



# Análisis de la descarga submarina en dos sectores de la costa oriental de la Provincia de Buenos Aires, Argentina

Submarine groundwater discharge analysis in two sectors of the eastern coast of the Province of Buenos Aires, Argentina

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>; <lrcapitulo@fcnym.unlp.edu.ar>; <kruse@fcnym.unlp.edu.ar>

<sup>2</sup> Biology Department, Sacred Heart University, 5151 Park Ave, Fairfield, CT 06825, EE.UU. <rapaglia@sacredheart.edu>

\* Autor de correspondencia: <scarretero@fcnym.unlp.edu.ar>

## 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 300 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 clave** — Acuífero costero, descarga subterránea, radón.

► Ref. bibliográfica: Carretero, S.; Rapaglia, J.; Rodrigues Capítulo, L.; Kruse, E. 2023. "Análisis de la descarga submarina en dos sectores de la costa oriental de la Provincia de Buenos Aires, Argentina". *Acta Geológica Lilloana* 34 (2): 93-109. doi: <https://doi.org/10.30550/j.agl/2023.34.2/1838>

► Recibido: 18 de agosto 2023 – Aceptado: 25 de septiembre 2023



► URL de la revista: <http://actageologica.lillo.org.ar>

► Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución – No Comercial – Sin Obra Derivada 4.0 Internacional.

## 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  $^{222}\text{Rn}$  as a tracer and hydrogeological flow maps.  $^{222}\text{Rn}$  activity was measured in wells and along a transect 300 m from the coastline. Groundwater depth was measured in wells and groundwater contour maps were made. Calculated flux of SGD for La Costa was  $0.37 \text{ m}^3/\text{m}/\text{d}$  according to hydrodynamics and of  $3.5 \text{ m}^3/\text{m}/\text{d}$  according to the radon mass balance. For Pinamar these values were of  $0.66$  and  $0.55 \text{ m}^3/\text{m}/\text{d}$  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 of 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 mecanismo natural del agua subterránea por el cual ésta 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 interface agua dulce / agua salada depende, en parte, de ella. Sin embargo, recientemente el incremento del nivel del mar y el exceso de extracción de agua subterránea para consumo humano o comercial ha llevado, en muchos casos, a un descenso de la altura hidráulica por debajo del nivel del mar, ocasionando intrusión marina (Sherif y Singh, 1999; Werner y Simmons, 2009). En casos extremos, esta intrusión puede contaminar el acuífero al punto de que ya no es viable para su uso. Particularmente 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 (Barlow y Reichard, 2010). Muchas de estas comunidades dependen de los acuíferos como único suministro de agua, ya que la mayoría de estos ambientes no presentan suficientes cuerpos de agua superficiales que permitan su abastecimiento. El área de estudio se incluye dentro de estas características.

Para poder entender estos procesos se deben considerar técnicas integradas para el estudio de la relación agua superficial / agua subterránea. Muchas veces se realizan análisis sobre la descarga desde el punto de vista de los acuíferos, por medio de sus parámetros hidráulicos o, desde la perspectiva marina, por ejemplo, utilizando “seepagemeters” o trazadores químicos, pero raramente se aplican ambos enfoques (Mulligan y Charette, 2006). La utilización conjunta de más de una metodología

que evalúe los procesos de descarga puede ser una herramienta de utilidad para la comprensión del funcionamiento del acuífero.

La hidrogeología clásica se basa en el entendimiento de los parámetros del acuífero por medio de la medición en pozos. A lo largo de una barrera medanosa la lente de agua subterránea descargará al mar dependiendo de la altura hidráulica y de la permeabilidad del acuífero de acuerdo a la ley de Darcy. El flujo total de descarga puede ser cuantificado en base a estos valores.

El  $^{222}\text{Rn}$  es hijo del  $^{235}\text{U}$ , y siendo un gas noble se encuentra disuelto en el agua mientras pasa por las rocas y/o sedimentos y permanece en solución hasta que se expone a la superficie. Por lo tanto, este elemento es un excelente trazador del flujo subterráneo. La actividad del radón ha sido exitosamente utilizada para cuantificar la SGD en muchos ambientes costeros (Cable *et al.*, 1996; Burnett y Dulaiova, 2003; Rapaglia *et al.*, 2015), y su uso ha ganado popularidad debido a la facilidad de medición del dispositivo RAD7.

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).

## MARCO GEOLÓGICO

El área de estudio corresponde al cordón costero de la Provincia de Buenos Aires, Argentina que incluye a los Partidos de La Costa (PDLA) 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 (Rodríguez Capitulo, 2015).

En la región se reconocen dos ambientes geomorfológicos, el cordón costero y la llanura deprimida, donde la geomorfología ejerce un control fundamental sobre el comportamiento hidrodinámico e hidroquímico. El cordón costero se caracteriza por la presencia de sedimentos compuestos por arenas finas, el agua subterránea es de baja salinidad las cuales presentan un predominio del tipo bicarbonatado cálcico/sódico y cuyo comportamiento es el típico para aguas de reciente infiltración. La llanura deprimida se desarrolla al oeste del cordón costero con cotas inferiores a 5 m s.n.m., predominan los materiales limosos y arcillosos y contiene agua de elevada salinidad, de tipo clorurado sódico.

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. 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

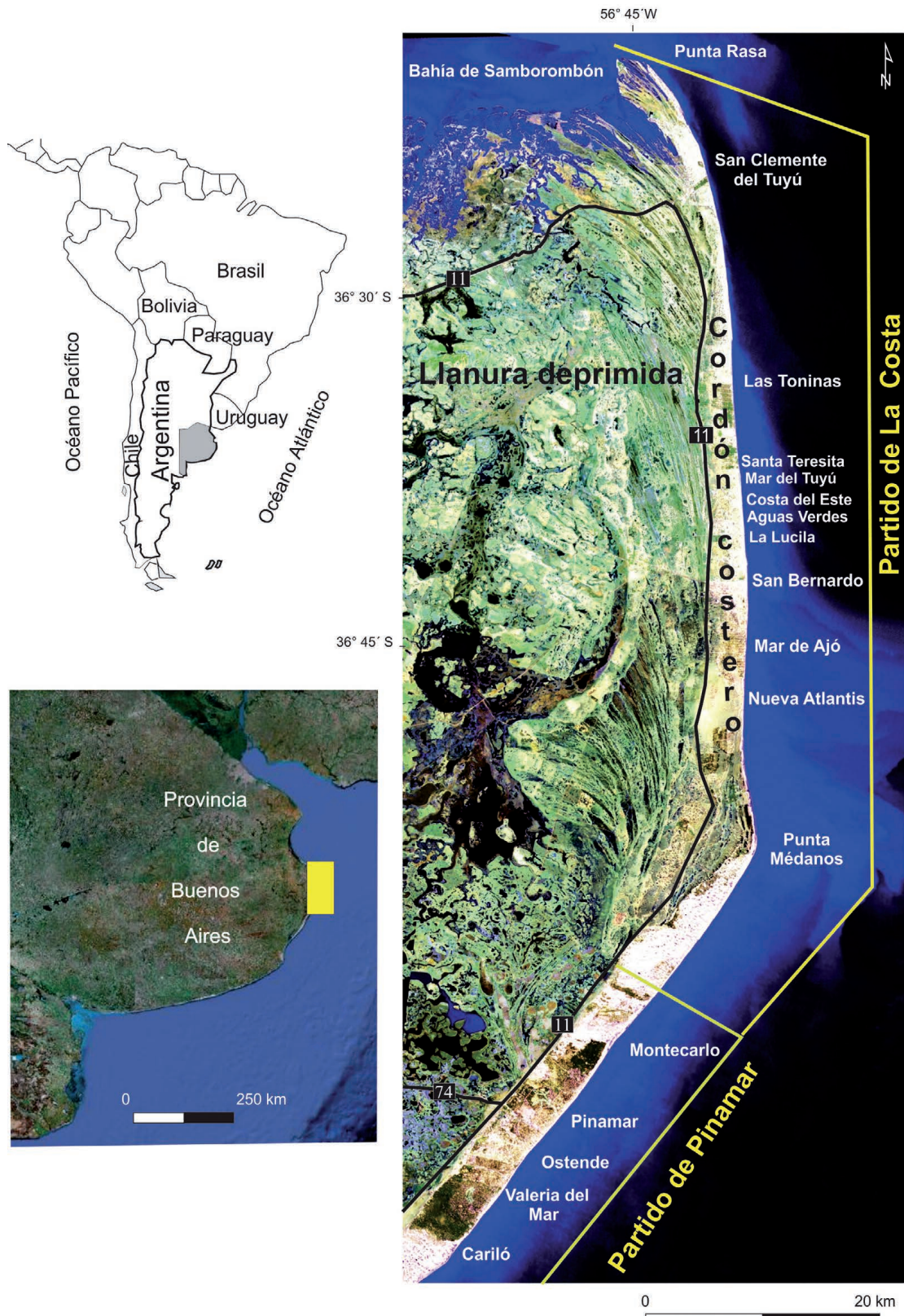


Figura 1. Área de estudio.

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, con un gradiente hídrico que varía entre 1,5 y 4 km/m. 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.*, 2022a). En función del tipo de cobertura identificada se reconocen mayores excesos en el suelo desnudo (470 mm/año) con respecto a suelo forestado (261 mm/año), indicando mayor evapotranspiración para la cobertura arbórea (Rodríguez Capitulo *et al.*, 2018). Este fenómeno es particularmente importante en el sector sur debido a la extensa superficie forestada.

En la región, la actividad económica dominante es el turismo siendo el uso del agua casi exclusivamente para consumo humano y recreativo. La población, que depende del acuífero costero para el suministro de agua, se incrementa notablemente durante el verano. 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 proveniente del mar (Carretero *et al.*, 2013; Perdomo *et al.*, 2013). En Pinamar se observaron procesos de salinización en el sector costanero, con un desplazamiento de la interfase hacia el continente (Carretero *et al.*, 2022a). El principal factor condicionante de la calidad química en la costa arenosa de la Provincia de Buenos Aires son los elevados contenidos de Fe y Mn, el segundo factor es el fenómeno de intrusión salina.

La mayoría de las localidades del PDLC no poseen servicio de agua potable y sus habitantes se abastecen mediante pozos domiciliarios individuales, sin tratamiento del agua ni control de los caudales extraídos. En San Clemente del Tuyú existe un campo de bombeo fuera de la localidad donde se tratan los excesos de Fe y Mn y cuya red alimenta principalmente la zona céntrica donde se encuentran emplazados restaurantes, hoteles y los mayores edificios frente a la avenida costanera. En Santa Teresita recientemente se instaló una planta potabilizadora para abastecer al nuevo Hospital, algunos colegios y tanques barriales, pero no incluye al sector con intrusión marina. El sector sur del PDLC posee servicio parcial brindado por una empresa privada (Mar de Ajó, San Bernardo). En el partido de Pinamar el servicio lo provee una cooperativa, pero hay sectores sin acceso y no se realiza tratamiento para abatimiento de Fe y Mn. La cobertura de saneamiento es muy superior a la de la red de agua potable, lo que supone una ventaja para protección del acuífero

## MÉTODOS

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 han utilizado dos métodos: piezómetros y  $^{222}\text{Rn}$  como trazador pudiéndose realizar una cuantificación. Ambas metodologías han sido aplicadas anteriormente en el área de estudio por Carretero *et*

*al.* (2019, 2021). En el primer caso sólo se aborda el tema de la SGD para el Partido de La Costa, y en el segundo se analiza la relación entre la actividad del  $^{222}\text{Rn}$  y sus variaciones asociadas al ciclo hidrológico en ambos sectores (PDLC-Pinamar).

### 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:

$$(1) \quad Q = -K dh/dL$$

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  $dh/dL$  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. De acuerdo a perforaciones realizadas en el área (Rodrigues Capítulo y Kruse, 2017; Carretero *et al.*, 2022b) la variación del espesor del acuífero es despreciable en las transectas construidas. Los valores de descarga fueron estimados para cada localidad considerando los sectores donde la dirección del flujo subterráneo se posiciona perpendicular a la línea de costa, corroborando el valor estimado con la medida puntual de los pozos y la distancia a los mismos. Una vez obtenidos estos valores, se realizó un promedio en cada localidad y se recalculó la descarga en m<sup>3</sup>/d por metro de costa (m<sup>3</sup>/m/d). Cabe aclarar que se trata de estimaciones de tipo regionales y que esta metodología es la más frecuente y ampliamente utilizada para la estimación de estos caudales, tal como se menciona en Burnett *et al.* (2006).

### Mediciones de radón ( $^{222}\text{Rn}$ )

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 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 ( $\sim 4\text{-}11$  km/h) y la temperatura del aire fluctuó entre  $15^\circ\text{C}$  en la mañana y  $28^\circ\text{C}$  en la tarde.

En noviembre de 2018 se repitió la experiencia abarcando la totalidad de las localidades del partido de Pinamar lo cual representa 16 km de costa. La velocidad del viento osciló entre 10 y 16 km/h y la temperatura entre 18 y  $29^\circ\text{C}$ . 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):

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

Donde  $F_{SGD}$  = flujo de  $^{222}\text{Rn}$  desde la SGD ( $\text{Bq}/\text{m}^3/\text{d}$ ),  $F_{Diff}$  = 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:

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

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 del 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.

A pesar de las asunciones realizadas y la simplificación de la ecuación para la obtención de la SGD el método ha permitido arribar a valores que serán discutidos en los resultados y que para el caso del PDL se encuentran publicados en Carretero et al. (2019).

## 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 estimados 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.



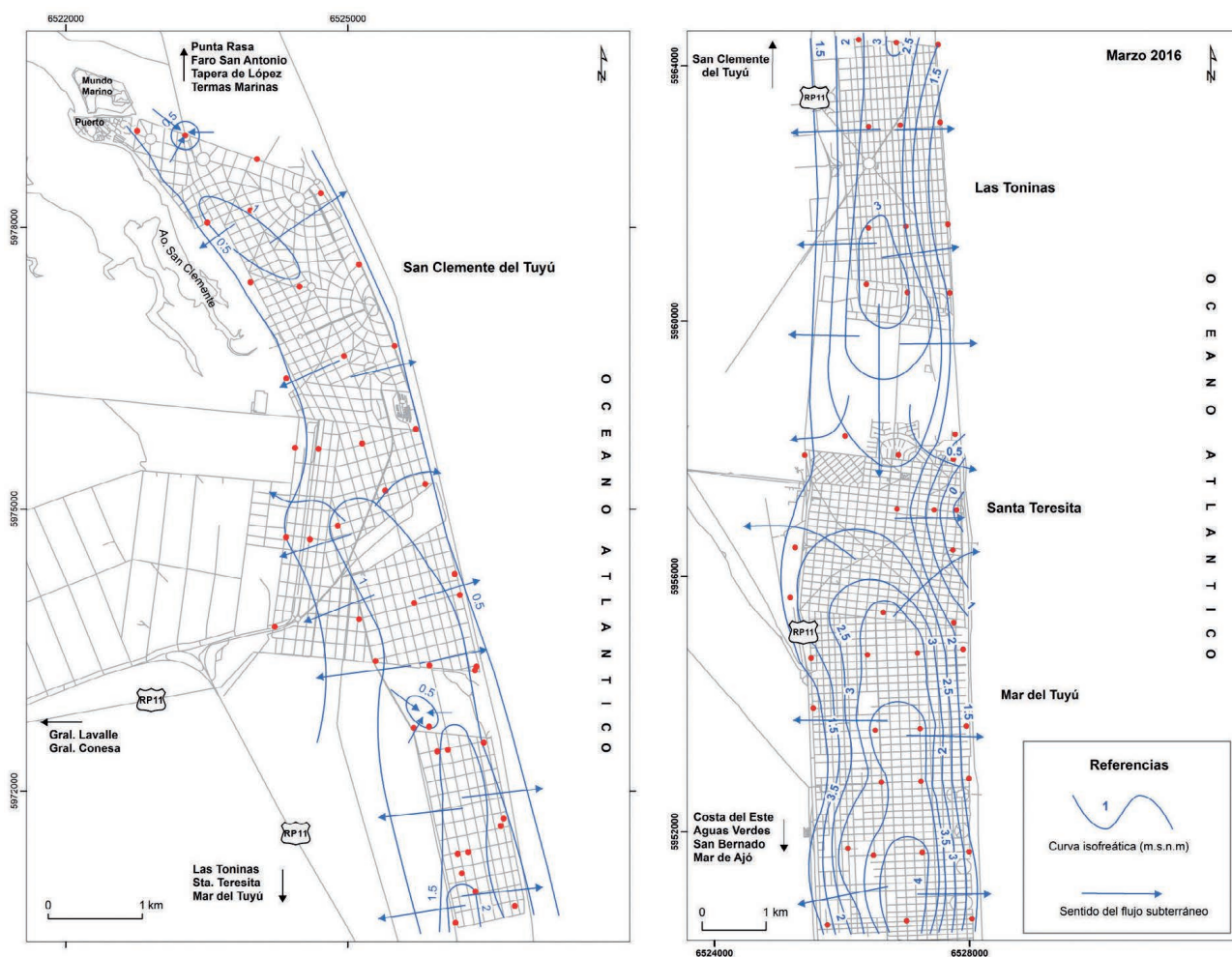


Figura 2. Mapas de flujo para marzo de 2016. Izquierda: San Clemente del Tuyú. Derecha: Sector Las Toninas, Santa Teresita y Mar del Tuyú. Los puntos rojos simbolizan la localización de los freaímetros.

El caudal promedio de descarga para todo este sector del PDLC alcanzaría los  $0,39 \text{ m}^3/\text{m}/\text{d}$ . 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.

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  $4 \text{ m}/\text{km}$  y la velocidad efectiva de  $0,88 \text{ m}/\text{d}$ .

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

### 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) (Figura 4). No se tomaron muestras para evaluar la cantidad de sedimentos en suspensión en las aguas, pero visualmente

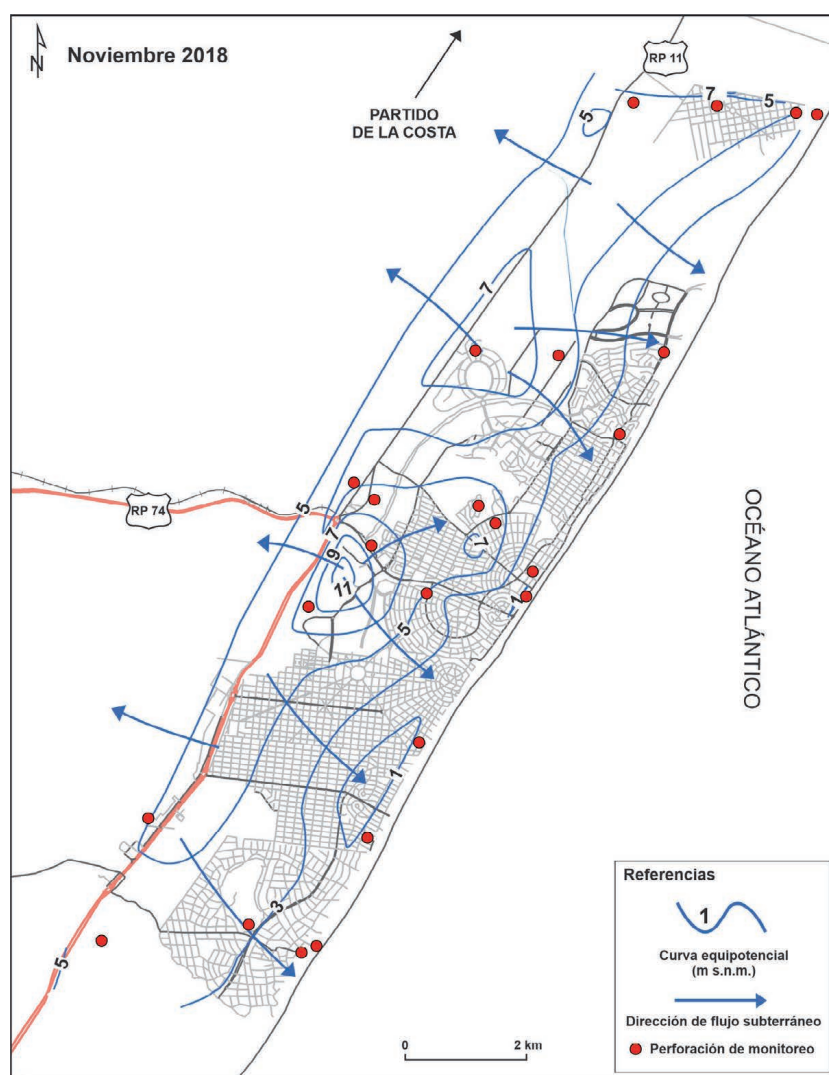


Figura 3. Mapa de flujo para Pinamar, noviembre 2018.

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  $\text{Bq}/\text{m}^3$  conforme el desplazamiento a lo largo de la costa. El promedio de estas actividades es de 789  $\text{Bq}/\text{m}^3$  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  $\text{Bq}/\text{m}^3$ . El promedio de las concentraciones de  $^{222}\text{Rn}$  fue de 11023  $\text{Bq}/\text{m}^3$ . Las mediciones de  $^{222}\text{Rn}$  en el aire fueron despreciables ( $\sim 35 \text{ Bq}/\text{m}^3$ ).

En la transecta a lo largo de la costa de Pinamar (Figura 4) 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  $\text{Bq}/\text{m}^3$  con un promedio de 170  $\text{Bq}/\text{m}^3$ . En el continente las actividades del  $^{222}\text{Rn}$  son más homogéneas en comparación con las del PDLC, con una media de 1364  $\text{Bq}/\text{m}^3$ , resultando en las concentraciones más bajas del área estudiada.

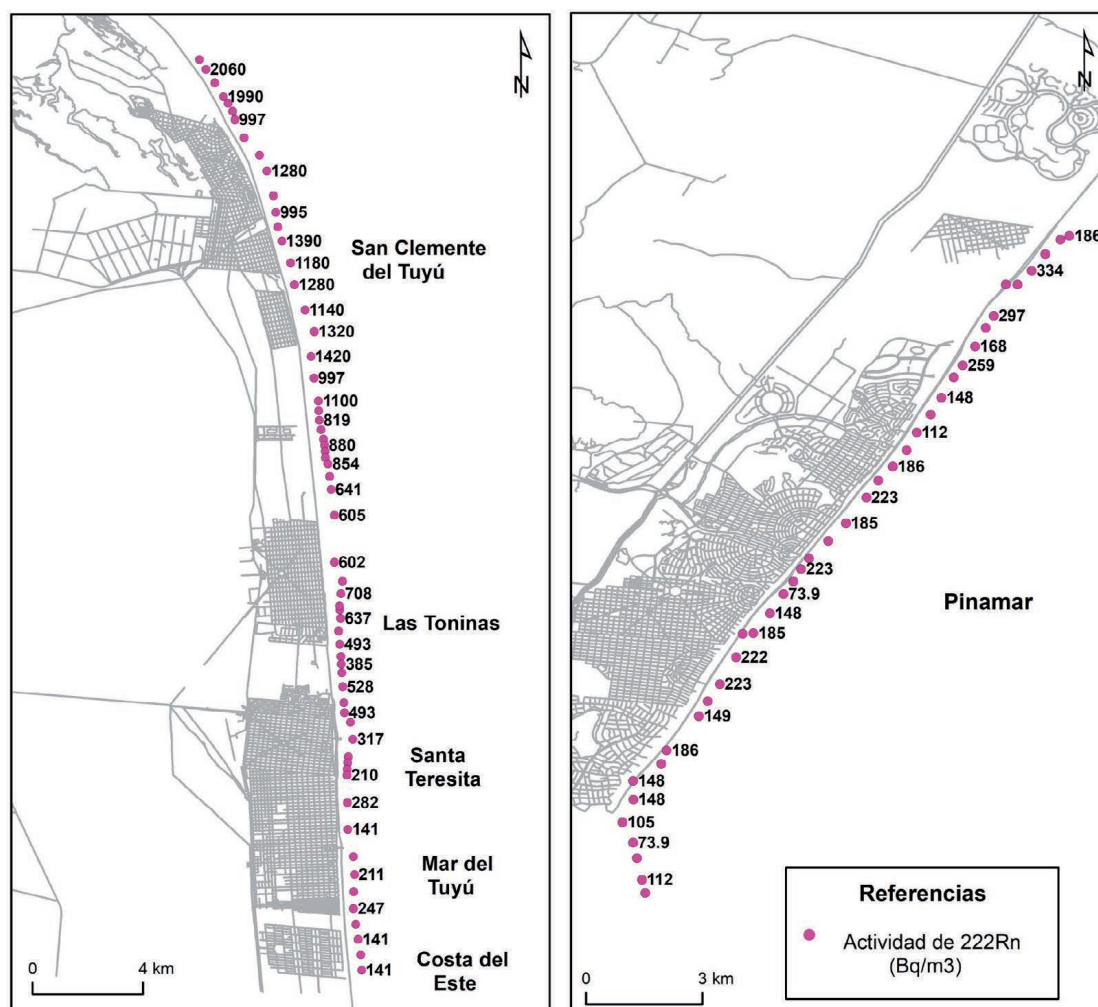


Figura 4. Transecta con la actividad de  $^{222}\text{Rn}$ . Derecha: PDLC, marzo 2016. Izquierda: Pinamar, noviembre 2018.

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 SDG es de  $3,5 (\pm 2,5) \text{ m}^3/\text{m}/\text{d}$ . Esto resulta en un orden de magnitud mayor que el calculado por medio de la Ley de Darcy.

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  $1364 \text{ Bq/m}^3$ .

## DISCUSIÓN

A nivel internacional se pueden citar numerosos estudios sobre la detección de la SGD por varios métodos, pero no así en Argentina. Además del realizado por Carretero *et al.* (2019) para el PDLC, existe otra investigación en la Patagonia argentina (Torres *et al.*, 2018), donde se ha detectado en las costas de Chubut y Santa Cruz la presencia de  $^{222}\text{Rn}$ . La mera presencia de este elemento indica la salida de agua

dulce al mar, con lo cual, si bien los autores no han cuantificado un valor de flujo, sí se ha comprobado la existencia del fenómeno. La actividad del  $^{222}\text{Rn}$  en esta región oscila entre 107-646 Bq/m<sup>3</sup>. En ese estudio se mencionan valores entre 26-49 Bq/m<sup>3</sup> para el Sur de Brasil y de 10-31 Bq/m<sup>3</sup> en las costas del Uruguay (Andrade, 2010). Para el PDLC el rango de valores va de 141 a 2140 Bq/m<sup>3</sup> y en Pinamar entre 37 y 334 Bq/m<sup>3</sup>. En el caso de Patagonia los autores especulan que las altas actividades en esta zona, en comparación con Brasil y Uruguay sería consecuencia de la contribución de radón de los mismos sedimentos o la acción de la SGD favorecida por efecto mareal. En el caso de la costa bonaerense se han realizado estudios (Montes et al., 2022) sobre la radiactividad de los sedimentos y se continúa trabajando para arribar al origen y variabilidad del radón en el agua.

En dos regiones geológicas diferentes de la barrera costera del sur de Brasil, da Rocha et al. (2018) calcularon mediante  $^{222}\text{Rn}$  valores de SGD de  $969,3 \pm 51,2 \times 10^3$  y  $59,7 \pm 1,7 \times 10^3$  m<sup>3</sup>/d para 70 y 55 km de costa, respectivamente. Estas diferencias significativas se atribuyen a las características geológicas como depositación, permeabilidad y porosidad. También en Ubatuba, Brasil, Povinec et al. (2008) determinó una descarga de  $13 + 6$  cm d<sup>-1</sup> ( $7$  m<sup>3</sup>/d/m), en 40 km de costa mediante el uso de  $^{222}\text{Rn}$  mientras que la estimación del flujo de SGD en base a Darcy oscila en un orden de magnitud mayor con valores entre  $0,17$  m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup> a  $1,6$  m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup> por metro de costa.

En diferentes costas del mundo se han obtenido una variedad de estimaciones de SGD con el uso del  $^{222}\text{Rn}$  como trazador. En la zona costera de Vizhinjam y Thiruvanantha, India, Jacob et al. (2009) estimaron la SGD en términos de flujo, utilizando mediciones de  $^{222}\text{Rn}$ . Estos autores han desestimado del cálculo los términos de la ecuación que incluyen la difusión atmosférica y la mezcla de agua offshore. Los valores calculados por  $^{222}\text{Rn}$  fueron de  $10,9 \pm 6,1$  cm/d, los cuales se encuentran en el orden (10-100 cm/d) de los estimados por Burnett y Dulaiova (2003). En el estuario de Punnakayal, India, Selvam et al. (2021) calcularon descargas entre  $0,04$ - $0,12$  m<sup>3</sup> m<sup>2</sup> d<sup>-1</sup>. Estos autores comparan sus resultados con otros obtenidos en los estados de Maryland y Virginia (USA) donde Charette y Buesseler (2004) estimaron una descarga entre  $1$ - $106$  m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>, mientras que, en Tampa Bay, Florida, Swarzenski et al. (2007) obtuvieron datos con rangos entre  $1,6$ - $10,3$  m<sup>3</sup> m<sup>-1</sup>d<sup>-1</sup>. En Corea (Yeongil Bay) estos valores oscilan entre  $6$ - $106$  m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup> (Kim et al., 2008). En otro sector de la costa de India (Coleroon Estuary) flujos de  $8,94$ - $12,12$  m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup> fueron obtenidos por Prakash et al. (2018)

Existe una notable preocupación en la región costera bonaerense sobre la disminución de las reservas debido a la sobreexplotación e intrusión marina. Para poder entender la interacción agua superficial / agua subterránea en la barrera medanosa resultó de interés utilizar un enfoque que incluyó mediciones de la SGD directas e indirectas. Ambos métodos, flujo de Darcy y  $^{222}\text{Rn}$  sugieren que existe un movimiento del agua subterránea a través de los sedimentos del cordón costero hacia la interfase marina. Esta salida de agua desde el acuífero hacia el mar no parece ser homogénea a lo largo del área de estudio. Es espacialmente variable con extensas áreas de descarga intercaladas con pequeños sectores afectados por intrusión marina ubicados en los ejidos urbanos. Se conoce la presencia de este fenómeno por estudios realizados en la región (Carretero et al., 2013; Perdomo et al., 2013) y se

esperaba que la señal del  $^{222}\text{Rn}$  pudiera detectar estos patrones y se observaran áreas con baja concentración cercana a las zonas de intrusión marina. Si este fuera el caso hubiera sido un aporte para la hipótesis que el  $^{222}\text{Rn}$  puede ser utilizado como una herramienta de mapeo rápido para detectar este fenómeno. Sin embargo, debido a la mezcla de las aguas superficiales la señal se diluye a la distancia donde se realizaron las mediciones (300-500 m de la orilla) y no se ha observado una correlación entre la actividad del  $^{222}\text{Rn}$  y la salinidad del agua subterránea.

Debido a la potencial variabilidad en el flujo del agua subterránea, incertidumbre en el tiempo de residencia, en los valores extremos, y la recirculación de agua de mar, la SGD calculada por la ley de Darcy y  $^{222}\text{Rn}$  difiere en un orden de magnitud en el PDLC, lo cual es muy probable que se deba al aporte de sedimentos del Río de la Plata.

Aunque es particularmente difícil estimar el intercambio de  $^{222}\text{Rn}$  al mar en un ambiente abierto, la metodología sería útil para confirmar la presencia y localización de la SGD en vez de cuantificarla. Pero en el caso del área de Pinamar, no se manifiesta un aporte desde el río y los resultados son coherentes por ambas técnicas, siendo la cantidad de sedimentos en suspensión, la única variable que difiere en ambos estudios.

Cuando se obtuvieron los primeros datos en 2016 para el PDLC, se supuso que el método del  $^{222}\text{Rn}$  era potencialmente más interesante como herramienta de mapeo en tiempo real que de cuantificación, dada las diferencias numéricas encontradas. Y que la información de las redes de monitoreo era la que aportaba los datos necesarios para poder calcular valores de descarga. Sin embargo, este panorama cambió al realizar los estudios en Pinamar y obtener un buen grado de correlación entre ambos métodos. De todas maneras, como se ha expuesto en los datos de estudios internacionales, las técnicas utilizadas para el cálculo de la SGD muestran una variedad de resultados donde en ocasiones se obtienen valores que difieren en órdenes de magnitud entre las metodologías aplicadas sin que por ello el aporte sea desestimado.

## CONCLUSIONES

La SGD en el área de estudio ha sido cuantificada mediante dos técnicas, el cálculo mediante parámetros hidrodinámicos y el balance de masas 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 sedi-

mentos 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.

Como se ha mencionado, no existen muchos estudios en el país donde se estime la SGD aplicando la combinación de estas metodologías, incluso sólo el uso del trazador, por lo tanto, este trabajo es una contribución importante para comprender la hidrodinámica de la región.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las autoridades y personal de la Cooperativa de Obras y Servicios de San Clemente del Tuyú (COS), Cooperativa Cosyc Las Toninas y Cooperativa de Obras y Servicios Públicos de Santa Teresita, por la colaboración brindada durante las tareas de campo y el desarrollo del estudio, así como a la Municipalidad de Pinamar. Este trabajo fue financiado por el Proyecto de Investigación CONICET PIP 0403, 2013–2015, Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica PICT 2013-2117, 2014-2017 y Proyectos Promocionales de Investigación y Desarrollo, PPID N021 de la UNLP.

## REFERENCIAS

- Andrade, C.F.F. 2010. *Conexões e interações entre a água superficial e subterrânea aregiãocosteira do extremo sul do Brasil*. Tese de doutorado. Insituto de Oceanografia. Rio Grande, Universidade Federal do Rio Grande.
- Barlow, P.M. and Reichard, E.G. 2010. Saltwater intrusion in coastal regions of North America. *Hydrogeology Journal* 18 (1): 247-260.
- Burnett, W.C. and 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. and 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.
- Cable, J.E., Burnett, W.C., Chanton, J.P. and Weatherly, G.L. 1996. Estimating groundwater discharge into the northeastern Gulf of Mexico using radon-222. *Earth and Planetary Science Letters* 144 (3-4): 591-604.
- 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. Disponible en <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/4918>
- Carretero, S. and 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., Kruse, E. and Rojo, A. 2013. Condiciones hidrogeológicas en Las Toninas y Santa Teresita, Partido de La Costa. En González, N., Kruse, E., Trovatto, M.M. and Laurencena, P. (Eds.). *Temas actuales en hidrología subterránea*. La Plata, EDULP, 28-35.
- Carretero, S., Rapaglia, J., Perdomo, S., Albino Martínez, C., Rodrigues Capítulo, L., Gómez, L. and Kruse, E. 2019. A multi-parameter study of groundwater-seawater interactions along Partido de La Costa, Buenos Aires Province, Argentina. *Environmental Earth Sciences* 78: 1-14.
- Carretero, S., Rapaglia, J., Rodrigues Capítulo, L. and Kruse, E. 2021. Variability of  $^{222}\text{Rn}$  in the sandy aquifer of Buenos Aires coast. *Environmental Earth Sciences* 80: 1-14.
- Carretero, S., Rodrigues Capítulo, L., Dapeña, C., Fabiano, M. and Kruse, E. 2022a. A chemical and isotopic approach to investigate groundwater dynamics in a coastal aquifer. *Catena* 213: 106229. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106229>
- Carretero S., García Galluzzi A. and 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.
- Charette, M.A. and Buesseler, K.O. 2004. Submarine groundwater discharge of nutrients and copper to an urban subestuary of Chesapeake Bay (Elizabeth River). *Limnology and Oceanography* 49 (2): 376-385. <https://doi.org/10.4319/lo.2004.49.2.0376>
- da Rocha, C. M., Barboza, E. G. and Niencheski, L. F. H. 2018. Radon activity and submarine groundwater discharge in different geological regions of a coastal barrier in Southern Brazil. *Environmental Earth Sciences* 77: 1-14.
- Jacob, N., Babu, D. S. and Shivanna, K. 2009. Radon as an indicator of submarine groundwater discharge in coastal regions. *Current Science* 1313-1320.
- Kim, G., Jae, W.R. and Dong, W.H. 2008. Radium tracing of submarine groundwater discharge (SGD) and associated nutrient fluxes in a highly-permeable bed coastal zone, Korea. *Marine Chemistry* 109: 307-317. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2007.07.002>
- Montes, M. L., Carretero, S., García Galluzzi, A., Mercader, R.C., Kruse E. and Taylor M.A. 2022. Radiological baseline, mineralogy and Fe oxides of the eas-

- tern coast of the Province of Buenos Aires. *Environmental Earth Sciences* 81:519. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10623-2>
- Mulligan, A. and Charette, M.A. 2006. Intercomparison of submarine groundwater discharges estimates from an unconfined sandy coastal aquifer. *Journal of Hydrology* 327: 411-425.
- Perdomo S., Carretero S., Kruse E. y Ainchil J. 2013. Identificación de la intrusión salina en Santa Teresita (Buenos Aires), mediante la aplicación de métodos eléctricos. En González, N., Kruse, E., Trovatto, M.M. y Laurencena, P. (Eds.). *Temas actuales en hidrología subterránea*. La Plata, EDULP, 44-49.
- Povinec, P. P., Bokuniewicz, H., Burnett, W.C., Cable, J., Charette, M., Comanducci, J. F., Kontar, E.A., Moore, W.S., Oberdorfer, J.A., de Oliveira, J., Peterson, R., Stieglitz, T. and Taniguchi, M. 2008. Isotope tracing of submarine groundwater discharge offshore Ubatuba, Brazil: results of the IAEA–UNESCO SGD project. *Journal of Environmental Radioactivity* 99 (10): 1596-1610.
- Prakash, R., Srinivasamoorthy, K., Gopinath, S. and Saravanan, K. 2018. Measurement of submarine groundwater discharge using diverse methods in Coleroon Estuary, Tamil Nadu, India. *Applied Water Science* 8 (13). <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0659-0>
- Rapaglia, J., Grant, C., Bokuniewicz, H., Pick, T. and Scholten J. 2015. A GIS typology to locate sites of submarine groundwater discharge. *Journal of Environmental Radioactivity* 145: 10-18.
- Rodriguez Capítulo, L. 2015. *Evaluación geohidrológica en la región costera oriental de la provincia de Buenos Aires. Caso de estudio Pinamar*. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Naturales y Museo, La Plata, Argentina. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/49965>
- Rodriguez Capítulo, L.R. and Kruse, E.E. 2017. Relationship between geohydrology and Upper Pleistocene-Holocene evolution of the eastern region of the Province of Buenos Aires, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 76: 276-289.
- Rodriguez Capítulo, L., Carretero, S.C. and Kruse, E.E. 2018. Impact of afforestation on coastal aquifer recharge. Case study: eastern coast of the Province of Buenos Aires, Argentina. *Environmental Earth Sciences* 77:74. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7258-0>
- Sherif, M.M. and Singh, V.P. 1999. Effect of climate change on sea water intrusion in coastal aquifers. *Hydrological Process* 13 (8): 1277-1287.
- Selvam, S., Muthukumar, P., Sajeev, S., Venkatramanan, S., Chung, S. Y., Brindha, K., Suresh Babu, D.S. and Murugan, R. 2021. Quantification of submarine groundwater discharge (SGD) using radon, radium tracers and nutrient inputs in Punnakayal, south coast of India. *Geoscience Frontiers* 12 (1): 29-38.
- Stieglitz, T. 2005. Submarine groundwater discharge into the near-shore zone of the Great Barrier Reef, Australia. *Marine Pollution Bulletin* 51 (1-4): 51.
- Stieglitz T.C., Cook P.G. and Burnett W.C. 2010. Inferring coastal processes from regional-scale mapping of 222 radon and salinity: examples from the Great Barrier Reef, Australia. *Journal of Environmental Radioactivity* 101 (7): 544-552.



- Swarzenski, P.W., Reich, C.D., Spechler, R.M., Kindinger, J.L. and Moore, W.S. 2007. Using multiple geochemical tracers to characterize the hydrogeology of the submarine spring off Crescent Beach, Florida. *Chemical Geology* 179: 187-202.
- Torres, A. I., Andrade, C. F., Moore, W. S., Faleschini, M., Esteves, J. L., Niencheski, L. F., and Depetris, P. J. 2018. Ra and Rn isotopes as natural tracers of submarine groundwater discharge in the patagonian coastal zone (Argentina): an initial assessment. *Environmental Earth Sciences* 77: 1-10.
- Werner, A.D. and Simmons, C.T. 2009. Impact of sea-level rise on sea water intrusion in coastal aquifers. *Groundwater* 47 (2): 197-204.