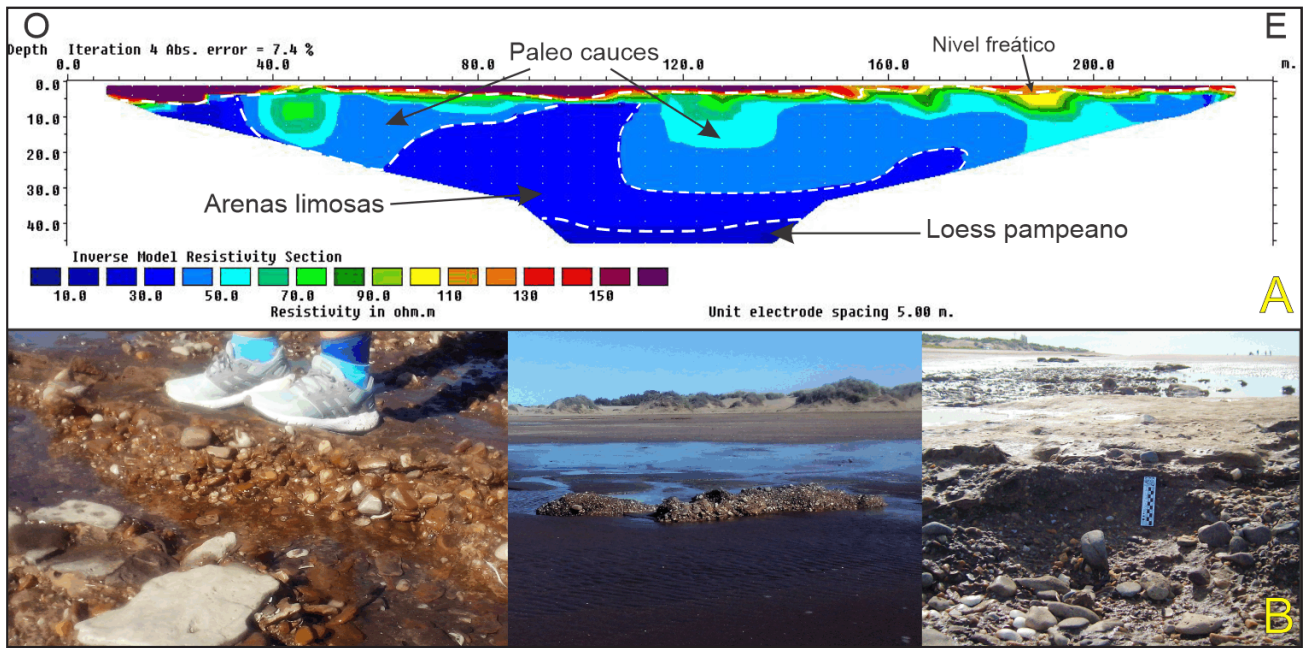


Figura 6. A) Imagen de resistividad eléctrica B (arreglo electrónico Wenner) donde se observan patrones de resistividad eléctrica interpretados como paleocauces. B) Depósitos correspondientes a paleocauces expuestos en el sector de playa.

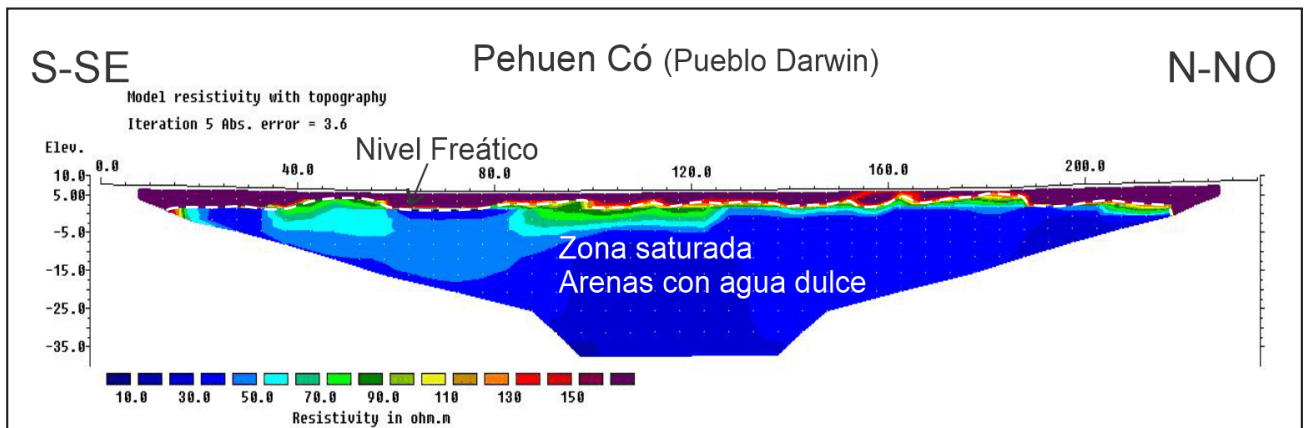


Figura 7. Imagen de resistividad eléctrica C (arreglo electrónico Wenner), correspondiente al sector costero de Pehuen C6, barrio pueblo Darwin.

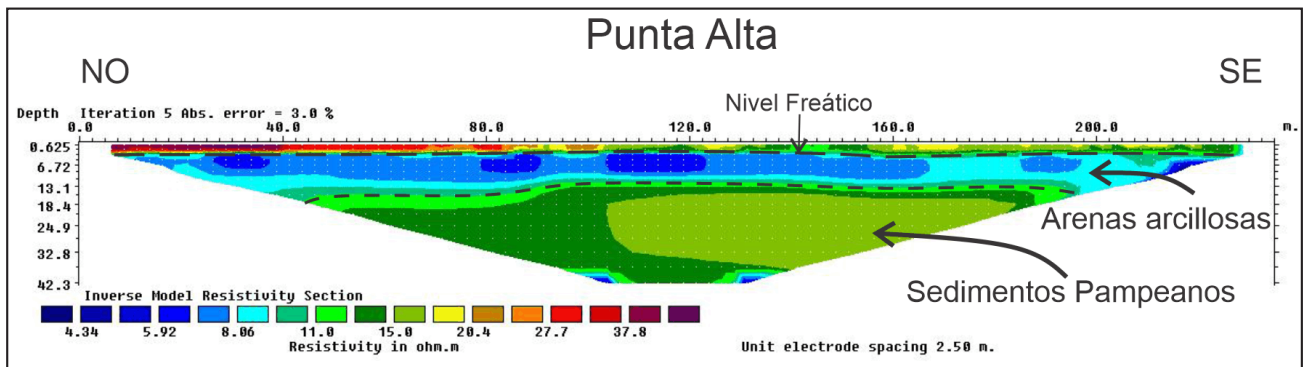


Figura 8. Imagen de resistividad eléctrica correspondiente al sector oeste del área de estudio (Arreglo electrónico Wenner).

Debajo del nivel conductivo el perfil continúa con valores de resistividad más elevados, en torno a los 12 - 15 Ω .m. Estos son interpretados como sedimentos pampeanos, a partir de su comportamiento resistivo y la correlación del techo de la Formación en distintas perforaciones de la zona.

El contenido fino carbonático de las arenas analizadas podría deberse a un retrabajo de los sedimentos pampeanos, cuyos afloramientos son abundantes en el sector. Estos suelen presentar en su techo niveles ricos en carbonatos denominados localmente como “tosca”.

CONCLUSIONES

Dado el contraste resistivo entre los distintos materiales que componen la columna estratigráfica del sector, sumado a las variaciones de salinidad existentes en profundidad, la prospección geoelectrica resulta una herramienta económica y efectiva para la exploración del recurso hídrico subterráneo.

La parametrización del método permite definir intervalos de resistividades correlacionables con las características hidrogeológicas de la cadena de médanos.

En general, los valores superiores a 120 Ω .m se consideran zona no saturada. Dentro de la zona saturada, los niveles psamíticos con agua dulce presentan resistividades entre 20 y 120 Ω .m,

mientras que los sedimentos pampeanos corresponden al intervalo entre 10 y 20 Ω .m.

Un caso particular resultan las arenas analizadas en proximidades de Punta Alta, donde el contenido carbonático de las mismas induciría una disminución de la resistividad obtenida, presentando un valor promedio de 8 Ω .m. Los datos adquiridos en dicho sector, exponen un cambio litológico en las arenas del cordón costero medanoso. Este aspecto genera una disminución de la resistividad respecto al resto de los niveles psamíticos analizados y debe ser tenido en cuenta para futuras prospecciones en el área.

A partir de la parametrización planteada, se infirió la presencia de paleocauces rellenos de materiales gruesos (posiblemente de tamaño grava), variaciones litológicas tanto en profundidad como lateralmente y zonas de mezcla entre aguas de distinta concentración salina. Conocer estos aspectos es de gran importancia en la planificación de campos de bombeo, ya que permite acotar arealmente y en profundidad los sectores objetivo con mayor probabilidad de encontrar agua de buena calidad y en cantidades económicamente explotables.

Se concluye que la metodología aplicada es de gran utilidad para el conocimiento geológico/hidrogeológico del subsuelo y proporciona datos precisos y de interés para la explotación racional del acuífero y la proyección de obras de captación de agua subterránea.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

“Conceptualización: Andrés Gabriel Ruffo; Metodología: Andrés Gabriel Ruffo y Matías Rey; Análisis de datos: Andrés Gabriel y Matías Rey; Redacción - preparación del borrador original: Andrés Gabriel Ruffo; Redacción - revisión y edición: Andrés Gabriel Ruffo, Matías Rey y René Albouy. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.”

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

“Los Autores declaran que no existe algún conflicto de interés”.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ARAMAYO, S.A., SCHILLIZI, R.A. Y GUTIÉRREZ TÉLLEZ, B.M., (2002). Evolución paleoambiental del Cuaternario en la Costa Atlántica del sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 15 (1-2): 95-104. AUGÉ, M., (2004). *Regiones hidrogeológicas. República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fe*. 104 p
- FIDALGO, F., COLADO, U.R. Y DE FRANCESCO, F. O., (1975). Sobre intrusiones marinas cuaternarias en los partidos de Castelli, Chascomús y Magdalena (Provincia de Buenos Aires). *5° Congreso Geológico Argentino, Actas 4: 225-240, Carlos Paz*.
- LOKE, M. H. (2004). Tutorial 2D and 3D electrical imaging surveys. 128p. (disponible en: <http://www.geotomosoft.com/coursenote.zip>).
- RUFFO, A. G.; ALBOUY, R.; BASTIANELLI, N. Y CARRICA, J. (2021). Humedales en la franja de médanos costeros entre Monte Hermoso y Pehuén C6, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Boletín Geológico y Minero*, 132 (1-2): 29-36. ISSN: 0366-0176 DOI: 10.21701/bolgeomin.132.1-2.003.
- ORELLANA, E., (1972). Prospección Geoelectrica en corriente continua. *Paraninfo. Madrid*.
- THORNTHWAITE, C. W., (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geologic. Rev. Vol. 38. 55-94. <http://dx.doi.org/10.2307/210739>*.
- ZAVALA, C., (1993). Estratigrafía de la localidad de Farola del Monte Hermoso (Plioceno-reciente), provincia de Buenos Aires. *12° Congreso Geológico Argentino y 2° Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Actas 2,228-235*.