



Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente • N.º 51 • 2024 • ISSN 2422-5703 • <https://www.editoriasagai.org.ar/>
Rodríguez Capitulo L., Carretero, S.C., Fabiano, M.E., Anguiano M.S. y Kruse E.E.
Dinámica de la interfase agua dulce – agua salada en el cordón costero, Buenos Aires. Caso de estudio: Pinamar
e016, <https://doi.org/10.59069/24225703e016>

Dinámica de la interfase agua dulce – agua salada en el cordón costero, Buenos Aires. Caso de estudio: Pinamar

Freshwater – saltwater zone dynamics in the sandune barrier, Buenos Aires. Study case: Pinamar

Leandro Rodríguez Capitulo^{1,2*} Silvana Claudia Carretero^{1,2}

Maximiliano Emanuel Fabiano² María Samanta Anguiano³ Eduardo Emilio Kruse^{1,2}

*Contacto

Recibido: 26 de julio de 2023 ▪ Aceptado: 19 de abril de 2024 ▪ Publicado: 24 de abril de 2024

Resumen

El estudio de la zona de interfase agua dulce-agua salada (IADAS) resulta fundamental para la caracterización de acuíferos costeros y la evolución de las reservas de agua dulce. En este trabajo se estudian los factores que condicionan la dinámica de la IADAS en la localidad de Pinamar. Para llevar a cabo esta tarea se realizó una perforación de monitoreo sobre el frente costero, se realizaron perfilajes de conductividad eléctrica (CE) y se instalaron sensores continuos presión, temperatura y salinidad. Se recopiló información proveniente del mareógrafo ubicado en la localidad de Santa Teresita mientras que los datos hidrometeorológicos se obtuvieron a partir de estación ubicada en la localidad de Pinamar. Se verifica una correlación entre los eventos de pleamar y los valores de conductividad eléctrica, nivel hidráulico y temperatura. Los tiempos de respuesta entre el ascenso de la marea y el aumento de la salinidad se reconocen menos de 8 horas, en tanto que el intervalo requerido para alcanza nuevamente el equilibrio demora al menos 2 días. Las variaciones de la temperatura se encuentran influenciadas por las condiciones climáticas dominantes al momento del ascenso de la marea. El análisis de la relación entre la variación del almacenamiento y los eventos de pleamar permiten inferir que, cuando se producen eventos de recarga, existe una mayor estabilidad debido al incremento de la carga hidráulica sobre la IADAS. El estudio del comportamiento de la IADAS resulta un indicador eficaz para la gestión de los recursos hídricos en sectores costeros.

Palabras clave: acuífero costero, conductividad eléctrica, marea.

Abstract

The study of the freshwater-saltwater interface zone (FWSWI) is fundamental for the characterization of coastal aquifers and the evolution of freshwater reserves. In this work we study the factors that condition the dynamics of

1 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. Argentina

2 Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Universidad Nacional de La Plata. Argentina

3 Secretaría de Paisaje y Medio Ambiente. Municipio de Pinamar. Pinamar. Argentina.

the IADAS in the locality of Pinamar. To carry out this task, a monitoring borehole was drilled on the coastal front, electrical conductivity (EC) profiling was performed, and continuous pressure, temperature and salinity sensors were installed. Information was collected from the tide gauge located in the town of Santa Teresita, while hydrometeorological data were obtained from a station located in the town of Pinamar. A correlation between high tide events and salinity, water level and temperature values were verified. The response times between the rise of the tide and the increase of the salinity are less than 8 hours, while the interval required to reach equilibrium again takes at least 2 days. Temperature variations are influenced by the prevailing climatic conditions at the time of the rising tide. The analysis of the relationship between storage variation and high tide events allows inferring that, when recharge events occur, there is a greater stability due to the increase of the hydraulic load on the IADAS. The study of IADAS behavior is an effective indicator for resource management.

Keywords: coastal aquifers, electrical conductivity, tide.

INTRODUCCIÓN

Las zonas litorales han experimentado presiones en sus valores ambientales como resultado del desarrollo poblacional. Este desarrollo ha sido posible, entre otros factores, por la existencia de recursos hídricos, ya sea a través de la utilización del agua superficial o del agua subterránea. El crecimiento económico durante el último siglo ha conllevado una explotación agresiva de estos recursos. Como resultado, las reservas de agua han disminuido y su calidad se ha deteriorado, afectando tanto a su disponibilidad para los usos humanos como para la preservación de los ecosistemas (Kruse y Mas Pla, 2009).

El estudio del comportamiento de la Interfase Agua Dulce Salada (IADAS) constituye una de las temáticas de mayor relevancia para la caracterización de acuíferos costeros, resultando un indicador eficaz para evaluar y cuantificar la evolución de las reservas de agua dulce disponibles. En este sentido, el conocimiento detallado de la misma resulta un insumo clave para la planificación de la explotación en sectores costeros donde el incremento poblacional y la demanda hídrica asociada debe ser cuidadosamente planificada en base al conocimiento hidrogeológico del comportamiento de la zona de transición entre el agua dulce y el agua salada.

El caso de estudio se ubica en la localidad costera de Pinamar, la cual constituye uno de los principales centros urbanos de la región y cuyo abastecimiento se realiza a partir de aguas subterráneas. En este contexto, la explotación intensiva del recurso y la falta de planificación se pone de manifiesto a partir de la medición y registro de los valores de conductividad en aquellos sectores más densamente poblados y cuya demanda se ha ido incrementando durante los últimos años.

A la situación mencionada anteriormente se adiciona la condición que el sistema de abastecimiento se realiza a partir de perforaciones individuales, las cuales abastecen a una única red interconectada y cuya presión depende del número de perforaciones o puntos de presión para mantener el caudal de abastecimiento. Esta condición permite inferir que la mayor parte de las perforaciones se encuentran localizadas en el sector más próximo a la costa (sector hotelero y comercial) constituyendo un forzante significativo para el

avance del frente salino cuya dinámica, además, se caracteriza por un delicado equilibrio hidrodinámico entre el agua dulce y salada (Rodrigues Capitulo, 2015).

Los primeros antecedentes acerca de la dinámica de la IADAS se constituyen en los trabajos realizados por el Consejo Federal de Inversiones (1993), quienes, en base a información hidroquímica de perforaciones de explotación, indican una interfase de alto ángulo para la localidad de Pinamar y cuya influencia se restringe únicamente al sector de playa.

Un aporte de relevancia fue el realizado por Perdomo et al (2013), quienes identificaron procesos de descarga subterránea de agua dulce mediante la aplicación de tomografías eléctricas y cuyos resultados permitieron demostrar que la zona de transición en superficie se manifiesta en una transecta de unos 100 metros de longitud desde valores asimilables a agua dulce hasta valores conductivos similares a los del mar.

Posteriormente Rodrigues Capitulo (2015) y Rodrigues Capitulo y Kruse (2018), en base a la interpretación del comportamiento hidrodinámico, hidroquímico y contenidos isotópicos en perforaciones, formularon un modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico a partir del cual fue posible estimar la configuración general de la IADAS para las localidades de Montecarlo, Pinamar, Valeria del Mar y Cariló. Asimismo, mediante el análisis de conductividades eléctricas de perforaciones costeras, identificaron procesos de incipiente salinización en las localidades de Pinamar y Cariló.

Otra contribución de importancia ha sido la realizada por Carretero et al (2019) quienes, mediante la determinación de ^{222}Rn en perforaciones de monitoreo y en una transecta paralela a la línea de costa en el cordón costero, describieron procesos de recarga y descarga subterránea, así como también la variabilidad estacional de la descarga con relación a los excesos del balance hídrico.

En este trabajo se analizan los factores que condicionan el comportamiento de la IADAS en la localidad de Pinamar como indicador del estado de las reservas de agua dulce disponibles. A partir de registros de conductividad, nivel hidráulico, temperatura, precipitaciones y mareas, se realiza una interpretación que permita establecer indicadores para re-



Figura 1: Área de estudio. Límites del Partido de Pinamar y sus localidades

conocer el avance o retroceso de la IADAS como herramienta de planificación para el abastecimiento de la población.

ZONA DE ESTUDIO

En el borde oriental de la Provincia de Buenos Aires se ubica el Partido de Pinamar ($37^{\circ} 6' 36.66''$ Latitud Sur; $56^{\circ} 52' 17.83''$ Longitud O) (Figura 1). Con una superficie de $66,2 \text{ km}^2$ se trata de un polígono de forma rectangular con su eje mayor ubicado en dirección sudoeste - noreste, que limita al oeste con el Partido de General Juan de Madariaga, al norte con el Partido de La Costa, al sur con el de Villa Gesell, y al este con el Mar Argentino.

El área de estudio corresponde desde un punto de vista hidrogeológico a la región "costera" (González, 2005). El clima de la región, de acuerdo con la clasificación de Thornthwaite (1948), es B2 B'2 r a', mesotermal, templado frío, con nulo a pequeño déficit de agua y concentración estival de la eficiencia térmica menor del 48%. El valor medio para las precipitaciones es de 900 mm, mientras que para las temperaturas el mismo es de $14,5^{\circ}\text{C}$.

El sector analizado se erige entre la Llanura deprimida y el océano Atlántico y corresponde al sector que geológica-

mente es conocido como Cordón Costero (Parker y Violante, 1989). El mismo posee entre 2 y 4 km de ancho, presenta su mejor expresión entre Villa Gesell y Punta Médanos y disminuye paulatinamente hacia el norte y sur hasta desaparecer. Se trata de una unidad arenosa que se compone de dos subunidades menores comúnmente denominadas como Playa y Médanos.

El esquema geohidrológico descrito por Rodrigues Capitulo (2015) se compone de una base de edad Pleistocena superior compuesta por "limos arcillosos con intercalaciones carbonáticas" (hidrofacies d) dentro de las cuales se encuentra incluido un nivel acuífero compuesto por las lentes de "arena muy fina" (hidrofacies e). El Holoceno temprano se constituye por las "arenas medianas" (hidrofacies c) de las barreras transgresivas que representan a una unidad acuífera, y por las "arcillas grises con intercalaciones arenosas" que, formadas en un ambiente de baja energía, conforman un nivel acuitardo (hidrofacies B). Por último, el Holoceno reciente se encuentra representado por las "arenas finas" (hidrofacies A) de la cadena de médanos actual (Figura 2).

El flujo subterráneo de la capa freática (hidrofacies a) está representado por curvas equipotenciales orientadas en forma paralela a la costa, con una divisoria de agua subterránea que tiende a coincidir con las máximas alturas topográficas.

cas del cordón costero y sentidos de flujo subterráneo hacia el este (mar) y hacia al oeste (continente).

La capa freática se recarga naturalmente en forma directa por infiltración de los excesos de la precipitación. La recarga de las unidades profundas se produce por filtración vertical en forma indirecta desde la capa freática tal como se deduce de las diferencias de carga hidráulica, siendo ello más manifiesto en los sectores topográficamente más altos.

Las coberturas del suelo, que incluyen forestación, urbanización y médanos con escasa vegetación o desnudos muestran diferentes condiciones de infiltración que se reflejan en la configuración del flujo de la capa freática. En este sentido se reconocen mayores excesos en el suelo desnudo (470 mm/año) con respecto a suelo forestado (261 mm/año), reflejando condiciones de mayor evapotranspiración para la cobertura arbórea.

METODOLOGÍA

Para la elaboración del presente trabajo se realizaron una serie de trabajos de campo y de gabinete. En el primer caso las tareas incluyeron la ejecución de una perforación de monitoreo profundo (35 m) ubicada en el sector costero de la localidad de Pinamar (Av. Bunge y Playa, Lat: 37° 7'5.82"S, Long: 56°51'19.07"O) (Figura 2A). Dicha perforación posee un diámetro de 63 mm en PVC reforzado, se encuentra ranurada desde la superficie hasta el final de la misma, cuenta con una tapa con sello de goma para evitar el acceso de agua desde la superficie y un brocal de hormigón para evitar actos de vandalismo. Durante su realización se extrajeron muestras de cutting a partir de las cuales fue posible realizar la confección del perfil litológico.

Se realizaron perfilajes periódicos de la CE (Conductividad eléctrica) en profundidad (Figura 2B) la cual resulta una medida indirecta de la salinidad de las aguas subterráneas. Para llevar a cabo dicha tarea se empleó una sonda TLC (Solinst Model 107). Este equipo posee un rango de medición de 0 a 80.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con una exactitud del 5%, en tanto que su calibración se realizó antes de cada perfilaje.

En dicha perforación también fueron instalados, a una profundidad de 18 m b. b. p. (metros bajo boca de pozo), 2 sensores de la marca HOBO-ONSET a partir de los cuales fue posible obtener registros horarios de conductividad, temperatura y presión la cual corregida permite obtener el valor del nivel freático (Figura 2C, 2D y 2E).

Los registros hidrometeorológicos (Precipitación, temperaturas, y vientos) fueron obtenidos a partir de una estación meteorológica municipal (Davis Vantage Pro II), ubicada en la intersección de la Avenida Valle Fértil y Rivadavia (Lat: 37° 6'38.73"S, Long: 56°51'52.87"O) en la localidad de Pinamar.

Se realizó la medición mensual de niveles a partir de una red de monitoreo de aguas subterráneas compuesta por 55 perforaciones, que se distribuye en todo el Partido de

Pinamar. A partir de dichas mediciones se realizaron mapas de flujo mensuales desde los cuales se estimaron valores de recarga y agotamiento para la serie mayo 2021/abril 2022. Se recopilaron registros horarios de mareas proveniente del mareógrafo ubicado en la localidad de Santa Teresita, que fue operado por el Servicio de Hidrografía Naval para el período mencionado anteriormente.

La estimación de los valores de recarga y agotamiento se realizó mediante el método de las fluctuaciones del nivel freático. Para el cálculo de las áreas comprendidas entre las curvas de isovariación fue necesario el empleo de la herramienta "Reclassify" del módulo "Spatial Analyst" incluido en el software QGIS 3.26.3 el cual también fue utilizado para la integración de un sistema de información geográfica.

RESULTADOS

Los registros obtenidos a partir de los perfilajes de conductividad eléctrica permitieron reconocer la morfología general de la IADAS y las variaciones de la conductividad en profundidad y su evolución temporal para el período comprendido entre 2013 y 2022 (Figura 3).

En términos generales el perfil se inicia con valores entre 5.000 y 6.200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y presenta dos quiebres. El primero de ellos desde 5.000 a 8.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre los 18 y los 20 m b. b. p., mientras que el segundo se manifiesta con un salto abrupto de 8.000 a 19.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre los 22 y los 28 m b. b. p. a partir de la cual se aprecia un incremento progresivo hasta los 35 m b. b. p. con CE de 35.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ aproximadamente. Asimismo, el análisis temporal de los perfilajes permitió identificar una mayor variación de las conductividades a partir de profundidades ubicadas entre los 22 y 35 m b. b. p.

Con el objeto de mejorar la comprensión del comportamiento de la IADAS, en la Figura 4 se muestran los registros horarios de CE y nivel hidráulico obtenidos a partir del sensor instalado en la perforación costera para el período comprendido entre el 17 de Febrero al 2 de Mayo de 2022, los cuales se presentan de manera conjunta con los registros obtenidos del mareógrafo ubicado en la localidad de Santa Teresita.

En términos generales se verifica una correspondencia entre los eventos de pleamar, el incremento de la conductividad eléctrica y el ascenso de nivel hidráulico. En la Tabla 1 se muestran los rangos de variación de altura de marea y nivel hidráulico y la salinidad para cada evento. Este proceso se manifiesta a través de un incremento abrupto de la conductividad desde valores de equilibrio cercanos a los 3.200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta llegar valores asimilables a la conductividad eléctrica del mar. Luego de cada estímulo, el descenso se manifiesta de manera suave hasta un nuevo ascenso de la marea. En este sentido, se verifica que el tiempo de respuesta entre el ascenso de la marea y el valor máximo de salinidad se produce en cuestión de horas, en tanto que el lapso temporal hasta alcanzar nuevamente el equilibrio se produce a razón de días.

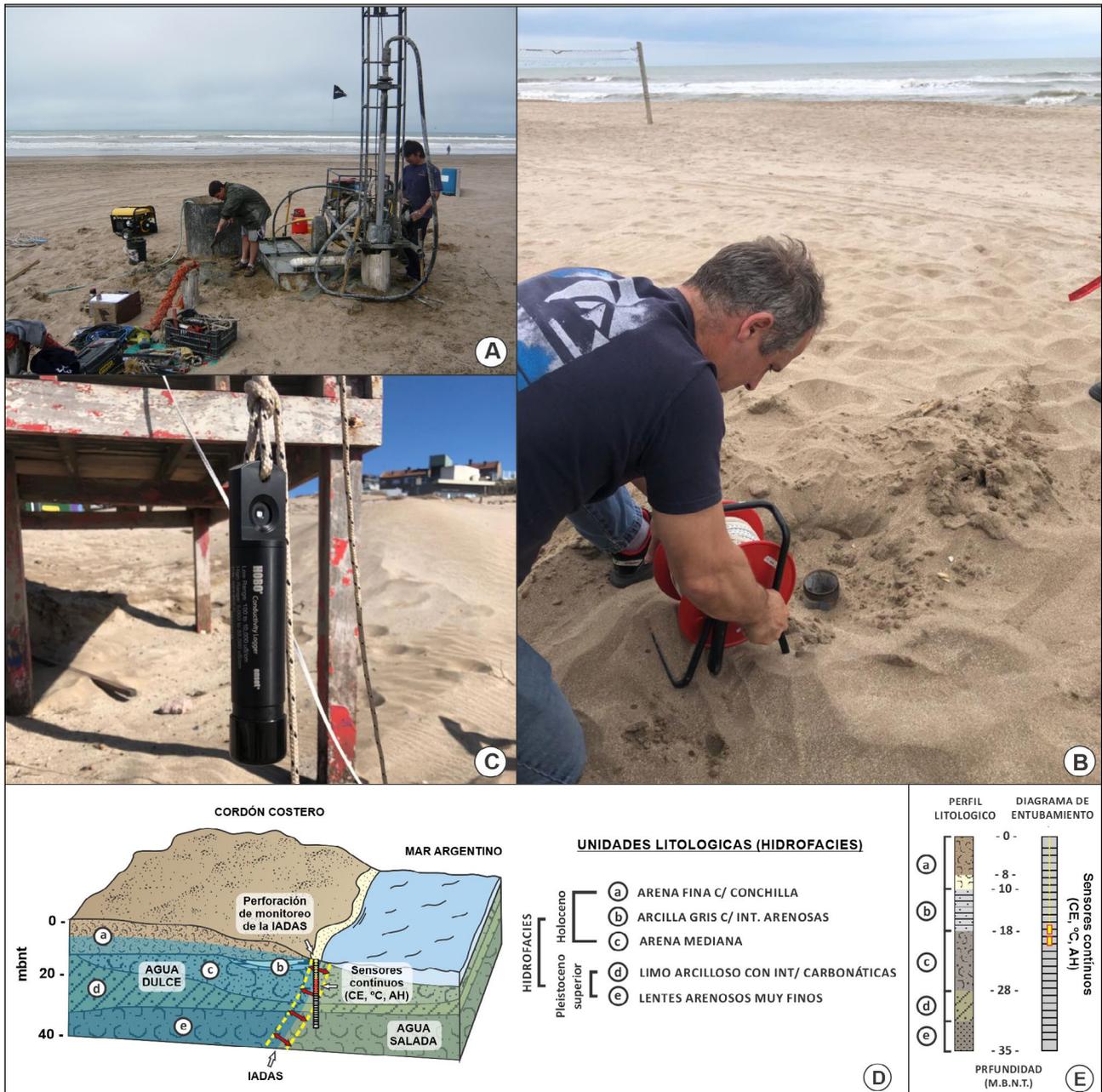


Figura 2: Trabajos de campo. A) Ejecución de perforación de monitoreo, B) Medición de perfiles de conductividad eléctrica, C) Instalación de sensores de salinidad, temperatura y altura hidráulica, D) esquema de monitoreo de la IADAS y unidades litológicas existentes en el área de estudio y E) Perfil litológico y diagrama de entubamiento de la perforación de monitoreo de la IADAS.

Otro fenómeno relevante se vincula con el comportamiento medido luego del cuarto evento de marea hasta el final del registro disponible. De acuerdo con lo mencionado anteriormente, existe una correlación entre el ascenso de la marea y el incremento de las conductividades asociadas al desplazamiento de la IADAS hacia el continente. Sin embargo, y tal como se muestra en la Figura 4, en donde se identifican eventos de ascenso de la marea incluso de mayor magnitud a los descritos para los eventos 1, 2 y 3, este comportamiento no se verifica.

Una posible explicación podría estar vinculada con la

evolución de los volúmenes de recarga y agotamiento obtenidos para el período comprendido entre mayo de 2021 a abril de 2022. En términos generales el área de estudio presenta 7 meses con recarga y 5 meses con agotamiento, esta condición responde a que, si bien la mayor cantidad de precipitaciones se manifiestan durante el verano, el efecto de la evapotranspiración y la demanda hídrica por parte del turismo resultan en valores de agotamiento. De manera opuesta, durante los meses más fríos, debido a una menor evapotranspiración y demanda hídrica, se produce la recarga del acuífero (Figura 5).

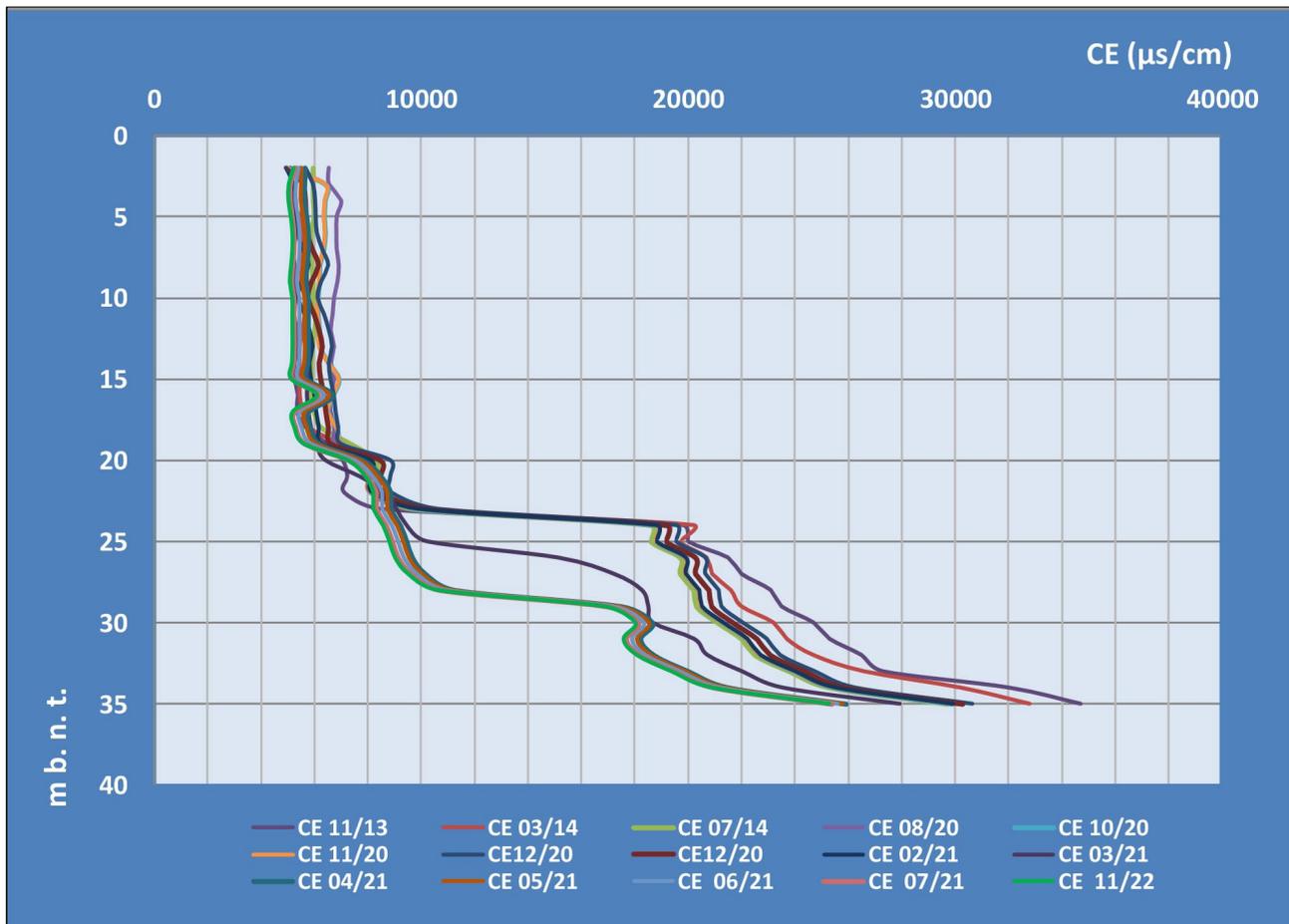


Figura 3: Perfilajes de conductividad eléctrica mensual registradas en la perforación de monitoreo costero (m b. n. t.: metros bajo el nivel del terreno).

El análisis de los volúmenes de recarga y agotamiento para la serie 2021/2022 permite advertir que durante los eventos 1, 2 y 3 el acuífero presentaba valores de agotamiento, mientras que, en abril de 2022, las precipitaciones acumuladas (180 mm) resultaron suficientes como para generar excedentes hídricos resultando en un valor de recarga de 1,10 hm³. De este modo se infiere que el aumento del volumen almacenado podría estar ejerciendo una mayor presión hidráulica sobre la IADAS evitando el desplazamiento de esta hacia el continente.

Un proceso que resulta de interés es la variación de la temperatura del agua subterránea durante los ascensos de marea. Tal como se muestra en la Figura 6, existe una correlación entre los eventos de marea alta y el incremento de la temperatura registrada en el sensor. Este proceso se verifica para los 3 primeros eventos de marea. Sin embargo, para el cuarto evento, ocurrido durante entre las 6:00 y las 17:00 h, se observa un comportamiento inverso al descrito anteriormente.

Este comportamiento podría vincularse a las condiciones climáticas dominantes vinculadas con el viento durante el ascenso de la marea (Figura 7). Durante los 3 primeros eventos los vientos no superaron los 20 m/s, mientras que para el cuarto evento los mismos superaron por amplia mar-

gen dicha intensidad. En este sentido, para el cuarto evento, y de acuerdo a los datos aportados por la estación meteorológica de Pinamar, los vientos predominantes se produjeron del cuadrante WSW alcanzando valores medios de 20 m/s y ráfagas mayores a 30 m/s a las 11:30 a.m. Se infiere que esta condición podría haber generado una mezcla de las aguas oceánicas más profundas y frías con las aguas superficiales más cálidas. De este modo el desplazamiento de dichas aguas, más frías, hacia el continente habría generado una disminución de las temperaturas registradas en el sensor.

DISCUSIÓN

La investigación llevada a cabo permitió identificar cuáles son los principales factores que condicionan el comportamiento de la IADAS en el sector costero de Pinamar. Si bien no existen investigaciones previas y específicas como las aquí desarrolladas, los primeros antecedentes vinculados a la posición de la IADAS se remontan a las investigaciones llevadas a cabo por el Consejo Federal de Inversiones (1993) en donde mencionan la existencia de una interfase de alto ángulo para la localidad de Pinamar. Los resultados obtenidos permiten inferir la condición anteriormente mencionada solo se cumple para los primeros 20 metros de profundidad,

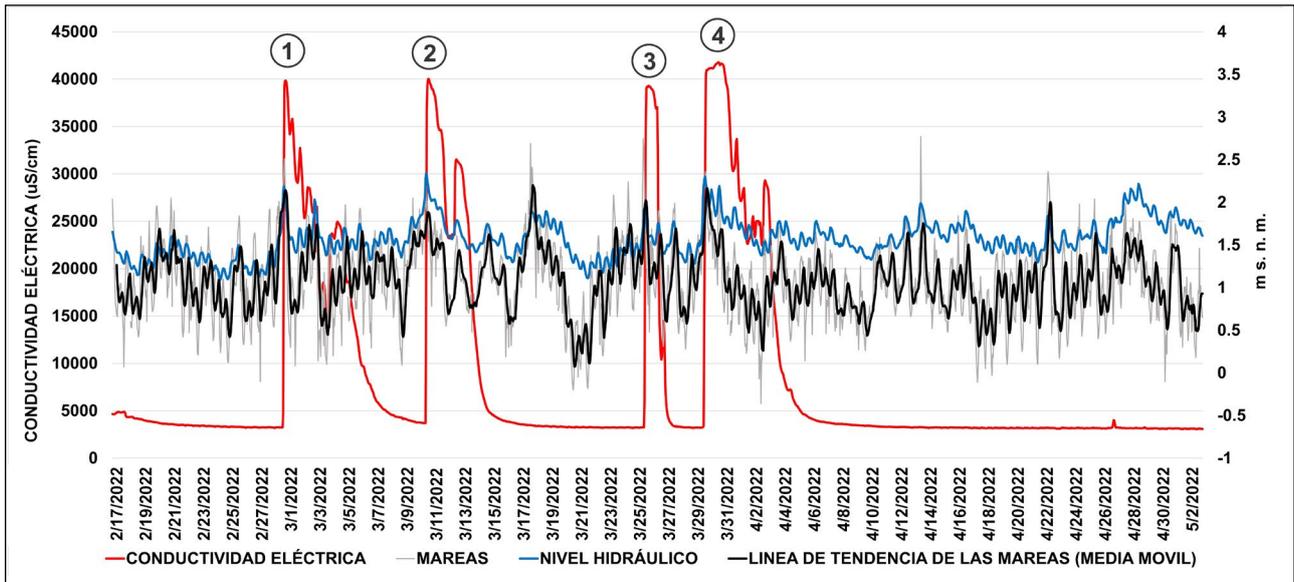


Figura 4: Registros horarios de CE, mareas y nivel hidráulico obtenidos a partir de los sensores instalados en la perforación de monitoreo de la IADAS.

Tabla 1. Eventos de ascenso de marea y sus manifestaciones en termino de nivel hidráulico, rangos de variación de la salinidad y tiempos de respuesta hasta alcanza el máximo de CE y el equilibrio.

Fecha y hora	Rango de variación de marea (m s. n. m.)	Rango de variación del nivel hidráulico (m)	Rango de variación CE (µS/cm)	Tiempo de respuesta	Tiempo hasta alcanzar el equilibrio
1/03/2022 8:00 am	0,54 - 2,51	1,47 - 2,17	3.240 - 39.786	2 h	8,5 días
11/03/2022 3:00 am	1,5 - 2,19	1,71 - 2,31	3.697 - 39.603	6 h	5,1 días
26/03/2022 4:00 am	1,13 - 2,75	1,33 - 1,93	3.250 - 38.945	8 h	2,3 días
30/03/2022 11:00 pm	1,15 - 2,36	1,28 - 2,26	3.215 - 41.252	6 h	6,7 días

mientras que en profundidad dicho ángulo tiene a disminuir de manera significativa.

Por su parte, estudios llevados a cabo por Rodrigues Capitulo (2015) para el mismo sector en noviembre de 2013, describen un perfil de conductividad que se inicia con valores cercanos a los 5.100 µS/cm y presenta dos quiebres. El primero de ellos desde 5.000 a 7.000 µS/cm entre los 16 y los 20 m b. b. p., mientras que el segundo se manifiesta con un salto de 8.000 a 19.000 µS/cm entre los 22 y los 24 m b. b. p. a partir de la cual se aprecia un incremento hasta los 35 m b. b. p. con valores cercanos a los de 35.000 µS/cm aproximadamente. Similares patrones de comportamiento se verificaron en los relevamientos de marzo y julio de 2014 aunque con leves cambios particularmente en los registros obtenidos después de los 24 m b. b. p.. No obstante, si bien la morfología general del perfil presenta similares características a lo largo del tiempo se verifica un movimiento lateral particularmente significativo entre los 20 y los 28 m b. b. p.



Figura 5: Valores de recarga y agotamiento obtenidos para el período mayo 2021 a abril 2022.

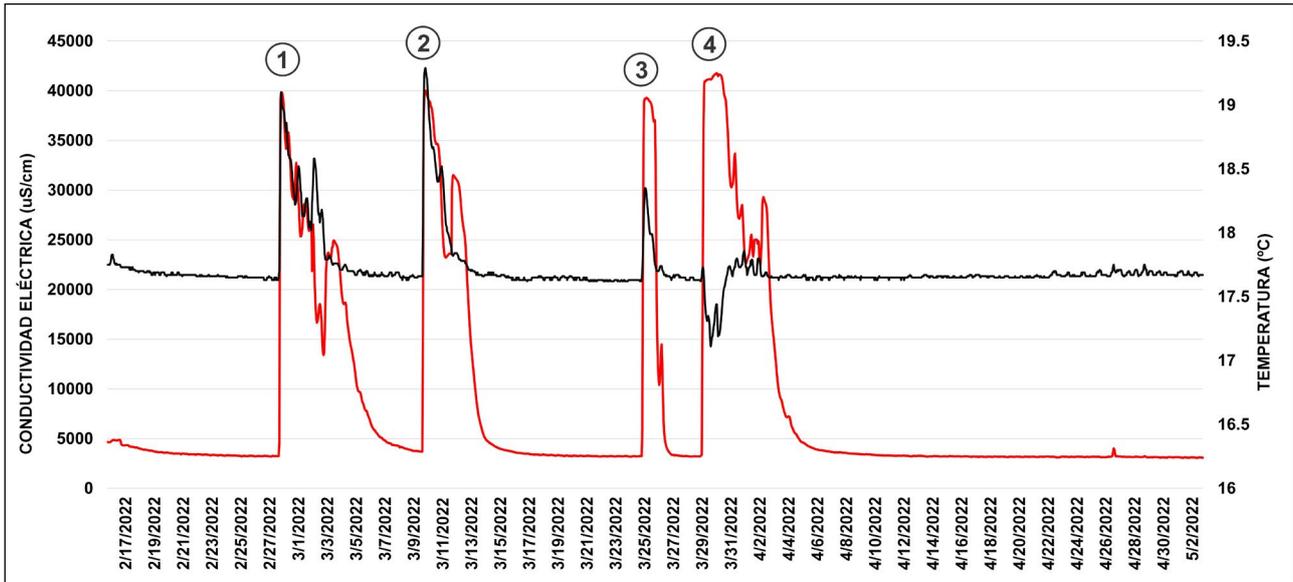


Figura 6: Registros horarios de conductividad eléctrica y temperaturas horarias registrada por el sensor instalado en la perforación de monitoreo de la IADAS.

Esta condición podría estar vinculada con un medio físico de mayor permeabilidad a dicha profundidad el cual podría favorecer el movimiento lateral a dicha profundidad y deberá ser confirmado en futuros estudios.

Asimismo, Rodriguez Capitulo (2018) ya indica que el análisis comparativo de los diferentes perfiles de conductividad en todo el frente costero del Partido de Pinamar permite identificar la influencia de los procesos de explotación intensiva la cual se relaciona con el avance del frente salino. Esta condición se manifiesta a partir de abruptos cambios de la conductividad eléctrica en profundidad en las localidades de Pinamar, Valeria del Mar y Cariló.

Considerando el grado de impermeabilización, la explotación intensiva y el progresivo aumento de la demanda hídrica vinculada al avance de la urbanización, resulta coherente con la interpretación realizada en este trabajo en cuanto refiere a las condiciones de estabilidad de la IADAS en relación a los procesos de recarga planteados en el presente trabajo.

Si bien en este trabajo se ha realizado el análisis detallado de 4 eventos vinculados a condiciones de pleamar y su relación con los variables asociadas al ascenso de la marea,

la recarga o los vientos dominantes durante dichos eventos, no ha sido posible explicar los motivos por los cuales no se detecta un incremento abrupto de la conductividad en eventos similares como los registrados durante el mes de abril de 2022. En este sentido, una posible explicación del aumento abrupto de la conductividad esté relacionada con la combinación de 2 o más factores que operan de forma simultánea, es decir, por ejemplo, que el aumento de la marea combinado con los vientos intensos del sector W actúen de manera conjunta generando un mayor avance del frente salino hacia el continente. Asimismo, no se descarta que el efecto del oleaje de manera conjunta con el ascenso de la marea pueda estar condicionando el comportamiento de la IADAS.

Por otra parte, si se considera el análisis comparativo de los comportamientos hidroquímico e isotópico de la IADAS realizado Carretero et. al (2022), en donde verifican distintas configuraciones para la curva de conductividades en profundidad en otros sectores del Partido de Pinamar, es posible que, la mayor evapotranspiración debido a una mayor cobertura forestal (Rodriguez Capitulo et. al, 2018), o la explotación intensiva vinculada a la existencia de campos de golf Pinamar Norte y Cariló, la mayor demanda vinculada a el crecimiento de desarrollos urbanos y complejos hote-

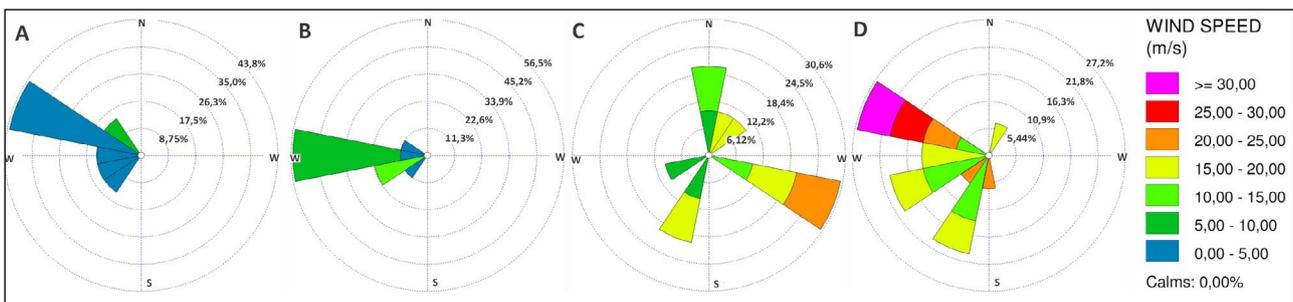


Figura 7: Diagrama de rosas elaborado a partir de registros de dirección e intensidad de extremos durante los eventos de pleamar. En A) Evento 1, B) Evento 2, C) Evento 3 y D) Evento 4. Elaboración propia.

leros de gran envergadura ubicados sobre el sector costero (Rodrigues Capítulo et. al, 2017), sean factores que deban considerarse en futuros estudios.

CONCLUSIONES

Tal como ha sido demostrado en este artículo, el estudio de la relación entre el agua dulce y salada resulta fundamental para comprender la dinámica de los acuíferos ubicados en sectores costeros. En este trabajo, se analizaron las variaciones de las conductividades en profundidad lo cual permitió reconocer la morfología general, el comportamiento y el carácter transicional de la zona de interfase agua dulce – agua salada.

A una escala de mayor detalle temporal se verifica el efecto dominante por parte de las mareas y cómo esta última influye sobre la salinidad, la temperatura y el nivel hidráulico. Asimismo, el carácter permeable de los sedimentos arenosos que componen el subsuelo se pone de manifiesto a partir una rápida respuesta ante cada evento de marea alta el cual se produce en términos de horas, mientras que el tiempo de retardo para alcanzar nuevamente el equilibrio requiere de al menos 2 a 8 días.

En términos generales, se interpreta que la IADAS se caracteriza por un gran dinamismo el cual se encuentra relacionado con múltiples factores que actúan de manera simultánea generando el avance y retroceso de la IADAS.

La estimación de los valores de recarga y agotamiento mensual permite inferir el efecto de la carga hidráulica del agua dulce sobre la zona de interfase el cual otorga una mayor estabilidad ante un evento de marea alta. Asimismo, las condiciones climáticas dominantes durante el ascenso de las mareas constituyen un factor que condiciona en mayor o menor medida la magnitud del avance temporal de la interfase hacia el continente.

En virtud de los resultados obtenidos, y considerando el grado de impermeabilización que la localidad de Pinamar presenta y el efecto que ejerce la recarga en la dinámica de la IADAS, la planificación urbana deberá priorizar e implementar la creación de sitios que favorezcan los procesos de infiltración in situ para incrementar el almacenamiento subterráneo.

Si bien ha sido posible encontrar patrones de comportamiento que se manifiestan de manera periódica, la falta de estudios específicos antecedentes relacionados con la temática abordada, ponen de manifiesto la necesidad de contar con registros de mayor escala temporal que permitan definir con mayor grado de precisión cual es la combinación de factores que generan el avance del frente salino en un u otra condición.

Por último, se concluye que el monitoreo sistemático de las conductividades, las temperaturas, los niveles hidráulicos y su relación con las mareas constituyen indicadores eficaces para evaluar el estado, la evolución de las reservas de agua dulce y el control del avance del frente salino y deben ser considerados como un insumo básico para una adecuada gestión de los recursos hídricos en sectores costeros.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las autoridades y personal de la Secretaría de Paisaje y Medio Ambiente del Municipio de Pinamar, por la colaboración brindada durante el desarrollo del estudio.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Todos los autores contribuyeron a la concepción y el diseño del estudio. La preparación del material, la recopilación y el análisis de datos fueron realizados por Leandro Rodrigues Capítulo, Silvina Carretero, Maximiliano Fabiano, Samanta Anguiano y Eduardo Kruse. El primer borrador del manuscrito fue escrito por Leandro Rodrigues Capítulo y todos los autores comentaron las versiones anteriores del manuscrito. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final.

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declaran que no existe algún conflicto de interés.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carretero, S., Rapaglia, J., Rodrigues Capítulo, L., y Kruse, E. (2019). Variability of 222Rn in the sandy aquifer of Buenos Aires coast. *Environmental Earth Sciences*, 80 (3): 1-14.
- Carretero, S. C., Capítulo, L. R., Dapeña, C., Fabiano, M., & Kruse, E. (2022). A chemical and isotopic approach to investigate groundwater dynamics in a coastal aquifer. *Catena*, 213, 106229.
- Consejo Federal de Inversiones. (1993). Estado Actual de las Fuentes Subterráneas en Pinamar y Villa Gesell. Primera Etapa: Pinamar.
- González N. (2005). Los ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Buenos Aires. *Geología y Recursos Minerales de la*

Provincia de Buenos Aires. *XVI Congreso Geológico Argentino*, Cap. XXII: 359 - 374.

- Kruse E. y Mas-Plá, J. (2009). Procesos hidrogeológicos y calidad del agua en acuíferos litorales. En Mas-Pla, J., & Zuppi, G. M. (Eds), *Gestión ambiental integrada de áreas costeras*; p:29-53. España: Rubes Editorial.
- Parker G. y Violante R. A. (1989). Geología y Geomorfología. Regiones I y II. Punta Rasa - Faro Querandí. Provincia de Buenos Aires. *Convenio Consejo Federal de Inversiones y Servicio de Hidrografía Naval, Informe final*. 141 pp.
- Perdomo S., Rodrigues Capítulo L., Kruse E. E. y Ainchil, J. E. (2013). Aplicación de tomografías eléctricas en la configuración del acuífero costero en un sector oriental de la Provincia de Buenos Aires. *VIII Congreso Argentino de Hidrogeología y VI Seminario Latinoamericano sobre Termas Actuales de la Hidrología Subterránea*, p: 57-62.
- Rodrigues Capítulo, L. (2015). Evaluación geohidrológica en la región costera oriental de la Provincia de Buenos Aires. Caso de estudio: Pinamar (Tesis de doctorado). Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina.
- Rodrigues Capitulo, L., Carretero, S. C., & Kruse, E. E. (2017). Comparative study of urban development and groundwater condition in coastal areas of Buenos Aires, Argentina. *Hydrogeol J* 25, 1407–1422 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1544-x>
- Rodrigues Capitulo, 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". p: 135-142. Salta; Argentina, p. 135 – 142. Ed. Universidad de salta.
- Rodrigues Capítulo, L., Carretero, S. C., & 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(3), 74.
- Thornthwaite C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*. 38 (1): 55-94