

Hidrogeología de las barreras medanosas de la Provincia de Buenos Aires:

vulnerabilidad al aumento del nivel del mar

Federico I. ISLA ¹, Leonardo SÁNCHEZ CARO ², Silvina CARRETERO ², Leandro RODRÍGUES CAPÍTULO ²

1. Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario (CIC-UNMDP), Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (CONICET-UNMDP), fisla@mdp.edu.ar
2. Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE-UNLP), Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata (UNLP), calle 64 n 3, 1900 La Plata, Argentina Leonardo.sanchezcaro@gmail.com, scarretero@fcnym.unlp.edu.ar, leandrorodriguescapitulo@gmail.com

RESUMEN

Las barreras medanosas de Buenos Aires han tenido un desarrollo urbano explosivo una vez que las dunas fijas fueron convertidas en dunas forestadas desde 1931. Las urbanizaciones balnearias originales de Villa Gesell, Pinamar y Partido de La Costa están siendo imitadas por municipios en los que la disponibilidad del recurso es limitada y los condicionamientos geomorfológicos diferentes. Algunos acuíferos han sido explotados con diferentes resultados. Se presentan las experiencias bien conocidas de la Barrera Medanosa Oriental (BMO) y se informan algunas diferencias reconocidas en la Barrera Medanosa Austral (BMA). La barrera medanosa de Patagones (BMP) es solo mencionada ya que no se conoce explotación significativa. La interfase entre el agua salada y dulce es oblicua en la BMO y se trasladará hacia el continente con el avance del mar. En cambio, la interfase de la BMA es horizontal y condicionada por la naturaleza salina de las rocas que la infrayacen. De acuerdo a las tendencias en los cambios de uso del suelo (crecimiento urbano) se pronostican los efectos del aumento previsto del nivel del mar.

Palabras clave: barreras medanosas, hidrogeología, interfase agua dulce-agua salada

ABSTRACT

Hydrogeology of the dune barriers of Buenos Aires: vulnerability to sea level rise.

The sandy barriers of Buenos Aires have had an explosive urban growth once the dunes were afforested since 1931. The original bathing villages of Villa Gesell, Pinamar and Partido de La Costa are today being copied by counties where the water resources are limited and the Geomorphology conditions different. Several aquifers have been exploited with different successes. The well-known documented experiences from the Eastern Sandy Barrier (BMO) are considered, while some different experiences from the Southern Barrier (BMA) are also reported. The Patagones Barrier (BMP) is only mentioned that there is no significant exploitation known. The interface between the marine salt water and the fresh water is oblique at the BMO and is expected to migrate with the sea level rise. Instead, the interface between salt and fresh water is horizontal and conditioned to the nature of the rocks beneath. According to these trends in the land-use changes (urban sprawl), the effects of the sea-level rise are forecasted.

Keywords: dune barriers, hydrogeology, interface freshwater – salt water

INTRODUCCIÓN

Los acuíferos costeros suelen ser de magnitud reducida. Sin embargo, pueden adquirir una gran relevancia para cubrir necesidades humanas, desde el abastecimiento de ciudades hasta la irrigación de cultivos (Custodio 2010). En Sudamérica, los acuíferos costeros más importantes son del Cuaternario. Las barreras medanosas se desarrollan de manera continua y discontinuas en otras, a lo largo de la costa este del continente americano (Rebouças, 1999). Los principales reservorios costeros de agua subterránea están alojados en dunas costeras o depósitos de playa (Bocanegra et al. 2010). De acuerdo a estos autores los problemas más graves se manifiestan en acuíferos localizados en áreas densamente pobladas con sistemas de barreras y lagunas del sudeste de Brasil extendiéndose hacia el noreste de Uruguay (Almagro y Custodio 2004). Además, son áreas vulnerables ante el cambio climático y ascenso del nivel del mar (Carretero et al. 2013a, Koerth et al. 2014).

En una revisión reciente sobre las reservas dunícolas en barreras medanosas se puntualizó la importancia de los recursos hidrogeológicos para el desarrollo de villas balnearias orientadas al turismo de Sol y Playa (Isla et al. 2022). En las barreras medanosas de la Provincia de Buenos Aires, el abastecimiento de agua a las localidades ha sido un problema complejo (Rodríguez Capítulo et al. 2017) que se incrementará debido al ascenso del nivel del mar de acuerdo a las previsiones del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (Cozzolino et al. 2017, Oppenheimer et al. 2019). La economía de las localidades balnearias bonaerenses se encuentra fuertemente ligada al turismo; y éste, a su vez, se encuentra condicionado a la disponibilidad de agua para consumo y uso recreativo. Sin el recurso hídrico, actividades como piscinas, campos de golf, parques acuáticos, jardines, o complejos deportivos serían inviables (Gössling et al. 2006). Estudios en la costa del Mediterráneo muestran que no son los grandes hoteles los más altos consumidores de agua, sino los campos de golf, casas particulares, y complejos con jardines y piscinas (Rico-Amorosa et al. 2009). El riego de jardines es la causa del mayor consumo (70%) del agua calculada como de uso recreativo en esta región de Europa (Hofa y Schmitt 2011).

El origen de las barreras medanosas de la Provincia de Buenos Aires se vincula al nivel máximo del mar alcanzado durante el Holoceno medio, que depositó abundante sedimento litoral que luego migró hacia el interior (Isla 1997, 1998, 2010). La Barrera Medanosa Oriental (BMO) se extiende desde Punta Rasa hasta el sur del Partido de Mar Chiquita (Fig. 1), su ancho es de apenas 1,2 km en San Clemente, y llega a 3 km en el tramo de Pinamar y Villa Gesell. La

Barrera Medanosa Austral (BMA) se extiende de Miramar hasta el Partido de Coronel Rosales y llega también a anchos máximos de 3 km. Por último, la Barrera Medanosa de Patagones (BMP) es continua desde San Blas a la desembocadura del Río Negro (Cortizo e Isla 2012). No se conoce su explotación en la villa Siete de Marzo.

Se identificaron tres etapas de generación de médanos litorales: la primera fue constatada en la Barrera Austral, donde la presencia de playas de hace 6,000 años AP dio lugar a la formación de dunas que colmataron las secuencias estuáricas subyacentes; posteriormente se originó una segunda generación de médanos que sepultó depresiones intermedanosas formadas entre 3500 y 3000 años AP. La tercera generación de médanos costeros corresponde a los 1600-500 años AP y representa removilizaciones de arena que sepultaron marismas próximas a la costa y depresiones intermedanosas que están más desvinculadas de la costa y por lo tanto en una cota más alta (Isla et al. 2001). El desarrollo de estas barreras medanosas depende de la disponibilidad de material arenoso en las playas, pero además, de la pendiente original de las planicies en que se emplazan (Isla et al. 1996). Según perfiles desarrollados sobre ambas barreras, la BMO se desarrolló totalmente en relación a la fluctuación del nivel del mar del Holoceno, mientras que la BMA está montada sobre viejos acantilados y barreras medanosas del Pleistoceno (Fig. 2).

En la costa arenosa de la provincia de Buenos Aires la vegetación típica es de tipo pastizal, pero desde mediados del siglo XX existen sectores que han sido artificialmente forestados con coníferas y que constituyen un atractivo turístico (Rodríguez Capítulo 2015; Rodríguez Capítulo y Kruse 2011, Rodríguez Capítulo et al. 2018; Isla et al. 2022). Sin embargo, la implantación de especies arbóreas exóticas trajo consigo cambios en el ciclo hidrológico que afectaron la recarga de agua subterránea en los partidos de Pinamar y Villa Gesell (Bértola et al. 2002; Rodríguez Capítulo, 2015; Rodríguez Capítulo et al., 2018). Esta forestación artificial a su vez es condicionante del atractivo turístico (Van Berkel y Verburg 2012, Van Berkel et al 2014). En la costa mediterránea de Turquía o Italia, además del atractivo turístico, la forestación constituye una defensa contra la erosión de las dunas y la degradación de la cubierta vegetal trae consecuencias negativas tanto ambientales como económicas (Kuvan 2005, Cozzolino et al. 2017).

El presente trabajo apunta a evaluar de manera integrada las particularidades hidrogeológicas de las barreras medanosas de la Provincia de Buenos Aires. La disponibilidad de abastecimiento de agua dulce está condicionada a las características del sustrato y su evolución con relación a las fluctuaciones del nivel del mar la sobre explotación en algunas villas balnearias. Se proponen

pautas de manejo del recurso hídrico tendientes a anticipar posibles problemas derivados del aumento previsto del nivel del mar y la erosión costera. Este tipo de contribuciones representan una síntesis que puede resultar de suma utilidad para los tomadores de decisiones. Actualmente, distintos municipios costeros están ampliando áreas residenciales sin efectuar evaluaciones previas de disponibilidad o pautas integradas de manejo del recurso.

METODOLOGÍA

El presente trabajo se basó en la revisión de antecedentes sobre la evolución cuaternaria y la hidrogeología de las barreras medanosas bonaerenses (CFI 1989 a y b, 1990 a y b), considerando además antecedentes internacionales. Se realizó una evaluación de los principales problemas de cada tramo de costa. En base a esto, se logró un diagnóstico general sobre el estado de las diferentes zonas comprendidas en la costa arenosa de la Provincia Buenos Aires desde un punto de vista hidrogeológico. Se plantean líneas de manejo en un contexto de aumento de nivel del mar debido al cambio climático y del crecimiento demográfico y urbanístico de las localidades emplazadas en esas barreras medanosas (Bocanegra et al. 2013, Oppenheimer et al. 2019).

MARCO GEOLOGICO

Barreras medanosas de Buenos Aires

a. La Barrera Medanosa Oriental

A partir de las perforaciones realizadas en diferentes sectores de la Barrera Oriental se ha propuesto un esquema estratigráfico (Parker y Violante 1989) asociado a procesos transgresivos y regresivos que se caracterizan por una sedimentación con fuertes variaciones laterales tanto en espesores como en su composición litológica (Fig. 3).

El sustrato está conformado por limos arcillosos con intercalaciones carbonáticas e interdigitaciones de lentes o mantos de arena muy fina del Pleistoceno Superior. Los sedimentos

del Holoceno temprano, incluyen arenas medianas relacionadas a barreras transgresivas y arcillas grises con intercalaciones arenosas formadas en un ambiente de baja energía. Finalmente, el Holoceno tardío está representado por arenas finas de origen eólico que conformaron las barreras.

Este esquema geológico fue reinterpretado según un criterio hidrogeológico, para definir 5 hidrofacies para el Partido de Pinamar (Rodríguez Capítulo 2015, Rodríguez Capítulo y Kruse 2018). La hidrofacies A (arena fina con conchilla) es acuífera, contiene a la zona no saturada y a la capa freática. Sus espesores oscilan entre los 2 y los 15 m. Los valores de T y K promedio son de 174 m²/d y 20 m/d respectivamente, mientras que el almacenamiento (S) es de 0.10. La hidrofacies B (arcilla gris con intercalaciones arenosas y horizontes orgánicos) es un nivel acuitado entre la hidrofacies A y C, con espesores máximos de 12 m. Los valores de T' y K' son de 1x10⁻⁴ m/d, 1x10⁻⁵ d⁻¹ en cada caso. La hidrofacies C (arenas medias) representa un nivel acuífero con espesores que alcanzan los 12 m en el sector central de la barrera. Los rangos de transmisividad van de los 45 a los 70 m²/d y de permeabilidad de 10 a 20 m/d, mientras que el de almacenamiento es de 1x10^{-3/4}. La hidrofacies D (limos arcillosos con intercalaciones carbonáticas) es acuitado y se ubica entre las hidrofacies C y E, con espesores máximos de 40 m y con valores de T' y K' de 1x10^{-2/3} m/d, y 1x10^{-3/4} d⁻¹, respectivamente. Por último, la hidrofacies E (lentes arenosas muy finas) es una unidad acuífera incluida en forma de lentes de hasta 20 m de espesor dentro de la hidrofacies D. Los valores de T y K oscilan entre 15 y 150 m²/d, y entre 4 y 40 m/d, respectivamente, mientras que el almacenamiento se encuentra en el rango de 1x10^{-3/4}. Una característica importante del sistema hidrogeológico en este sector de la barrera oriental es la continuidad hidráulica y la conexión variable entre los niveles acuíferos A, C y E, en función de la presencia y variaciones en el espesor de los niveles acuitados. Estos niveles acuíferos son explotados de forma simultánea constituyendo un sistema hidráulico interconectado cuyo espesor útil alcanza al menos los 45 m.

Al aplicar este esquema de hidrofacies al Partido de La Costa (sector norte de la Barrera Medanosas Oriental) pueden establecerse diferencias en los grados de expresión y desarrollo de los tipos litológicos presentes (Rodríguez Capítulo et al. 2017). Estas diferencias indican la presencia de dos sistemas hidrogeológicos desarrollados sobre la misma barrera, pero con algunos aspectos diferentes en cuanto al funcionamiento hidrogeológico. En este sector, el nivel acuífero que abastece a la población se encuentra restringido exclusivamente a las hidrofacies A y C, cuya potencia en forma conjunta raramente supera los 12 m. El basamento hidrogeológico está constituido por un paquete arcilloso (hidrofacies D) que separa al agua dulce de las aguas salobres contenidas en el sistema acuífero profundo.

A lo largo de toda la barrera, la recarga natural del acuífero freático es de índole local y directa a partir de la infiltración de los excesos de la precipitación. La oscilación de los niveles a lo largo del año responde a la distribución de los excesos del balance hídrico, los cuales se manifiestan a partir de un ascenso generalizado de los niveles durante los meses más fríos y un descenso durante los más calurosos. La recarga de las unidades acuíferas más profundas presentes en el sector sur, se produce por filtración vertical en forma indirecta desde el acuífero freático, como sugieren las diferencias de carga hidráulica en los distintos niveles acuíferos.

Esta barrera está condicionada lateralmente con relación a la interfase con agua salada marina hacia el este. Por el oeste, está condicionada con una interfase salada en los tramos septentrionales (San Clemente del Tuyú, Partido de la Costa) mientras que más al sur con niveles salobres correspondientes a marismas menos salinas (Pinamar; Fig. 4).

b. La Barrera Medanososa Austral

Esta barrera medanosa está montada sobre antiguos acantilados (Isla et al. 1996). Es menos conocida ya que las localidades más importantes del sector (Miramar, Necochea) no se abastecen de sectores ni niveles arenosos. Las reservas como lentes de agua dulce en ella dependen de la altura de las dunas, el espesor de los sedimentos medanosos y el tipo de roca en su base (Fig. 5).

En varias localidades de la Pampa Interserrana (Miramar, Necochea, Tres Arroyos) se lograron perforaciones de más de 200 m que caracterizaron los acuíferos principales (Sala y Cavalie 1974). En Miramar el abastecimiento se localiza en el acuífero denominado Pampeano (Vizcaíno et al. 1995) que puede adquirir 100 m de espesor. El pozo del Arroyo El Durazno reconoce arenas pliocenas por encima de las cuarcitas de la Formación Balcarce (Isla et al. 2015). En la costa de Lobería el acuífero costero no resulta de interés por ser de apenas 20 m (Quiroz Londoño et al. 2010).

Las localidades de Centinela del Mar, Balneario Orense y Claromecó están emplazadas sobre cordones medanosos colgados encima de depósitos de la transgresión del Pleistoceno Superior (Isla et al. 2000, 2010). En Dunamar (oeste de Claromecó), dado el sustrato marino de la transgresión Belgranense (Isla et al. 2000), las reservas están limitadas debido a estos niveles salinos (Césare 2016; fig. 6).

Hacia el oeste, las dunas de Monte Hermoso y Pehuen C6 también est1n montadas sobre antiguos sedimentos marinos como las formaciones Puerto Belgrano y Punta Tejada (Ruffo et al. 2021). En este acuífero freático se informaron coeficientes de almacenamiento de 0.2 y conductividades hidráulicas entre 2 y 9 m/día para un espesor ensayado de 20 m (Albouy et al. 2020). Conductividades eléctricas promedio de 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hacen estas aguas aptas para el consumo humano en estas localidades balnearias. No obstante, se recomienda evitar que las perforaciones lleguen a las formaciones infrayacentes donde hay incrementos en los valores de flúor y arsénico (Albouy et al. 2020). Esto coincide con los valores de arsénico informados para la desembocadura del arroyo Claromec6 (Peluso et al. 2011) y en Puerto Rosales (Caputo y Cal6 2005). De todos modos, los valores de arsénico en sedimentos son mayores que los evaluados en aguas superficiales (Robles et al. 2016)

c. La Barrera Medanosa de Patagones

Esta barrera de unos 4.5 km de ancho, no tiene prácticamente explotación hidrogeológica salvo la localidad balnearia de 7 de Marzo (antes La Baliza). Consiste en un campo de dunas mayormente parab6licos hacia el interior y barjanoides a transversales hacia sectores costeros con mayor abundancia de arena (Cortizo e Isla 2012)

RESULTADOS

Las condiciones particulares que caracterizaron la evoluci6n geol6gica de las barreras medanosas durante el Cuaternario generaron distintas configuraciones del subsuelo, que derivan en comportamientos hidrogeol6gicos característicos para cada zona, que adem1s evolucionaron de acuerdo a los efectos derivados de los cambios del nivel del mar. A su vez, este esquema natural es afectado de distinta forma y en diferente grado por la actividad antr6pica (regímenes de extracci6n, cambios en el uso y la cobertura del suelo, fuentes de contaminaci6n) en las diferentes localidades.

El consumo de agua

Las villas balnearias tienen un consumo estacional que se incrementa durante la temporada estival con actividades de sol y playa (enero-febrero; Fig. 7). En ciudades más grandes (Miramar, Pinamar, Villa Gesell) estas diferencias estacionales son menos marcadas. Los barrios que crecieron recientemente con planes habitacionales (ProCrear) no han tenido planificación y poseen pozos domiciliarios cuyo impacto no fue previsto (Isla et al. 2018).

Desde un punto de vista hidrológico, los usos del suelo pueden ser categorizados como forestal, urbano y médanos con escasa o nula vegetación (suelo desnudo). Estos usos de suelo condicionan los ritmos de infiltración: la demanda de los árboles es más constante que la demanda estival de los barrios de mayor demanda turística. Las diferentes condiciones de infiltración resultantes de estos tipos de cobertura se reflejan en la configuración del flujo de la capa freática. El suelo desnudo muestra mayores excesos (470 mm/año) con respecto al suelo forestado (261 mm/año), debido a la mayor evapotranspiración vinculada a la cobertura arbórea. Este fenómeno es particularmente importante en algunos sectores de la barrera oriental como Pinamar o Villa Gesell, donde la superficie forestada es extensa. En el partido de Pinamar se estima una diferencia de 3 m en la profundidad del nivel freático entre sectores forestados y sin cubierta vegetal (Rodríguez Capítulo et al. 2018; Fig. 8). En la localidad de Mar de Las Pampas, Partido de Villa Gesell, la expansión de la forestación durante el período 1975-2014 ocasionó hasta un 26% de disminución de la recarga al acuífero freático (Sánchez-Caro et al. 2023). Costa Esmeralda fue planificada como un barrio cerrado del Partido de la Costa con provisión comunitaria a partir de 16 pozos distribuidos en el predio (Villalba 2022).

Desde un punto de vista hidroquímico, la recarga local y directa de las precipitaciones deriva en la presencia de aguas de baja salinidad en el acuífero freático, con un predominio del tipo bicarbonatado cálcico-sódico. En el sector norte de esta barrera medanosa, las aguas evolucionan en el sentido de flujo hacia el margen oeste (transición a la llanura deprimida) de aguas de tipo bicarbonatadas cálcico-sódicas hacia cloruradas sódicas. Se ha observado la presencia de una zonación química vertical que permite separar unidades con agua de baja conductividad eléctrica ($< 1200 \mu\text{S}/\text{cm}$) hasta los 5-7 m de profundidad, incrementándose por debajo hasta en un orden de magnitud ($12000 \mu\text{S}/\text{cm}$; Carretero et al. 2016, Carretero et al. 2022a). Este fenómeno no se observa en el sistema acuífero del sector sur, por lo cual el espesor de agua de buena calidad es mayor. En el Partido de Villa Gesell, las aguas son predominantemente bicarbonatadas cálcicas, aunque se observó un mayor contenido de cloruro en el sector costero, con mayores valores de conductividad eléctrica (Sánchez Caro et al. 2023). Los valores de nitrato resultaron aptos para el consumo humano según el límite establecido por el Código Alimentario Argentino (CAA 2007); sin embargo, se encontraron en varios sitios

concentraciones de nitrito por encima del límite para uso domiciliario. Esto debe tenerse en cuenta como posible condicionante de la calidad química del acuífero freático a futuro (Sánchez Caro et al. 2023). El mayor problema respecto de la calidad del agua se debe a los elevados contenidos naturales de Fe y Mn (Carretero et al. 2015, 2022b), problema común en las barreras medanosas del mundo, y cuyas concentraciones provienen de los sedimentos arenosos (barrera y duna) que componen al acuífero (Carretero et al. 2019, 2022c, Montes et al. 2023).

En la localidad de Pinamar la tomografía eléctrica cuyo inicio coincide con la Av. Costanera y culmina a escasos metros del mar (Fig. 9) indica que la ZNS presenta un espesor de 5 m. Las resistividades intermedias (20-150 Ω m) observadas hasta los 20 m de profundidad son atribuibles a arenas saturadas con agua de bajo contenido salino. El análisis de los valores relativamente más resistivos en el sector inferior izquierdo del perfil permite suponer la existencia de una zona de descarga o transferencia de agua dulce hacia el mar.

Existe una cuña salina de pendiente muy marcada en Villa Gesell centro, Villa Gesell Sur y Mar de Las Pampas de acuerdo sondeos eléctricos verticales, aunque en otros perfiles también transversales a la barrera esta interfase aguadulce-salada no es tan evidente (Toledo 2022). La localidad balnearia de Monte Hermoso posee unos 6500 habitantes estables que llegan a 70.000 durante la temporada de enero a febrero. Su abastecimiento depende de dos acuíferos; el inferior comprende la Formación Monte Hermoso (Mioceno superior-Plioceno inferior), una de las formaciones basales de la sucesión de limos arenosos pampeanos. El acuífero superior reúne a las formaciones Puerto Belgrano y Punta Tejada (Ruffo et al. 2021a) con algunos niveles de origen marino que condicionan los niveles de interés en profundidad (Fig. 10). Los análisis identificaron fuentes difusas, multipuntuales y puntuales de contaminación. El riesgo de contaminación de los acuíferos de abastecimiento está condicionado por la presencia de lagunas colgadas donde pueden aflorar niveles freáticos, por la carencia de cámaras sépticas domiciliarias y basurales sin membrana de aislamiento en zonas arenosas (Ruffo et al. 2021b).

En la localidad de Puerto Rosales se reconoció un acuífero profundo (800 a 1000 m de profundidad), surgente, con muy buen caudal de agua y alta temperatura (63 a 72 °C; Caputo y Caló 2005). Por arriba se ubicó otro acuífero entre 350 y 800 m de profundidad con aguas de muy mala calidad química (extremadamente saladas) y por lo tanto no aptas para explotación. Más arriba existe un tercer acuífero -entre 180 y 250 m de profundidad-, con aguas de regular calidad (2 a 5 gr de materia sólida por litro). Es surgente, termal (25 a 34 °C) y de buen caudal. En la parte más superficial se encuentra un cuarto acuífero surgente no potable. Se lo encuentra a partir de los 150 m de profundidad hacia arriba. En la barrera medanosa, a escasos 2-8 m

existe un acuífero de agua dulce pero que no es potable por poseer un exceso de fluoruros y arsénico. El escaso volumen lo hace inapropiado para una explotación industrial (Caputo y Caló 2005).

Sistema de abastecimiento de agua potable y de saneamiento

Muchas localidades del Partido de La Costa no poseen servicio de agua potable y la población se abastece mediante pozos domiciliarios individuales, sin tratamiento del agua. La información es saltuaria usualmente vinculada a estudios específicos. Un pequeño porcentaje de los habitantes de municipios urbanos cuenta con suministro de agua de red no obstante vivir en áreas urbanas medianosas: 75% en el Partido de la Costa, 33% en Pinamar, 13% en Villa Gesell, y 18% en Monte Hermoso, según datos de 2016 . En San Clemente del Tuyú la red alimenta principalmente la zona céntrica. La extracción del recurso se realiza a partir de un campo de bombeo situado hacia el sur fuera de la zona urbanizada, mediante sistemas de captaciones a 6 m de profundidad (Carretero et al. 2019). Se utilizan pozos tipo Well Point, y Ranney, en donde los caudales de extracción alcanzan los 13 m³/h y 7 m³/h, respectivamente (Fig. 11). Existe una planta potabilizadora donde se trata el agua extraída (abatimiento de Fe y Mn) para su distribución. Parte de las localidades de San Bernardo y Mar de Ajó son abastecidas por ABSA, cuyo campo de extracción se localiza al sur de esta última localidad. En el Partido de Pinamar, el sistema de abastecimiento consta de una red de pozos convencionales distribuidos en Pinamar, Ostende y Valeria del Mar, los cuales alimentan a una red unificada (Figura 12). Se diferencian dos tipos de captaciones, las primeras son destinadas al consumo humano y van desde los 20 a los 25 m extrayendo un caudal promedio de 12 a 18 m³/h. Las segundas poseen menos de 12 m de profundidad, extraen entre 2 y 4 m³/h y son destinadas principalmente al riego de parques y jardines y eventualmente para el consumo humano. La metodología empleada genera a nivel local conos o áreas de abatimiento que se reconocen en las fluctuaciones de los niveles freáticos y en la evolución de los mapas del flujo subterráneo. En el Partido de Villa Gesell sólo parte de la zona urbanizada posee red de agua potable abastecida por Obras Sanitarias Villa Gesell. En las localidades del sur la explotación de agua subterránea ha sido mediante pozos particulares. Actualmente se encuentra en marcha el proyecto de expansión de la red a las localidades del sur. Este sector será abastecido por una serie de perforaciones de relativamente poca profundidad (25 a 30 m bajo nivel del terreno; mbnt), alineadas de forma paralela a la costa y ubicadas a más de 1 km de la misma.

El abastecimiento de la Barrera Austral depende de los sedimentos que las infrayacen. En los partidos de General Alvarado, Lobería, Necochea y San Cayetano existen espesores de

sedimentos pampeanos que pueden abastecer las localidades costeras (Vizcaíno et al. 1995). En cambio, en el litoral de Tres Arroyos y en Monte Hermoso por debajo de la barrea medanosa existen sedimentos de origen marino y por lo tanto las capas productoras de agua dulce se limitan a los espesores de las arenas eólicas (Cesare 2016, Albouy et al. 2020, Ruffo et al. 2021).

Aumento del nivel del mar e intrusión salina

Los acuíferos costeros han sido particularmente vulnerables al aumento del nivel del mar en áreas bajas de acuerdo al IPCC (Magnan et al. 2019). Esto es un problema crucial para el caso de islas oceánicas con subsidencia tectónica como Kiribati u otras del Océano Pacífico (Webb y Kench 2010, Cauchi et al. 2021) pero también para la costa de Buenos Aires (Chidichimo et al. 2022, Isla et al. 2022). A esto deben sumarse recientes informes sobre la aceleración del nivel del mar (Church y White 2006) aunque estos deben evitar los sesgos regionales y los inducidos por los aumentos anómalos relacionados a eventos ENSO fuertes (White et al. 2014). Por otro lado, en las zonas costeras el 60% de la subsidencia es provocado por extracciones de agua subterránea (Bagheri-Gavkosh et al. 2021). El problema ha obligado a tratados internacionales (acuerdo de Paris) específicos sobre el tema (Sadai et al. 2022).

En la costa de Charleston, Carolina del Sur, la interfase agua dulce-agua salada ha migrado hacia el interior unos 4 km desde 1950 (Kana et al. 1984). Para el delta del Nilo, de acuerdo a los escenarios extremos del IPCC (RCP2.6 y RCP8.5) en el año 2100 la intrusión salina en aguas subterráneas será entre 43 y 57 km hacia el interior (Wassef y Schüttrumpf 2016). Estas intrusiones por avance del nivel del mar serían mayores en caso de costas con subsidencia como el Wadden Sea (Pauw et al. 2012). No obstante, existen simulaciones como en la marisma de Elbe-Wesser (Alemania) en las que la intrusión salina es estimada como mínima (González et al. 2021). Lamentablemente, los impactos del aumento del nivel del mar no siempre son considerados en la hidrogeología urbana y sus efectos en las infraestructuras (Bossierelle et al. 2022).

Otro problema que cobra cada vez mayor importancia en la zona costera es la de los procesos puntuales de salinización de aguas (intrusión salina) por efecto de una explotación intensiva. En el sector norte de la Barrera Oriental (Santa Teresita, Partido de La Costa), se ha detectado un proceso de salinización en pozos próximos a la costa, donde valores de conductividad eléctrica de 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en 1987, superaron 12000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en 2012, y alcanzaron los 30000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en

2016 (Carretero et al. 2019, 2022 a). El sector afectado por intrusión salina abarca el 33% del frente costero de la localidad. La profundización del nivel freático y la consecuente salinización en sectores próximos a la costa se relaciona con una mayor cantidad de habitantes que deriva en una mayor extracción del agua subterránea para consumo (Carretero et al. 2013b; Perdomo et al. 2013). En el Partido de Pinamar (Pinamar, Valeria del Mar y Cariló) la extracción intensiva del recurso hídrico subterráneo genera un avance del frente salino, que se manifiesta a través de un salto abrupto de los valores de conductividad eléctrica (desde 750 a mayores de 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en pozos situados cerca de la línea de costa (Rodríguez Capítulo 2015). En el Partido de Villa Gesell, Hurtado et al. (1987) definieron la presencia del contacto agua dulce-agua salada en las playas de la zona céntrica de Villa Gesell; de acuerdo a sondeos eléctricos verticales (SEV). Estos sondeos se han replanteado con mayor detalle con posterioridad definiendo la profundidad de la base del acuífero de baja resistividad en 85 a 92 m (Toledo 2022).

Si bien se han efectuado evaluaciones de tendencias de aumento del nivel del mar en la costa de Buenos Aires (Lanfredi et al. 1988, Chidichimo et al. 2022) las proyecciones más modernas se basan en modelos físicos basados en los ritmos de derretimiento de los glaciares (Fig. 13; Oppenheimer et al. 2019). Carretero et al. (2013b) modelaron el desplazamiento de la interfase agua dulce-agua salada bajo condiciones de flujo constante (de descarga hacia el mar) y de nivel freático constante, en el Partido de La Costa. En el segundo caso obtuvieron las mayores intrusiones con hasta 211 m de desplazamiento de la interfase hacia el continente. Queda claro que los problemas de intrusión marina por sobrebombeo se verían agravados a consecuencia del incremento del nivel del mar y desplazamiento de la cuña salina hacia el continente (Fig. 13).

DISCUSIÓN

La BMO creció adosada a una planicie de suave pendiente. Por lo tanto, el aumento del nivel del mar significará problemas de intrusión marina. Los problemas serán mayores en donde la barrera es más angosta (Partido de la Costa, Mar Chiquita) que en los sectores de mayor ancho (Pinamar, Villa Gesell).

En cambio, la BMA está montada sobre viejos acantilados. En los sectores donde los sedimentos infrayacentes poseen niveles de caudal y calidad de aguas (Mar del Plata, Miramar, Necochea) el cambio climático incidirá menos. En las localidades que dependen de las barreras medanosas (Claromecó, Dunamar, Monte Hermoso, Pehuen Co) el abastecimiento está limitado

al espesor de las arenas y su relación con los niveles salinos que las infrayacen. No serían afectadas por el aumento del nivel del mar.

Relación entre geología de las barreras y factores socioeconómicos

Existe una serie de relaciones entre la evolución geomorfológica regional de las barreras y la distribución de los recursos hídricos subterráneos; éstos últimos constituyen un factor condicionante del crecimiento y desarrollo vinculado al sector turístico e inmobiliario. El crecimiento poblacional es un indicador común del desarrollo socioeconómico en las localidades balnearias. A su vez, se reconoce una similitud en los sistemas acuíferos de la BMO, ya que comparten una historia geológica similar. Ciertas características son también compartidas con la BMA. La evolución geomorfológica condiciona la distribución de los sedimentos que son portadores de la única fuente disponible de agua en cada sector.

Dentro de la BMO, existen diferencias entre el sector norte y el sector sur que influyen en el desarrollo de las actividades socioeconómicas (Carretero et al. 2021). El sector norte se caracteriza por una menor densidad poblacional. En la época turística la concentración de población alcanza a 10.000 habitantes/km². Los emprendimientos urbanísticos están restringidos debido a que el recurso de agua dulce disponible es de menor magnitud y está destinado, mayormente, al abastecimiento a la población, no dejando margen para la generación de lagunas, riego o lavaderos de autos. Además, existe una escasa cobertura en la distribución de agua potable con localidades que se abastecen de agua salada (Santa Teresita). Las unidades hidrogeológicas tienen prácticamente la mitad del espesor que, en el sector sur, y se registra una zonación química vertical que disminuye la disponibilidad del reservorio de agua dulce.

Por otro lado, el sector sur donde la barrera alcanza 3 km de ancho (partidos de Pinamar y Villa Gesell), se caracteriza por una mayor densidad poblacional, reconociéndose un progreso más acelerado. En los meses de verano se estima una concentración de población de 15.500 habitantes/ km². Estas urbanizaciones poseen usos de suelo que implican un mayor consumo de agua (lavaderos de autos, campos de golf, spas, jardines y canchas de polo). En el sector sur de Pinamar, el perfil hidrogeológico con disponibilidad de agua dulce alcanza 50 m de profundidad y representa a dos eventos transgresivos regresivos ocurridos durante el Pleistoceno tardío y el Holoceno. Como consecuencia de la potencia de los depósitos arenosos (capas acuíferas), adquieren una mayor importancia las reservas de agua dulce disponibles. Las dunas naturales fueron modificadas por forestación, lo que se traduce en una modificación del balance

hidrológico natural resultando que los excesos se reducen casi a la mitad en zonas forestadas respecto de un suelo arenoso desnudo (Rodríguez Capítulo 2015). La existencia de los bosques de coníferas se sostiene debido a la presencia de mayores reservas de agua. El servicio de abastecimiento de agua potable presenta una mayor cobertura. En estos sectores los valores de evapotranspiración requieren estimaciones estacionales que necesitan ser validadas (balances hídricos).

Manejo del recurso

Tradicionalmente, la explotación de aguas subterráneas en las barreras medanosas de la Provincia de Buenos Aires ha sido un proceso caótico. La falta de estudios antecedentes como punto de partida es una falencia que se ha intentado cubrir en los últimos años (Carretero 2011, Rodríguez Capítulo 2015, Gómez 2021). Por ejemplo, en el Partido de La Costa, el primer estudio data de fines de 1970 (Sala et al. 1976) y se llevó a cabo en San Clemente del Tuyú para conocer el sistema en donde se instalaría la planta de explotación de agua. Posteriormente, el CFI (1989a, 1989b, 1990a, 1990b) realizó un estudio integral del partido, con datos tomados entre 1986 y 1987. La caracterización geomorfológica abarcó hasta Mar Chiquita, pero los hidrogeológicos sólo llegaron al sector norte de la BMO. La mención de estos antecedentes cobra importancia porque demuestra que el uso y explotación del recurso hídrico se ha realizado sin conocimiento del sistema en la mayoría de los casos, llevado a cabo tanto por cooperativas como por los mismos municipios. Es importante la interrelación entre los progresos académicos y la gestión. En las localidades mencionadas se ha conseguido implementar canales de comunicación con el objetivo de conducir a la región a realizar un uso sustentable del recurso.

Como ya se mencionó, las ciudades grandes de la Barrera Austral (Miramar, Necochea) no se abastecen de zonas medanosas sino del acuífero pampeano que las infrayacen. Las nuevas villas balnearias (Arenas Verdes, Bahía Los Moros, Balneario San Cayetano, Balneario Orense, Dunamar, Balneario Reta, Marisol), Pehuen C6) deben necesariamente orientar su abastecimiento a los espesores de médanos evitando los sedimentos salinos infrayacentes.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. La evolución geomorfológica de las barreras medanosas es un condicionante significativo para la disponibilidad de agua dulce para uso humano en la costa arenosa

de la provincia de Buenos Aires. En el sector sur de la barrera oriental el agua subterránea explotable se asocia a la evolución geomorfológica del Holoceno y Pleistoceno superior que generó 3 unidades acuíferas interrelacionadas, constituyendo un sistema cuyo espesor útil alcanza al menos 45 m. En cambio, el sector norte se restringe a dos unidades acuíferas Holocenas, cuyo espesor es del orden de 12 m.

2. La barrera austral presenta sistemas acuíferos más acotados, dado que las barreras medanosas son de menor espesor porque se ubican sobre antiguos acantilados. Los depósitos eólicos sobre los cuáles se emplazan las localidades balnearias presentan buenas propiedades hidráulicas y constituyen excelentes acuíferos. Sin embargo, los sedimentos subyacentes, de origen variable, pueden constituir o no niveles explotables más profundos, ligados a diferentes controles litogénicos en la calidad química de las aguas subterráneas.
3. El aumento del nivel del mar provocará mayor salinización en la barrera medanosa oriental en virtud de que el agua salada afectará con mayor facilidad los sedimentos arenosos. En algunas zonas la erosión costera inducida por actividades humanas aumentaría el desplazamiento aún mayor de la interfase agua dulce-agua salada hacia el continente.
4. En cambio, en la Barrera Medanosa Austral la intrusión marina será menor condicionada por la resistencia a la intrusión salina de las rocas que componen el acantilado, y resguardados por la cota topográfica a la cual se emplazan los sistemas de dunas eólicas del Holoceno (dunas en el tope de acantilados). El riesgo de los acuíferos más profundos del sector radica en los valores de arsénico y flúor.
5. La presencia de bosques implantados de coníferas es considerada una ventaja como oferta turística en la zona sur de la Barrera Oriental y parte de la Barrera Austral. Sin embargo, estas forestaciones representan una importante demanda hídrica sobre sistemas acuíferos de extensión limitada.
6. Se recomienda tener en cuenta las características geomorfológicas y geohidrológicas a la hora de planificar el uso del recurso. Como se ha expuesto, las barreras medanosas presentan diferencias que condicionan la extracción del agua subterránea. Futuros emprendimientos inmobiliarios y tomadores de decisiones pueden considerarlos ambientes semejantes por lo tanto con recursos similares. La presente compilación es guía para llevar a cabo el uso sostenible del recurso hídrico subterráneo, que en la mayoría de los casos, es la única fuente de abastecimiento a residentes y turistas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a todos los colegas que participaron en las tareas de campo así como a las autoridades municipales y cooperativas locales. El proyecto fue financiado como PIP 041 “Impactos de la reversión del nivel del mar en Buenos Aires, Argentina”. Pedro Garzo realizó algunas de las ilustraciones. Dos revisores y la Dra. Marcomini mejoraron el manuscrito original.

REFERENCIAS

Albouy, E.R., Ruffo, A.G., Giorgi, J.M. y Bastianelli, N. V. 2020. Agua subterránea en la franja medanosa austral del suroeste bonaerense, Argentina. Factores que condicionan su aptitud para consumo humano. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, número especial, 12-23.

Almagro, L. y Custodio, E. 2004. Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas de la Formación Chuy, en la franja costera del Este del Uruguay, fronteriza con Brasil. *Boletín Geológico y Minero* 115: 357–378.

Bagheri-Gavkosh, M., Hosseini, S. M., Ataie-Ashtiani. B. Sohani, Y., Ebrahimian, H., MOrovat, F. y Ashrafi, S. 2021. Land subsidence: A global challenge. *Science of the Total Environment* 778: 146193.

Bertola, G., Isla, F. Cortizo, L., Turno, H. y Farenga, M. 2002. Modelo sedimentario de la barrera medanosa al norte de Villa Gesell (Prov. de Buenos Aires) de aplicación hidrogeológica. *Revista AAS* 9(2): 109-126.

Bocanegra, E., Cardoso Da Silva Jr, G., Custodio, E., Manzano, M., y Montenegro, S. 2010. State of knowledge of coastal aquifer management in South America. *Hydrogeology Journal* 18(1):261-267. DOI: 10.1007/s10040-009-0520-5.

Bocanegra, E., Custodio, E., Manzano, M., Cardoso da Silva, G. y Montenegro, S. 2013. Gestión de acuíferos urbanos en zonas costeras: experiencias en Iberoamérica. *Temas actuales de la Hidrología subterránea* 2013, 15-22.

Bosserelle, A. L., Morgan, L. K. y Hughes, M. W. 2022. Groundwater rise and associated flooding in coastal settlements due to sea-level rise: A review of processes and methods. *Earth's Future*, 10, e2021EF002580. <https://doi.org/10.1029/2021EF002580>CÓDIGO

ALIMENTARIO ARGENTINO 2007. Artículo 982, Resolución 8/2007 y 196/2007. Modificación Ley 18.284. Decreto Reglamentario 2126, Capítulo XII: 1, Buenos Aires, Argentina.

Carretero, S. 2011. Comportamiento hidrológico de las dunas costeras en el sector nororiental de la provincia de Buenos Aires. Tesis inédita, UNLP, La Plata. Argentina: Facultad de Ciencias Naturales y Museo, 341 pp.

Carretero, S., Kruse, E. y Rojo, A. 2013a. Condiciones hidrogeológicas en Las Toninas y Santa Teresita, Partido de La Costa. En: N. González, E. Kruse, M.M. Trovatto y P. Laurencena (Editores). Temas actuales en hidrología subterránea 2013. ISBN 978-987-1985-03-6. La Plata, EDULP, 28-35.

Carretero, S., Rapaglia, J., Bokuniewicz, H. y Kruse, E. E., 2013b, Impact of sea-level rise on saltwater intrusion length into the coastal aquifer, Partido de La Costa, Argentina. *Continental Shelf Research* 61–62: 62-70.

Carretero S. y Kruse E. 2015. Iron and manganese content in groundwater on the northeastern coast of the Buenos Aires province, Argentina. *Environmental Earth Sciences* 73 (5): 1983-1995. DOI 10.1007/s12665-014-3546-5.

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, 93-100.

Carretero, S, Rapaglia, J., Perdomo, S., Martínez, C. A. Rodríguez Capítulo, Gómez, L., y Kruse, E., 2019. A multi-parameter study of groundwater–seawater interactions along Partido de La Costa, Buenos Aires Province, Argentina. *Environmental Earth Sciences* (2019) 78:513. Carretero S., Rodríguez Capítulo, L. y Kruse, E. 2019. 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. <https://doi.org/10.1144/qjegh2018-136>

Carretero S., Rodríguez Capítulo L. y Kruse E. 2021. Evolution of groundwater recharge as a result of forest development on the east coast of the province of Buenos Aires, Argentina. *Hydrogeology Journal*: 29(2): 783-797, doi 10.1007/s10040-020-02282-z

Carretero, S., Rodríguez Capítulo L. y Kruse E., 2022a. 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., Rodríguez Capítulo L., Dapeña C., Fabiano M. y Kruse E. 2022b. 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>.

Carretero S., García Galluzzi A. y Kruse E. 2022c. 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: 103692

Caputo, R. y Caló, J. 2005. Posibilidades de explotación del recurso hídrico subterráneo en las proximidades de Puerto Rosales, Partido de Coronel Rosales. Informe inédito, 11 pp.

Cauchi, J. P., Moncada, S., Bambrick, H., Correa-Vélez, I., 2021. Coping with environmental hazards and shocks in Kiribati: Experiences of climate change by atoll communities in the Equatorial Pacific. *Environmental Development* 37: 100549.

Cesare, A. 2016. Barrio Dunamar, Claromecó. Ampliación de información. Informe inédito, 35 pp.

CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES 1989a. Evaluación del Recurso Hídrico Subterráneo de la Región Costera Atlántica de la Provincia de Buenos Aires Regiones I y II Punta Rasa-Punta Médanos. Provincia de Buenos Aires Informe Final. Tomo II. Geología y Geomorfología. 192 p.

CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES 1989b. Evaluación del recurso hídrico subterráneo de la región costera atlántica; región I: Punta Rasa. Punta Médanos, provincia de Buenos Aires; Prospección geoelectrica en la costa Atlántica de la provincia de Buenos Aires entre Punta Rasa y Punta Médanos. 33 pp.

CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES 1990a. Evaluación del Recurso Hídrico Subterráneo de la Región Costera Atlántica de la Provincia de Buenos Aires Región I Punta Rasa-Punta Médanos. Informe Final Tomo IV Caracterización climática y Balance Hidrológico. 177 p.

CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES 1990b. Evaluación del Recurso Hídrico Subterráneo de la Región Costera Atlántica de la Provincia de Buenos Aires Región 1 Punta Rasa-Punta Médanos. Informe Final. Tomo I. Hidrología Subterránea. 177 pp.

Cortizo, L. C. e Isla, F. I. 2012. Dinámica de la barrera medanosa e islas de barrera de Patagones (Buenos Aires, Argentina). *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 19(1): 47-63.

Cozzolino, D., Greggio, N., Antonellini, M. y Giambastiani, B. M. S. 2017. Natural and anthropogenic factors affecting freshwater lenses in coastal dunes of the Adriatic coast. *Journal of Hydrology* 551: 804-818.

Custodio, E. 2010. Coastal aquifers of Europe: an overview. *Hydrogeological Journal* 18: 269-280.

Chidichimo, M.P., Martos, P., Allega, L., Berghoff, C., Bianchi, A.A., Cozzolino, E., Dogliotti, A.I., Dragani, W.C., Fenco, H., Fiore, M., Guerrero, R., Isla, F.I., Kahl, C.L., Luz Clara Tejedor, M., Maenza, R.A., Osiroff, A.P., Prario, B.E., Risaro, D.B., Saurral, R.I. y Scardilli, A.S. 2022. Sección 2. Cambios físicos y químicos en el Océano Atlántico Sudoccidental. En Buratti, C.C., Chidichimo, M.P., Cortés, F., Gaviola, S., Martos, P., Prodocimi, L., Seitune, D., Verón, E. (eds) Estado del conocimiento de los efectos del cambio climático en el Océano Atlántico Sudoccidental sobre los recursos pesqueros y sus implicancias para el manejo sostenible. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. 27-81.

Church, J. A. y White, N. J. 2006. A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters* 33, L01602, doi:10.1029/2005GL024826.

Gómez, L. 2021. Procesos de recarga/descarga en acuíferos someros de la región costera en la provincia de Buenos Aires. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata. Disponible en <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/122309>

González, E., Deus, N., Elbracht, J., Rahman, M. A. y Wiederhold, 2021. Current and future state of groundwater salinization of the northern Elbe-Weser region. *Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie* 26:343–356.

Gössling, S., Peeters, P., Hall, M., Ceron, J.-P., Dubois, G. La Vergne, L. y Scott, D. 2012. Tourism and water use: Supply, demand, and security. An international review. *Tourism Management* 33: 1-15.

- Hofa, A. y Schmitt, T. 2011. Urban and tourist land use patterns and water consumption: Evidence from Mallorca, Balearic Islands. *Land Use Policy* 28: 792–804.
- Hurtado, H., Meleguer E. y Werner, N. 1987. Prospección hidrogeológica por métodos geoelectrónicos en el acuífero de Villa Gesell. Aplicación del programa CORTES. Convenio INCYTH-Municipio de Villa Gesell, 31 p. Ezeiza.
- Isla, F. I., 1997. Procesos de canibalización de la barrera medanosa entre Faro Querandí y Mar Chiquita, Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 52 (4): 539-548.
- Isla, F. I. 1998. Holocene coastal evolution of Buenos Aires. *Quaternary of South America & Antarctic Peninsula*, A. A. Balkema, 11: 297-321
- Isla, F.I. 2010. Erosión de médanos litorales de Villa Gesell y Mar Chiquita. En: Isla, F.I y Lasta, C.A. (eds.), *Manual de Manejo costero para la Provincia de Buenos Aires*, EUDEM, 89-104, Mar del Plata.
- Isla, F.I., Cortizo, L.C. y Schnack, E. J. 1996. Pleistocene and Holocene beaches and estuaries along the Southern Barrier of Buenos Aires. *Quaternary Science Reviews* 15 (8-9): 833-841.
- Isla, F.I., Cortizo, L.C. y Turno Orellano, H. 2001. Dinámica y evolución de las barreras medanosas, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Brasileira de Geomorfologia. Uniao da Geomorfologia Brasileira* 2(1): 73-83.
- Isla, F. I., Dondas, A. y Taglioretti, M., 2010. Medános relícticos intrapampeanos en Daireaux y Centinela del Mar, Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 68 (1): 58-64.
- Isla, F. I., Garzo, P. y Cortizo, L. C. 2022. Las reservas de dunas de Buenos Aires: una actualización ante la reversión del nivel del mar. *Revista de Asociación Geológica Argentina*, 79 (4): 586-599.
- Isla, F.I., Garzo, P. y Sánchez Caro, L. 2022. Environmental evolution of coastal afforestations: management strategies for dune fixation in the sandy barriers of Buenos Aires, Argentina. *Journal of Integrated Coastal Zone Management* 22 (3): 1-18.
- Isla, F., Quiroz Londoño, O.M. y Cortizo, L.C. 2018. Groundwater content within loessic deposits: the coastal springs of Los Acantilados, Mar del Plata, Argentina. *Environ. Earth Sciences*, 77: 610.

Isla, F. I., Rutter, N. W., Schnack, E. J. y Zárata, M. A. 2000. La transgresión Belgranense en Buenos Aires. Una revisión a cien años de su definición. *Revista Cuaternario y Ciencias Ambientales*, Asociación Geológica Argentina 1: 3-14.

Isla, F. I., Taglioretti, M. L. y Dondas, A., 2015. Revisión y nuevos aportes a la estratigrafía y sedimentología de los acantilados entre Mar de Cobo y Miramar, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 72 (2): 235-250.

Kana, T. W., Michel, J., Hayes, M. O., Jensen, J. R., 1984. The Physical impact of sea level rise in the area of Charleston, South Carolina. Chapter 4, 28 pp. DOI:10.1007/978-1-4684-6569-3_4.

Koerth, J., Vafeidis, A., Carretero, S., Sterr, H. y Hinkel, J. 2014. A typology of household-level adaptation to coastal flooding and its spatio-temporal patterns. *Springerplus*, 3: 466, DOI 10.1186/2193-1801-3-466.

Kuvan, Y. 2005. The use of forests for the purpose of tourism: the case of Belek Tourism Center in Turkey. *Journal of Environmental Management* 75: 263–274.

Lanfredi N.W., Pousa J.L. y D'onofrio E. D. 1988. Sea-level rise and related potential hazards on the Argentine coast. *Journal of Coastal Research* 14: 47-60.

Magnan, A.K., M. Garschagen, J.-P. Gattuso, J.E. Hay, N. Hilmi, E. Holland, F. Isla, G. Kofinas, I.J. Losada, J. Petzold, B. Ratter, T. Schuur, T. Tabe, y R. van de Wal, 2019: Cross-Chapter Box 9: Integrative Cross-Chapter Box on Low-Lying Islands and Coasts. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 657–674. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.009>.

Montes M. L., Carretero, S., García Galluzzi, A., Mercader, R. C., Kruse, E. y Taylor M. A. 2022. Radiological baseline, mineralogy and Fe oxides of the eastern coast of the Province of Buenos Aires. *Environmental Earth Sciences* 81:519 <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10623-2>

Oppenheimer, M., Glavovic, B.C., Hinkel, J., van de Wal, R., Magnan, A. K., Abd-Elgawad, A., Cai, R., Cifuentes-Jara, M., DeConto, R.M., Ghosh, T., Hay, J., Isla, F., Marzeion, B.,

- Meyssignac, B. y Sebesvari, Z. 2019. Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 321–445.
- Parker, G. y Violante, R. A. 1989. Geología y Geomorfología. Regiones 1 y 11. Punta Rasa - Faro Querandí. Provincia de Buenos Aires. Convenio Consejo Federal de Inversiones y Servicio de Hidrografía Naval, Informe final. 110 pp.
- Pauw, P., de Louw, P. G. B., y Oude Essink, G. H. P. 2012. Groundwater salinisation in the Wadden Sea area of the Netherlands: quantifying the effects of climate change, sea-level rise and anthropogenic interferences. *Geologie en Mijnbouw* 91 (3): 373-383.
- Peluso, F., González Castelain, J., Othax, N. y Rodríguez, L. 2011. Riesgo sanitario por sustancias tóxicas en aguas superficiales de Tres Arroyos, Argentina. *Acta Bioquímica Clínica Latinoamericana* 45 (2): 311-21.
- 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: N. González, E. Kruse, M.M. Trovatto y P. Laurencena (Editores) *Temas actuales en hidrología subterránea 2013*. ISBN 978-987-1985-03-6. La Plata, EDULP, pp 44-49.
- Quiroz Londoño, O., Martínez, D. y Massone, H. 2010. Las aguas subterráneas de Lobería. En Isla, F. I. y Lasta, C. A. (eds.) *Manual de manejo de barreras medanosas de la Provincia de Buenos Aires*. EUDEM, Mar del Plata, 117-128.
- Rebouças, A. da C. 1999. Groundwater resources in South America. *Episodes* 22(3): 232–237.
- Rico-Amorosa, A., Olcina-Cantosa, M. y Sauri, J. D. 2009. Tourist land use patterns and water demand: Evidence from The Western Mediterranean. *Land Use Policy* 2:, 493-501.
- Robles, A. D., Polizzi, P., Romero, M. B., Chiodi Budet, L. N., Medici, S., Costas, A. y Gerpe, M. 2016. Geochemical mobility of arsenic in the surficial waters from Argentina. *Environmental Earth Sciences* 75:1479.

Rodríguez Capitulo, L. 2015. Evaluación geohidrológica en la región costera oriental de la provincia de Buenos Aires. Caso de estudio Pinamar. Tesis doctoral inédita. La Plata: Facultad de Ciencias Naturales y Museo.

Rodríguez Capítulo, L. y Kruse, E. E. 2017. Relationship between geohydrology and Upper Pleistocene and Holocene evolution of the eastern region of the Province of Buenos Aires, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences* 76: 276-289.

Rodríguez Capítulo, L., Carretero, S. y 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>.

Rodríguez Capítulo, L. y Kruse, E. 2011. Balance hidrológico en un área costera medanosa con forestación. Caso de estudio: Partido de Pinamar (Provincia de Buenos Aires). In R. F. García, & M.V Rocha Fasola (Eds.). VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. *Hidrogeología Regional y Exploración Hidrogeológica* 80-87.

Rodríguez Capítulo, L. y Kruse E.E. 2018. Modelo conceptual de funcionamiento geohidrológico del acuífero costero medanoso. Caso de estudio: Pinamar. El agua subterránea “recursos sin fronteras”. Ed. Universidad de Salta. Salta; Argentina, pp. 135-142.

Ruffo, A.G., Albouy, E.R., Giorgi, J.M., Carrica, L. y Bastianelli, N. V. 2021a. The phreatic aquifer in the coastal dunes of Southwestern Buenos Aires Province, Argentina. Factors conditioning groundwater quality. *Journal of Ecology and Natural Resources* 5 (4): 260.

Ruffo, A. G., Rey, M. y Albouy, R., 2021b. Identificación y cuantificación del índice de carga contaminante al acuífero contaminante en el Balneario Pehuen Co, Buenos Aires, Argentina. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería al Ambiente* 46 (57): 57-65.

Sadai, S., Spector, R. A., De Conto, R., y Gómez, N., 2022. The Paris Agreement and climate justice: Inequitable impacts of sea level rise associated with temperature targets. *Earth's Future*, 10, e2022EF002940. <https://doi.org/10.1029/2022EF002940>

Sala, J. M. y Cavalie, C. C. 1974. Contribución al mapa geohidrológico de la Provincia de Buenos Aires. Zona Interserrana, Consejo Federal de Inversiones, Buenos Aires, 51 pp.

Sala, J., González, N., Hernández, M., Martín de Uliana, E., Cheli, E. y Kruse, E. 1976. Factibilidad de provisión de agua subterránea a la localidad de San Clemente de Tuyú-El Tala.

Provincia de Buenos Aires. Informe técnico. Convenio Cátedra de Hidrogeología. Facultad de Ciencias Naturales- Cooperativa de Obras Sanitarias de San Clemente del Tuyú, La Plata. 42 pp.

Sánchez Caro, L., Carretero, S., Gáspari, F. y Vagaria, A. 2023. Estimación de la variación en la recarga del acuífero costero en Mar de las Pampas, Argentina, en base a cambios del uso del suelo. *Tecnología y Ciencias del Agua* 14 (1): 38-90. DOI: 10.24850/j-tyca-14-01-02

Toledo, M. F., 2022. Identificación de la interface agua dulce-salada del acuífero costero en Villa Gesell mediante sondeos eléctricos verticales. Tesis de grado en Geofísica, UNLP, 98 pp.

Van Berkel, D. B. y Verburg, P.H. 2012. Spatial quantification and valuation of cultural ecosystem services in an agricultural landscape. *Ecological Indicators* 27(5): 641-658.

Van Berkel, D. B., Munroe, D. K. y Gallemore, C. 2014. Spatial analysis of land suitability, hot-tub cabins and forest tourism in Appalachian Ohio. *Applied Geography* 54: 139-148.

Villalba, G.A. 2022. Los sistemas urbanos de drenaje sostenible como herramienta para la preservación del ciclo hidrológico. Caso Costa Esmeralda. *Conama 2022*, 11 pp.

Vizcaíno, A., Remorini, G., Rossi, L. y González Arzac, R. 1995. Evaluación del recurso hídrico en el Partido de General Alvarado. Informe final, CFI, 83 pp.

Wassef, R. y Schüttrumpf, H., 2016. Impact of sea-level rise on groundwater salinity at the development area western delta, Egypt. *Groundwater for Sustainable Development* 2-3: 85-103.

Webb, A. P. y Kench, P. S. 2010. The dynamic response of reef islands to sea-level rise: Evidence from multi-decadal analysis of island change in the Central Pacific. *Global and Planetary Change* 72 (3): 234-246.

White, N. J., Haigh, I. D., Church, J. A., Koen, T., Watson, C. S., Pritchard, T. R., Watson, P. J., Burgette, P. J., Mc Innes, K. L., You, Z-L, Zhang, X. y Tregging, P. 2014. Australian sea levels—Trends, regional variability and influencing factors. *Earth-Science Reviews* 136: 155-174.

Captions for figures

Figura. 1. Ubicación de las 3 barreras medanosas de Buenos Aires.

Figura 2. Evolución costera de las barreras medanosas oriental y austral de Buenos Aires en relación a la fluctuación del nivel del mar (modificado de Isla et al. 1996).

Figura 3. Estratigrafía de la Barrera Medanosa Oriental desde el Partido de la Costa hasta Mar Chiquita (simplificado de Parker y Violante 1989)

Figura 4. Esquema hidrogeológico de interfase agua dulce-agua salada en la Barrera Oriental. a) al norte (San Clemente del Tuyú), y b) al sur de la barrera (Pinamar) (modificado de Rodrigues Capítulo 2015).

Figura 5. a. Perfil estratigráfico de las formaciones de la barrera medanosa austral en Centinela del Mar (modificado de Isla et al. 2000). b. Secuencias aflorantes en el cauce del arroyo Claromecó.

Figura 6. Perfil hidrogeológico esquemático de la Barrera Medanosa Austral en Dunamar (valores en Ω . m modificado de Cesare 2016).

Figura 7. Arriba: Fluctuación de la capa freática y precipitaciones para un año hidrológico (Carretero 2011). Abajo: Producción diaria de agua para abastecer San Clemente del Tuyú en el intervalo 2002-2021.

Figura 8. Diferencias en el nivel freático entre zonas forestadas y sin forestar en el Partido de Pinamar (modificado de Rodrigues Capítulo et al. 2018)

Figura 9. Perfiles de resistividad de la Barrera Oriental en Pinamar (modificado de Rodríguez Capítulo 2015). Los colores rojos y amarillos indican agua dulce mientras los azulados son salinos. La línea cortada indica la interfase agua dulce-salada oblicua.

Figura 10. Perfiles de resistividad de la Barrera Austral en Sauce Grande (modificado de Albouy et al. 2020). Los colores rojos y amarillos indican agua dulce mientras los azulados son salinos. La línea cortada indica la interfase agua dulce-salada horizontal.

Figura 11. Localización del campo de bombeo y sistemas de captación utilizados en San Clemente.

Figura 12. Método de explotación convencional en Pinamar.

Figura 13. Izquierda: previsión del aumento del nivel del mar para el año 2100 de acuerdo a los escenarios previstos por el IPCC (Oppenheimer et al. 2019). Derecha: evolución de la interfase de agua dulce y salada con relación al aumento del nivel del mar (Carretero et al. 2013b).

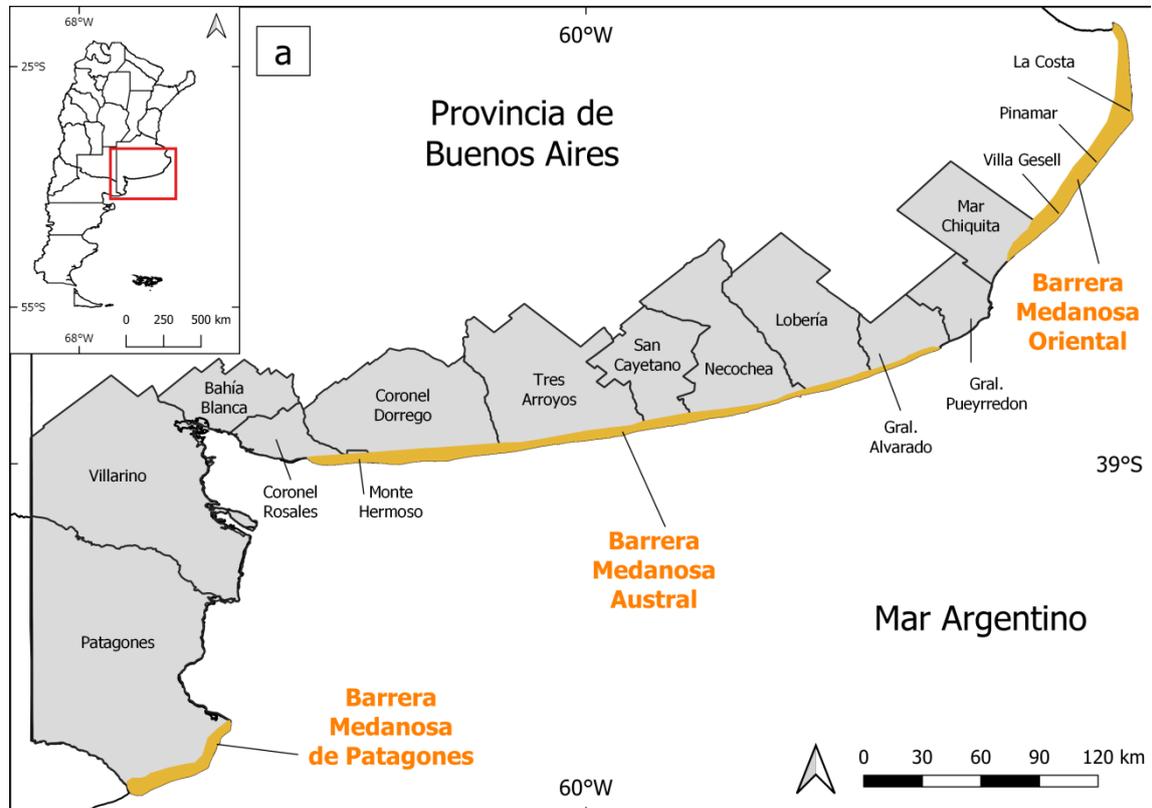


Figura. 1. Ubicación de las 3 barreras medanosas de Buenos Aires.

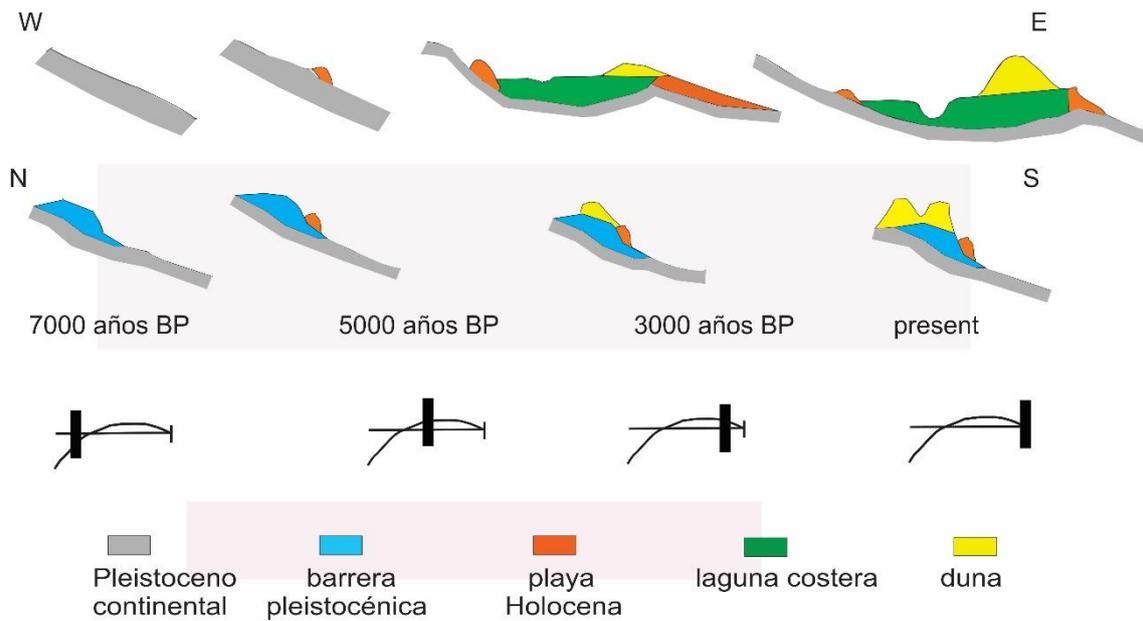


Figura 2. Evolución costera de las barreras medanosas oriental y austral de Buenos Aires en relación a la fluctuación del nivel del mar (modificado de Isla et al. 1996).

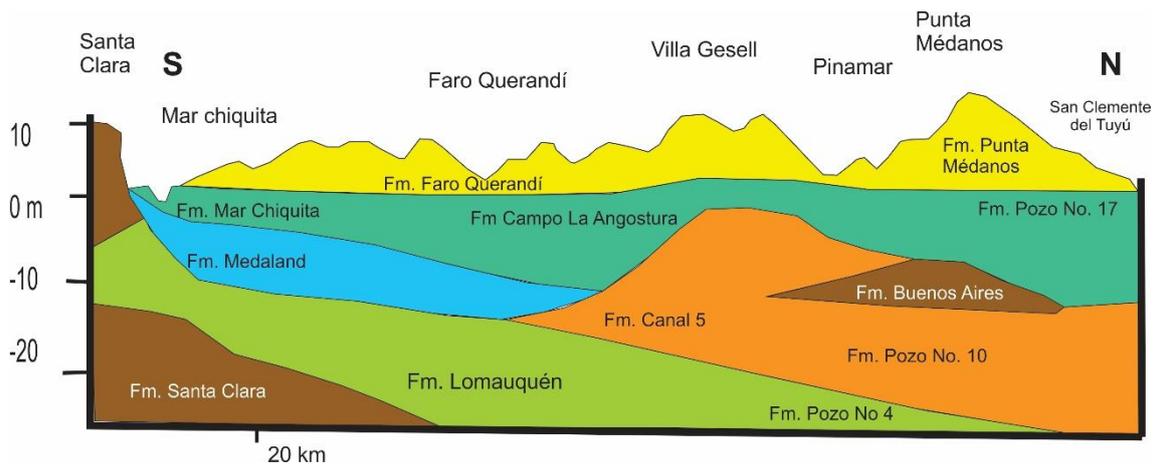


Figura 3. Estratigrafía de la Barrera Medanosa Oriental desde el Partido de la Costa hasta Mar Chiquita (simplificado de Parker y Violante 1989)

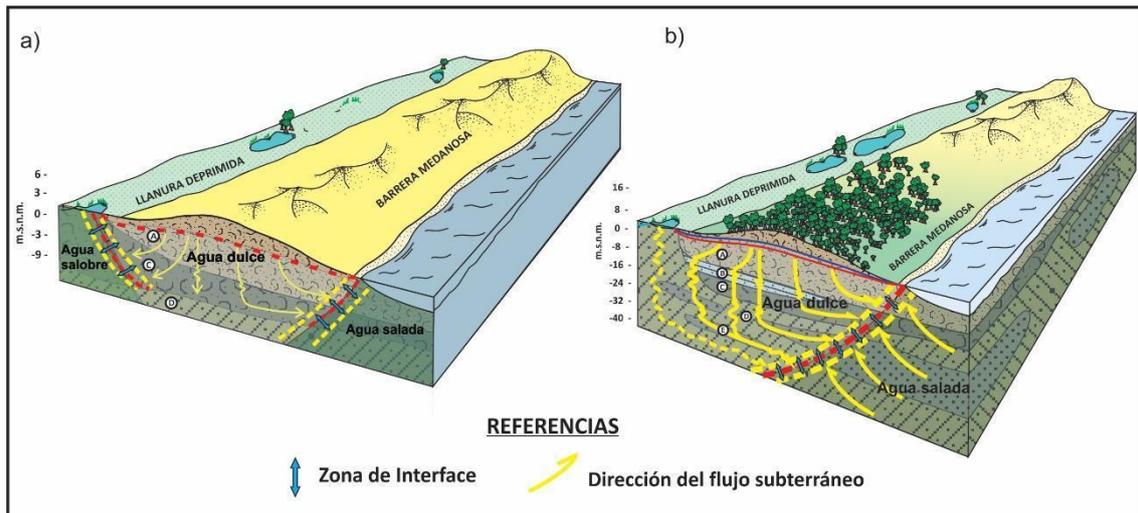


Figura 4. Esquema hidrogeológico de interfase agua dulce-agua salada en la Barrera Oriental. a) al norte (San Clemente del Tuyú), y b) al sur de la barrera (Pinamar) (modificado de Rodrigues Capítulo 2015).

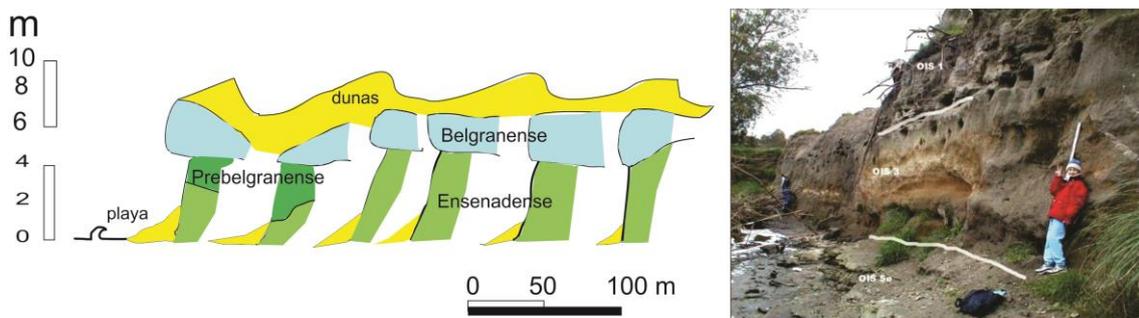


Figura 5. a. Perfil estratigráfico de las formaciones de la barrera medanosa austral en Centinela del Mar (modificado de Isla et al. 2000). b. Secuencias aflorantes en el cauce del arroyo Claromecó.

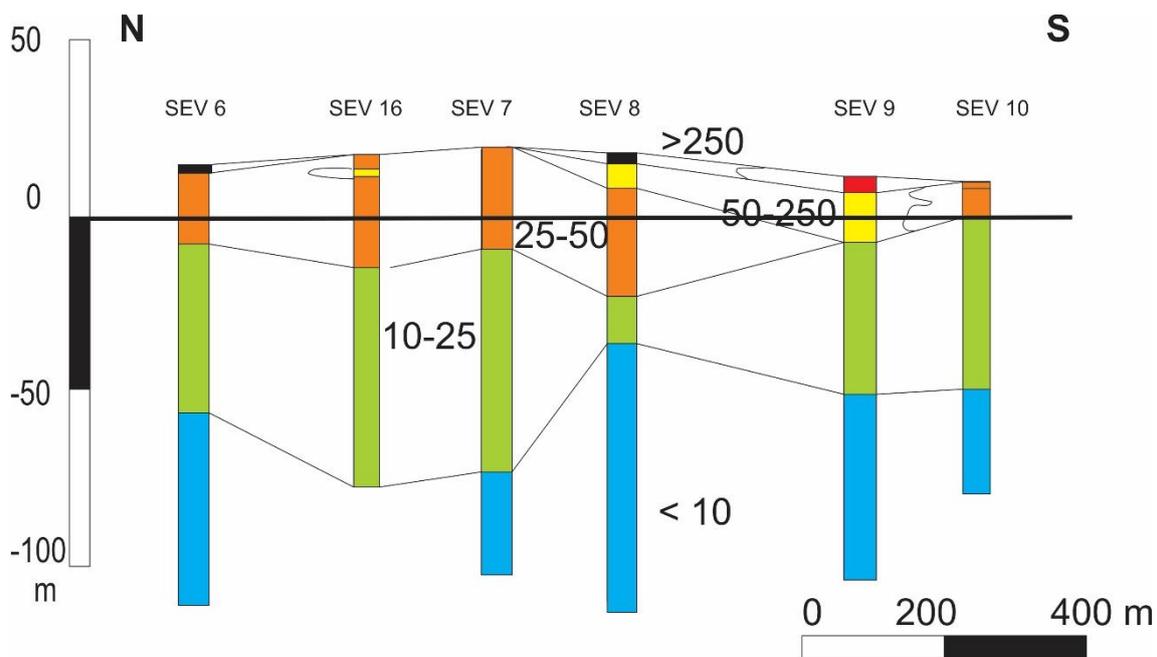


Figura 6. Perfil hidrogeológico esquemático de la Barrera Medanosa Austral en Dunamar (valores en Ω . m modificado de Cesare 2016).

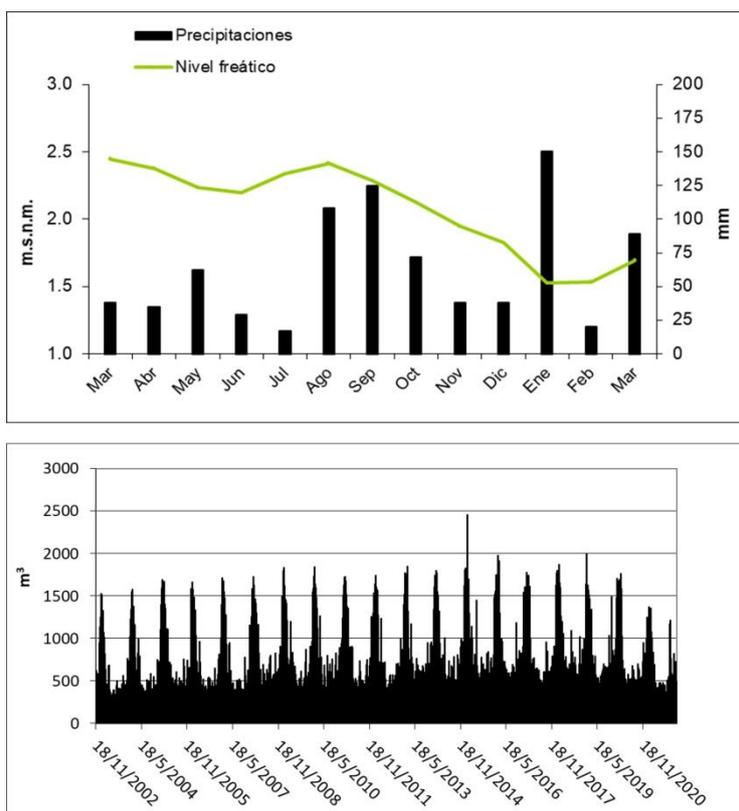


Figura 7. Arriba: Fluctuación de la capa freática y precipitaciones para un año hidrológico (Carretero 2011). Abajo: Producción diaria de agua para abastecer San Clemente del Tuyú en el intervalo 2002-2021.

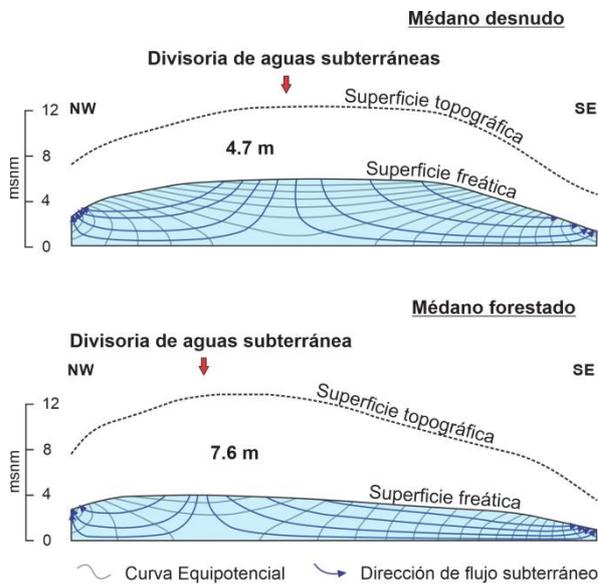


Figura 8. Diferencias en el nivel freático entre zonas forestadas y sin forestar en el Partido de Pinamar (modificado de Rodrigues Capítulo et al. 2018)

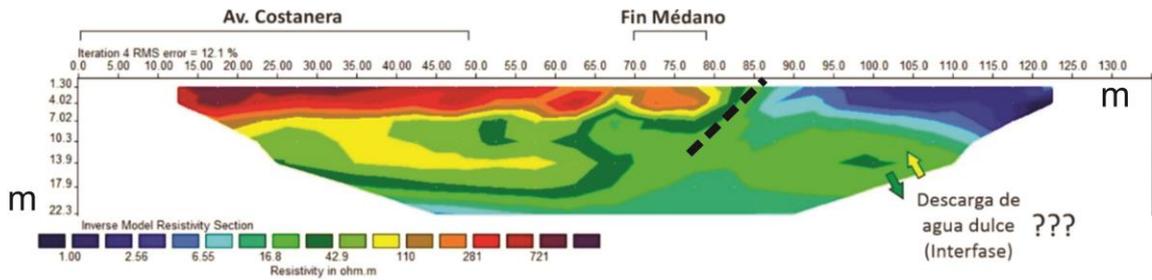


Figura 9. Perfiles de resistividad de la Barrera Oriental en Pinamar (modificado de Rodríguez Capítulo 2015). Los colores rojos y amarillos indican agua dulce mientras los azulados son salinos. La línea cortada indica la interfase agua dulce-salada oblicua.

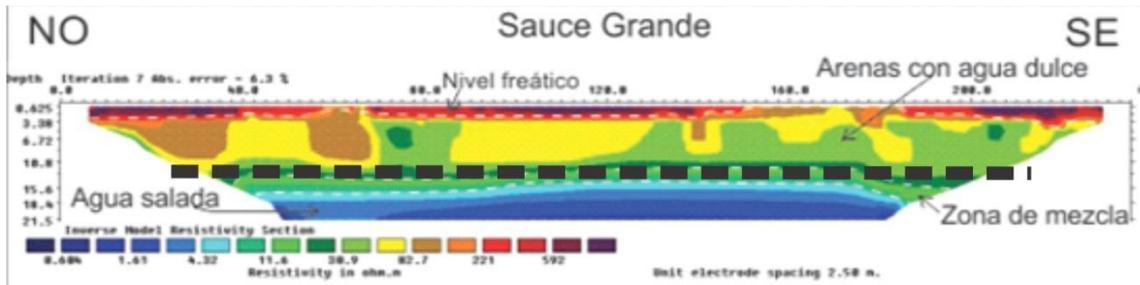


Figura 10. Perfiles de resistividad de la Barrera Austral en Sauce Grande (modificado de Albouy et al. 2020). Los colores rojos y amarillos indican agua dulce mientras los azulados son salinos. La línea cortada indica la interfase agua dulce-salada horizontal.

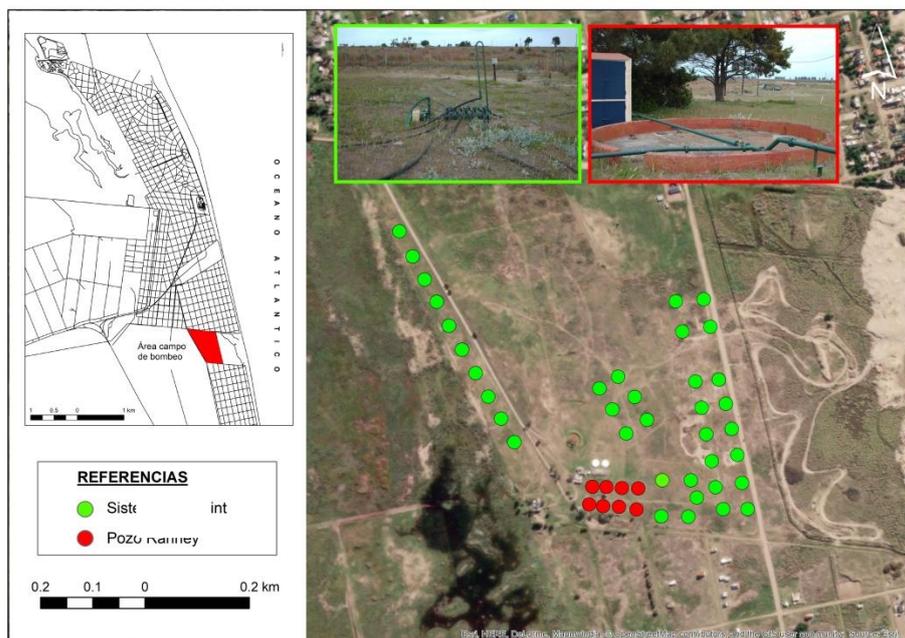


Figura 11. Localización del campo de bombeo y sistemas de captación utilizados en San Clemente.

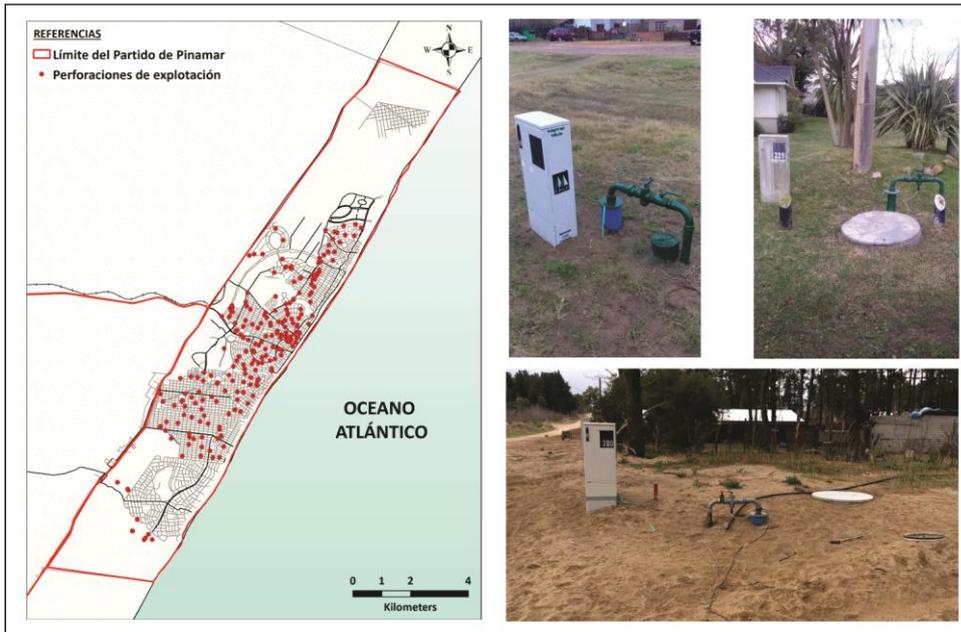


Figura 12. Método de explotación convencional en Pinamar.

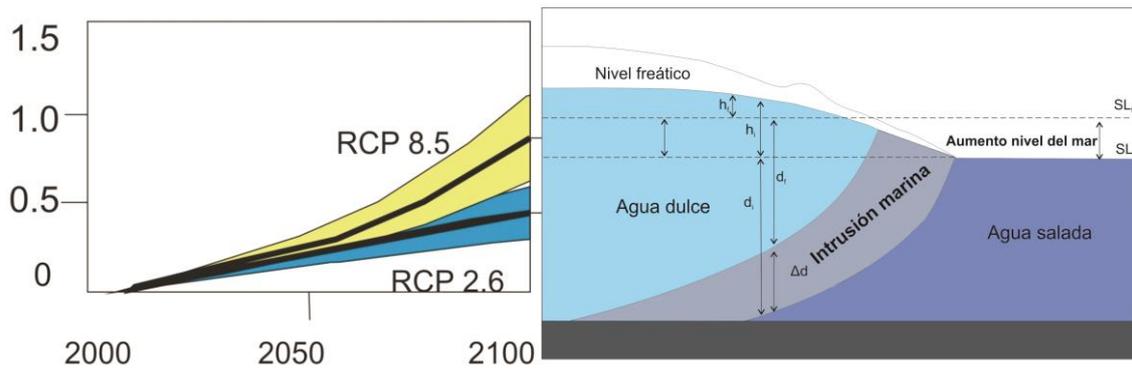


Figura 13. Izquierda: previsión del aumento del nivel del mar para el año 2100 de acuerdo a los escenarios previstos por el IPCC (Oppenheimer et al. 2019). Derecha: evolución de la interfase de agua dulce y salada con relación al aumento del nivel del mar (Carretero et al. 2013b).