



# Evaluación geohidrológica del sector costero ubicado entre Bahía Bustamante y Camarones, Chubut, Argentina

**María del Pilar ÁLVAREZ<sup>1</sup>, Pablo BOUZA<sup>2</sup>, Nicolás SCIVETTI<sup>2</sup>, Eleonora CAROL<sup>3</sup>, Sebastián RICHIANO<sup>2</sup>, Tomás BOSCO<sup>1</sup>, Lina VIDELA<sup>1</sup>, y Andrés BILMES<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Instituto Patagónico para el Estudio de los Ecosistemas Continentales (IPEEC), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco, Argentina.

<sup>2</sup>Instituto Patagónico de Geología y Paleontología (IPGP-CONICET), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.

<sup>3</sup>Centro de Investigaciones Geológicas (CIG), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

Email: alvarez@cenpat-conicet.gob.ar

**Editor:** María Romina Onorato

Recibido: 10 de junio de 2023

Aceptado: 13 de noviembre de 2023

## RESUMEN

En zonas costeras áridas, el agua subterránea tiende a ser de características salobres y los cordones litorales suelen ser sitios donde se generan lentes de agua dulce. A partir del estudio hidrogeológico y geoelectrico del área costera entre Bahía Bustamante y Camarones, este trabajo analizó la factibilidad de reservorios de lentes de agua dulce en cordones litorales que existen en esa zona. El trabajo incluyó además un relevamiento regional de fuentes de agua (conductividad eléctrica y nivel freático). Sobre los cordones litorales pleistocenos y holocenos se realizaron sondeos eléctricos verticales y calicatas para la descripción de suelos y ensayos de infiltración. Los estudios efectuados indican que los cordones holocenos presentan condiciones hidrológicas más propicias que los pleistocenos para la infiltración de agua de lluvia y su almacenamiento en forma de lente de agua dulce. No obstante, no se ha identificado la presencia de lentes de agua dulce en ninguno de los cordones litorales explorados. El desarrollo de suelos con horizontes argílicos y cálcicos es probablemente el principal motivo por el cual los cordones pleistocenos no constituyen zonas de recarga preferenciales. Por su parte, si bien los cordones holocenos presentan características favorables para alojar lentes de agua dulce, el reducido desarrollo areal de estas geoformas podría ser un condicionante para el desarrollo de reservorios de agua dulce dentro de estas geoformas. Los resultados obtenidos evidencian la necesidad de realizar estudios hidrogeológicos de mayor detalle que permitan verificar de manera más determinante el funcionamiento geohidrológico del área.

**Palabras clave:** sondeos eléctricos verticales, zonas áridas, recursos hídricos

## ABSTRACT

*Geohydrological assessment of a coastal sector located between Bahía Bustamante and Camarones, Chubut, Argentina.*

In arid coastal zones, groundwater is usually brackish and littoral ridges are often locations where freshwater lenses are generated. Based on the hydrogeological and geoelectric study of the coastal area between Bahía Bustamante and Camarones, this research analyzed the feasibility of freshwater lens reservoirs in littoral ridges existing in that zone. The study also included a regional survey of water sources (electrical conductivity and phreatic level). Vertical electrical soundings, soil description, and infiltration tests were conducted on Pleistocene and Holocene littoral ridges. The study indicates that Holocene littoral ridges exhibit more favorable hydrological conditions compared to Pleistocene littoral ridges for the infiltration of rainfall and the formation of freshwater lenses. However, the presence of freshwater lenses has not been identified in any of the explored littoral ridges. The development of soils with argillic and calcic horizons is likely the primary reason why the Pleistocene ridges do not serve as preferential recharge zones. While the Holocene ridges exhibit favorable characteristics for hosting freshwater lenses, their limited areal extent may be a limiting factor for their

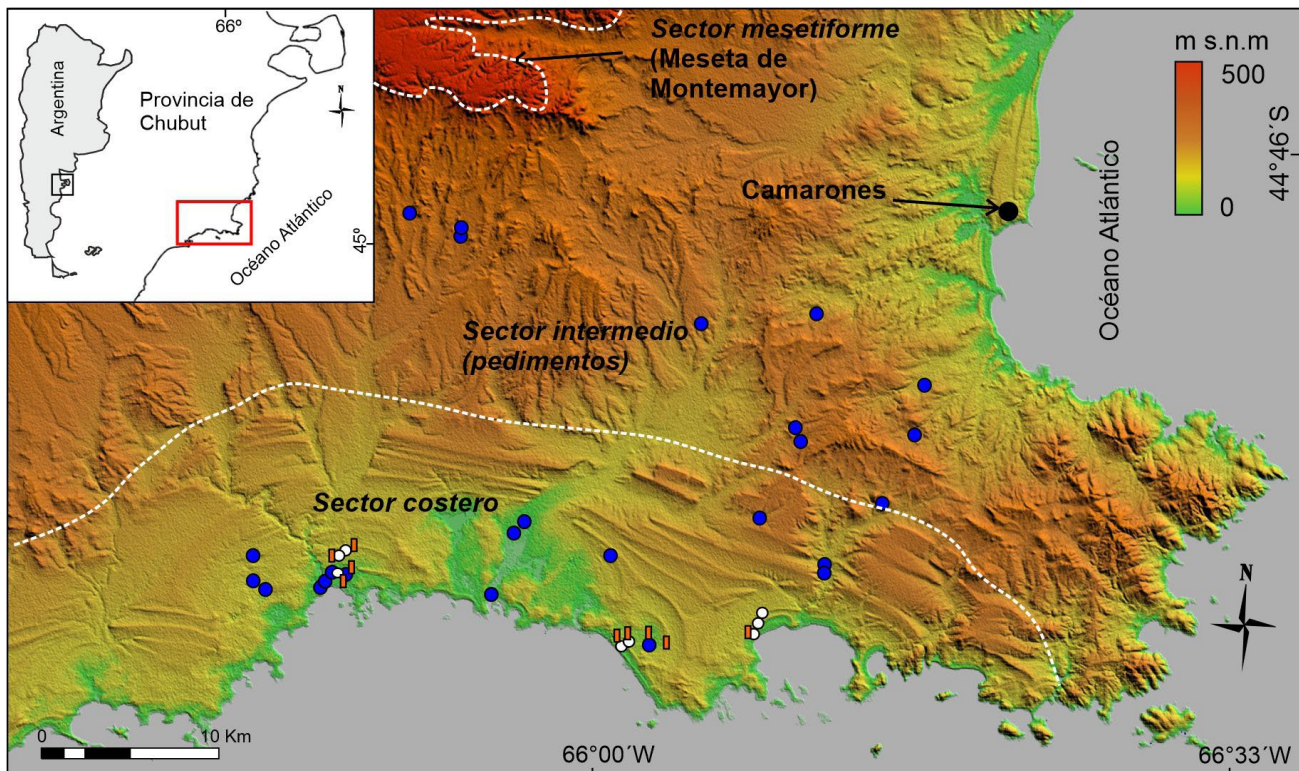
development. The obtained results highlight the necessity for further detailed hydrogeological studies to verify the geohydrological processes in the area.

**Keywords:** vertical electrical soundings, arid zones, water resources.

## INTRODUCCIÓN

Los cordones litorales se componen de sedimentos con texturas medias a gruesas, constituyendo ambientes hidrogeomorfológicos de alta permeabilidad, que favorecen la infiltración de la lluvia y su acumulación en forma de lentes subterráneas de agua dulce (Carol et al. 2021, Nielsen et al. 2007, Wallis et al. 1991). En áreas costeras, donde suele dominar el agua subterránea salina, la presencia de lentes de agua dulce representa un recurso hídrico vital para el desarrollo poblacional, especialmente en zonas áridas donde la disponibilidad de agua en cantidad y calidad es escasa (Al-rashidi y Bailey 2020, Custodio 2010). En la costa patagónica argentina, las oscilaciones del nivel de mar que existieron durante el período Cuaternario dieron lugar a la depositación de distintas secuencias de cordones litorales (Feruglio 1950, Aguirre et al. 2019) que han quedado preservados gracias al levantamiento regional que existe en la Patagonia extrandina

desde el neógeno (Pedoja et al. 2011). Particularmente en la costa de la provincia de Chubut, al sur de la localidad de Camarones (Fig. 1), existe una secuencia de cordones litorales acumulados durante el Pleistoceno y el Holoceno los cuales han sido asignados al MIS 1, MIS 5, MIS 7 y >MIS 9 (Schellmann y Radke, 2010, Fucks et al. 2018). Estos cordones están constituidos por secuencias de gravas con distintos porcentajes de arena, limo y restos de moluscos intercalados (Aguirre et al. 2006). En esta región árida, con precipitaciones anuales entre 200 y 300 mm (período 1991-2020, SMN 2023) y sin cursos de agua permanentes, el abastecimiento de agua de la población rural se realiza mediante la captación de diferentes fuentes (i.e. tajamares, molinos y vertientes en valles de cursos efímeros), que en los sectores más cercanos a la costa presenta salinidades elevadas (Álvarez et al. 2022). En otras zonas se ha reconocido que, si bien los cordones costeros son geoformas que favorecen la presencia de lentes de agua dulce, variaciones en la granulometría y textura de estas geoformas o en los tipos de suelos desarrollados en la



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio. En puntos azules se representan los sitios de monitoreo de agua, en blanco la localización de los sondeos eléctricos verticales (SEVs) y en barras naranjas las calicatas y ensayos de infiltración en suelos. Se indica con línea punteada negra la delimitación de las regiones geomorfológicas sector costero y sector intermedio según Lema et al. (2001) y Fucks et al. (2018).

superficie de las mismas pueden afectar la calidad y desarrollo de estas lentes (Carol et al. 2021). Si bien la granulometría de los sedimentos superficiales es un condicionante del proceso de infiltración, el contenido de carbonatos pedogenéticos y la acumulación de arcillas son, en regiones áridas, los principales condicionantes de la recarga y de los procesos salinizadores (Álvarez et al. 2020). En este contexto y frente a la necesidad de contar con nuevas fuentes de agua de baja salinidad, en un sector donde el recurso hídrico es escaso, el objetivo del trabajo fue explorar hidrogeológica y geoeléctricamente el área costera al sur de la localidad de Camarones a fin de evaluar la factibilidad de los cordones litorales como posibles reservorios de lentes de agua dulce.

## MARCO GEOLÓGICO

La geología del sector costero localizado al sur de Camarones está caracterizada por la presencia de una secuencia de cordones litorales, pedimentos y afloramientos rocosos (Fucks et al. 2018). La estratigrafía sintética del área (Lema et al. 2001) inicia con el Complejo Marifil, de naturaleza volcánica ácida y edad jurásica. Sobre este sustrato se apoyan en discordancia sucesiones sedimentarias marinas y continentales cretácico – cuaternarias. Los depósitos cretácicos y paleógenos se componen de las Formación Salamanca, Grupo Río Chico, Grupo Sarmiento y Patagonia. La secuencia cenozoica continúa con los depósitos continentales mio-pliocenos y depósitos conglomerádicos pliocenos que forman la meseta de Montemayor (Lema et al. 2001). Los depósitos cuaternarios constituyen terrazas fluviales, bajadas aluviales de pie de monte y niveles de pedimentación, estos últimos ubicados a distintas alturas. En el ambiente costero el cuaternario está representado por distintos sistemas de cordones litorales con

rangos de edades entre el Pleistoceno superior y el Holoceno. Al Holoceno tardío corresponden las acumulaciones aluviales, vinculadas a la red de drenaje actual y los depósitos asociados al cordón litoral más moderno.

La geomorfología de la zona, según Lema et al. (2001), puede ser subdividida en tres sectores (Fig. 1): El sector mesetiforme, el sector intermedio y el sector costero. El sector mesetiforme, presenta una altitud media de 300 m s.n.m. y una suave pendiente hacia el este. Culmina en una escarpa de erosión recortada cuya altura ronda los 50 m s.n.m. (Fucks et al. 2018). Es una extensa superficie representada por una delgada capa de gravas y arenas. El sector intermedio se encuentra comprendido entre la Meseta de Montemayor y la franja costera y está representado principalmente por una secuencia de pedimentos que fueron elaborados a partir de los depósitos cenozoicos. En los niveles de pedimento, como consecuencia del rejuvenecimiento, se reconoce un relieve de lomadas bajas, suaves o moderadamente empinadas. En este ambiente la red de drenaje, de régimen efímero, presenta un diseño dendrítico bien desarrollado. El sector costero está representado mayormente por alternancia de costas recortadas, (generalmente altas, con acantilados, caletas, puntas o cabos) y bahías (costas bajas con amplias entradas de mar). En las cuencas de drenaje que escurren hacia las bahías se reconocen relictos de terrazas fluviales en la parte superior y en la parte inferior cordones litorales pleistocenos y holocenos paralelos a la línea de costa que generalmente están separados por depresiones (paleoalbéferas) ocupadas por depósitos aluviales arcillosos o lagunas efímeras. Los cordones pleistocenos han sido asignados a los estadios MIS 5, MIS 7 y  $\geq$  MIS 9 (Fucks et al. 2018). Los cordones holocenos (MIS1), se desarrollan en una delgada franja próxima a la costa con cotas inferiores a los 10 m s.n.m. (Fucks et al. 2018).

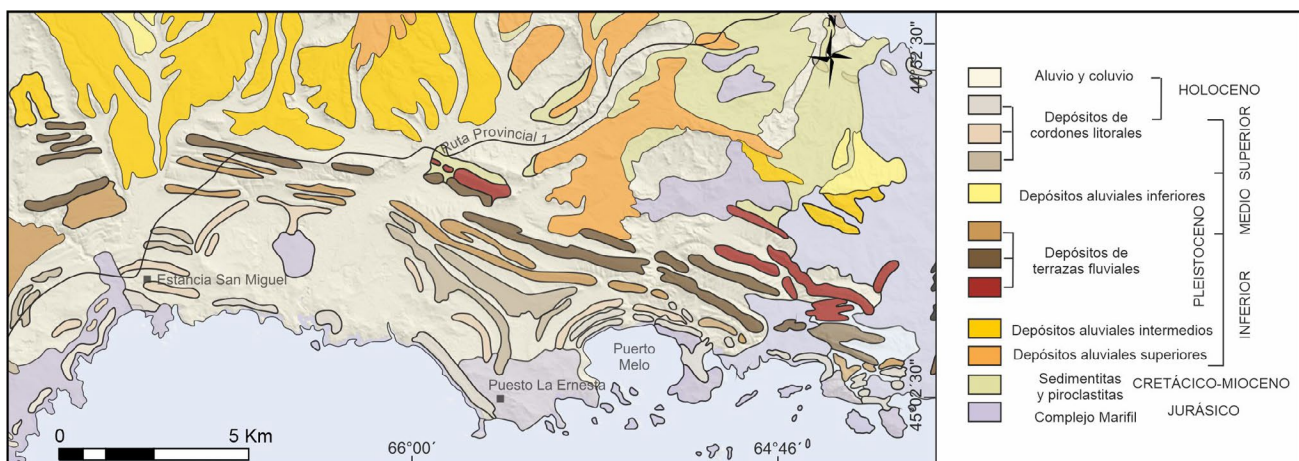


Figura 2. Mapa geológico del área de estudio (modificado de Ardolino et al. 2008).

## METODOLOGÍA

Sobre la base de la interpretación de modelos de elevación digital del terreno (MDE-Ar-30m, IGN2021), imágenes satelitales (Google Earth) y relevamiento de campo, se realizó una identificación de los tipos de suelo asociados a las geoformas mayores, especialmente en el sector más próximo a la costa, donde se encuentran los cordones litorales. Se realizaron calicatas para la descripción de los primeros 50 cm de suelo, atendiendo principalmente a variables que impactan sobre la permeabilidad de los depósitos (granulometría y grado de cementación). Las descripciones morfológicas de los perfiles de suelo se realizaron siguiendo la propuesta de Schoeneberger et al. (2002). La distribución del tamaño de partículas (sistema USDA) se determinó por el método de la pipeta, previa eliminación de materia orgánica con peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) al 30% y de carbonatos y sales solubles con una solución buffer de acetato de sodio ajustado a pH 5 (Gee y Bauder 1986). Asimismo, se determinó, sobre el extracto de saturación, la conductividad eléctrica de los suelos a fin de evaluar la presencia de sales solubles. Próximo a cada calicata se llevaron a cabo ensayos de infiltración con el método del anillo simple (Chowdary et al. 2006) a fin de poder determinar la capacidad de infiltración de los sedimentos superficiales. La reconstrucción del flujo subterráneo regional y la distribución espacial de su salinidad, se realizó a partir de un relevamiento de las fuentes de agua superficiales y subterráneas (molinos, vertientes, pozos, perforaciones, lagunas,

arroyos, canales de marea) dónde se midió *in situ* con equipo multiparamétrico Lutron® la conductividad eléctrica, como indicador de la salinidad. La profundidad del nivel freático se determinó con sonda manual.

La prospección geoelectrica se realizó en el sector de los cordones litorales a fin de ampliar la información hidrogeológica de ese sector. Se utilizó un equipo GEOMETER MPX-400 Ponti Electronics relevándose 8 sondeos eléctricos verticales con un tendido eléctrico paralelo al rumbo de los cordones, utilizando un arreglo electródico de tipo Schlumberger y un espaciado máximo entre los electrodos de corriente (AB) de 100 metros. Los sondeos eléctricos verticales se dispusieron conformando tres transectas, todas ellas con rumbos semi-perpendiculares a la elongación morfológica de los cordones litorales. Los datos de resistividades aparentes fueron procesados con el programa IPI2Win para determinar las resistividades “verdaderas” y el espesor de las capas geoelectricas. Los 8 sondeos eléctricos verticales utilizados para la interpretación presentaron un error de ajuste menor a 6% respecto a la curva teórica.

## RESULTADOS

### Suelos

Los suelos descriptos se localizan en las unidades geomorfológicas de sistemas de cordones litorales pleistocenos (Figs. 3a y 4), holocenos (Figs. 3c y 4) y en las áreas adyacentes. Estas últimas corresponden a sistemas vinculados a

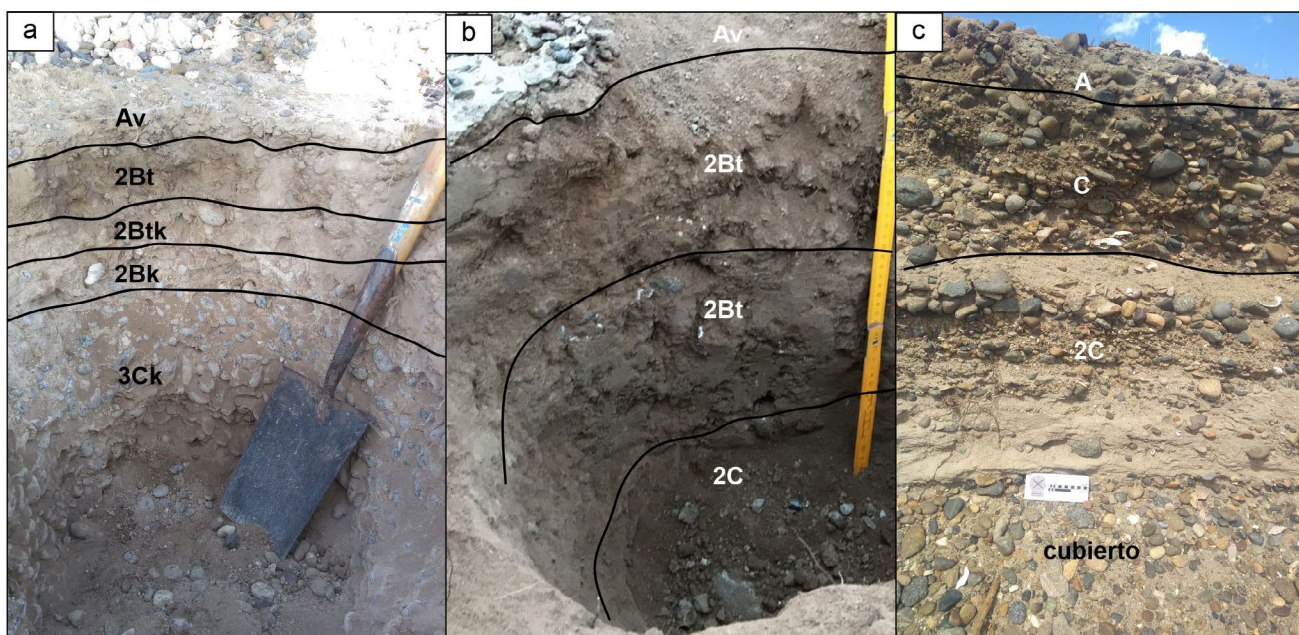
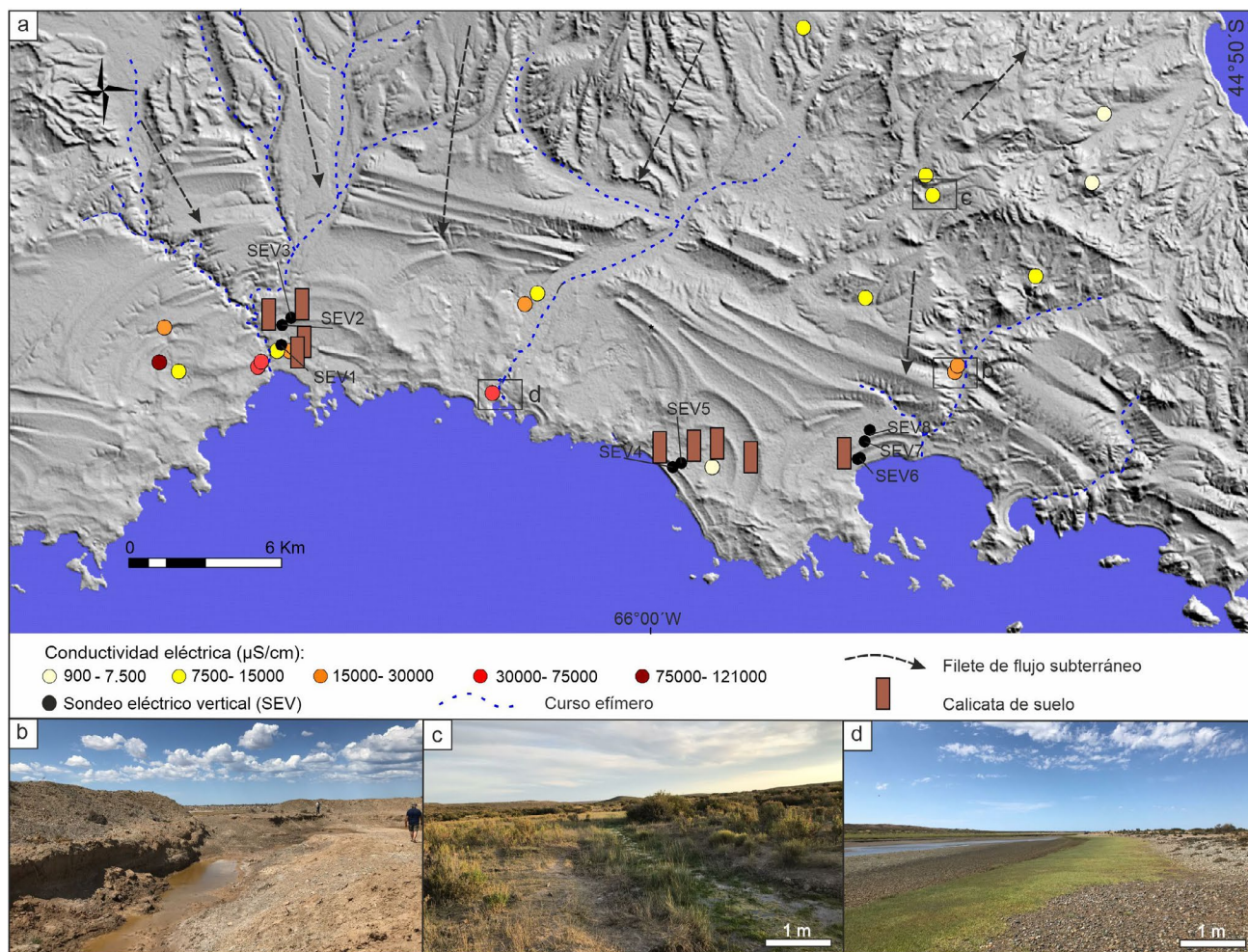


Figura 3. Suelos: a) Perfil de suelo en cordón pleistoceno; b) Perfil de suelo en bajo endorreico; c) Perfil de suelo en cordón holoceno



**Figura 4.** Hidrodinámica y salinidad del agua subterránea: a) Mapa del flujo subterráneo regional. Se indica para cada punto el rango de la salinidad del agua; b) Vista del afloramiento de agua subterránea en valle fluvial; c) Vista de vertiente en curso efímero; d) Vista del canal de marea en desembocadura de valle fluvial en el mar.

antiguas lagunas costeras, hoy transformadas en bajos endorreicos (Figs. 3b y 4), y a bajadas aluviales de piedemonte.

Los suelos desarrollados en cordones litorales pleistocenos presentan texturas franco-limosas y fueron clasificados como Calciargids y Haplocalcids típicos (Soil Survey Staff 2014). Ambos se distribuyen espacialmente en forma alternada en función de la micro-topografía. La forma de los perfiles son Av-2Bt-2Btk-2Bk-3Ck o A-C-2Bk-3Ck. Es frecuente observar además horizontes gypsicos asociados a los horizontes 3Ck, en los cordones litorales (Fig. 3a). Respecto al contenido de sales solubles, los horizontes de estos suelos presentan valores que van desde 6650  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 1990  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con los valores más elevados en los primeros centímetros del suelo. Los desarrollados en los bajos endorreicos (paleoalbéferas) son de tipo Haplargids típicos con horizontes A- 2Bt1-2Bt2-2C (Fig. 3b). En estos suelos, los contenidos de sales varían entre 14400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 57300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Por último, los suelos desarrollados en las crestas de los cordones litora-

les holocenos son tentativamente Torriorthents típicos, cuyos perfiles son de tipo A-C-2C, con texturas predominantemente arenosas, sin estructura y consistencia suelta. La salinidad de sus horizontes varía entre 850 y 231  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , registrándose la mayor salinidad en los primeros centímetros del suelo. El material parental de estos suelos contiene abundantes gravas obladas y frecuentes fragmentos de conchillas típicas de los depósitos litorales (Fig. 3c).

Respecto de la capacidad de infiltración de los suelos desarrollados sobre las distintas geoformas, aquellos asociados a los bajos de intercordón presentan tasas de infiltración menores a 5 mm/h. Los suelos que se desarrollan sobre los cordones pleistocenos presentan tasas de infiltración que varían entre 5 y 13 mm/h mientras que los suelos de los cordones holocenos presentan tasas de infiltración del orden de los 26 mm/h. En los sitios donde existe un manto arenoso inconsolidado superficial (Sondeo eléctrico vertical 4, Fig. 4) la tasa de infiltración es muy elevada (aproximadamente 315 mm/h).

## Hidrodinámica y salinidad del agua subterránea

Las mediciones de la profundidad del agua subterránea indican que la misma se encuentra entre los pocos cm desde la superficie y los 24 m, registrándose las mayores profundidades en los cordones litorales más elevados y las menores en los valles de los arroyos, donde en ocasiones aflora generando vertientes o bolsones de agua (Fig. 4a, b, c). Estos valles, dadas las características climáticas áridas de la región, presentan siempre cursos de agua de tipo efímeros que en sus desembocaduras en el mar se convierten en canales de marea con marismas asociadas (Fig. 4d).

La reconstrucción de los niveles freáticos indica que el mismo varía entre los 170 m s.n.m. en el sector localizado al norte de la zona y los 5 m s.n.m. en el sector más cercano a la costa. El flujo subterráneo se define así desde el sector norte hacia el sur oeste y hacia el noreste, marcando una divisoria de aguas con dirección NO a SE, una descarga regional sobre las líneas de costa y local en los valles fluviales (Fig. 4).

El relevamiento del agua de molinos, pozos de gran diámetro excavados en los bajos, bolsones, vertientes y marisma, indica que en el área en general existen aguas entre salinas y salobres, llegando en casos a hipersalinas. La salinidad, expresada como conductividad eléctrica del agua, presenta en los sectores topográficamente más bajos asociados a los cordones litorales, los bajos intercordones, los valles y los canales de mareas, valores entre 7500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 121000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  siendo lo más frecuente encontrar valores entre 30000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 75000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Fig. 4). Dentro de este sector, el valor más elevado (121000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) se encontró en un pozo desarrollado en un bajo endorreico donde abundaban los precipitados salinos en superficie siguiéndole en salinidad las mues-

tras provenientes de los canales de marea. Por otro lado, en la zona alta del área, asociada a los niveles de pedimento y los afloramientos rocosos, las salinidades registradas son en conjunto menores, con valores entre 4700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 15000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Fig. 4a).

## Sondeos eléctricos verticales

En el Cuadro 1, se observan los resultados obtenidos para los sondeos eléctricos verticales (SEV) realizados. Para los SEV 1, 2, 4, 5 y 6 (Cuadro 1) se puede apreciar, la existencia de un nivel de variada resistividad—Capa 1, (entre 14.6 y 989  $\Omega\text{m}$ )— interpretado como suelos con diferente participación de arenas, limos y arcillas, seguido por un nivel de resistividades elevadas —Capa 2, (entre 1171 y 6847  $\Omega\text{m}$ )—; cuyo espesor varía entre 1.21 y 12.73 m. Esta capa se interpreta como depósitos de una zona no saturada compuesta por gravas con diferentes porcentajes de matriz arenosa. El límite inferior de la Capa 2, está representado por un nivel de baja resistividad —Capa 3, (entre 2.48 y 19.9  $\Omega\text{m}$ )— interpretada como una zona saturada con aguas salobres. Dentro de estos SEVs es posible diferenciar aquellos de edad holocena de los pleistocenos, dado que los primeros presentan una Capa 1 con mayor resistividad (entre 740 y 1306  $\Omega\text{m}$ ).

Para los SEV 3, 7 y 8 (Cuadro 1) no se reconocen capas de elevada resistividad. Inician, en general, con una capa de baja resistividad —Capa 1, (entre 1.95 y 264  $\Omega\text{m}$ )— atribuida a sedimentos arcillosos con cierta participación de arenas seguidas por una capa con resistividades bajas a moderadas —Capa 2, (entre 4.92 y 404  $\Omega\text{m}$ )—; interpretada como depósitos arcillosos a arenosos de la zona no saturada. El límite inferior de la Capa 2 en estos SEV, también se encuentra representado por un nivel de baja resistividad —Capa 3, (en-

**Cuadro 1.** Resistividades y profundidades de las diferentes capas geoelectricas reconocidas en los sondeos eléctricos verticales (SEV). Las resistividades están expresadas en  $\Omega\text{m}$  y las profundidades en metros.

SEV	SEV 1		SEV 2		SEV 3		SEV 4	
	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	d (m)	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	d (m)	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	d (m)	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	d (m)
Capa 1	740	1	372	1	1.95	0.5	221	3.17
Capa 2	1171	4.73	1924	6.2	90	4	2330	15.9
Capa 3	16.1		19.9		3		8.96	
Capa 4								

SEV	SEV 5		SEV 6		SEV 7		SEV 8	
	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	d (m)	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	d (m)	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	d (m)	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	d (m)
Capa 1	14.6	1.51	989	1.03	264	2.07	6.06	1.2
Capa 2	1199	6.48	6847	2.24	404	19.1	4.92	6.32
Capa 3	2.48		1079	6.85	3.09		32.4	14.3
Capa 4				4.19				

tre 1.7 y 3.09  $\Omega$ m) interpretada como una zona saturada con aguas salobres.

## DISCUSION

En función de los resultados obtenidos dentro del área de estudio, es posible identificar diferencias en las características geohidrológicas de los cordones litorales pleistocenos y los holocenos (Fig. 5). Los pleistocenos, presentan mayor desarrollo de suelos (Fig. 3a), con desarrollo de niveles argílicos, recubrimientos de carbonatos y calcretes (Calciargids + Haplocalcids) los cuales se asocian a procesos pedogenéticos (Wright y Tucker 1991, Bouza 2012; Bouza 2014). Estos cordones litorales tienen baja capacidad de infiltración y salinidad elevada, principalmente en los horizontes superficiales (Fig. 5). En ellos el agua de lluvia al no poder infiltrarse rápidamente queda retenida en superficie, o en los primeros centímetros del suelo donde se evapora y precipitan sales, proceso que ocurre de manera cíclica provocando la salinización natural del suelo (Vengosh 2003). Cuando las precipitaciones son suficientes las sales son re disueltas y lavadas hacia niveles más profundos o en ocasiones pueden alcanzar el nivel freático y recargarlo con aguas de elevado contenido salino. Por su parte, en los cordones holocenos, localizados a cotas inferiores a los 10 m s.n.m., los suelos se presentan muy poco desarrollados (Torriortents), y no presentan carbonatos pedogenéticos (Fig. 3c). En estos suelos, la capacidad de infiltración es elevada y la salinidad de los horizontes es baja, en comparación con los cordones pleistocenos (Fig. 5).

En regiones áridas, donde los excesos hídricos son muy bajos, la presencia de geoformas constituidas por sedimentos de texturas medias a gruesas y muy poco desarrollo de sue-

los, o con suelos libres de carbonatos pedogenéticos, genera condiciones favorables para que ocurra recarga preferencial (Álvarez et al. 2020, Wang et al. 2015). La presencia del calcretes o cementos calcílicos en los cordones pleistocenos provoca una disminución de la capacidad de infiltración frente a los holocenos. Las velocidades de infiltración en los cordones holocenos son de más del doble que en los pleistocenos y se incrementa en un orden de magnitud en presencia de mantos arenosos. Así, los cordones holocenos, y áreas con mantos arenosos serían las geoformas más propicias para que la recarga por infiltración de agua de lluvia sea efectiva y se generen lentes de agua dulce (Carol et al. 2021). No obstante, en relación a la hidroquímica regional (Fig. 4a), es posible advertir que para la zona de los cordones el agua subterránea es de características principalmente entre salobres y salinas, con conductividades eléctricas entre 15000 y 75000  $\mu$ S/cm, aumentando hacia la zona de descarga con máximos puntuales asociados a canales de marea. Los estudios realizados mediante sondeos eléctricos verticales también indican una zona saturada con aguas salobres, no habiéndose identificado la presencia de lentes de agua dulce. La prospección geoelectrica indica la existencia para los cordones pleistocenos de una capa superficial de baja resistividad acorde a los suelos con mayor desarrollo y con salinidades elevadas (Capa 1, Cuadro 1), seguidos de una capa de alta resistividad, representativa de una zona no saturada con textura gravosa (Capa 2, Cuadro 1), y luego una capa de muy baja resistividad indicativa de la zona saturada con aguas salobres (Capa 3, Cuadro 1). En el caso de los cordones holocenos presentan una capa superficial de mayor resistividad acorde a los suelos con muy poco desarrollo (Capa 1, Cuadro 1) y luego una capa de muy alta resistividad representativa de una zona no saturada con textura gravosa (Capa 2, Cuadro1), seguida

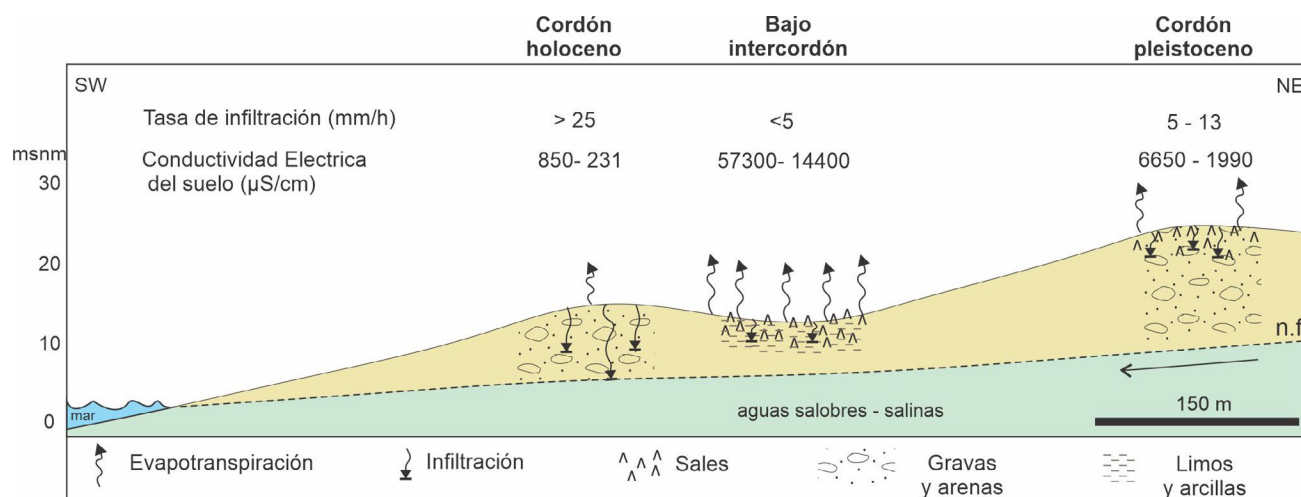


Figura 5. Modelo conceptual de funcionamiento hidrológico.

de una capa de baja resistividad correspondiente a la zona saturada también con aguas salobres (Capa 3, Cuadro 1).

Considerando los resultados de los ensayos de infiltración junto con los de los sondeos eléctricos verticales, el flujo regional y, las mediciones de salinidad del agua y los suelos, se observa que, si bien los cordones litorales holocenos presentan mejores aptitudes para la infiltración y posibilidad de recarga efectiva, no se ha detectado en ellos la presencia de lentes de agua dulce (Fig. 5). Es probable que, la recarga por infiltración de agua de lluvia sobre los cordones holocenos no sea suficiente, debido a las reducidas dimensiones areales que presentan estas geoformas, como para que el agua de infiltración logre desplazar el agua salobre regional hacia abajo y se generen lentes de agua dulce (Fig. 2). A su vez, de existir esta lente, podría ocurrir que el espesor de la misma sea muy delgado y no sea detectable en los sondeos eléctricos verticales. Esto podría deberse, a que la técnica de prospección geoeléctrica utilizada no fuese suficientemente sensible para detectar una delgada lente de agua dulce en una configuración estratigráfica de alto contraste de resistividades (ZNS gravosa en contacto con ZS salobre).

Si bien los cordones litorales holocenos de otras regiones de la costa argentina han sido identificados como reservas de agua dulce mediante métodos directos e incluso indirectos tales como sondeos eléctricos verticales (Carol et al. 2021), se trata de sitios donde las secuencias de cordones presentan dimensiones de varios órdenes de magnitud mayor respecto a los estudiados en la zona entre Bahía Bustamante y Camarones. Frente a las incertidumbres planteadas no se descarta, para la zona estudiada, la potencialidad de los cordones litorales de alojar lentes de agua dulce, resultando necesario intensificar los muestreos en este sector e incluir exploración con perforaciones.

## CONCLUSIONES

En la región estudiada existen numerosos cordones litorales pleistocenos y holocenos que podrían actuar como geoformas propicias para la infiltración del agua de lluvia y su almacenamiento en forma de lente de agua dulce. No obstante, los estudios efectuados no han identificado la presencia de lentes de agua dulce en ninguno de los cordones litorales explorados en la zona costera comprendida entre Bahía Bustamante y la localidad de Camarones. El desarrollo de suelos con horizontes argílicos y cálcicos es probablemente el principal motivo por el cual los cordones pleistocenos no constituyan zonas de recarga preferenciales. Por su parte, si bien los cordones holocenos presentan características favorables

para alojar lentes de agua dulce el reducido desarrollo areal de estas geoformas podría a su vez ser un condicionante para el desarrollo de una lente de agua dulce.

Los resultados obtenidos evidencian la necesidad de realizar estudios hidrogeológicos de mayor detalle que permitan verificar de manera más determinante el funcionamiento geohidrológico del área.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolla en el marco de los proyectos PICT2017-1131, PICT2019-2421, Pampa Azul A10 y PI 1674 de la UNPSJB.

## REFERENCIAS

- Aguirre, M.L. Richiano, S. Y. Negro Sirch, 2006. Palaeoenvironments and palaeoclimates of the Quaternary molluscan faunas from the coastal area of Bahía Vera-Camarones (Chubut, Patagonia), *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 229 (4): 251-286
- Aguirre M.L., Richiano, S., Voelker, A.H.L. Dettman, D.L. Schöne, B.R. Panarello, H.O. Donato, M. Gómez-Peral, L. Castro, L.E. y Medina, R. 2019. Late Quaternary nearshore molluscan patterns from Patagonia: windows to southern southwestern Atlantic-Southern Ocean palaeoclimate and biodiversity changes. *Global Planetary. Change* 181: 102990
- Álvarez, M. del P.; Funes, D.; Dapeña, C., y Bouza, P. J. 2020. Origin and hydrochemical characteristics of groundwater in the Northeastern Patagonia, Argentina: the relationship with geomorphology and soils. *Environmental Earth Sciences* 79: 503.
- Álvarez, M del P, Carol, E., Videla, L. S., Bosto, T, Richiano, S. y Bouza, P. 2022 Hidroquímica del agua subterránea de un sector costero al sur de Camarones, provincia de Chubut. 6° RAGSU, Bariloche.
- Alrashidi, M. S., y Bailey, R. T. 2020. Estimating groundwater recharge for a freshwater lens in an arid region: Formative and stability assessment. *Hydrological Processes* 34(4), 1063-1080.
- Ardolino, A., Busteros, A., Fauqué, L., Franchi, M. y Lema, H. 2008. Depósitos cuaternarios de las bahías Bustamante y Camarones. En: Ardolino, A., Lema, H. (eds.) Sitios de Interés Geológico de la República Argentina. Comisión de Sitios de Interés Geológico de la República Argentina, Servicio Geológico Minero Argentino. *Anales* 46: 705-718.
- Bouza, P.J. 2012. Génesis de las acumulaciones de carbonatos en Aridisoles Nordpatagónicos: su significado paleopedológico. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 69(2): 298 – 313.
- Bouza, P.J. 2014. Paleosuelos en cordones litorales de la Formación Caleta valdés, Pleistoceno superior, NE del Chubut. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71 (1): 1-10.



- Carol E.; Perdomo S.; Alvarez M. P.; Tanjal C. y Bouza P. 2021. Hydrochemical, Isotopic, and Geophysical Studies Applied to the Evaluation of Groundwater Salinization Processes in Quaternary Beach Ridges in a Semiarid Coastal Area of Northern Patagonia, Argentina. *Water*, vol. 13
- Chowdary, V.M., Damodhara. Rao, M. y Jaiswal, C.S. 2006. Study of infiltration process under different experimental conditions. *Agricultural Water Management* 83: 69-78.
- Custodio, E. 2010. Coastal aquifers of Europe: an overview. *Hydrogeology Journal* 18(1): 1-269.
- Feruglio, E. 1950. Descripción Geológica de la Patagonia. Dirección General de Y.P.F., T 3, 431 pp. Buenos Aires.
- Fucks, E., Luengo, M., D'Amico, G., Pommarés, N., Pisano, M.F. y Penzo, H. 2018. Influence of Quaternary sea level changes in the littoral of Chubut, Argentina. *Journal of South American Earth Science* 88: 589-598.
- Gee, G.W. y Bauder, J.W. 1986. Particle-size analysis. En: Klute, A. (ed.) *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, 2nd Agronomy 9. Soil Science Society of America: 383-411, Madison.
- IGN 2021. Modelo Digital de Elevaciones de la República Argentina versión 2.1 [https://www.ign.gob.ar/archivos/Informe\\_MDE-Ar\\_v2.1\\_30m.pdf](https://www.ign.gob.ar/archivos/Informe_MDE-Ar_v2.1_30m.pdf)
- Lema, H., A. Busteros, M. Franchi, C. Parisi, M. Márquez y A. Ardolino. 2001. Hoja Geológica 4566-II y IV, Camarones. Provincia del Chubut. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Mineero Argentino. *Boletín* 261:1- 53, Buenos Aires.
- Nielsen, L., Jorgensen, N. O., y Gelting, P. 2007. Mapping of the freshwater lens in a coastal aquifer on the Keta Barrier (Ghana) by transient electromagnetic soundings. *Journal of Applied Geophysics* 62(1), 1-15.
- Pedoja, K., Regard, V., Husson, L., Martinod, J., Guillaume, B., Fucks, E., Iglesias, M., Weill, P., 2011. Uplift of Quaternary shorelines in eastern Patagonia: Darwin revisited. *Geomorphology* 127:121-142.
- Schellmann, G. y Radtke. U. 2010. Timing and magnitude of Holocene sea-level changes along the middle and south Patagonian Atlantic coast derived from beach ridge systems, littoral terraces and valley-mouth terraces. *Earth Science Reviews* 103: 1-30.
- Schoeneberger, P.J., Wysocki, D.A., Benham, E.C. y Broderson, W.D. 2002. Field book for describing and sampling soils, Version 2.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, 226p., Lincoln.
- SMN, 2023. Atlas del Servicio Meteorológico Nacional. <https://www.smn.gob.ar/clima/atlasclimatico>
- Soil Survey Staff, 2014. Keys to Soil taxonomy, 12th ed.: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. USDA-SCS Agric. Handbook. U.S. Gov. Printing Office, 436 p., Washington, DC
- Vengosh, A. 2003. Salinization and Saline Environments, En: Heinrich D. Holland y Karl K. Turekian (eds.), *Treatise on Geochemistry*, Pergamon: 1-35.
- Wallis, T. N., Vacher, H. L., y Stewart, M. T. 1991. Hydrogeology of freshwater lens beneath a Holocene strandplain, Great Exuma, Bahamas. *Journal of Hydrology* 125(1-2): 93-109.
- Wang, T., Franz, T. E., y Zlotnik, V. A. 2015. Controls of soil hydraulic characteristics on modeling groundwater recharge under different climatic conditions. *Journal of Hydrology* 521: 470-481.
- Wright, V.P. y Tucker, M.E. 1991. *Calcrete: And Introduction: International Association of Sedimentologists, Reprint Series 2: 1-22.*