

MONITOREO DE LA CALIDAD QUÍMICA DEL AGUA AFECTADA POR BOMBEO EN UN ACUÍFERO COSTERO, PARTIDO DE LA COSTA, BUENOS AIRES

Silvina Carretero ^{***}, Santiago Perdomo ^{***}, Leandro Rodrigues Capítulo ^{***}, y Eduardo Kruse ^{**}

* CEIDE Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), 64 n° 3, 1900 La Plata, Argentina. Tel: +542214249049, int 14. Email: scarretero@fcnym.unlp.edu.ar

** Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

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

Resumen

En el sector norte del Partido de La Costa, Argentina, se monitoreó la calidad química del agua subterránea en el área de captación de la cooperativa prestadora de servicios. Este recurso es la única fuente de agua para consumo y presenta una extrema vulnerabilidad a la contaminación, tanto desde la superficie como a procesos de salinización. En 2014, en el sector donde la extracción de agua era más intensiva, se detectó un desmejoramiento de la calidad química debido a la salinización de los pozos con agua salobre proveniente desde un nivel inferior. Consecuentemente, la cooperativa realizó cambios en el manejo de la explotación. El objetivo del trabajo es verificar si el proceso de salinización se ha revertido luego de las modificaciones incorporadas en el sistema de extracción de agua. Entre 2021 y 2022/2023 se realizaron estudios complementarios para evaluar si las acciones habían sido exitosas o no, incluyendo mediciones de conductividad eléctrica y niveles (manuales y continuas) y métodos geoeléctricos. Se ha observado una reversión de los valores de conductividad luego de la redistribución de las perforaciones, lo cual ha sido verificado por las metodologías aplicadas. La tomografía eléctrica permitió dimensionar arealmente la situación puntual definida por los pozos individuales. El monitoreo de las zonas de captación es una herramienta imprescindible para evitar procesos de deterioro del recurso hídrico.

Palabras clave: zonación química, agua subterránea, monitoreo, manejo del recurso hídrico

Abstract

In the northern sector of the Partido de La Costa, Argentina, the chemical quality of groundwater was monitored in the pumping field of the water service provider cooperative. This resource is the only source of water for consumption and is extremely vulnerable to contamination from the surface and to salinization processes. In 2014, in the sector where water extraction was most intensive, a deterioration in chemical quality was detected due to the salinization of the wells with brackish water coming from a lower level. Consequently, the cooperative made changes in the groundwater management. The objective of the work is to verify if the salinization process has been reversed after the modifications incorporated in the water extraction system. Between 2021 and 2022/2023, complementary studies were carried out to evaluate whether the actions had been successful or not, including measurements of electrical conductivity and levels (manual and continuous) and geoelectrical methods. A reversal of conductivity values has been observed after the redistribution of the perforations, which has been verified by the applied methodologies. The electrical tomography allowed to measure the actual area of the specific situation defined by the individual wells. Monitoring catchment areas is an essential tool to avoid deterioration processes of water resources.

Keywords: chemical zonation, groundwater, monitoring, water resource management

INTRODUCCIÓN

En San Clemente del Tuyú, Partido de La Costa, Buenos Aires, Argentina, sólo un bajo porcentaje de los habitantes cuenta con agua potable de red a partir del servicio otorgado por la Cooperativa de Obras y Servicios (COS) que extrae agua del acuífero freático. El resto de la población se abastece de manera particular con captaciones al mismo acuífero. Esto constituye una situación de mucha vulnerabilidad en lo que refiere al deterioro de la calidad química del agua. Actualmente se está llevando a cabo un estudio con el objetivo de evaluar la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo en la zona de explotación. También se están considerando sectores para una futura expansión y poder así aumentar el abastecimiento de agua potable.

El manejo de los recursos hídricos en las localidades de la costa arenosa de la provincia de Buenos Aires es de gran importancia debido a sus limitadas reservas y la creciente demanda que requieren en épocas estivales.

En 2014 se realizó un estudio de detalle sobre el estado del recurso hídrico y las posibilidades de expansión de la zona de captación de agua subterránea de la COS. Se reconoció una zonación química en profundidad con su límite a los 6 m (Carretero *et al.*, 2016). Se diferenciaron aguas bicarbonatadas cálcicas por arriba de este límite (zona A) y cloruradas sódicas por debajo (zona B), cuyas concentraciones de aniones y cationes superaron los límites de potabilidad. Cabe aclarar que esa interfase no es estática y fluctúa de acuerdo con el ciclo hidrológico (Carretero *et al.*, 2022). Se detectó un proceso de salinización a consecuencia del bombeo intensivo en un sector del campo de extracción ocasionado por el ascenso de la zona B (Carretero *et al.*, 2017). En virtud de los resultados obtenidos, se efectuaron una serie de recomendaciones que la Cooperativa aceptó realizando cambios en el manejo de la explotación.

El objetivo del trabajo es verificar si el proceso de salinización se ha revertido luego de las modificaciones incorporadas en el sistema de extracción de agua.

AREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la costa arenosa de la provincia de Buenos Aires, Argentina (San Clemente del Tuyú, Partido de la Costa) (Figura 1). Se trata de una franja costera con un ancho de 2 km, que cubre una superficie aproximada de 15 km².

El clima es templado húmedo, la precipitación media anual oscila entre los 900 y 1000 mm. El 60% de las lluvias se produce en los meses con mayor evapotranspiración (cálidos), por lo que la mayor recarga del agua subterránea se manifiesta durante la estación fría (~ 430 mm/año) (Carretero y Kruse, 2012). Esta recarga se origina a partir de los excesos de las precipitaciones.

El acuífero principal de agua dulce está constituido por arenas de médanos superpuestas a arenas de barrera marina, con un espesor promedio de 10 m, con profundidades de los niveles freáticos menores a los 3 mbbp, y está limitado por dos interfaces: hacia el continente, agua dulce-agua salobre, y hacia el mar, agua dulce-agua salada (Carretero, 2011). La capa freática, cuya morfología es radial con curvas equipotenciales paralelas a la línea de costa, presenta dos sentidos de flujo subterráneo, uno hacia el mar y otro hacia el continente. Se reconocen dos ambientes geomorfológicos, el cordón costero y la llanura deprimida. El cordón costero se caracteriza por agua subterránea de baja salinidad, principalmente del tipo bicarbonatada cálcica. Por otra parte, la llanura deprimida se desarrolla al oeste del cordón costero con cotas inferiores a 5 msnm, predominan los materiales limosos y arcillosos y contiene agua de elevada salinidad, del tipo clorurada sódica (Carretero *et al.*, 2013).

La actividad económica dominante en la región es el turismo, siendo el uso del agua casi exclusivamente para consumo humano y recreativo. En San Clemente del Tuyú, el abastecimiento de agua potable se realiza a partir de un campo de bombeo situado hacia el sur de la localidad, fuera de la zona urbanizada. La explotación se realiza a través de 7 pozos Ranney (caudal 7 m³/h) y 43 sistemas wellpoint (caudal 13 m³/h) ubicados en el

cordón costero. La profundidad de extracción oscila entre 4 y 6 m, con una distancia entre los pozos de 25 m (Carretero *et al.*, 2020). Para evitar fenómenos de interferencia, estos sistemas de extracción se operan de manera alternada, aunque en verano y debido a la mayor demanda suele no respetarse este régimen. La producción promedio fuera de los meses de verano es de alrededor de 500 m³/d. Para diciembre y marzo es 800 m³/d, mientras que en enero y febrero aumenta a 1500 m³/d, con algunos años superando los 1800 m³/d, con lo cual en temporada se triplica la extracción. La red de agua sirve a la zona centro con la mayor concentración de edificios, hoteles y restaurantes, lo cual representa aproximadamente al 20% de la localidad.

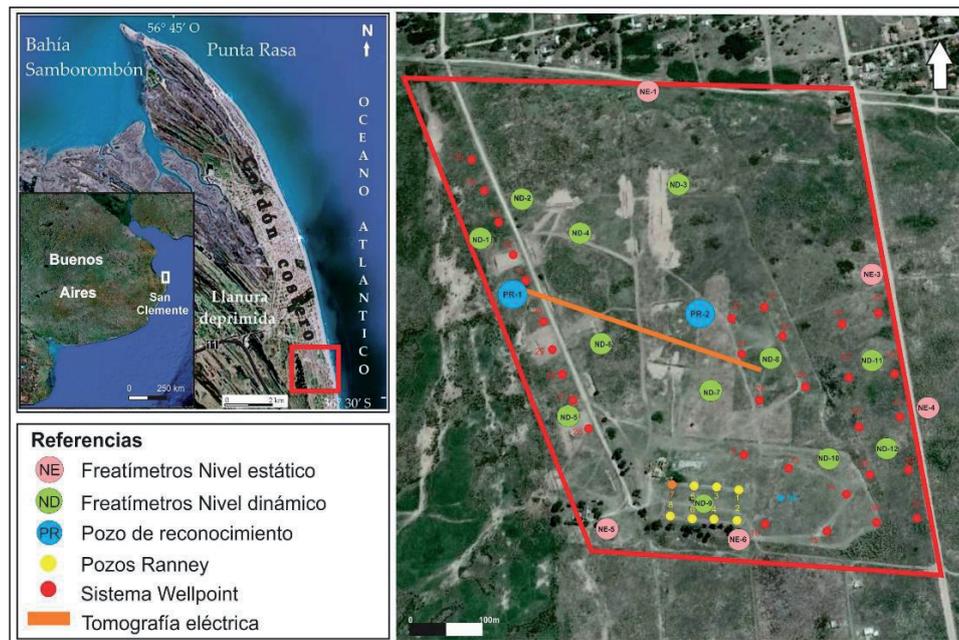


Figura 1. Área de estudio. El recuadro rojo indica la zona de la planta COS. Izquierda: detalle del predio de la planta

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo tuvo comienzo en el año 2014, mediante un estudio de detalle sobre el estado del recurso hídrico y las posibilidades de expansión de la zona de captación de agua subterránea. En vista de los resultados obtenidos, se realizaron cambios que incluyen la modificación del esquema de explotación, especialmente en la distribución de las bombas y en su frecuencia de uso. Entre 2021 y 2022/2023 se realizaron estudios complementarios para evaluar si las acciones habían sido exitosas o no.

Hidrogeología-hidroquímica

Se contó con datos de conductividad eléctrica (CE), nivel freático y registros continuos (data loggers) de ambas variables, obtenidos en la red de monitoreo (Figura 1) instalada en la planta en 2014 para el estudio preliminar (Carretero y Kruse, 2015). En los pozos de reconocimiento (PR) se midió la CE y profundidad utilizando una sonda Solinst TLC (Model 107), para evaluar el estado de zonación química vertical. En julio de 2021 se repitieron las mediciones de CE *in situ*, se mapearon los resultados y se compararon con los valores previamente obtenidos. Se realizó un monitoreo durante la temporada Dic-22/Mar-23, donde se colocaron data loggers de nivel y CE en los pozos ND-1 y ND-8. En ND-4 se monitorearon solo variaciones de nivel. Se realizaron mediciones de niveles freáticos en todo el predio para construir mapas de flujo en ambos periodos analizados. También se han analizado los datos de caudales de explotación brindados por la Cooperativa.

Geofísica

En septiembre de 2022 se efectuó una tomografía eléctrica de 500 m en el campo de bombeo, con un arreglo Wenner-Schlumberger de 5 m de separación entre electrodos. La tomografía fue medida con un cable multielectrodo y estacas revestidas en cobre para la energización y las mediciones de la caída de tensión. Aumentando la separación entre los dipolos se consigue mayor penetración en el terreno y mediante el traslado horizontal del arreglo se exploran las variaciones horizontales. Los datos de resistividad aparente obtenidos se ordenan en forma de pseudosección, que también es necesario invertir para obtener un modelo de resistividades “verdaderas”, cuya respuesta se ajuste adecuadamente a las mediciones. El modelo de resistividades “verdaderas” se obtiene de manera iterativa y, por medio de algoritmos matemáticos desarrollados en el marco los elementos finitos (Loke, 2006), se calcula la 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. El dispositivo Wenner-Schlumberger posee una adecuada sensibilidad a los cambios de resistividad esperados y la penetración vertical lo hace apropiado para este tipo de estudios hidrogeológicos (Perdomo, 2015). La tomografía permite contemplar las variaciones laterales de la resistividad, además combina mediciones en profundidad, por lo que constituye un estudio de gran detalle (Perdomo *et al.*, 2013). Se comparó el perfil de resistividad actual con el obtenido en 2015.

RESULTADOS

Funcionamiento del sistema de bombeo

Se han calculado los caudales de extracción medios diarios. Los valores resultaron en 1450 m³/d en enero y en 1300 m³/d para febrero en ambos periodos (2015 y 2023). La totalidad de agua extraída ronda en los 44800 m³ en enero y 36500 m³ para febrero de 2023. Para 2015 en enero se extrajo un caudal similar a 2023, y en febrero, 39400 m³.

En 2015 la cantidad de bombas era de 35 y para 2023 se incrementó a 43. La redistribución de los pozos (Figura 2) muestra que la zona utilizada para el bombeo se extendió hacia el este. Sin embargo, a pesar de que la distribución es más amplia, el uso sigue siendo bastante uniforme en cuanto a la cantidad de días en que se utiliza cada bomba. Para 2015, el 28,6% de las bombas estuvieron operando más del 50% de los días entre enero y febrero. La situación de 2023 resulta en el funcionamiento del 43% de los pozos, con una recurrencia de uso mayor al 50% de los días para los mismos meses. Esto indicaría que se ha incrementado el uso intensivo en vez de generar una mejor rotación del patrón de extracción dentro del campo de bombeo. Este tipo de manejo puede conducir a alteraciones en la calidad química del agua subterránea.

Variaciones en la CE

El mapa de distribución de CE para el año 2014 (Figura 2) muestra áreas con valores superiores a 2000 µS/cm al momento de efectuado el muestreo. Estos sectores coinciden con la localización de los wellpoint que han realizado una extracción más intensiva durante la temporada, siendo utilizados con muy poca rotación. Para 2021 (Figura 2), al haberse eliminado los pozos de bombeo en el sector problemático, la CE presenta una disminución con valores entre 600 y 1000 µS/cm. En ambos muestreos, hacia el oeste, los valores mayores a 2000 µS/cm corresponden a concentraciones naturales, ya que este sector es de transición hacia la llanura deprimida.

La hidrodinámica que acompaña a la hidroquímica se puede observar en la Figura 2. El sentido de escurrimiento del agua subterránea se produce desde el sector central del médano, con descarga hacia el este (mar) y hacia el oeste (llanura deprimida). Se evidencian las variaciones y conos de depresión producidos dentro del sector del campo de bombeo.

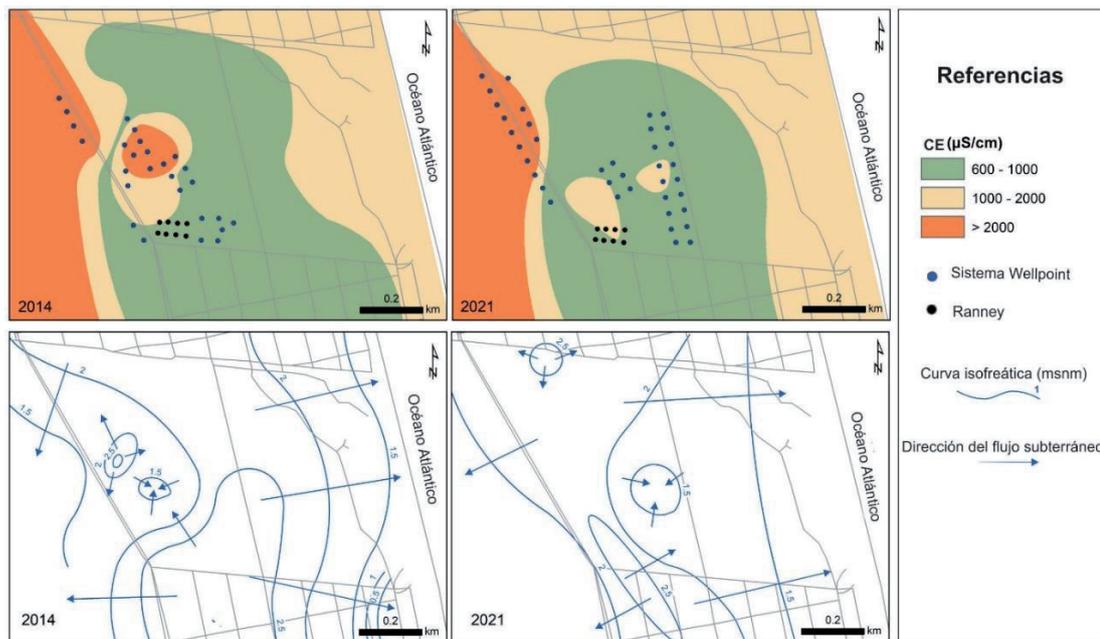


Figura 2. Arriba: Mapa de conductividad eléctrica en la zona de captación y alrededores. Nótese el cambio de distribución de los wellpoint. Abajo: Mapa isofreático para las dos situaciones estudiadas

Se analizaron las variaciones de nivel y las CE registradas en los data loggers. Para la temporada 2014-2015, en los pozos ND-4 y ND-8 (Figura 3) los registros de nivel y CE muestran oscilaciones en sus valores. En ND-8 se registraron valores entre 583 y 2663 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La CE medida antes de la temporada y periodo de monitoreo es del orden de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se observa que, en general, el pozo muestra valores superiores durante el periodo de extracción intensiva. Para el mismo periodo en el pozo ND-4 la CE osciló entre 723 y 1326 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo la media de 768 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En la Figura 3 puede observarse que en tres ocasiones los valores de CE se acercan al valor medio, superando los 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

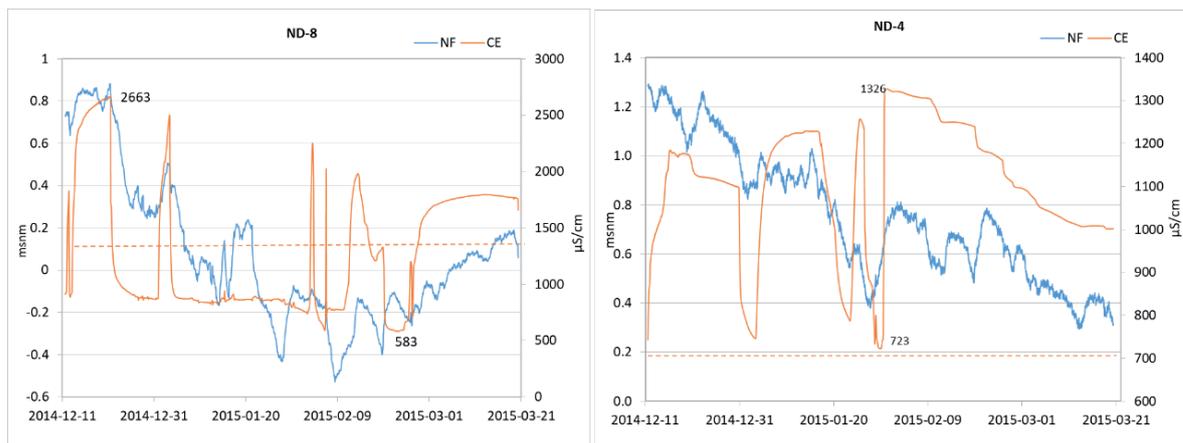


Figura 3. Respuesta del nivel dinámico (NF) y conductividad (CE) en ND-4 y ND-8 frente al bombeo en la temporada 2014-2015. En línea punteada, el valor medio de CE

En la temporada 2022-2023 (Figura 4), los registros muestran que para ND-8 la CE fluctúa entre valores por debajo de la media y valores por encima de la misma, en correspondencia con el proceso de encendido y apagado de las bombas cercanas. En este periodo la CE no superó los 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El caso de ND-1 presenta valores muy fluctuantes a lo largo de las mediciones puntuales entre 2014 y 2022, con un rango entre 1200 y 7300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que da una media de 3100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se trata de una perforación localizada cerca de

la transición con la llanura deprimida, con lo cual las altas salinidades son de esperarse. En esta temporada la CE osciló entre 1300 y 2200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, acompañando los ciclos de bombeo.

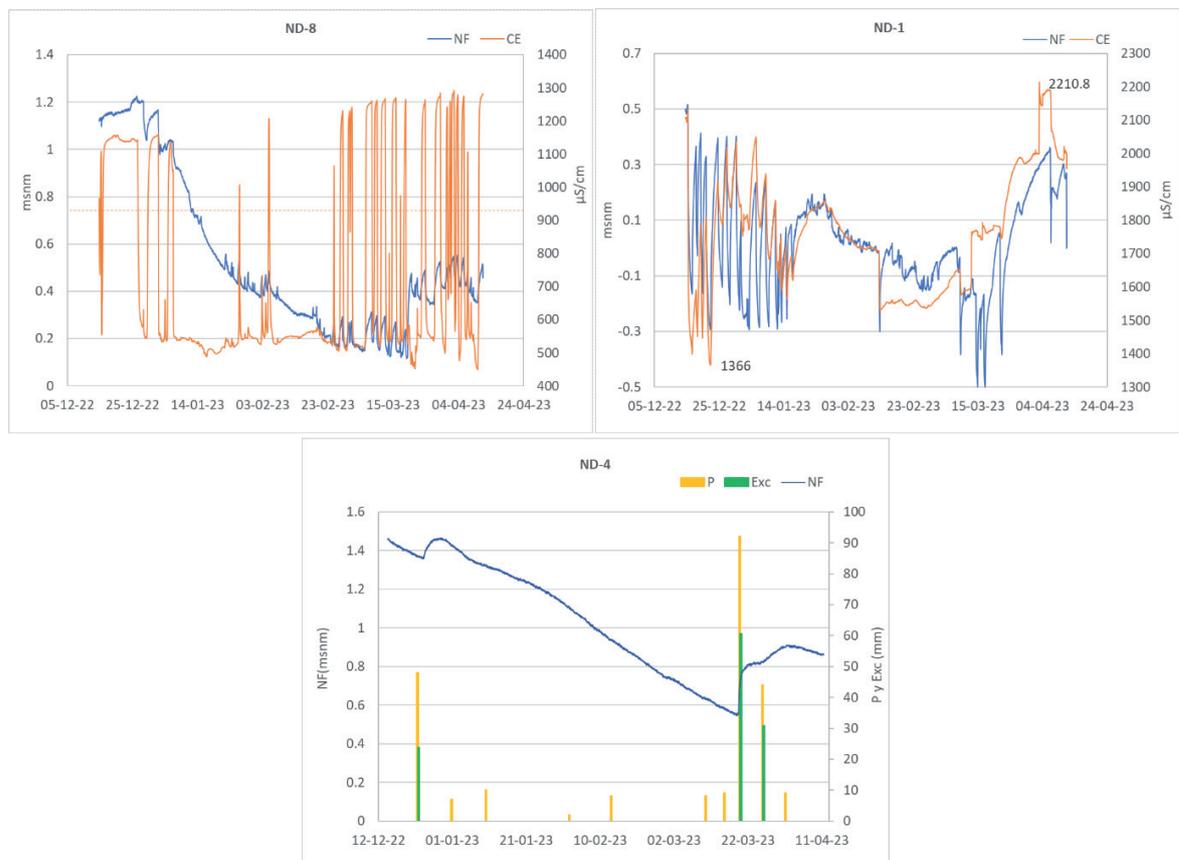


Figura 4. Respuesta del nivel dinámico (NF) (ND-4) y conductividad (CE) en ND-1 y ND-8 frente al bombeo (P: precipitación, Exc: exceso)

Debido a que luego de la reestructuración de la planta, que se fue realizando posterior a los resultados obtenidos en 2015, no quedaron perforaciones en la cercanía de ND-4, sólo se colocó un sensor de nivel y no se monitoreó la CE. Los niveles serían representativos de la fluctuación natural del nivel freático. Como puede observarse en la Figura 4, los niveles descienden de manera sostenida debido a la falta de recarga. A fines de diciembre-22 se manifiesta un incremento de 0,10 m, debido a las precipitaciones que generaron excesos. El otro evento recién se observa a fines de marzo-23, con lluvias acumuladas de más de 100 mm que generan excesos suficientes para ocasionar casi 0,40 m de aumento en la capa freática. Se han producido precipitaciones menores a 10 mm que no generan excesos y, por lo tanto, no influyeron en la recarga al acuífero.

Tomografía de resistividad eléctrica

Se realizó una tomografía para comprobar la extensión de la zona afectada por el proceso de salinización, manifestado como un aumento de la CE del agua. La tomografía eléctrica se midió transversalmente al campo de bombeo con un largo de 500 m (Figura 1), incluyendo el sector donde se ha detectado elevada CE por otros métodos. Sobre el eje horizontal (Figura 5) se indican las posiciones relativas de los pozos de bombeo y el pozo de reconocimiento PR-1.

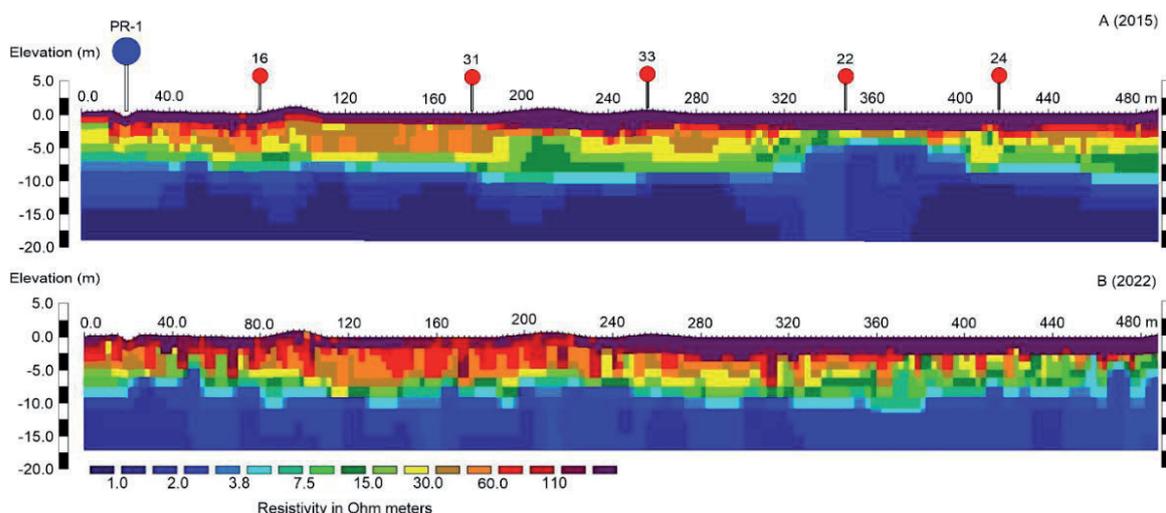


Figura 5. Tomografía eléctrica realizada en el campo de bombeo. Arriba, situación para 2015. Obsérvese el ascenso del agua salinizada (color azul) entre las bombas 22 y 24, correspondiente al sector de mayor extracción. Abajo, situación para 2022 donde el proceso se revirtió

Puede observarse que la zona superficial, correspondiente a la zona no saturada, presenta una alta resistividad (mayor a $90 \Omega\text{m}$). Por debajo de esta primera zona y hasta una profundidad media de 7 m, se observan resistividades entre $8\text{-}60 \Omega\text{m}$, atribuibles al acuífero de agua dulce. A mayor profundidad la resistividad disminuye considerablemente a valores inferiores a $2 \Omega\text{m}$. En general, se observa que en las progresivas próximas a los pozos de bombeo la resistividad de la zona acuífera disminuye (pozos 18, 19 y 24). Cerca del pozo 22, se observa que las resistividades bajas comienzan a partir de los 5 m de profundidad, indicando posiblemente la presencia de agua de mayor CE (salinidad) que en los sectores adyacentes. Esta particularidad observada en la tomografía, que adopta una forma de domo (Figura 5), coincide con el sector de mayor CE mapeado en la Figura 2. A partir de este resultado quedó confirmado que la extensión del área afectada por salinización fue de 80 m aproximadamente en la dirección del perfil. Este resultado no pudo ser determinado por otros métodos puntuales, como la ejecución de pozos o frentímetros. En 2022 se repitió la medición de la tomografía en el mismo sitio y en las mismas condiciones (Figura 5). Esta nueva tomografía muestra la misma distribución de resistividades para la zona no saturada, el acuífero freático y la base acuitardo/acuícludo. La principal diferencia se destaca entre los 320 y 400 m, donde las resistividades oscilan entre valores de 8 y $60 \Omega\text{m}$ (agua dulce). En esta misma zona en 2015 los valores eran inferiores a los $2 \Omega\text{m}$ (agua salobre). De esta manera, se confirma que la zona no se encontraría salinizada, situación también verificada a partir del mapa de CE (Figura 2), cuyos valores son inferiores a $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$.

CONCLUSIONES

Existe un desmejoramiento de la calidad química del agua debido al aumento de la CE en un sector del área de captación donde se ha efectuado una extracción más localizada. Durante el bombeo, se produce una salinización de los pozos proveniente de los niveles inferiores (zona B). Este fenómeno ha sido detectado por variadas metodologías: medición de CE *in situ*, registro continuo de CE durante la temporada y por medio de una tomografía eléctrica. Posteriormente, luego de un reordenamiento de las bombas en el campo de extracción, la situación fue revertida y corroborada por los mismos métodos.

Esta información resulta un aporte de importancia para los prestadores de servicios de agua potable, tanto para ajustar los volúmenes y tiempos de explotación como para la planificación de nuevas perforaciones de abastecimiento.

La tomografía fue el único método capaz de identificar la extensión real de la zona afectada. Mediante la repetición de la tomografía fue posible comprobar que toda el área afectada se ha recuperado en términos de CE. Esto permitiría la realización de un monitoreo de detalle en el campo de bombeo con mayor frecuencia y obteniendo resultados a corto plazo.

La combinación de estas técnicas es extrapolable no sólo a otros sectores costeros, sino a cualquier región bajo bombeo intensivo y a cualquier escala de trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Cooperativa de Provisión de Obras y Servicios Públicos de San Clemente del Tuyú Ltda (COS) por su colaboración en las tareas de campo. Este trabajo fue desarrollado con fondos de los proyectos PIP 2310 (CONICET), N967 (UNLP) y el Programa "ImpaCT.AR Ciencia y Tecnología" Desafío 70.

REFERENCIAS

- Carretero, S.** (2011). *Comportamiento hidrológico de las dunas costeras en el sector nororiental de la provincia de Buenos Aires*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata. Argentina. http://sedici.unlp.edu.ar/search/request.php?id_document=ARG-UNLP-TPG-0000002075andrequest=request.
- Carretero, S. y Kruse, E.** (2012). Relationship between precipitation and water-table fluctuation in a coastal dune aquifer: northeastern coast of the Buenos Aires province, Argentina. *Hydrogeology Journal*. 20:1613–1621.
- Carretero, S. y Kruse, E.** (2015). *Estudio hidrogeológico de detalle Planta COS, San Clemente del Tuyú*. Informe Técnico. 112p
- Carretero, S., Dapeña, C. y Kruse, E.** (2013). 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*. 49(3): 399-419.
- Carretero S., Perdomo S. y Kruse E.** (2017). Efectos del bombeo sobre la calidad química del acuífero costero en el sector norte del Partido de La Costa. XX Congreso Geológico Argentino, Sesión técnica 11, Geología de los Recursos Hídricos: 9-18.
- Carretero, S., Rodríguez Capítulo L. Kruse, E.** (2020). Decision tree as a tool for the management of coastal aquifers of limited saturated thickness. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 53(2): 189-200.
- Carretero, S, Rodríguez Capítulo, L. y Kruse E.** (2022). Evaluación del comportamiento de la interfase en la zonación química vertical de un acuífero costero. XI congreso Argentino de Hidrogeología: agua subterránea, el agua que no se ve / Miguel P. Auge... [et al.]; coordinación general de René E. Albouy. -1a ed.- Bahía Blanca: Editorial de la Universidad Nacional del Sur. Ediuns, 2022. Libro digital, ISBN 978-987-655-310-0
- Carretero S., Perdomo, S., Kruse, E. y Ainchil J.** (2016). Respuesta eléctrica de la zonación química en un nivel acuífero en la costa arenosa oriental de la Provincia de Buenos Aires. En: García R. y Mariño E. (Editores) *Calidad del agua subterránea*. ISBN 978-987-661-222-7. Editorial Científica Universitaria - Secretaría de Ciencia y Tecnología - Universidad Nacional de Catamarca, San Fernando del Valle de Catamarca, Catamarca, pp 93-100.
- Loke, M. H.** (2006). RES2DINV, Rapid 2-D resistivity and IP inversion using the least-square method. Penang, Malaysia: Geotomo Software.
- Perdomo, S.** (2015). *Estimación de parámetros hidráulicos subterráneos a partir de estudios de resistividad eléctrica en 2D*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata. Argentina. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/46662>
- Perdomo, S., Rodríguez Capítulo, L., Kruse, E. y Ainchil J.** (2013). Aplicación de tomografías eléctricas en la configuración del acuífero costero en un sector oriental de la Provincia de Buenos Aires. En: González, N.; Kruse, E., Trovatto M. M., Laurencena P. (Editores) *Temas actuales de la hidrología subterránea*. La Plata: Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. p57 - 62.