

Resistividad eléctrica y cargabilidad del acuífero Puelche en La Plata, provincia de Buenos Aires

Santiago Perdomo^{1,2}, Jerónimo E. Ainchil¹, Eduardo E. Kruse^{3,4}, Joaquín Nigro^{2,5}, Mario Tessone⁵, Soledad Lagos¹ y Martín Pensa¹

¹ Departamento de Geofísica Aplicada, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (UNLP), Paseo del Bosque s/n. (1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina.

² Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires. (CIC)

³ Cátedra de Hidrología General, Facultad de Ciencias Naturales y Museo (UNLP), Cátedra de Hidrología General, Calle 64 n° 3 (1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina.

⁴ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Universidad Nacional de La Plata. (CONICET-UNLP)

⁵ Instituto de Recursos Minerales (INREMI-UNLP-CIC) Calle 64 n° 3 (1900) La Plata, Buenos Aires, Argentina.

Mail de contacto: santiago.perdomo@fcaglp.unlp.edu.ar

RESUMEN

Las técnicas geoelectricas de superficie permiten la caracterización del medio a reducidos costos, posibilitando delimitar el desarrollo de un acuífero. En este trabajo se valora el uso de la tomografía eléctrica en la evaluación hidrogeológica del acuífero Puelche en una zona de La Plata, donde presenta fuertes variaciones laterales en el espesor y la granulometría. La aplicación de esta técnica genera modelos en forma de perfil o imágenes de Resistividad Eléctrica (IRE) y de Cargabilidad. Mediante esta caracterización se intenta mejorar el conocimiento del sistema y aportar información para la ubicación y diseño de perforaciones. Las mediciones fueron realizadas con un resistivímetro IPR-12 de Scyntrex, usando una configuración electródica dipolar axil de 50m de separación y hasta 8 niveles de medición, permitiendo explorar hasta 120m de profundidad. El análisis conjunto de la resistividad y la cargabilidad, permite una interpretación más precisa, incorporando información acerca de las características litológicas.

Palabras clave: acuífero Puelche, imágenes de resistividad eléctrica, cargabilidad.

ABSTRACT

Geoelectrical methods allow a fast and low cost characterization of an aquifer in the subsurface by studying the electrical properties of the ground. The technique provides useful complementary data in a hydrogeological study. The aim of this work is to apply the electrical tomography to evaluate the possible lateral variations in thickness and grain size in the Puelche aquifer near the city of La Plata in the province of Buenos Aires, Argentina. A dipole-dipole array of 50m separation was used, reaching a final depth of exploration of 120m, measuring electrical resistivity and chargeability of the fresh water aquifer zone. The results presented here are additional information for improving hydrogeological models of the area.

Keywords: Puelche aquifer, electrical resistivity imaging, chargeability.

Introducción

Conocer en detalle las características de un acuífero es relevante, no sólo para mejorar su explotación, sino para protegerlo de posibles contaminaciones, tanto naturales como antrópicas y evaluar la eficiencia de posibles procesos de remediación.

Un estudio hidrogeológico a través de perforaciones resulta costoso y su distribución

espacial condiciona los resultados y conclusiones.

Las técnicas geofísicas en superficie permiten una rápida caracterización del medio, pudiendo aumentar la distribución espacial de la información, lo cual se constituye en una herramienta complementaria adecuada para la extrapolación de información reconocida a partir de las perforaciones.

Con el método eléctrico en particular, es posible delimitar las zonas de desarrollo de un

acuífero, por contraste de las propiedades eléctricas de los sedimentos.

En el área considerada Ainchil et al (2006) señala que la asociación de registros geofísicos en los perfiles de perforaciones es de utilidad para delimitar los sedimentos y los niveles acuíferos, en particular en el esquema hidrogeológico que se describirá a continuación. A su vez se reconoce, que existen fuertes variaciones laterales en el espesor y granulometría del principal nivel acuífero de la región, constituido por las denominadas Arenas Puelches. Ello tiene una influencia directa en variaciones significativas en la transmisividad y conductividad hidráulica (Perdomo et al, 2011)

En este trabajo se aplica y valora el uso de la tomografía eléctrica con el objetivo de reconocer e identificar dichas variaciones laterales en las características del acuífero en la ciudad de La Plata y sus alrededores.

Los modelos obtenidos se presentan en forma de perfil o sección de resistividades en 2D, denominadas Imágenes de Resistividad Eléctrica (IRE) (Loke, 2004). Mediante la caracterización planteada se busca aportar información adicional para la ubicación y diseño de perforaciones y mejorar el entendimiento del comportamiento del sistema acuífero subterráneo.

Área de estudio

Las características estratigráficas de la región son descritas por Auge et al. (2002), Laurencena et al. (2010), entre otros. Las unidades presentes y de mayor interés hidrogeológico serán enumeradas y descritas a continuación en forma decreciente temporalmente, efectuando una síntesis de los citados autores.

Los Sedimentos Pospampeanos corresponden a limos, arcillas, arenas,

conchillas y conglomerados calcáreos de diferente origen (fluvial, eólico, marino, lacustre), acumulados en ambientes topográficamente deprimidos, como valles fluviales y bañados o lagunas.

Los Sedimentos Pampeanos están compuestos por limos arenosos y arcillosos de origen eólico y fluvial, conocidos genéricamente como loess. Poseen tonalidades castañas, amarillentas y rojizas y suelen estar intercalados por cuerpos calcáreos. La existencia de un estrato limo-arcilloso por encima de las Arenas Puelches, cumple la función de acuitardo.

Las Arenas Puelches están constituidas por una secuencia de arenas cuarzosas, medianas y finas, de colores blanquecinos y amarillentos. Son de origen fluvial y ocupan el Noreste de la Provincia de Buenos Aires, extendiéndose hacia el Norte hasta Entre Ríos y hacia el Noroeste hasta Santa Fe y Córdoba (Auge et al, 2002) En La Plata y alrededores se ha estimado un espesor medio de 20 metros y se ubica entre una profundidad mínima de 20 metros y hasta una máxima que supera los 50 metros.

Por debajo de las Arenas Puelches se constituye la Fm. Paraná, formada por arcillas y arenas de origen marino. En la parte superior pueden encontrarse arcillas plásticas de tonos verdosos y azulados.

La Fm. Olivos se encuentra por debajo y está constituida también por arcillas y arenas pero de origen continental y de tonalidades rojizas.

El basamento hidrológico está constituido por rocas cristalinas de tipo gneis granítico, alcanzado en la ciudad de La Plata por la Perforación Plaza de Armas a 486 m y puede asimilarse al que aflora en las Sierras de Tandil, en la isla Martín García y en la costa uruguaya.

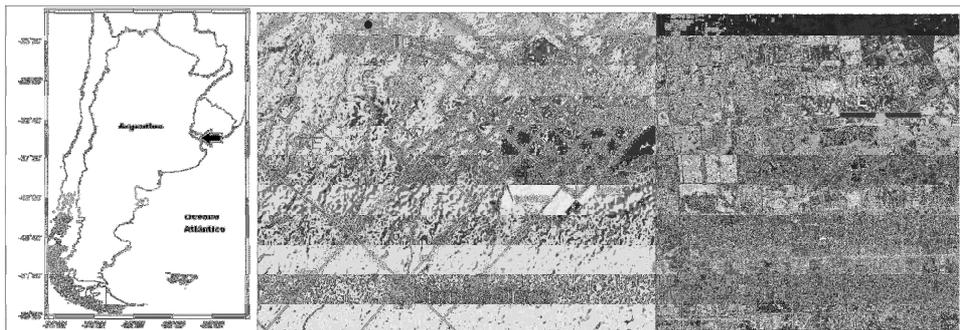


Figura 1. Mapa del área de estudio y ubicación de la tomografía eléctrica y el SEV.

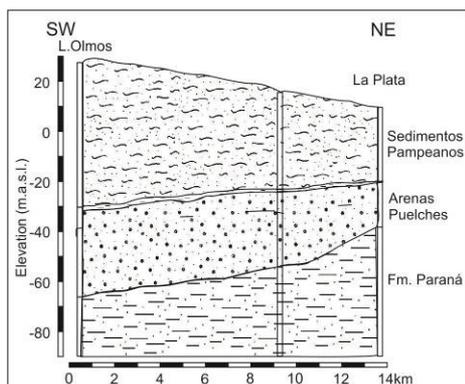


Figura 2. Esquema de la sección estratigráfica en la zona de La Plata.

Según González (2005), el comportamiento hidrogeológico del Acuífero Puelche lo convierte en la principal fuente de almacenamiento y explotación de agua potable de la región. En general, el Pampeano se comporta como un acuífero de baja a media productividad, y funciona como recarga y descarga del anterior. Las arcillas de la Fm. Paraná funcionan como acuícludo y son la base de dicho nivel acuífero.

Materiales y métodos

Principio del método eléctrico

La conductividad eléctrica en corriente continua se denomina σ_0 (expresada en Sm^{-1}) y manifiesta la facilidad con la que puede establecerse un flujo a través de cualquier material (Orellana, 1982; Sharma, 1997). La magnitud recíproca es la resistividad ρ_0 ($1/\sigma_0$) y se mide en unidades de Ohm m [Ωm].

La ecuación que gobierna la conducción de corriente eléctrica es la ley de Ohm, $J = \sigma_0 E$. Donde J es la densidad de corriente y E es el campo eléctrico que por ser conservativo deriva de un potencial eléctrico escalar, $E = -\partial V$.

El caso más simple para estudiar este fenómeno es considerar la resistencia eléctrica de una muestra cilíndrica de roca de longitud L , resistividad ρ y sección transversal A : $R = \rho L/A$. El factor (A/L) es puramente geométrico y en los estudios de campo viene dado por la posición relativa de los electrodos en el terreno.

La resistencia se obtiene aplicando la ley de Ohm: $\Delta V = RI$, donde ΔV es la diferencia de potencia medida entre los extremos (Volts) de la muestra e I es la intensidad de corriente inyectada (Ampere).

Cuando se explora la resistividad del medio se debe considerar que los electrodos resultan

fuentes puntuales, así el potencial eléctrico medido en un punto cualquiera sobre la superficie se obtiene resolviendo la ecuación de Laplace.

De la solución obtenida se puede despejar y obtener la siguiente expresión para la resistividad: $\rho = G\Delta V/I$, donde G es un factor "geométrico" que contiene la información de las posiciones relativas de los electrodos. Para el caso más general de un medio heterogéneo, la magnitud calculada mediante esta expresión se denomina resistividad "aparente", la cual es necesario invertir para obtener una distribución de resistividades "verdaderas".

Polarización Inducida

El método de polarización inducida (PI) permite medir la capacidad de almacenar carga de las rocas además de su conducción eléctrica. Este fenómeno de acumulación reversible de cargas en el subsuelo puede estudiarse en el dominio del tiempo, midiendo el decaimiento del voltaje transitorio luego de interrumpida la energización, o también en el dominio de la frecuencia, determinando la impedancia y la fase (Revil et al. 2012).

La unidad de cargabilidad, M , se expresa en mV/V y se utiliza la siguiente expresión para calcularla: $M = \sum V_i/V_p$, donde V_p es un voltaje medido durante la energización y V_i son los voltajes medidos durante la etapa de descarga. Esta magnitud se calcula en el dominio del tiempo y su determinación depende del instrumento utilizado, por esta razón es útil normalizar M por la conductividad (Frye et al. 1998). De esta manera la cargabilidad normalizada (M_n), es más sensible a efectos de conducción superficial, predominante en las arcillas por sobre conducción volumétrica, la cual depende del contenido electrolítico (Slater et al. 2000).

Los cambios observados en las secciones de resistividad pueden ser causados por variaciones litológicas en la sección explorada pero también por cambios en la concentración de sales contenidas en el agua presente, por ello se plantea la necesidad de incorporar mediciones de cargabilidad y el cálculo de la sección de cargabilidad normalizada. Con esta información adicional es posible discriminar la naturaleza de los efectos eléctricos observados.

Metodología

Los sondeos eléctricos verticales (SEV), permiten conocer la distribución vertical de resistividades, a partir de mediciones en superficie y su posterior inversión, a través de la cual se obtienen modelos que suponen un

comportamiento lateralmente homogéneo para cada una de las electrocapas (Orellana, 1982).

Para contemplar posibles variaciones laterales de la resistividad es necesario realizar estudios de mayor detalle como son las tomografías eléctricas, que combinan mediciones en profundidad y en dirección horizontal. Los modelos obtenidos se presentan en forma de perfil o imagen de resistividad eléctrica (IRE).

El trabajo de campo consiste en obtener valores de resistividad aparente a partir de hacer circular una corriente continua I por el circuito de emisión (C1 y C2) y medir la diferencia de potencial V generada entre los electrodos de recepción (P1 y P2), teniendo en cuenta su disposición espacial (Sharma, 1997). El dato de resistividad “aparente” obtenido se ubica en forma de pseudo sección o perfil (Figura 3).

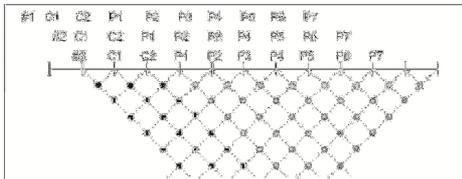


Figura 3. Esquema de la pseudo sección para el arreglo dipolar axil. Se muestran los electrodos activos para 3 mediciones sucesivas.

El modelo de resistividades “verdaderas” se obtiene de manera iterativa, y por medio de algoritmos matemáticos se calcula su respuesta eléctrica que es comparada con los datos medidos. La diferencia entre la sección calculada y las mediciones viene dada por un error medio cuadrático, que indica la bondad del ajuste (Loke, 2004).

En el área de estudio se utilizó un arreglo dipolar axil de 50m de separación eléctrica y hasta 8 niveles de medición, permitiendo explorar hasta 120m de profundidad. La sensibilidad de este arreglo a las variaciones horizontales de resistividad lo hace apropiado para diferenciar variaciones laterales en el comportamiento eléctrico de una estratificación horizontal, como son las Arenas Puelches. Este arreglo minimiza los efectos de perturbaciones electromagnéticas de los dipolos, debido a que necesita menos cantidad de cables que otros arreglos en el terreno, facilitando además las tareas de campo (Loke, 2004).

Las mediciones fueron realizadas con un resistivímetro IPR-12, desarrollado por Scyntrex, que trabaja en el dominio del tiempo. El equipo

trabaja con una fuente de emisión, inyectando corriente continua por un período suficientemente largo de tiempo (hasta alcanzar el equilibrio) y midiendo el decaimiento del voltaje en los electrodos de recepción cuando se interrumpe la energización. Este instrumento muestrea el voltaje en una ventana de tiempo posterior y ajusta un modelo “exponencial” de decaimiento. (Scyntrex, 1997)

Resultados

Como parte del estudio se efectuó un Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) previo a la adquisición de datos 2D para estimar la profundidad del techo y base del acuífero, en el lugar tomando como base tres perforaciones próximas. Las profundidades obtenidas se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados e Interpretación del SEV.

Profundidad (m)	Resistividad (Ω m)	Asignación Litológica
3.2	20	Sedimentos Superficiales
50	10	Limo arenarcilloso
80	66	Arenas
490	1.1	Arcilla/Limo arcilloso
INF	500	Gneis granítico

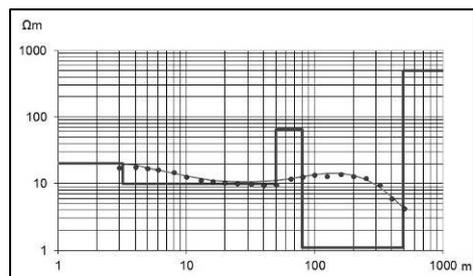


Figura 4. Curva de Campo (puntos), Modelo de Resistividades Verdaderas (trazos rectos) y respuesta calculada (curva continua). El modelo generó un ajuste de 4.1%.

El corte geoelectrico propuesto consta de 5 capas y un error de ajuste de 4.1%. Se observa

una primera capa superficial de pocos metros de espesor, subyace una capa de 10 Ω m resistividad hasta los 50m, atribuible a los sedimentos Pampeanos. Luego aparece una capa con un espesor de 30m y una resistividad de 66 Ω m, asignable al acuífero Puelche. Finalmente, se evidencia un marcado descenso de la resistividad, que estaría caracterizando a las arcillas de la Fm. Paraná. También se incorporó la presencia de un basamento resistivo próximo a los 500m de profundidad (señalado en los antecedentes), aunque su efecto no es evidente en los datos medidos, se utiliza como un valor condicionante.

Siguiendo la interpretación de este sondeo se programó la adquisición de la IRE viendo que fue posible reconocer fácilmente la profundidad del techo y base de las Arenas Puelches debido a los contrastes eléctricos observados.

Modelos de Resistividad y Cargabilidad

Para el procesamiento de los datos se utilizó un modelo inicial de referencia, siguiendo la interpretación del SEV, que contempla la presencia de la formación Pampeano, Paraná y la presencia del basamento resistivo a los 500m, pero sin imponer condiciones iniciales a la resistividad del acuífero Puelche. La inversión de los datos de cargabilidad se realizó simultáneamente con la de resistividad y se obtuvo un ajuste de 1% y 6.1 %, respectivamente al cabo de 7 iteraciones.

En la IRE planteada (Figura 5) se ve el comportamiento conductivo (1-16 Ω m) de los

aumento de la resistividad hasta valores de 40 Ω m. Este aumento de la resistividad sería atribuible a la presencia de material más arenoso y a la presencia de agua de bajo contenido salino (acuífero Puelche), hasta una profundidad aproximada de 80m donde disminuyeron los valores de resistividad.

La sección de cargabilidad presenta tres anomalías de alta cargabilidad entre las progresivas 400 y 500m; 550-650m y 800-850m y una anomalía de baja cargabilidad más allá de la progresiva de 900m por debajo de los 50m de profundidad.

Las anomalías de alta cargabilidad serían asociadas a la presencia de arcilla, sin embargo, la sección de cargabilidad normalizada sólo muestra valores altos por debajo de los 75m entre la progresiva de 600-900m y por encima de los 50m entre los 300 y 600m. Esta sección permite suponer que el material arcilloso dentro de las Arenas Puelches estaría presente cerca de la progresiva de 800m.

Conclusiones

Las IRE permitirían la correcta identificación del acuífero Puelche de agua de bajo contenido salino (resistivo) en relación a los sedimentos limos arcillosos del Pampeano por encima y a los sedimentos arcillosos de la Fm. Paraná por debajo (ambas más conductivas).

El contraste eléctrico observado entre las unidades acuíferas y su entorno haría que las IRE y la metodología planteada sean adecuadas para el reconocimiento del sistema

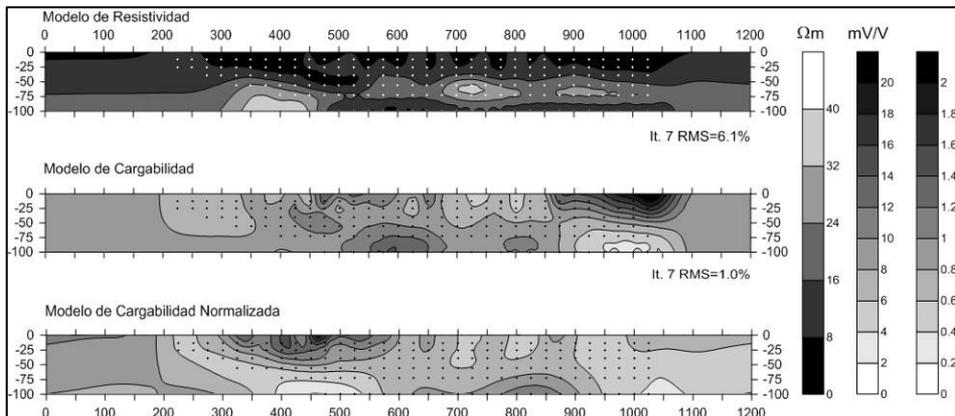


Figura 5. IRE, Cargabilidad y Cargabilidad Normalizada. Las distancias y profundidades están en metros.

limos Pampeanos hasta una profundidad aproximada de 50m, por debajo se observa un

hidrogeológico, así como la identificación de sus posibles variaciones laterales.

Esta técnica permitiría una adecuada cuantificación del espesor y profundidad del acuífero Puelche debido a que los valores observados se corresponden con los citados por otros autores para la región.

La ocurrencia de zonas anómalas en la sección de cargabilidad y cargabilidad normalizada serían atribuibles a un mayor contenido de material arcilloso dentro del espesor asignado a la capa acuífera por el método SEV.

El análisis conjunto de distintos perfiles como la resistividad y la cargabilidad, así como la cargabilidad normalizada, permitiría realizar una interpretación más precisa de las condiciones del sistema acuífero incorporando información acerca de las características litológicas de las formaciones estudiadas.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su especial agradecimiento a José Luis Molina, Ezequiel Valeff, Gustavo Tinto e Ignacio Otero, por su colaboración en las tareas de campo, a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC) y al Instituto de Recursos Minerales (INREMI).

Referencias

- Ainchil, J., Kruse, E., Calahorra, P. (2006). Variaciones Laterales den los sedimentos de los acuíferos Pampeano y Puelche (Noreste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina). Memorias del VII Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Asunción, Paraguay.
- Auge, M.; Hernández, M.; Hernández, L. (2002). Actualización del conocimiento del acuífero semiconfinado Puelche en la Provincia de Buenos Aires - Argentina. XXXIII International Hydrogeology Congress, (págs. 624-633). Mar del Plata, Argentina.
- Frye, K., Lesmes, D., Morgan, F. (1998). The influence of pore fluid chemistry on the induced polarization response of rocks and soils. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics and Engineering and Environmental Problems, 771-780.
- Gonzalez, N. (2005). Los ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino, (págs. 359-374). La Plata, Argentina.
- Laurencena, P., Deluchi, M., Rojo, A., Kruse, E. (2010). Influencia de la explotación de aguas subterráneas en un sector del área periurbana de La Plata. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 66(4), 484 – 491.
- Loke, M. (2004). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.
- Orellana, E. (1982). Prospección Geoeléctrica en corriente continua (2 ed.). Madrid: Paranainfo.
- Perdomo, S., Ainchil, J., Kruse, E. (2011). Relación entre la conductividad hidráulica de un acuífero y parámetros geoeléctricos en un sector del noreste de la provincia de Buenos Aires. VII Congreso Argentino de Hidrogeología, (pág. 8). Salta.
- Revil, A.; Karaoulis, M.; Johnson, T.; Kemma, A. (2012). Review: Some low-frequency electrical methods for subsurface characterization and monitoring in hydrogeology. Hydrogeology Journal(20), 617-658.
- Scyntrex. (1997). IP/Resistivity Receiver Operator's Manual. Ontario, Canadá.
- Sharma, P. (1997). Environmental and engineering geophysics. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Slater, L., Lesmes, D., Sandberg, S. (2000). IP interpretation in environmental investigations. Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 935-944.