

# CUANTIFICACIÓN DE LA DESCARGA SUBMARINA EN DOS SECTORES DE LA COSTA ORIENTAL DE LA PROVINCIA DE BUENOS AIRES

Silvina Carretero<sup>1</sup>, John Rapaglia<sup>2</sup>, Leandro Rodrigues Capítulo<sup>1</sup>, Eduardo Kruse<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CONICET, CEIDE, FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MUSEO, UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA (UNLP), 64 N° 3, (1900) LA PLATA, ARGENTINA. EMAIL: SCARRETERO@FCNYM.UNLP.EDU.AR

<sup>2</sup> BIOLOGY DEPARTMENT, SACRED HEAR UNIVERSITY, 5151 PARK AVE, FAIRFIELD, CT 06825, EE. UU.

## RESUMEN

La descarga de agua dulce subterránea en el mar (SGD: sigla en inglés) es un proceso natural que ocurre en la interfase continente-océano y es de importancia en la dinámica costera. En la costa oriental de la provincia de Buenos Aires, Argentina (Partidos de La Costa y Pinamar), se planteó como objetivo detectar la descarga de agua dulce desde el acuífero arenoso hacia el Océano Atlántico aplicando balance de masas de <sup>222</sup>Rn como trazador y mapas de flujo subterráneo. Se midió la actividad del <sup>222</sup>Rn en el agua subterránea en perforaciones y en transectas a 200 m de la línea de costa. En base a la obtención de la profundidad en los pozos de la red de monitoreo existente se construyeron mapas isofreáticos. La SGD para La Costa resultó en 0,37 m<sup>3</sup>/m/d según la hidrodinámica y 3,5 m<sup>3</sup>/m/d según el radón. Para Pinamar, estos valores fueron de 0,66 y 0,55 m<sup>3</sup>/m/d respectivamente. La presencia de sedimentos en suspensión del Río de la Plata tendría influencia sobre las mediciones de radón incrementando los valores de descarga en La Costa, mientras que en Pinamar la ausencia de los mismos permitió la obtención de resultados similares por ambas metodologías.

**Palabras Claves:** acuífero costero, descarga subterránea, radón.

## ABSTRACT

Submarine groundwater discharge (SGD) is a natural hydrological process which occurs along the continent-ocean interface, and plays an important role in coastal dynamics. SGD along the western coast of Buenos Aires Province, Argentina (Partido de La Costa and Pinamar), was quantified via a mass balance of <sup>222</sup>Rn as a tracer and hydrogeological flow maps. <sup>222</sup>Rn activity was measured in wells and along a transect 200 m from the coastline. Groundwater depth was measured in wells and groundwater contour maps were made. Calculated flux of SGD for La Costa was 0.37 m<sup>3</sup>/m/d according to hydrodynamics and of 3.5 m<sup>3</sup>/m/d according to the radon mass balance. For Pinamar these values were of 0.66 and 0.55 m<sup>3</sup>/m/d respectively. The presence of suspended sediments from the Río de la Plata influenced the radon activity, increasing discharge values near La Costa, meanwhile in Pinamar the absence of the sediments allowed for a more accurate comparison or methodologies.

**Keywords:** coastal aquifer, submarine groundwater discharge, radon.

## INTRODUCCIÓN

La descarga submarina (SGD por su sigla en inglés, submarine groundwater discharge) se define como el proceso natural del agua subterránea por el cual esta se mueve hacia el mar. Es un proceso hidrológico que ocurre en la interfase continente-océano, representando una gran importancia en la dinámica costera.

La descarga es una de las variables del ciclo hidrológico cuyo conocimiento es fundamental, especialmente en zonas costeras, ya que el equilibrio entre la interfase agua dulce – agua salada depende, en parte, de ella.

En áreas costeras donde el agua subterránea es la única fuente de abastecimiento a las poblaciones, los procesos que controlan la interacción entre el agua dulce y el agua de mar son extremadamente importantes para asegurar la viabilidad futura de las comunidades costeras. El área de estudio se incluye dentro de estas características.

El objetivo del trabajo es la cuantificación de la SGD desde el acuífero arenoso hacia el Océano Atlántico en la costa oriental de la provincia de Buenos Aires, Argentina (Partidos de La Costa y Pinamar) mediante la combinación de técnicas como el uso de trazadores ( $^{222}\text{Rn}$ ) y la aplicación de la ley de Darcy (mapas de flujo subterráneo).

## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde al cordón costero de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, que incluye a los Partidos de La Costa (PDLC) y Pinamar (Figura 1). En el primero, el espesor del acuífero oscila entre 10 y 15 m con profundidades de los niveles freáticos menores a los 3 m.b.b.p. (metros bajo boca de pozo) (Carretero, 2011), mientras que, en el segundo, la posición del nivel supera los 6 m.b.b.p. en un acuífero de entre 20 y 40 m de potencia (Rodrigues Capítulo, 2015).

El acuífero está limitado por dos interfases: hacia el continente (llanura deprimida), agua dulce-agua salobre y hacia el mar, agua dulce-agua salada, siendo la única fuente de provisión de agua dulce para la población. En cuanto a la calidad química del agua ambos sectores muestran aguas de baja salinidad, las cuales presentan un predominio del tipo bicarbonatado cálcico/sódico y cuyo comportamiento es el típico para aguas de reciente infiltración (Rodrigues Capítulo, 2015). El clima es templado húmedo, con una estación de menores precipitaciones en los meses fríos (abril-septiembre) y una húmeda en los meses cálidos (octubre-marzo). La precipitación media anual oscila entre los 900 y 1000 mm, donde el 60% se produce en los meses con mayor evapotranspiración (meses cálidos), por lo que la mayor recarga se produce durante la estación fría (Carretero y Kruse, 2012). El sector central del cordón costero es la zona de recarga principal, que se produce a partir de los excesos de las precipitaciones, y se reconocen dos direcciones opuestas de descarga, una hacia el mar y la otra al oeste, hacia la llanura deprimida. La divisoria de agua subterránea coincide con las máximas alturas topográficas siguiendo una línea imaginaria orientada en sentido norte-sur. En el PDLC el espesor del acuífero se ve limitado por una zonación química vertical donde la conductividad eléctrica se incrementa abruptamente entre los 5-7 m de profundidad (Carretero et al., 2022).

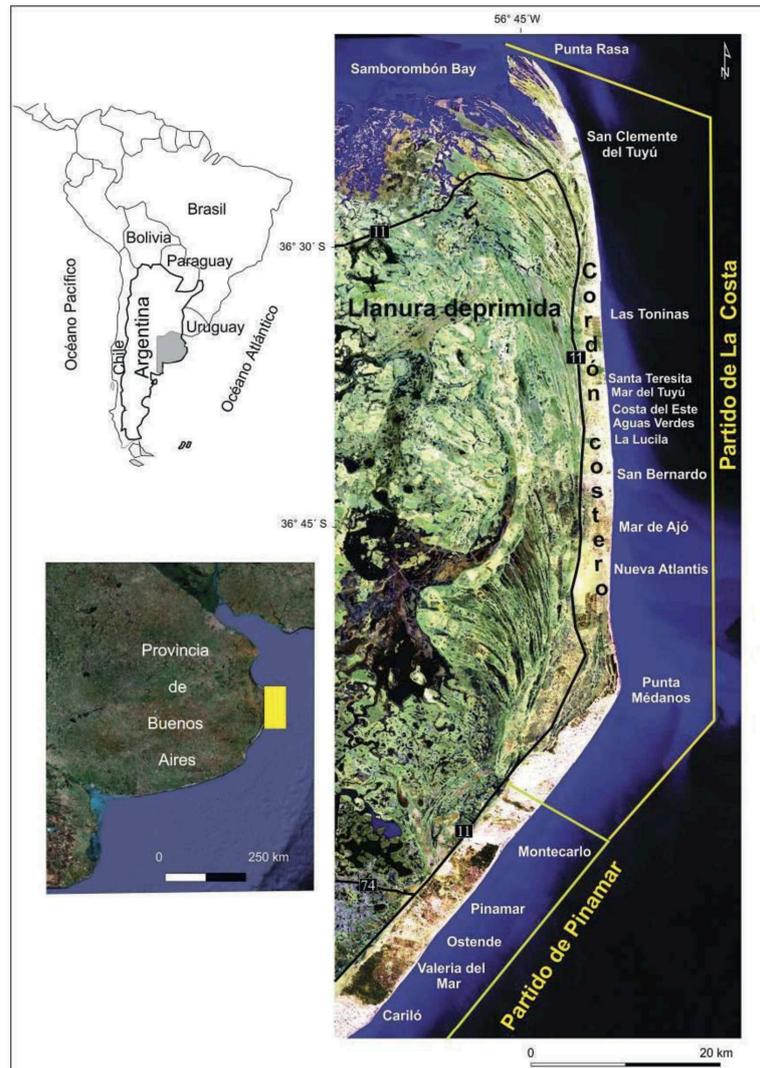


Figura 1. Área de estudio

## METODOLOGÍA

En marzo de 2016 se llevó a cabo una campaña en el PDLC, y en noviembre de 2018 en el partido de Pinamar, para estudiar la SGD. Se ha realizado la cuantificación a través de dos métodos: el cálculo mediante parámetros hidrodinámicos y el balance de masa de  $^{222}\text{Rn}$  como trazador.

### ■ Método de los piezómetros

Se dispone de más de 100 piezómetros distribuidos a lo largo del cordón costero, los cuales constituyen una red de monitoreo que abarca desde San Clemente hasta Mar del Tuyú (90 km<sup>2</sup>) en el PDLC. En Pinamar la cantidad de perforaciones es de 42 distribuidas en 66 km<sup>2</sup>.

Se midieron los pozos y se confeccionaron los mapas de flujo correspondientes a cada sector a partir de los cuales se calculó la descarga hacia el mar.

Una de las metodologías para el cálculo de la SGD (Burnett et al., 2006) es el método de los piezómetros, donde se considera constante el valor de conductividad hidráulica del acuífero y se aplica la ley de Darcy de acuerdo a la ecuación:

$$Q = -K\partial h/\partial L \quad (1)$$

donde Q es el flujo de Darcy (volumen de agua subterránea descargada por unidad de área por unidad de tiempo), K es la conductividad hidráulica, y  $\partial h/\partial L$  es el gradiente hidráulico en donde h es la altura hidráulica y L la distancia. Para el área de estudio se ha considerado un K de 20 m/d.

### ■ Mediciones de radón

La medición de radón en el agua de zonas costeras es una técnica para localizar potenciales fuentes de SGD (Stieglitz, 2005; Rapaglia et al., 2015). En marzo de 2016 se midió el  $^{222}\text{Rn}$  en forma constante utilizando un sistema de detección de  $^{222}\text{Rn}$  en el aire (RAD7) modificado para medir agua vía intercambio a través de un mini-módulo con filtro de membrana (Liqui-Cel). Se navegó en una embarcación de pequeño porte en forma paralela a la costa desde Punta Rasa hasta Costa del Este (30 km) a una velocidad promedio de 3 nudos (5.56 km/h) tratando de mantener una distancia menor a 500 m de la costa. Se bombeó el agua al mini-módulo utilizando una bomba peristáltica a una tasa de 0,5-0,8 L/min devolviendo el excedente al mar. La actividad del  $^{222}\text{Rn}$  fue continuamente medida por el RAD7 según la técnica descrita por Burnett y Dulaiova (2003). Simultáneamente se midió temperatura y conductividad eléctrica del agua utilizando un conductímetro de campo. En tres ocasiones el sistema cerrado estalló debido a la carga de sedimentos en suspensión proveniente de la descarga del Río de la Plata. En cada oportunidad el bote se detuvo hasta que el equilibrio fue alcanzado nuevamente. Desafortunadamente no se tomaron muestras para obtener la concentración de los sedimentos en suspensión. La velocidad del viento fue muy baja (~ 4-11 km/h) y la temperatura del aire fluctuó entre 15°C en la mañana y 28°C en la tarde.

En noviembre de 2018 se repitió la experiencia abarcando la totalidad de las localidades del partido de Pinar lo cual representa 16 km de costa. La velocidad del viento osciló entre 10 y 16 km/h y la temperatura entre 18 y 29 °C. La actividad del  $^{222}\text{Rn}$  fue posteriormente corregida por desgasificación debido a estos dos factores en ambos muestreos. También se midió la actividad del  $^{222}\text{Rn}$  y la conductividad eléctrica *in situ* en varias perforaciones. En ese caso el agua fue bombeada a través del mini-módulo hasta que se alcanzó la concentración en equilibrio en el detector (aproximadamente 35 minutos).

Resulta complejo cuantificar la SGD utilizando la actividad del  $^{222}\text{Rn}$  a lo largo de la costa debido a que la mezcla de aguas es difícil de caracterizar y el componente de entrada en el balance de masas no es tan claro como sería en el caso, por ejemplo, de una laguna costera (Stieglitz et al., 2010). Sin embargo, asumiendo que el aporte de  $^{222}\text{Rn}$  desde mar abierto sea despreciable, se puede calcular un balance de masas para intentar una cuantificación.

Las fuentes y sumideros de  $^{222}\text{Rn}$  en aguas costeras pueden representarse por el modelo de balance de masas de Burnett y Dulaiova (2003):

$$F_{SGD} + F_{Diff} + F_{Riv} = F_{atm} + F_{dec} + F_{mix} \quad (2)$$

donde  $F_{SGD}$  = flujo de  $^{222}\text{Rn}$  desde la SGD (Bq/m<sup>3</sup>/d),  $F_{diff}$  = flujo de  $^{222}\text{Rn}$  por difusión desde los sedimentos,  $F_{Riv}$  =  $^{222}\text{Rn}$  aportado desde el río;  $F_{atm}$  = pérdida de  $^{222}\text{Rn}$  por difusión atmosférica;  $F_{dec}$  = desintegración del  $^{222}\text{Rn}$  en la columna de agua;  $F_{mix}$  = pérdida de  $^{222}\text{Rn}$  debido a la mezcla.

Se asume que  $F_{diff}$  no presenta una importancia significativa de acuerdo a las diferencias regionales en la distribución del  $^{222}\text{Rn}$  que se observan en este trabajo. El aporte desde el río debería ser también despreciable,

sin embargo, debido a la carga de sedimentos en suspensión no sería el caso. El problema es que este factor no es posible de cuantificar por falta de datos, por lo tanto, no se considerará en la ecuación. De todas maneras, hay que tener en cuenta que este factor sobreestima el rol de la SGD en el área. La mezcla es otro factor que resulta dificultoso de cuantificar en una costa abierta y también se desprecia. Como una primera aproximación de los cálculos, la ecuación 2 se simplifica en:

$$F_{SGD} = F_{atm} + F_{dec} \quad (3)$$

La difusión atmosférica se calcula multiplicando el coeficiente de transferencia del gas por la concentración promedio de radón en aguas abiertas. Este valor sería insignificante ya que depende de la velocidad del viento, la cual fue muy baja durante el muestreo. Por lo tanto, el mayor factor que determina el balance de masas es el decaimiento, el cual depende de la profundidad del agua y la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en la superficie. El flujo de  $^{222}\text{Rn}$  por SGD puede ser dividido por la actividad del radón en los pozos para determinar el flujo en  $\text{m}^3/\text{m}/\text{d}$ .

Si se asume que el  $^{222}\text{Rn}$  está en equilibrio, entonces la fuente de ingreso debe ser igual al sumidero, en el cual se incluye a la difusión atmosférica, decaimiento y mezcla desde afuera de sistema. Las fuentes incluyen la mezcla dentro del sistema, difusión desde los sedimentos y advección vía SDG. Si se considera que la mezcla desde y hacia el sistema son equivalentes, se pueden reducir las fuentes a la difusión por sedimentos o a la SDG. Otra complicación es la falta de datos relativos al tiempo de residencia del agua en el sistema. Por lo tanto, la variable decaimiento se considera como una incertidumbre. En base al conocimiento de la hidrodinámica, se puede asumir que el tiempo de residencia se encuentra en el orden de una vida media.

## RESULTADOS

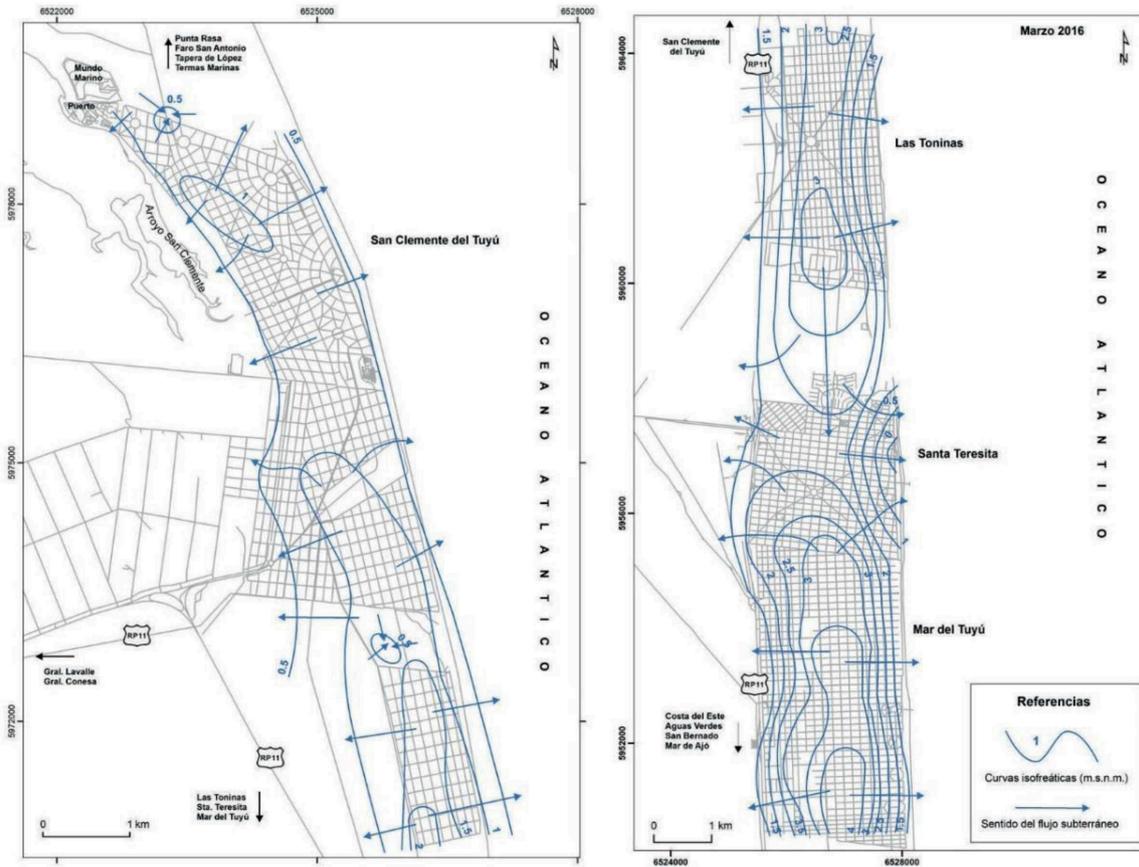
### ■ Cálculo de la descarga mediante hidrodinámica

En los mapas de flujo confeccionados se observa que las curvas isofreáticas muestran un incremento de norte a sur. La descarga regional se manifiesta en dos direcciones preferenciales: hacia el oeste, a la llanura deprimida, y hacia el este, al mar. El presente estudio se enfoca en esta última (Figura 2).

En el sector de San Clemente los niveles oscilan entre 0,5 y 2 m.s.n.m., con las mayores alturas al sur de la localidad y un gradiente hídrico medio de 1,4 m/km. La presencia de dos conos de depresión está relacionada a la extracción de agua del campo de bombeo (sur) y de un pozo municipal (norte). En las Toninas, con gradientes de 2,2 m/km, los niveles se encuentran entre 1,5 y 3 m.s.n.m. En Santa Teresita las alturas máximas de la capa freática están representadas por las curvas de 1,5 m.s.n.m. y el gradiente hídrico resulta en 1,9 m/km. Existen sectores de la costanera con pozos con valores por debajo del nivel del mar donde se ha detectado intrusión salina. Mar del Tuyú presenta curvas entre 1,5 y 4 m.s.n.m., resultando en la localidad con las mayores alturas de la capa freática con un gradiente hídrico de 3,3 m/km.

Los valores de caudales de descarga calculados a partir de los mapas de flujo expresados en  $\text{m}^3/\text{d}$  por metro de costa ( $\text{m}^3/\text{m}/\text{d}$ ) son 0,21; 0,41; 0,38 y 0,57 para San Clemente, Las Toninas, Santa Teresita y Mar del Tuyú respectivamente. Para todo el PDLC el gradiente hídrico medio es de 1,2 m/km mientras que la velocidad efectiva se calcula en 0,24 m/d.

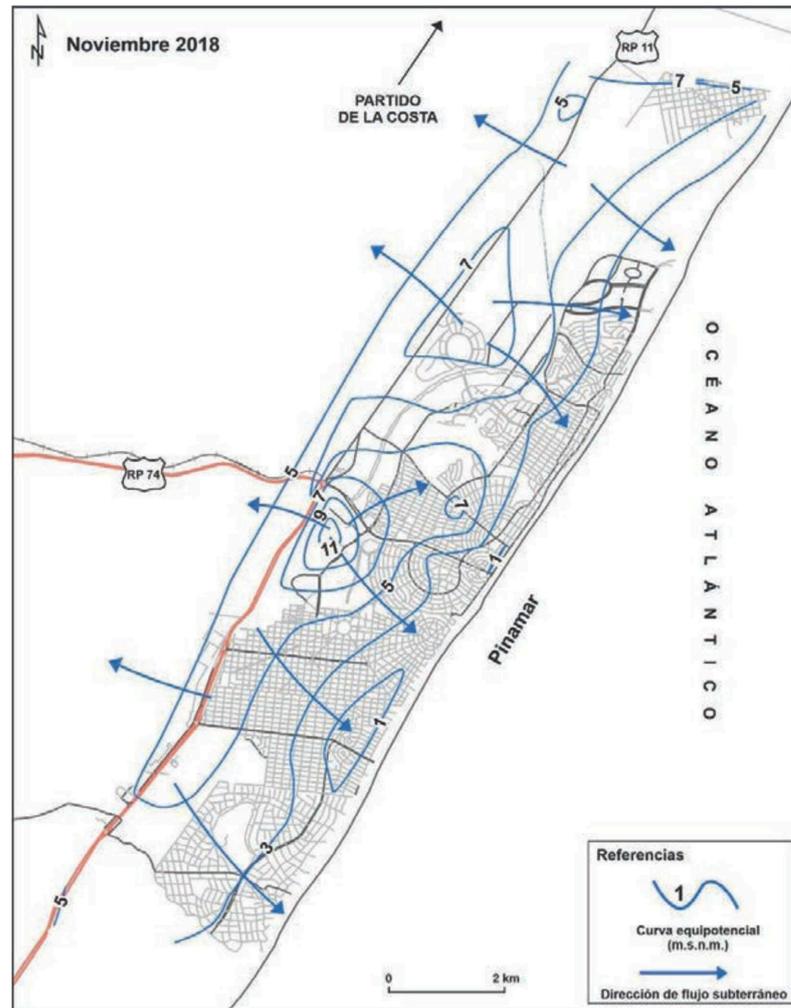
El caudal promedio de descarga para todo este sector del PDLC alcanzaría los 0,37  $\text{m}^3/\text{m}/\text{d}$ . La SGD anual resulta en 574  $\text{m}^3/\text{m}/\text{a}$ , lo que contabiliza un total de 12.400.000  $\text{m}^3/\text{a}$  (12,4  $\text{hm}^3/\text{a}$ ) para todo el sector estudiado.



**Figura 2.** Mapas de flujo para marzo de 2016. Izq., San Clemente del Tuyú. Der., Sector Las Toninas, Santa Teresita y Mar del Tuyú.

Pinamar se caracteriza por niveles freáticos entre 1 y 13 m.s.n.m. con algunos valores por debajo del nivel del mar asociados a bombeo de perforaciones cercanas a la costanera (Figura 3). El gradiente hidráulico promedio es de 4m/km y la velocidad efectiva de 0,88 m/d.

El caudal promedio de descarga al mar se calculó en 0,66 m<sup>3</sup>/m/d, con lo cual la SGD anual estaría en el orden de 241 m<sup>3</sup>/m/a, lo que representa la totalidad de 3.854.400 m<sup>3</sup>/a (3,85 hm<sup>3</sup>/a).



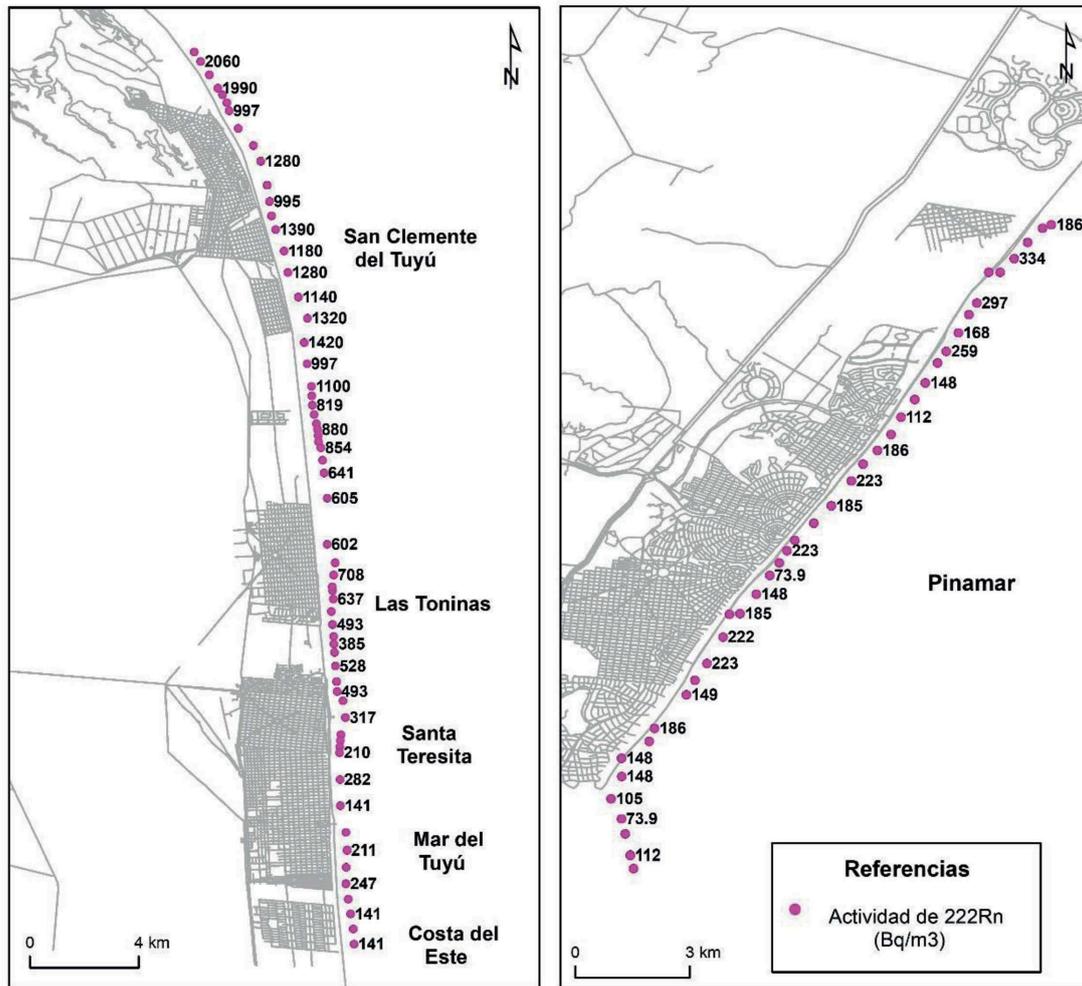
**Figura 3.** Mapa de flujo para Pinamar, noviembre 2018

### ■ Cálculo de la descarga por Radón

En el PDLC la actividad del  $^{222}\text{Rn}$  generalmente decrece con la distancia a la desembocadura del Río de la Plata (Punta Rasa). No se tomaron muestras para evaluar la cantidad de sedimentos en suspensión en las aguas, pero visualmente se observó una disminución en la turbidez al alejarse de la influencia del río. Este gradiente de turbidez parece correlacionarse con la actividad del  $^{222}\text{Rn}$ . Los valores decrecen de 2140 a 141 Bq/m<sup>3</sup> conforme el desplazamiento a lo largo de la costa. El promedio de estas actividades es de 789 Bq/m<sup>3</sup> y se detectaron pequeñas fluctuaciones en el km 12 y 20 de la transecta.

En el continente, para el PDLC la actividad del  $^{222}\text{Rn}$  en los pozos osciló entre 4630 y 18000 Bq/m<sup>3</sup>. El promedio de las concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  fue de 11023 Bq/m<sup>3</sup>. Las mediciones de  $^{222}\text{Rn}$  en el aire fueron despreciables (~ 35 Bq/m<sup>3</sup>).

En la transecta a lo largo de la costa de Pinamar la actividad del  $^{222}\text{Rn}$  no muestra una tendencia al descenso de norte a sur como en el PDLC, pero tampoco se observan variaciones en la turbiedad del agua de mar. Los valores oscilan entre 37 y 334 Bq/m<sup>3</sup> con un valor promedio de 170 Bq/m<sup>3</sup>. En el continente los valores son más homogéneos en comparación con los del PDLC y con una media de 1364 Bq/m<sup>3</sup> resultando en las concentraciones más bajas del área estudiada.



**Figura 4.** Transecta con la actividad del Rn. Der. PDLC, marzo 2016. Izq. Pinamar, noviembre 2018

Para el PDLC, usando el promedio de la actividad del  $^{222}\text{Rn}$  en la transecta ( $789 \text{ Bq/m}^3$ ) y el promedio de los pozos ( $11023 \text{ Bq/m}^3$ ) como valor extremo, se ha intentado calcular el flujo de descarga. Los valores indican que la SGD es de  $3,5 (\pm 2,5) \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ . Esto resulta en un orden de magnitud mayor que el calculado por medio de la Ley de Darcy. Esta diferencia podría atribuirse a la incertidumbre en el tiempo de residencia, en los valores extremos, la recirculación de agua de mar y complicaciones debidas a la alta turbidez del agua en el extremo norte del PDLC.

Los cálculos de la SGD para Pinamar dieron como resultado un caudal de  $0,55 \text{ Bq/m}^3$ , considerando el valor medio de  $^{222}\text{Rn}$  en la transecta de  $170 \text{ Bq/m}^3$  y la media en los pozos de  $1364 \text{ Bq/m}^3$ .

## CONCLUSIONES

La SGD en el área de estudio ha sido cuantificada mediante dos técnicas, el cálculo mediante parámetros hidrodinámicos y el balance de masa de  $^{222}\text{Rn}$ .

Las mediciones de niveles freáticos y el cálculo por medio de la ecuación de Darcy se aplican en el área de estudio desde hace más de 15 años. Existe una variabilidad temporal que depende de los ciclos hidrológicos, pero los valores se mantienen dentro de rangos del mismo orden, por lo cual esta metodología se considera consistente.

Los resultados de la SGD obtenidos mediante  $^{222}\text{Rn}$  en el PDLC han dado valores que difieren del método hidrodinámico en un orden de magnitud. En cambio, para el sector de Pinamar se han obtenido valores similares con ambos métodos, resultando la SGD un 17% mayor según los mapas de flujo.

El uso de  $^{222}\text{Rn}$  es ampliamente utilizado, pero los mejores resultados se obtienen en ambientes más restringidos como las lagunas costeras. En el caso particular del área de estudio, la mayor incertidumbre es el aporte de  $^{222}\text{Rn}$  desde los sedimentos en suspensión del Río de la Plata. Cuanto más cerca de la desembocadura (Bahía de Samborombón) se realizó la medición, más altos resultaron los valores de  $^{222}\text{Rn}$ , los cuales fueron descendiendo a medida que la embarcación se fue alejando del frente de turbidez.

En la transecta al sur, donde al parecer ya no se detecta la influencia de estos sedimentos, se corrobora que los valores de descarga son coincidentes por ambos métodos.

Se propone completar la transecta desde el sector central hacia el sur del PDLC, donde pareciera no detectarse la influencia de los sedimentos del Río de la Plata, y completar el relevamiento de la región. De esta manera, se corroboraría que las metodologías son compatibles y que en el sector norte del PDLC la influencia de los sedimentos en suspensión podría ser la causa de la diferencia en un orden de magnitud entre ambos resultados.

## REFERENCIAS

- Burnett W.C. y Dulaiova H., 2003. Estimating the dynamics of groundwater input into the coastal zone via continuous radon-222 measurements. *Journal of Environmental Radioactivity* 69(1-2): 21-35.
- Burnett W.C., Aggarwal P.K., Kulkarni K.M., Aureli A., Bokuniewicz H., Cable J.E., Charette M.A., Kontar E., Krupa S., Loveless A., Moore W.S., Oberdorfer J.A., Oliveira J., Ozyurt N., Povinec P., Scholten J., Privitera A.M.G., Rajar R., Ramessur R.T., Stieglitz T., Taniguchi M., Turner P.V., 2006. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods. *Science of The Total Environment*: 67 (2-3): 498-543.
- 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, La Plata, Argentina.
- 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., Rodrigues Capítulo L., Dapeña C., Fabiano M., Kruse E., 2022. A chemical and isotopic approach to investigate groundwater dynamics in a coastal aquifer. *Catena* 213, 106229, DOI <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106229>.
- Rodrigues Capítulo, L., 2015. Evaluación geohidrológica en la región costera oriental de la provincia de Buenos Aires. Caso de estudio Pinamar. Tesis doctoral. La Plata: Facultad de Ciencias Naturales y Museo.
- Rapaglia, J., Grant, C., Bokuniewicz, H., Pick, T. y Scholten, J., 2015. A GIS typology to locate sites of submarine groundwater discharge. *Journal of Environmental Radioactivity*, 145(0): 10-18.
- Stieglitz, T., 2005. Submarine groundwater discharge into the near-shore zone of the Great Barrier Reef, Australia. *Marine Pollution Bulletin*, 51(1-4): 51.

# EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA INTERFASE EN LA ZONACIÓN QUÍMICA VERTICAL DE UN ACUÍFERO COSTERO

Silvina Carretero\*, Leandro Rodrigues Capítulo\* y Eduardo Kruse\*

\*CONICET, CEIDE, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), 64 n° 3, (1900) La Plata, Argentina. E-mail: scarretero@fcnym.unlp.edu.ar

## RESUMEN

La presencia de zonación química en el agua subterránea frecuentemente se relaciona con la serie de Chebotarev y, en general, se presenta de forma lateral desde la zona de recarga hasta la descarga. En el acuífero costero del Partido de La Costa, Buenos Aires, se detectó una zonación química vertical. El objetivo del trabajo fue evaluar el comportamiento de la interfase de la zonación química vertical ya que este conocimiento es de importancia para los prestadores de servicio de agua potable a la hora de planificar la profundidad de las perforaciones. Se concluye que se trata de una interfase naturalmente dinámica influenciada por las condiciones hidrológicas y el ambiente geomorfológico.

**Palabras Claves:** acuífero costero, interfase, conductividad eléctrica.

## ABSTRACT

The presence of groundwater chemical zonation related to Chebotarev sequence in general is presented in lateral disposition from the recharge to the discharge zone. In the coastal aquifer in the Partido de La Costa, Buenos Aires, a vertical chemical zonation was detected. The aim of this work was to evaluate the behavior of the interface in the vertical chemical zonation due to its importance for the drinking water supply service when planning the wells depth. It is concluded that the interface is naturally dynamic, influenced by the hydrogeological conditions and the geomorphological environment.

**Keywords:** coastal aquifer, interface, electrical conductivity.

## INTRODUCCIÓN

La presencia de zonación química en el agua subterránea frecuentemente sigue el patrón de comportamiento definido en la serie de Chebotarev y, en general, se presenta de forma lateral desde la zona de recarga hasta la descarga.

En el acuífero costero del Partido de La Costa (PDLC), Buenos Aires, se detectó una zonación química vertical. Carretero et al., (2016) analizaron por primera vez la relación entre la litología, la conductividad eléctrica del agua (CE) y la respuesta eléctrica en los materiales que componen al acuífero. Los resultados indicaron que el acuífero es homogéneo en cuanto a su litología, pero no a su calidad química. Existe una zonación que permite diferenciar unidades con agua subterránea de baja conductividad eléctrica ( $< 1500 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) hasta los 5 y 7 m de profundidad. Por debajo, los valores se incrementan, alcanzando  $18000 \mu\text{S}/\text{cm}$  a los 11 m. Se encontró una buena correlación entre los valores de conductividad eléctrica del agua y los modelos de resistividad propuestos, pudiéndose verificar la efectividad del método en determinar estas variaciones.

Posteriormente, Carretero et al., (2017) realizaron análisis químicos en ambos sectores de la zonación definida por la CE. Estos análisis confirmaron que la zonación manifestada en los cambios de CE se corresponde con una mayor concentración de cationes y aniones en profundidad. De esta manera la unidad acuífera arenosa se dividió en dos zonas de acuerdo a sus características químicas. La zona A (0-6m) es el sector caracterizado por aguas bicarbonatadas cálcicas; la zona B (> 6m), la que presenta aguas cloruradas sódicas. Las concentraciones de la totalidad de los cationes y aniones de la zona B la convierten en no apta para consumo humano. En ese trabajo se discute sobre la necesidad de realizar más estudios para establecer el origen de la elevada salinidad que caracteriza a las aguas más profundas. Preliminarmente se exponen algunas hipótesis mediante las cuales se podría adjudicar la elevada salinidad a un pasaje de agua vertical ascendente desde el nivel arcilloso inferior (acuitardo). Estas arcillas son de origen de marismas o lagunas costeras y contendrían agua salinizada. Adicionalmente, se plantea la posibilidad de un flujo más lento debido a una menor conductividad hidráulica consecuencia del incremento del contenido de arcillas en profundidad y menor gradiente hídrico. Dicha condición permitiría un mayor tiempo de residencia del agua en contacto con los sedimentos portadores de agua salada.

Recientemente, Carretero et al., (2022a) anexaron a los datos hidroquímicos las relaciones isotópicas mediante el uso de los isótopos estables deuterio y oxígeno-18. Los resultados indicaron que el agua de las zonas A y B son diferentes. Existe una variabilidad en la composición isotópica y en la salinidad de la zona B en los diferentes pozos analizados y entre muestreos. Se observó, además, que el contenido isotópico de la zona B se encuentra más enriquecido y con valores de exceso de deuterio ( $\delta$ ) menores al 10 ‰ comparado con las muestras de las aguas de la zona A. De acuerdo a los datos disponibles hasta el momento tanto las variaciones isotópicas como en salinidad podrían explicarse por la ocurrencia de varios procesos que podrían estar actuando simultáneamente.

El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento de la interfase de la zonación química vertical que ocurre entre las zonas A y B, ya que este conocimiento es de importancia para los prestadores de servicio de agua potable como una herramienta básica para definir la profundidad de las perforaciones de explotación.

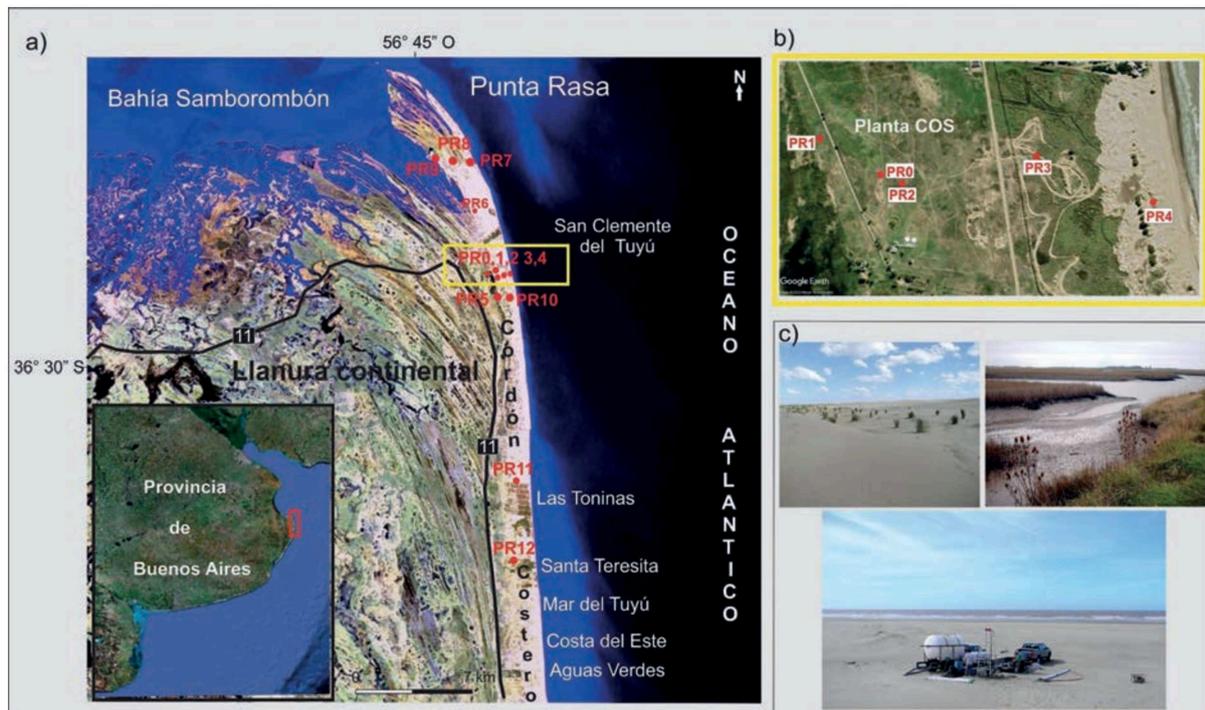
## ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a la costa arenosa de la Provincia de Buenos Aires, Argentina (Partido de La Costa) (Figura 1).

El perfil estratigráfico realizado por Carretero et al., (2022b), correlacionando las muestras analizadas con las formaciones geológicas definidas por Violante et al., (2001), indica que hasta los 3,5 m de profundidad se observa una arena clara, de origen eólico, con fragmentos de conchillas que corresponde a la Fm Punta Médanos. Por debajo, y hasta los 8 m, aparecen arenas más oscuras, lo cual se correlaciona con el ambiente de barrera de la Facies Mar de Ajó (Fm Pozo n° 17). En adelante, y hasta los 11 m, se detecta una arena más oscura y fina, muy arcillosa con fragmentos de conchillas. Luego de los 11 m la litología cambia a arcillas arenosas con conchillas que gradan a arcilla gris con fragmentos de conchillas gruesas (5 mm), lo cual constituye la Facies Destacamento Río Salado de la Fm Pozo n° 8. Desde el punto de vista hidrológico, la Fm Punta Médanos, la Facies Mar de Ajó y la parte superior de la Facies Destacamento Río Salado constituyen la unidad acuífera, mientras que los niveles arcillosos se comportan como acuitardo/acuícludo.

Se reconocen dos ambientes geomorfológicos: el cordón costero y la llanura deprimida. El primero se caracteriza por la presencia de arenas finas con agua subterránea de baja salinidad, principalmente del tipo Ca-HCO<sub>3</sub> y Na-HCO<sub>3</sub>. En el segundo predominan los materiales limosos y arcillosos, y contiene agua de elevada salinidad, tipo Na-Cl.

El acuífero freático presenta un espesor promedio de 10 m y está limitado por dos interfaces: hacia el continente, agua dulce-agua salobre y, hacia el mar, agua dulce-agua salada, siendo la única fuente de provisión de agua dulce para la población. El sector central del cordón costero es la zona de recarga principal, que se produce a partir de los excesos de las precipitaciones; 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 deprimida. El espesor del acuífero se ve limitado por una zonación química y un gradiente vertical de la conductividad eléctrica, la cual se incrementa abruptamente entre los 5-7 m de profundidad (Carretero et al., 2016). En términos generales, la divisoria de agua subterránea coincide con las máximas alturas topográficas siguiendo una línea imaginaria orientada en sentido norte-sur. Se reconocen procesos puntuales de intrusión salina (Santa Teresita), los cuales se vinculan con una extracción intensiva del recurso que favorece el avance del frente salino.



**Figura 1.** a) Área de estudio, b) detalle del sector de la Planta de la Cooperativa de agua (COS) en recuadro amarillo, c) ambientes geomorfológicos: derecha, cordón costero; izquierda, llanura deprimida; abajo sector de playa.

## METODOLOGÍA

Se realizaron 13 pozos de reconocimiento (PR) (Figura 1) abarcando el espesor total de la unidad acuífera. Los pozos fueron diseñados con cañería ranurada en la totalidad de su extensión para permitir el normal funcionamiento del flujo subterráneo. Mediante una sonda Solinst TLC meter se midió la CE del agua y profundidad en los PR en mayo-15, octubre-16, abril-17, julio-17, octubre-18, diciembre-20, marzo-21, julio-21, septiembre-21, diciembre-21 y marzo-22.

Se realizaron perfiles de CE vs profundidad para las diferentes fechas de control; se agruparon los perfiles de acuerdo a su localización en los ambientes: sectores al oeste del cordón costero, sector central, y al este, relacionado además con zonas de descarga y recarga principal.

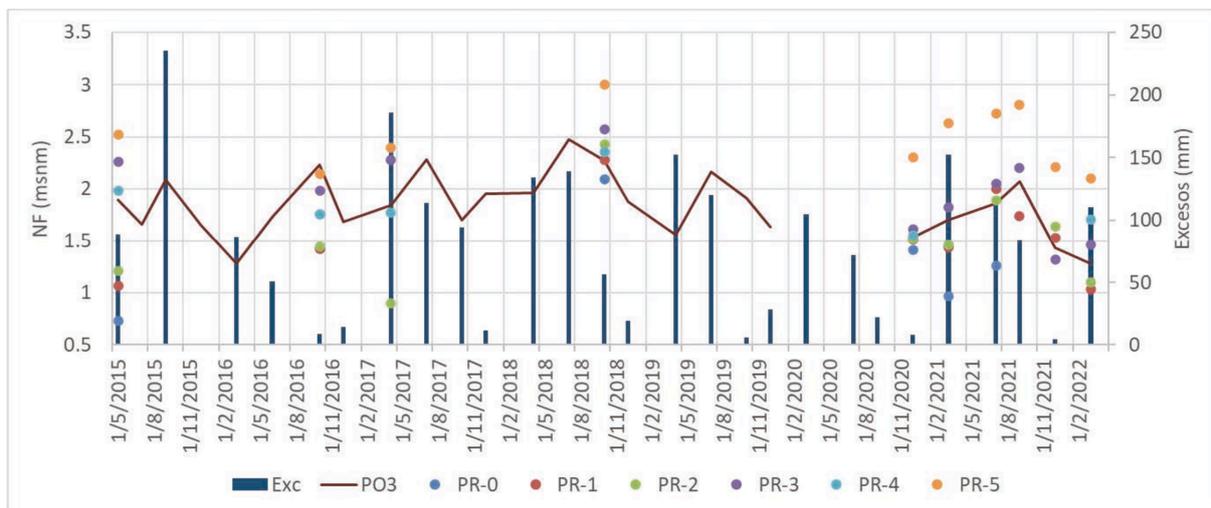
Se confeccionaron diversos gráficos para evaluar la relación entre la CE promedio de la zona B y los niveles freáticos. También se estudió la relación entre la variación de la profundidad de la interfase, los niveles freáticos y

los excesos del balance. Para la determinación de los excesos de agua se efectuaron balances hídricos diarios de acuerdo a los datos de precipitación disponibles y los valores de ETo (evapotranspiración de referencia) media diaria estimadas según el método de Penman-Monteith (Allen et al., 1998) utilizando el programa AGROAGUA v.5.0 (Forte Lay et al., 1995). De acuerdo a las características de los sedimentos (Carretero et al., 2022a), asociado a su elevada permeabilidad, en general no se observan procesos de escurrimiento superficial y se considera que los excesos del balance se transforman directamente en recarga al acuífero dentro del ambiente de médanos costeros.

## RESULTADOS

### ■ Variaciones de nivel freático

Debido a que las mediciones de CE en los PR, en principio, no fueron tomadas con un paso de tiempo homogéneo, se graficó el comportamiento del nivel freático del pozo de observación (PO3) ubicado a 5 m de PR-3 (Figura 2) para analizar el funcionamiento de la capa freática durante el periodo estudiado.



**Figura 2.** Variaciones del nivel freático (PO3) medidos cada 90 días aproximadamente y excesos acumulados en el mismo periodo. En 2020 se vio interrumpido el registro hasta diciembre, donde pudo retomarse las mediciones. Los puntos indican los niveles para los PR en las fechas correspondientes.

En general, se observa una relación directa entre los niveles freáticos y los excesos del balance hídrico, excepto en algunas mediciones de PR-0, PR-1 y PR-2, lo cual podría ser consecuencia de la extracción de agua en el campo de bombeo en donde se encuentran ubicados. Esto generalmente ocurre entre marzo-abril luego de la temporada turística. Los niveles más altos se observan en julio-17 para PO3 y para los PR en octubre-18, producto de los elevados excesos acumulados en los meses previos al monitoreo.

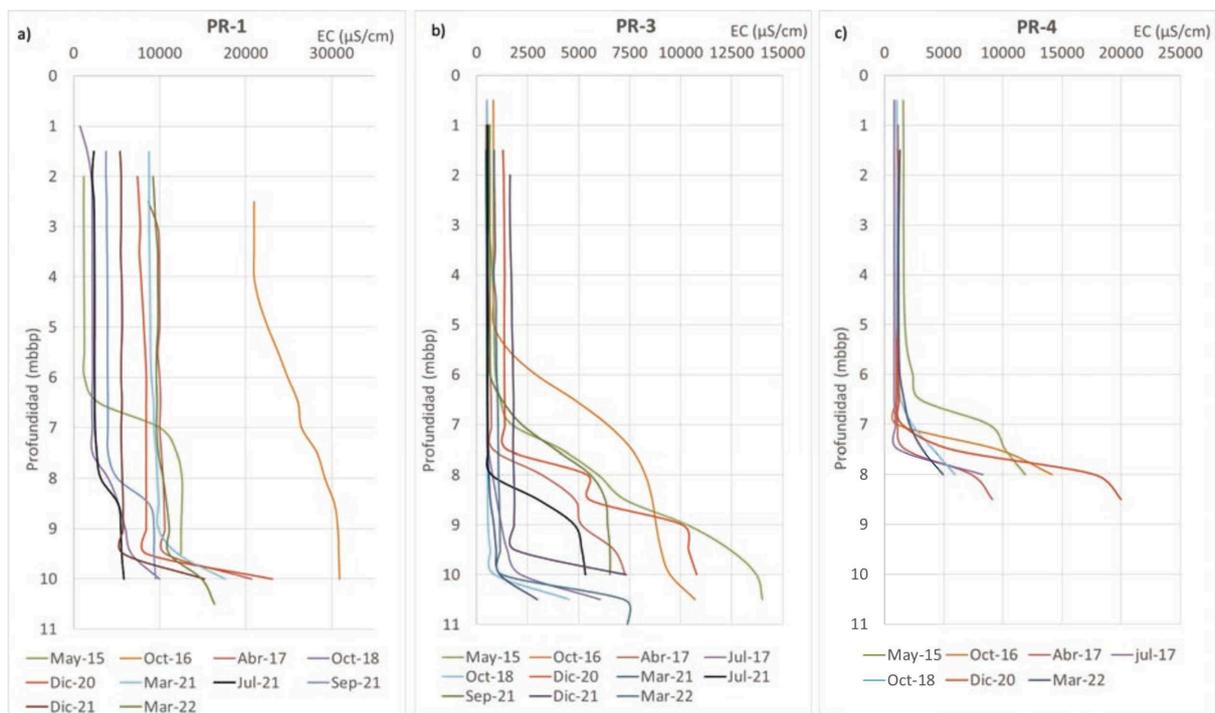
### ■ Variaciones de CE según el ambiente geomorfológico

Para PR-1 (Figura 3a), localizado en la transición hacia la llanura deprimida, la CE de la zona A puede oscilar entre 2000 y 10000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que en la zona B el máximo puede exceder de 30000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con un valor medio de 6000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En esta perforación se observa que la interfase se desplaza entre los 6,5 y 9,5 metros bajo boca de pozo (mbbp). En mayo-15 se observó la posición más elevada, mientras que en octubre-16 toda la columna de agua presenta valores mayores a 20000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , los cuales se incrementan con la profundidad

de manera gradual llegando al máximo de casi 31000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con la consecuente desaparición de la zona A. En abril-17 la zona A se manifiesta con sus valores medios en el orden de 10000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y la zona B con 20000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a los 9,5 mbbp.

En el caso de PR-3 (Figura 3b), ubicado en el centro del médano, la interfase se desplaza entre los 5 y los 10 mbbp. El momento donde la interfase se encuentra más elevada, alrededor de los 5 mbbp, es en octubre-16. Para octubre-18 se da la situación donde la interfase se observa a mayor profundidad (10 mbbp). La CE para la zona A oscila entre 700 y 1800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , en cambio para la zona B estos valores se encuentran entre 3000 y 14000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

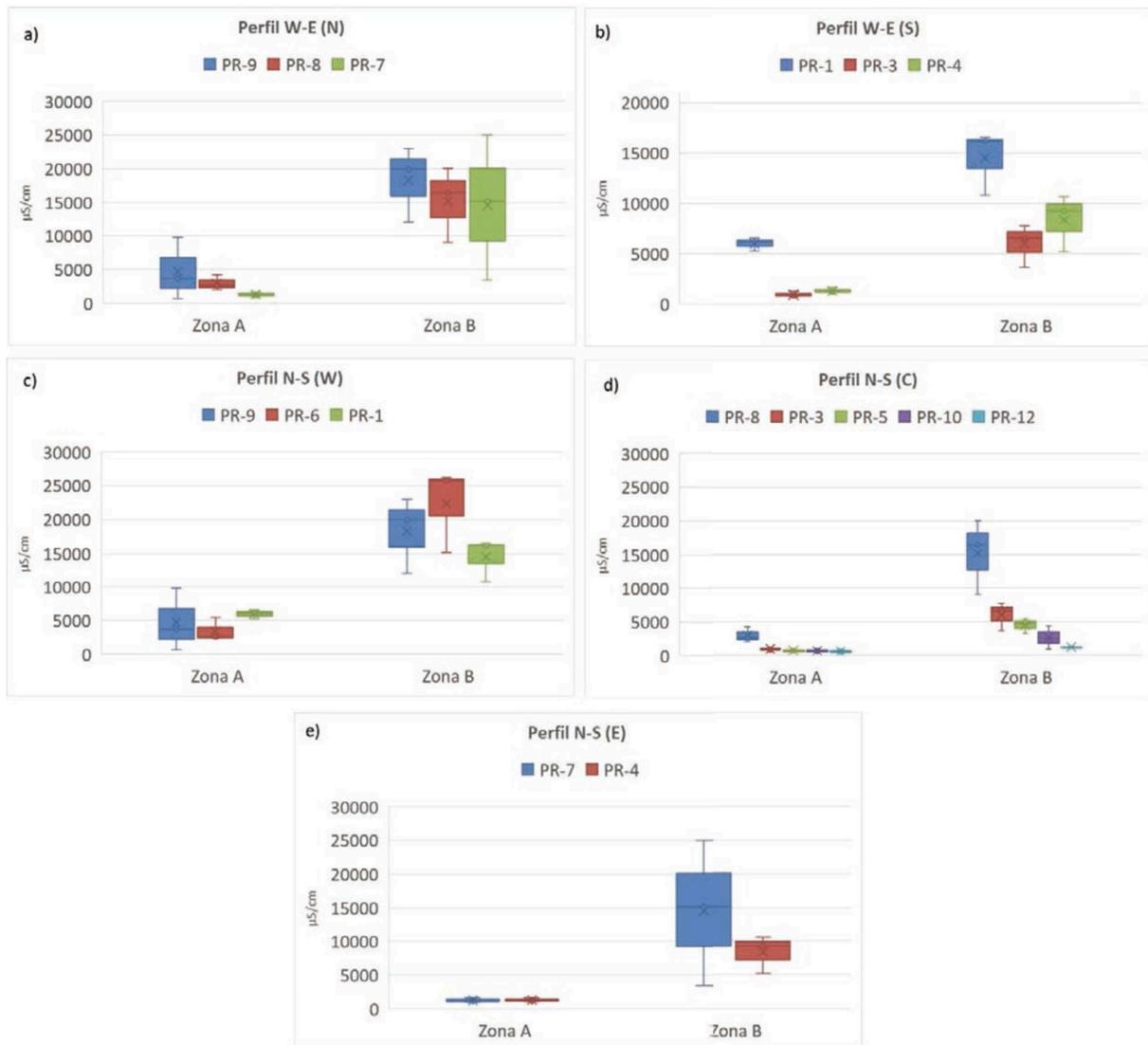
PR-4 (Figura 3c) se localiza en la playa, en la zona de descarga hacia el mar. La interfase es más uniforme en este caso, encontrándose en la mayoría de las mediciones a 7,5 y 8 mbbp, oscilando entre 6,5 y 8 mbbp. La CE promedio de la zona A es del orden de los 1200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y la zona B oscila entre 3000 y 20000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .



**Figura 3.** Perfiles de conductividad eléctrica en diferentes fechas para los pozos PR1, PR3, PR4 localizados al oeste, centro y este del cordón costero respectivamente.

En el perfil oeste-este, tanto para la zona A como la B, la CE en sus valores medios en el sector norte descende en dirección W-E (Figura 4a). Para el sector sur, el valor medio más bajo se observa en la zona central y el más alto al oeste (Figura 4b).

Para el perfil norte-sur, en la zona A el mayor valor medio se observa al sur (afectación por bombeo), pero en la zona B se localiza en el centro del perfil (Figura 4c). Una disminución en la concentración de la CE media en sentido N-S se observa para ambas zonas en el sector central (Figura 4d). Para el sector este del perfil, en la zona A se presentan valores similares, mientras que en la zona B valores más altos se obtuvieron al norte (Figura 4e).



**Figura 4.** Diagramas de cajas y bigotes para la zona A y B organizados según la localización de los PR. a) Perfil W-E sector norte; b) Perfil W-E sector sur; c) Perfil N-S, sector oeste; d) Perfil N-S, sector central; e) Perfil N-S, sector este.

#### ■ Variaciones de CE según condiciones hidrológicas

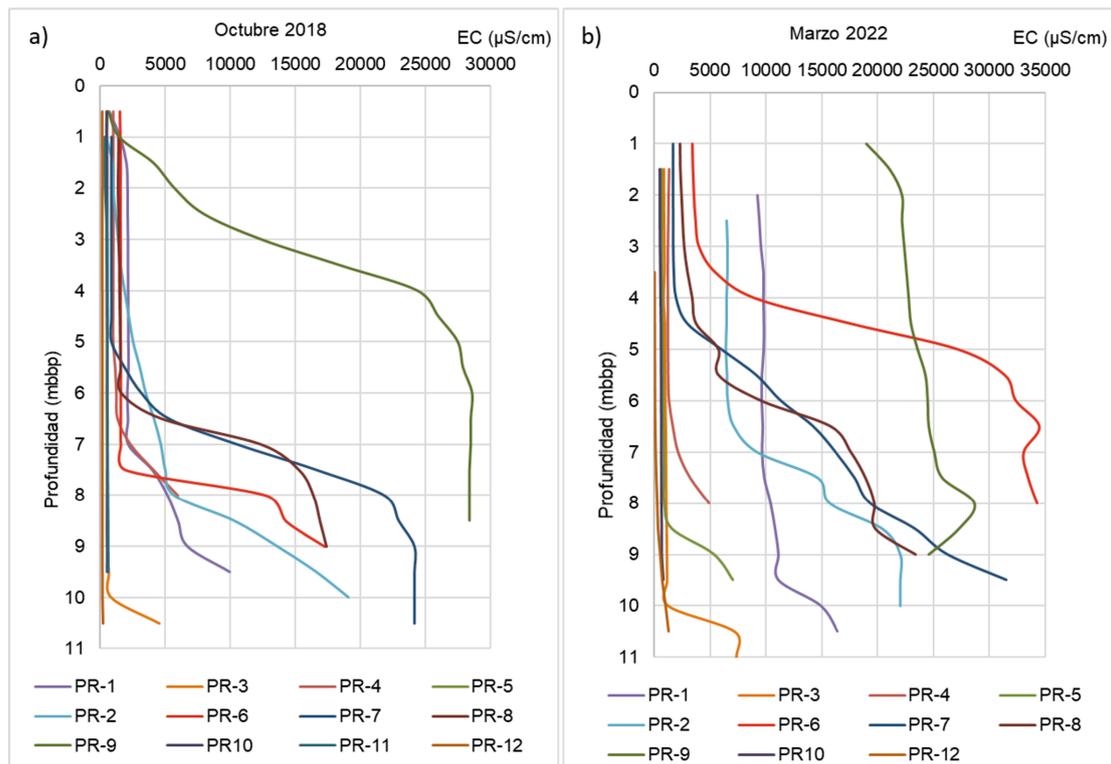
Se analizó el comportamiento de la CE en dos perfiles realizados en condiciones de niveles freáticos elevados (octubre-18, Figura 5a) y niveles deprimidos (marzo-22, Figura 5b). La CE, tanto para la zona A como la B, es mayor en marzo-22 para todos los pozos. La diferencia es de menor magnitud para PR-4, PR-10 y PR-12. Este incremento en los valores de CE a su vez viene acompañado, en general, de una somerización de la interfase.

Enfatizando el análisis en la zona B (Figura 6a, b, c, d), en términos generales se observa que los valores de la CE disminuyen cuando suben los niveles, pero esta relación no es tan clara en todos los casos y fechas analizadas. Sí se verifica una coincidencia entre los valores más elevados dentro del periodo monitoreado y la CE más baja en octubre-18 para todos los pozos.

En la Figura 6b se puede observar el comportamiento para PR-3, donde hasta diciembre-20 existe una relación inversa entre niveles y CE, pero a partir de esa fecha la relación parece invertirse y se vuelve poco clara hasta marzo-22.

Para PR-4 (Figura 6d) las menores concentraciones medias de CE están en el orden de los 4000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Esta situación ocurre tanto en octubre-18, coincidiendo con el nivel más elevado, como en marzo-22, cuando el mismo se encontraba 0,65 m más profundo.

En el caso del PR-5 (Figura 6e), para octubre-18 la zona B desaparece coincidiendo con la instancia de niveles más elevados.



**Figura 5.** Perfiles de conductividad eléctrica para dos situaciones hidrológicas diferentes a) niveles freáticos elevados: octubre-2018; b) niveles freáticos deprimidos: marzo-2022.



**Figura 6.** Relación entre la conductividad eléctrica (CE) promedio de la zona B y los niveles freáticos.

## CONCLUSIONES

La interfase de la zonación química vertical en el acuífero costero presenta una naturaleza dinámica, siendo sus principales forzantes las características del medio físico que la aloja y la relación entre la recarga y descarga (extracción) del sistema acuífero

La definición de zona A y B es variable de una perforación a otra. En los primeros estudios se estableció que la primera correspondía a valores de CE menores a 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y la segunda a mayores. Pero el seguimiento de esta variable en el tiempo permitió establecer que la zona A presenta CE mucho mayores en los PR localizados en la cercanía de la llanura deprimida.

Contrariamente a lo que se puede esperar en un acuífero costero, la interfase de los PR localizados en las proximidades del mar resultó ser la más estable con pocas variaciones en profundidad a lo largo del tiempo. En este caso, no se ha detectado la presencia de la cuña salina proveniente de la interfase agua dulce – agua salada marina.

Existe una relación inversa entre los niveles freáticos y la CE en la zona B. En periodos de menores excesos hídricos se produce un incremento en los valores de CE, los cuales coinciden con una somerización de la interfase.

De acuerdo a los estudios antecedentes y los resultados obtenidos en el presente trabajo, podría considerarse que el funcionamiento del acuífero costero se ve influenciado, además de la recarga directa, por una recarga lateral desde la llanura deprimida. Considerando que este ambiente está conectado y recibe agua desde la Bahía de Samborombón, esta condición resultaría en diferentes proporciones de mezclas de agua. Más evidente es la influencia de la recarga durante eventos de elevadas precipitaciones que remueve y reemplaza el agua salobre, evidenciado por el descenso en los valores de la CE y de la profundidad de la interfase.

Estos resultados son 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 variabilidad en la profundidad de la interfase es un factor muy importante al momento de establecer la profundidad de explotación para evitar la salinización del sector superior del acuífero. Una mejora en el grado de conocimiento del sistema hidrológico permite realizar una explotación sustentable del recurso evitando realizar perforaciones cuya profundidad se encuentre por debajo de los límites aceptables para el agua potable.

## REFERENCIAS

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. y Martin Smith M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements, FAO irrigation and drainage papers 56. FAO, Rome.
- 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.
- 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., García Galluzzi A. y Kruse E., 2022b. Coastal aquifer behaviour related to the textural and mineralogical characteristics of the sands in the eastern coast of the province of Buenos Aires. *Journal of South American Earth Sciences* 114 (2022) 103692.
- Carretero S., Rodrigues Capítulo L., Dapeña C., Fabiano M. y Kruse E., 2022a. A chemical and isotopic approach to investigate groundwater dynamics in a coastal aquifer. *Catena* 213, 106229, DOI <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106229>.
- Forte Lay J.A., Aiello J.L. y Kuba J., 1995. Software AGROAGUA v.5.0. AGROAGUA, CIBIOM. CONICET. Buenos Aires.
- Violante R.A., Parker G. y Cavallotto J.L., 2001. Evolución de las llanuras costeras del este bonaerense entre la bahía Samborombón y la laguna Mar Chiquita durante el Holoceno. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 56(1), 51-66.