

Identificación de la intrusión salina en Santa Teresita (Prov. Buenos Aires), mediante la aplicación de métodos eléctricos

Santiago Perdomo^{1,2}; Silvina Carretero^{3,4}; Eduardo Kruse^{3,4}; Jerónimo Ainchil¹

¹ 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 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)

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

RESUMEN

En Santa Teresita (Buenos Aires) se evaluó la extensión de una zona afectada por intrusión salina a través de Sondeos Eléctricos Verticales e Imágenes de Resistividad Eléctrica. El análisis de la resistividad permitió identificar los sedimentos de la zona no saturada (alta resistividad), de la zona saturada con agua dulce (resistividad media) y con agua salina (alta conductividad). La metodología propuesta permite caracterizar el acuífero de agua dulce y definir la extensión de la zona afectada por la salinización.

Palabras clave: agua dulce-agua salada, imágenes resistividad eléctrica, salinidad aguas subterráneas, Partido de La Costa.

ABSTRACT

In Santa Teresita (Buenos Aires) the extension of an area affected by saltwater intrusion using Vertical Electrical Sounding and Electrical Tomographies techniques was investigated. The analysis of the resistivity models allowed identifying sediments from the unsaturated zone (highly resistive), the saturated zone with freshwater (resistive) and saline water (conductive). The methodology applied was successful to describe the freshwater aquifer in the region and to define the extent of the area affected by salinization.

Keywords: freshwater-saltwater, electrical resistivity images, groundwater salinity, Partido de La Costa.

Introducción

La aplicación de la prospección geofísica contribuye a conocer la distribución de los materiales en el subsuelo y su naturaleza, analizando la variación de las propiedades físicas de las rocas con la profundidad. Esta metodología aplicada en hidrogeología sirve para determinar la existencia y distribución aproximada del agua en los terrenos permeables. Los métodos de exploración geoelectrica son sensibles a la composición mineral del subsuelo, pero en mayor medida al contenido de sales presentes en el agua subterránea y han sido aplicados con frecuencia en regiones costeras (Nowroozi et al., 1999; Nassir et al., 2000; Satriani et al., 2011; Perdomo et al., 2011).

Los procesos de urbanización además de alterar la morfología del médano, modifican el régimen de infiltración y recarga del acuífero. A

su vez, un exceso de explotación del recurso hídrico puede disminuir la descarga y consecuentemente producir un aumento en la salinidad del agua subterránea, deteriorando la calidad del agua del acuífero (Custodio y Llamas, 1983; El Yaouti et al., 2009; Bocanegra et al., 2010).

En Santa Teresita (Prov. de Buenos Aires) Carretero et al., (2013a) detectaron un valor elevado de conductividad eléctrica del agua subterránea (11800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en una perforación que en 1987 presentaba un valor de 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Consejo Federal de Inversiones, 1990). Este dato, sumado a la falta de información de perforaciones, a la carencia de monitoreo previo de las aguas subterráneas y a la comunicación verbal de los habitantes, se utilizó como punto de partida para definir la zona afectada por el proceso de intrusión salina. Debe señalarse que esta localidad no posee una red de abastecimiento de agua potable.

El objetivo del trabajo fue identificar preliminarmente los límites de la zona afectada por la salinización del agua dulce mediante el empleo de técnicas geoelectricas.

Área de estudio

El área de estudio se ubica en el Partido de la Costa, Provincia de Buenos Aires (Fig.1).



Figura 1. Área de estudio

Se reconocen dos ambientes geomorfológicos: cordón costero y llanura continental, que condicionan el comportamiento hidrodinámico e hidroquímico de las aguas subterráneas (Carretero et al., 2013b). El cordón costero se caracteriza por la presencia de sedimentos compuestos por arenas finas. La llanura continental se desarrolla al oeste del cordón costero con cotas inferiores a 5 msnm, predominando los materiales limosos y arcillosos. El cordón costero es la zona de recarga principal, la conducción se efectúa en un corto tramo, y se da la descarga en dos direcciones opuestas, una hacia el mar y la otra al oeste hacia la llanura continental.

El acuífero principal de agua dulce está constituido por arenas de médanos superpuestas a arenas de barrera con un espesor promedio de 10 m y está limitado por dos interfases, hacia el continente agua dulce-agua salobre y hacia el mar, agua dulce-agua salada. Este acuífero es la única fuente de provisión de agua dulce para la población.

Métodos Geoelectricos

La conducción eléctrica de los materiales en la superficie de la tierra se estudia a partir de establecer un flujo de corriente y determinar la

distribución del campo potencial producido por una o más fuentes de corriente continua (Orellana, 1982). La magnitud medida se denomina resistividad, ρ y se expresa en Ohm metro [Ωm] en el Sistema Internacional (SI). Es también recíproca de la conductividad eléctrica, $\rho=1/\sigma$. La resistividad resulta de conocer la intensidad de la corriente inyectada (I), la diferencia de potencial producida en dos electrodos de medición (ΔV) y de la disposición geométrica de los electrodos en el terreno (K) siguiendo la expresión de la ecuación 1.

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Debido a que el medio donde se efectúan las mediciones tiene características heterogéneas, la resistividad calculada es una magnitud aparente. Los sondeos eléctricos verticales (SEV) son las determinaciones de la resistividad aparente medidas con un mismo dispositivo tetrapolar, lineal y simétrico respecto a un origen, y se obtienen a partir de aumentar la separación entre los electrodos de emisión de corriente AB (Orellana, 1982).

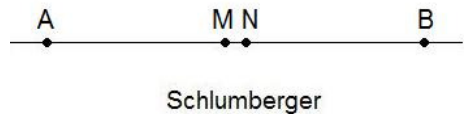


Figura 2. Esquema de disposición de electrodos para el arreglo Schlumberger. La emisión de corriente se hace a través de A-B y la lectura de potencial en M-N.

Estas determinaciones deben ser invertidas para obtener un modelo de distribución vertical de resistividades verdaderas. Este modelo contempla, por lo tanto, variaciones verticales de la resistividad (1D), suponiendo que el suelo está compuesto por capas horizontales y paralelas de comportamiento eléctrico homogéneo. La bondad del modelo se estima a través de un error medio cuadrático calculado entre los datos registrados en el campo y la resistividad aparente calculada para ese modelo.

La técnica de Tomografía Eléctrica también efectúa determinaciones de la resistividad aparente del subsuelo pero utilizando diferentes separaciones y posiciones de electrodos de

emisión y recepción (Sharma, 1997). Esta metodología permite contemplar variaciones de la resistividad en la dirección vertical al igual que los SEV, pero además en la dirección horizontal. Por esta razón, constituye un estudio de mayor detalle y apropiado para resolver situaciones geológicas más complejas.

Los valores medidos de la resistividad aparente se ubican en forma de pseudo sección (Figura 3) que también es necesario procesar para obtener un modelo de resistividades verdaderas en dos dimensiones. El producto obtenido se representa en forma de perfil o Imagen de Resistividad Eléctrica (IRE) (Loke, 2004).

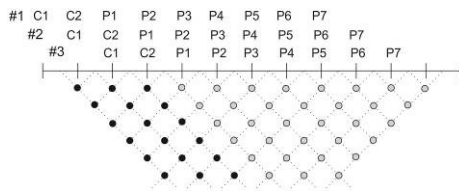


Figura 3. Esquema de electrodos activos en tres secuencias de medición con el arreglo dipolar axil. Ci corresponde a los electrodos de energización y Pi a los de medición. Además puede verse, el orden de los datos en forma de pseudo sección.

Las tareas de prospección involucraron la medición de 7 SEV de 100m de longitud máxima de separación entre electrodos, partiendo de la zona próxima a la perforación afectada por la salinización y extendiéndose hacia el sur y norte para extrapolar las condiciones eléctricas observadas (Figura 4).

Para la tomografía eléctrica se utilizó un arreglo dipolar axil de 5m de separación y hasta 6 niveles de medición de diferencia de potencial. Este arreglo cumple con los requerimientos de sensibilidad a cambios horizontales de la resistividad y además de practicidad en la adquisición de datos, alcanzando la profundidad máxima de exploración determinada a partir de los SEV.

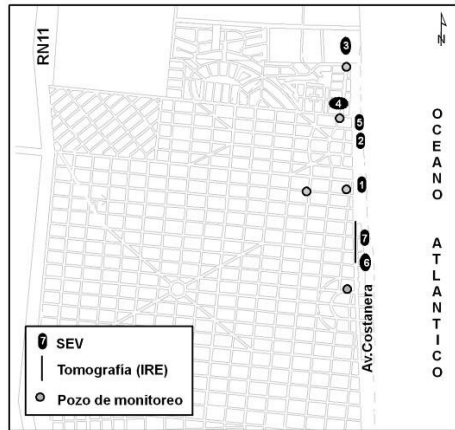


Figura 4. Ubicación de los SEV e IRE sobre Av. Costanera, además de los pozos de monitoreo.

Resultados

En la Figura 5 (SEV 1) se ven representados: una curva medida, la curva ajustada y el modelo propuesto. Se interpretó que la baja resistividad se debe a la presencia de agua de elevado contenido salino. El SEV 1 se localizó enfrente del sector de la perforación donde se detectarían altos valores de conductividad eléctrica. Las mismas características se han advertido para los SEV 2, 5 y 7.

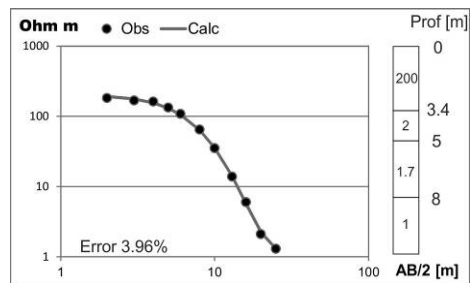


Figura 5. Izquierda: Curva SEV 1 observada y calculada. Derecha: Modelo de resistividades propuesto. Las bajas resistividades por debajo de los 3m indican la presencia de agua de elevada salinidad.

Las características del SEV 3 se presentan en la Figura 6, este corresponde a un sector del acuífero que contiene agua de baja salinidad. El mismo comportamiento se observa en los SEV 4 y 6. El SEV 3 se realizó al norte de la localidad

en las cercanías de un pozo que presenta una conductividad eléctrica de 491 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El modelo propuesto reflejó un aumento de la resistividad a valores intermedios (63 Ωm) respecto al SEV 1 y se interpretó como una capa saturada con agua de menor contenido de sales, lo cual se corresponde con los valores de conductividad.

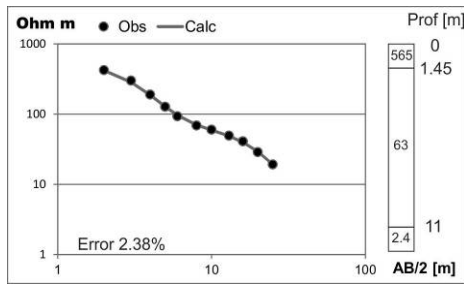


Figura 6. Izquierda: Curva SEV 3 observada y calculada. Derecha: Modelo de resistividades propuesto. El valor intermedio de resistividad se interpreta como una zona de agua de baja salinidad.

Los modelos propuestos fueron realizados con ajustes inferiores al 5% y posteriormente se integraron en un perfil de orientación norte-sur (Figura 7).

Analizando este perfil de resistividades fue posible afirmar que los modelos de los SEV 1 y 2 reflejan el comportamiento eléctrico del sector afectado por un mayor espesor saturado con agua de elevada salinidad.

Estos modelos muestran características muy resistivas en la parte más superficial (zona no saturada) y por debajo una zona muy conductiva, posiblemente saturada con agua de alto contenido salino.

Los sondeos adyacentes, SEV 5 hacia el norte y SEV 7 hacia el sur, mostraron también una capa muy resistiva en la primera porción del subsuelo y por debajo una capa conductiva pero levemente superior a la observada en los modelos 1 y 2.

La diferencia de resistividad se hizo notoria en los modelos propuestos para los SEV 3 y 4, hacia el norte y 6 hacia el sur, donde se observó una electrocapa de resistividad intermedia que fue interpretada como de sedimentos saturados con agua de baja salinidad.

El análisis del perfil esquemático permitió identificar y restringir la exploración de mayor detalle al sector entre los SEV 6 y 7 al sur, y SEV 4 y 5 en el norte, con el objeto de definir la zona de interfase entre la cuña salina y el agua dulce. Se debe aclarar que no fue posible efectuar la tomografía el sector norte a causa de la existencia de una mayor urbanización y no contar con espacio suficiente para efectuar las mediciones, ya que la técnica requiere de terreno natural para poder realizarse adecuadamente. Tampoco fue posible determinar el ancho de la intrusión salina hacia el oeste por las mismas razones.

En el sector definido en la zona sur, se midieron tres tomografías eléctricas en el espacio de la rambla sobre la Av. Costanera (Figura 8) que luego fueron integradas y

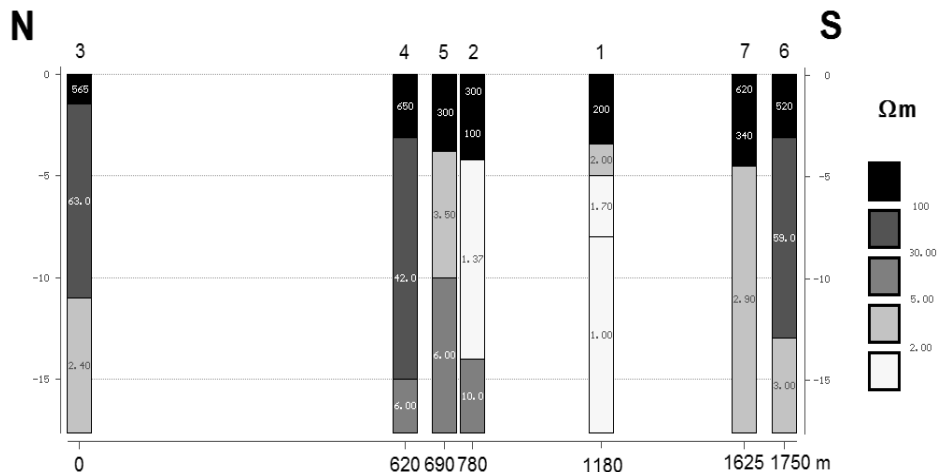


Figura 7. Perfil de los modelos propuestos para cada SEV. El eje vertical representa profundidad en metros y los colores oscuros representan valores resistivos.

procesadas en una única IRE (Figura 9).



Figura 8. Instrumento de medición y disposición del cable multielectrónico sobre la rambla de Av. Costanera.

El modelo de resistividades propuesto presentó un error medio de ajuste del 12,7%, el cual se considera como adecuado teniendo en cuenta las condiciones desfavorables del terreno y la pobre relación señal/ruido. Al igual que en los SEV, en la IRE se observó el comportamiento resistivo de la parte más superficial del subsuelo, disminuyendo la resistividad con la profundidad.

El rasgo más notorio fue una anomalía conductiva entre el inicio de la línea y la progresiva de 150m. El tope de esta región se encontró a los 6m de profundidad aproximadamente y con un aumento de la profundidad hacia el sur. Esta anomalía de baja resistividad se interpretó como causada por un aumento en el contenido salino del agua subterránea. Las condiciones eléctricas entre los 150m y 300m mostraron un aumento de la resistividad asociado con una disminución de la salinidad en el agua (Figura 9).

A partir de los resultados obtenidos por los SEV y las IRE e integrando los valores de conductividad eléctrica del agua obtenidos por

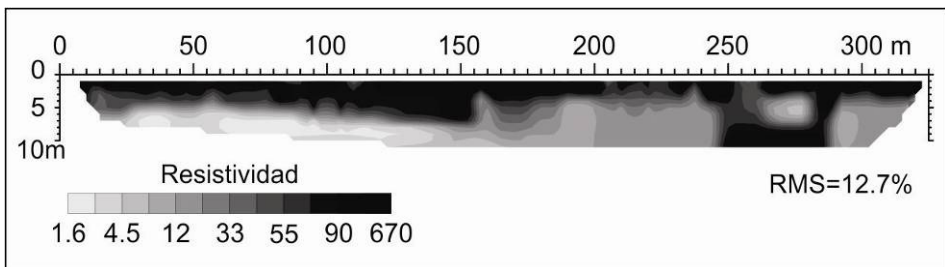


Figura 9. Imagen de Resistividad Eléctrica. La zona afectada por salinización se encontraría entre los 0-150m. El eje vertical representa profundidad en metros y los colores claros indican baja resistividad.

Carretero et al., (2013a) fue posible delinear la zona que comprende la cuña salina (Figura 10).

El frente costero de Santa Teresita se extiende por 3 km de longitud y el sector afectado por intrusión salina abarca 1 km lo cual representa el 33% de su costa.

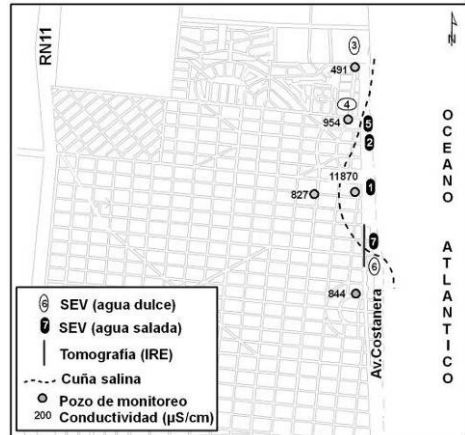


Figura 10. Resultado de los SEV e IRE. La línea punteada indica la extensión de la cuña salina

Conclusiones

Santa Teresita no posee servicio de abastecimiento de agua a la población. Sus habitantes obtienen el recurso mediante perforaciones de lentes de agua dulce suspendidas sobre aguas salinas o salobres, que se explotan sin control. Ello ha generado un proceso de salinización como consecuencia de una explotación excesiva de las aguas subterráneas.

Las técnicas geoelectricas de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) e Imágenes de Resistividad Eléctrica (IRE) se utilizaron de manera complementaria para detectar el proceso de salinización del acuífero costero.

Los SEV permitieron delimitar el sector afectado para luego ser estudiado en detalle mediante las IRE.

Se reconoció que la zona no saturada presenta valores de resistividad muy alta, los valores de resistividad intermedia se correlacionan con sedimentos saturados con agua de baja salinidad mientras que las zonas muy conductivas se asignan a capas que contienen agua de alto contenido salino.

Los resultados obtenidos validaron la aplicabilidad del método, sobre todo las IRE que permitieron delimitar la interfase agua dulce-agua salada en el sector sur. No fue posible definir la interfase en la zona norte mediante tomografías debido a las características del terreno (urbanizado), pero si se logró establecer una posible área entre dos SEV de diferentes modelos. Esto le otorga al frente costero salinizado una extensión de 1000m, ubicados en el sector con mayor densidad de edificaciones.

Las técnicas utilizadas constituyen una herramienta de bajo costo y de rápida resolución para un paso inicial hacia la definición de un sistema de monitoreo en las zonas afectadas por salinización.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Cooperativa de Obras y Servicios Públicos de Santa Teresita Ltda.

Referencias

Bocanegra E., Cardoso Da Silva Jr. G., Custodio E., Manzano M y Montenegro S. 2010. State of knowledge of coastal aquifer management in South America. *Hydrogeology Journal* 18: 261–267

Carretero S., Kruse E. y Rojo A. 2013a. Condiciones hidrogeológicas en Las Toninas y Santa Teresita, Partido de La Costa. VIII Congreso Argentino de Hidrogeología y del VI Seminario Latinoamericano. La Plata.

Carretero S., Dapeña C. y Kruse E. 2013b. Hydrogeochemical and isotopic characterisation of groundwater in a sand-dune phreatic aquifer on the northeastern coast of the province of Buenos Aires. *Isotopes in Environmental & Health Studies*. DOI: 10.1080/10256016.2013.776557

Consejo Federal de Inversiones. 1990. Evaluación del Recurso Hídrico Subterráneo de la Región Costera Atlántica de la Provincia de Buenos Aires Región 1 Punta Rasa-Punta

Médanos. Informe Final. Tomo I. Hidrología Subterránea. 177 p.

Custodio, E., & Llamas, M. 1983. Hidrología Subterránea. (2 tomos). Omega.

El Yaouti F., El Mandour A., Khattach D., Benavente J. y Kaufmann O. 2009. Salinization processes in the unconfined aquifer of Bou-Areg (NE Morocco): A geostatistical, geochemical, and tomographic study. *Applied Geochemistry* 24:16–31

Loke, M. (2004). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys.

Nassir, A. S., Loke, M.H., Lee, C.Y. y Nawawi, M.N.M. 2000. Salt–water intrusion mapping by geoelectrical imaging surveys, *Geophysical Prospecting*, Vol. 48, pp. 647–661

Nowroozi, A.A., Horrocks, S.B. y Henderson, P. 1999. Saltwater intrusion into the freshwater aquifer in the eastern shore of Virginia: a reconnaissance electrical resistivity survey. *Journal of Applied Geophysics*, 42, pp. 1–22.

Orellana, E. 198). *Prospección Geoelectrica en corriente continua* (2 ed.). Madrid: Paranainfo.

Perdomo, S., Carretero, S., Ainchil, J. y Kruse, E. 2011 Imágenes de resistividad eléctrica en lentes de agua dulce de la zona costera oriental de la provincia de Buenos Aires. VII Congreso Argentino de Hidrogeología 1º Edición. Buenos Aires: Asociación Civil Grupo Argentino de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos - AIH, 2011. ISBN 978-987-23936-9-4. Salta, Argentina, pp 113-120

Satriani, A., Loperte, A., y Proto, M. 2011. Electrical Resistivity Tomography for coastal salt water intrusion characterization along the Ionian coast of Basilicata region (Southern Italy). Fifteenth International Water Technology Conference. Alexandria, Egypt.

Sharma, P. 1997. *Environmental and engineering geophysics*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.