

Caracterización hidroquímica del acuífero libre medanoso del sector septentrional del partido de Villarino, provincia de Buenos Aires

Matías Rey*
Andrés Gabriel Ruffo**

Resumen

En el presente trabajo se realizó un estudio detallado sobre la composición química del agua del acuífero libre medanoso del partido de Villarino. El análisis incluyó la recolección de muestras, con mediciones de los valores de pH, conductividad eléctrica e iones mayoritarios, flúor y arsénico. Estos datos fueron ploteados en diferentes gráficos y mapas para comprender los procesos y condiciones que determinan su distribución areal. Se definió la influencia del polvo atmosférico en la química del agua de lluvia y el efecto de las condiciones de evapotranspiración y geomorfología en la zona. El agua subterránea mostró un contraste entre las zonas de recarga y de descarga, sin observarse una marcada diferenciación de los términos medios. Su composición resultó mayoritariamente bicarbonatada/clorurada-sódica. El flúor y el arsénico presentaron una gran variabilidad en su concentración y distribución, con los mayores tenores de estos elementos ubicándose en la llanura circundante a la cadena de médanos. Finalmente, el 56 % de las muestras resultan aptas para riego, mientras que el 81% son aptas para ganado y el 75 % para consumo aviar. La aptitud para consumo humano resultó dependiente de la ubicación dentro del área de estudio, siendo las zonas de recarga las de mejor aptitud química.

Palabras clave: Hidrogeoquímica, Agua Subterránea, Villarino, Cordón de Dunas.

Hydro chemical characterization of the unconfined dune of the Northern sector of Villarino District, Buenos Aires Province

Abstract

This study presents a detailed analysis of the chemical composition of the ground water from the unconfined dune aquifer in the district of Villarino. The research involved the collection of water samples and measurement of pH values, electrical conductivity, major ions, fluoride, and arsenic.

° <https://doi.org/10.52292/j.rug.2025.34.1.0080>

* Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur. CONICET. E-mail: matiasrey@gmail.com

** Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur. CONICET. E-mail: andres.ruffo@uns.edu.ar

The data were plotted in various graphs and maps to better understand the processes and conditions that influence their areal distribution. The study identified the influence of atmospheric dust on rainwater chemistry as well as the effects of evapotranspiration and geomorphology conditions in the area. Groundwater exhibited a clear contrast between recharge and discharge zones, with no significant differentiation in intermediate zones. Its composition was predominantly bicarbonate/chloride-sodium. Fluoride and arsenic concentrations showed considerable variability in both magnitude and spatial distribution, with the highest found in the plain surrounding the dune system. Finally, 56 % of the samples were suitable for irrigation, 81% for livestock, and 75 % for poultry consumption. Suitability for human consumption was found to depend on the location within the study area, with the recharge zones showing the best chemical characteristics.

Keywords: Hydro geochemistry, Groundwater, Villarino, Dune Chain.

Introducción

Las características químicas del agua subterránea dependen principalmente de la composición del agua de lluvia como término inicial del sistema, la interacción que esta tenga con el suelo, los sedimentos/rocas de la zona no saturada y saturada y el tiempo de contacto con estos. Estas interacciones dan lugar a diversas reacciones y transformaciones químicas, como enriquecimiento de sales por evapotranspiración, precipitación o solubilización de diferentes minerales e intercambios catiónicos, por citar los más comunes. En regiones áridas y semiáridas, como lo es la zona de estudio, los aportes de sales generadas por evaporación en la zona no saturada suelen llegar a tener un rol importante en la impronta química del agua subterránea. Estos depósitos evaporíticos, pueden ser incorporados al agua subterránea, ya sea cuando el agua de lluvia infiltra en el suelo y recarga el acuífero, o cuando el ascenso del nivel freático pone en contacto al agua subterránea con dichas sales. En el caso específico del acuífero libre alojado en el cordón de dunas, ubicado en proximidades de la localidad de Médanos y objeto de este estudio, la cercanía de salinas y salitrales genera sectores con características químicas particulares.

En base a los resultados obtenidos a partir de 26 análisis químicos realizados (9 de agua de lluvia y 16 de agua subterránea) y datos antecedentes, fue posible caracterizar hidroquímicamente el sistema acuífero contenido en el cordón de dunas, identificando el comportamiento de los diversos iones presentes en el mismo y considerando los posibles mecanismos y condiciones que determinan su distribución areal en el área de estudio. A su vez, se analizó la impronta química del agua de lluvia que lo recarga. Finalmente, se determinó la aptitud del agua subterránea de la cadena para riego, consumo animal y humano.

Caracterización del área de estudio

En el sector norte del partido de Villarino, en el SO de la provincia de Buenos Aires, Argentina, se ubica una cadena de dunas continentales, las cuales constituyen el área de estudio en este trabajo. Este sector incluye las localidades de Médanos, La Mascota y Argerich (Fig. 1). Regionalmente, forma parte de la llanura bonaerense, comprendiendo una cadena de médanos arenosos, de suave pendiente que se extienden unos 50 km en dirección NO-SE, desde la laguna Chasicó y el arroyo homónimo al NO, hasta el estuario de Bahía Blanca, al SE. Al NE limita con el Salitral de la Vidriera, mientras que al SO bordea parcialmente la depresión de las Salinas Chicas (la cual alcanza una cota mínima de 42 m s.n.m).

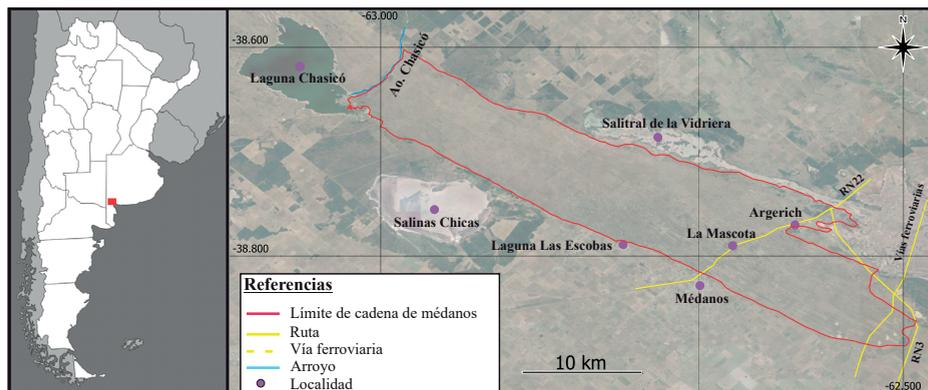


Figura 1. Ubicación del área de estudio. Fuente: Modificado de Rey et al. (2023a).

Su porción SE tiene una pendiente suave de 0,2 % hacia el NE y una altura media de 30 metros sobre el nivel del mar (Carrica et al., 2012), mientras que el sector NO de la cadena tiene una pendiente media de 0,5 % hacia el SO, con una elevación media de 3 m s.n.m.

Aplicando los índices climáticos de Thornthwaite (1948), el clima de la zona clasifica como C1 B'2 d a', es decir, subhúmedo (C1), templado fresco mesotérmico (B'2), con nulo o escaso exceso de agua (d) y una eficiencia térmica inferior al 48 % (a'), limitando con el sector semiárido (D B'1 d a') (Sánchez et al., 1998). La precipitación media anual es de 546,8 mm (serie 1972-2005) para la localidad de Médanos, con mínimos en julio (20,8 mm) y máximos en marzo (78,2 mm). La temperatura media anual es de 14,2 °C, con medias extremas en enero y julio de 22,5 °C y 7 °C, respectivamente.

Materiales y métodos

Se utilizó una metodología de trabajo clásica para esta clase de estudios, incluyendo trabajos de gabinete, así como campañas de campo. Se realizó la recopilación de datos antecedentes sobre la zona de estudio, incluyendo datos geológicos, geomorfológicos y climáticos. Posteriormente, se realizaron campañas de campo para llevar a cabo un censo de puntos de agua, mapeando y midiendo tanto afloramientos freáticos como pozos, totalizando 43 mediciones y tomas de muestras para análisis químicos de laboratorio, las cuales fueron ubicadas geográficamente utilizando un GPS Garmin Etrex Vista e30x.

Se realizaron mediciones *in situ* del pH, conductividad eléctrica (CE) y temperatura de las muestras de agua recolectadas utilizando una sonda LUTRON WA-2015. El equipo se calibró antes de cada salida al campo utilizando soluciones buffer de pH y una solución estándar de conductividad de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$. A su vez, se recogieron 16 muestras de agua subterránea en toda la zona de estudio (Fig. 2) y 9 de agua de lluvia, para su análisis químico en laboratorio con el fin de determi-

nar su contenido de iones mayoritarios (cloruro, sulfato, carbonato y bicarbonato, sodio, calcio, potasio y magnesio), así como F y As en parte de ellas.

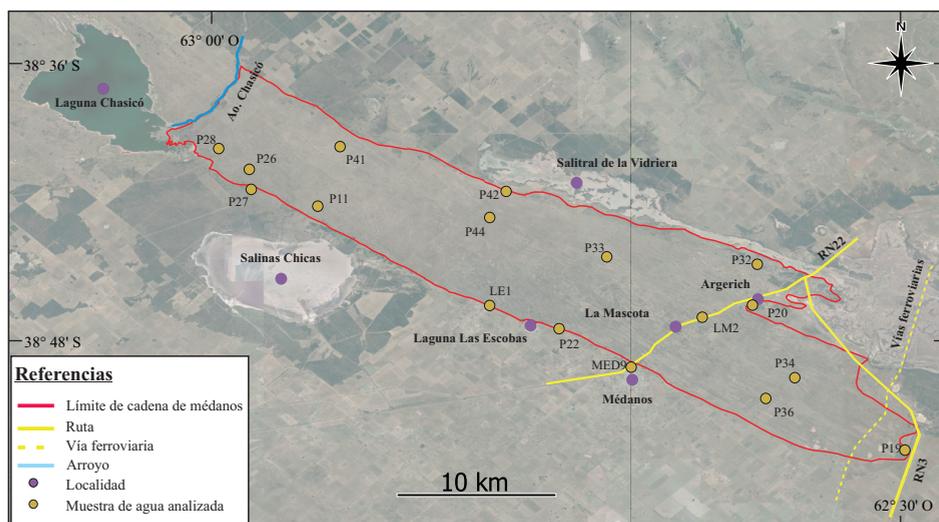


Figura 2. Ubicación de las muestras de agua subterránea analizadas. Fuente: elaboración propia sobre la base de datos de campo.

Para garantizar la representatividad de las muestras y de las mediciones mencionadas, previamente a la recolección de las muestras, se procedió a la purga de los pozos, extrayendo de 3 a 5 veces el volumen de agua contenido en el sondeo en el momento de la extracción. Las muestras se recogieron en recipientes de plástico de 1 litro, que se etiquetaron y conservaron hasta su envío al laboratorio.

Las determinaciones de aniones en laboratorio se llevaron a cabo de acuerdo con Standard Method for the Examination of Water and Wastewater, 17ª edición (1989). Las determinaciones de cationes se realizaron con un Espectrómetro de Emisión Atómica por Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES) Shimadzu Simultaneous 9000, de acuerdo con la Norma 200.7 de la EPA. Para el fluoruro, se utilizó un electrodo combinado selectivo de fluoruro Orion (ISE). Con estas determinaciones, se calcularon índices y relaciones iónicas, se elaboraron diversos gráficos (Piper, Stiff, Schoeller-Berkaloff), mapas de isolíneas de CE y de los diferentes iones a partir de los datos obtenidos.

Adicionalmente, se determinó la aptitud del agua subterránea para riego, consumo animal y humano. Para la caracterización de la aptitud del agua subterránea de la zona para riego, se utilizó la clasificación propuesta por Richards (1969). Esta considera tanto la conductividad eléctrica, como la denominada RAS (Relación de Adsorción de Sodio), la cual se calcula mediante la ecuación:

$$RAS = \frac{r(Na)}{\sqrt{\frac{r(Ca + Mg)}{2}}}$$

Donde las concentraciones de los iones están expresadas en meq/L. Con este valor calculado para cada muestra, las mismas fueron ploteadas en un diagrama RAS versus conductividad.

En el caso de la aptitud del agua para consumo animal, si bien no existe una clasificación global, se utilizó para esta determinación la recopilada por Luque (2018) para el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Debe considerarse que en la clasificación utilizada en este trabajo (Tabla I), no se tiene en cuenta el tipo de alimentación de los animales, pasturas, suplementos y cualquier otro factor que podría ser de interés, por lo que aquí se tratará el tema como una primera aproximación.

CE (µS/cm)	Clase
< 1500	Excelente
1500 - 5000	Muy satisfactoria
5000 - 8000	Satisfactoria para ganado, no apta para aves.
8000 - 11000	Uso limitado para ganado
11000 - 16000	De uso muy limitado
> 16000	No recomendable
Componente	Límite máximo (mg/L)
Arsénico	0,15 - 0,20
Flúor	2
Nitrato + Nitrito	100
Nitrito	10
Sulfato	1000 - 1200
Magnesio	300
Cloruro	7000
Cloruro de sodio	10000

Tabla I. Clasificación de agua para bebida animal basada en su salinidad y algunos elementos químicos. Fuente: modificado de Luque (2018).

Finalmente, para la determinación de la aptitud del agua para consumo humano, los límites máximos y mínimos considerados fueron los establecidos en el Código Alimentario Argentino (CAA). Mediante toda la información generada, se logró caracterizar hidroquímicamente tanto el agua de lluvia como subterránea en el área de estudio.

Geología e hidrogeología

La secuencia geológica en el sector inicia con depósitos de edad pliocena, encontrándose una secuencia limoarcillosa de origen continental correspondientes a la Formación Chasicó (Pascual, 1961). Sobre estos, en ocasiones, se apoyan los materiales arenosos de origen fluvial denominados Formación Río Negro (Andreis, 1965). Discontinuamente, sobre lo anterior, se encuentra un nivel de conglomerados, denominado Rodados Patagónicos, de edad pleistocena (Fidalgo, 1999). Cubriendo lo anterior se ubican los sedimentos arenosos de edad holocena, que conforman el cordón de dunas. Estas arenas son de origen eólico y se denominan, según el autor: Arenas Médanos (Spaletti e Isla, 2003), Formación Estancia La Aurora (Fidalgo et al., 1987), Formación La Postrera o Formación Médanos (Bonorino, 1974), siendo esta última la denominación adoptada para este trabajo.

Estas dunas, que cubren toda la zona de estudio, están compuestas, en términos generales, por arenas unimodales finas a medias, a veces muy finas, que tienden a disminuir ligeramente de tamaño de grano hacia el NO de la cadena. Están compuestas principalmente por cuarzo, plagioclasa, microclino, piroxeno, epidoto, magnetita titanífera y no contienen carbonato cálcico (Bonorino, 1979). Rossetto (1953) les atribuye, además de un origen eólico, una componente piroclástica, tras haber realizado un exhaustivo estudio de su granometría y mineralogía.

Morfológicamente, estas acumulaciones de arenas alcanzan los 15 m de altura y forman barjanes de 150 a 200 m de longitud, frecuentemente alineados en dirección NO-SE, con la mayor pendiente buzando hacia el NE, aunque también pueden observarse transversales a esta dirección predominante. Hacia el sur se desarrollan en forma de manto.

Hidrogeológicamente, el área de estudio se encuentra dentro de la Región Hidrogeológica de la Cuenca de Bahía Blanca (Auge, 2004). A través de investigaciones previas (Bonorino, 1974, 1979) y de sondeos eléctricos verticales (SEV) realizados en el área, Lexow y Bonorino (2012) determinaron el esquema hidroestratigráfico del sector (Tabla II).

El acuífero freático objeto de este trabajo se localiza en el cordón de dunas, con aguas subterráneas con una conductividad eléctrica (CE) que se sitúa generalmente en el rango de 400 a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estas arenas tienen una elevada capacidad de infiltración debido a sus características litológicas, lo que impide el desarrollo de una red de drenaje definida. Esto permite la rápida incorporación del agua de precipitación a la zona saturada como recarga al sistema. La recarga calculada para la zona se sitúa entre el 33 y el 35 % de la precipitación media anual (Carrica et al., 2012). En las medidas de campo realizadas, el nivel freático se ha encontrado como máximo, a 13,5 m de profundidad, siendo las medidas más frecuentes inferiores a 8 m. La dirección del flujo de agua subterránea sigue aproximadamente la pendiente del terreno (Rey et al., 2023b). Localmente, se producen flujos radiales superpuestos al anterior, que descargan en zonas topográficamente deprimidas o interduna (Albouy,

2005). Estos bajos topográficos pueden dar lugar al afloramiento de la capa freática, formando sectores de humedales permanentes o estacionales. De este modo, se pueden identificar dos sistemas de flujo: un sistema de flujo local somero, de corto recorrido y un sistema de flujo regional más profundo y extenso.

Formación	Litología	Propiedades Acuíferas
Médanos (Holoceno)	Arenas medias a finas, en forma de mantos o medanosos, de origen eólico. Según el sector, apoyan sobre sedimentos finos (Loess), los Rodados Patagónicos o la Fm Río Negro.	Nivel freático somero. Agua en espacios porosos. Elevada porosidad y buena permeabilidad. Agua dulce, con baja mineralización. (3 m de espesor medio)
Rodados Patagónicos (Pleistoceno)	Gravas medianas a finas con matriz arenosa, de origen fluvial. Los niveles superiores se encuentran fuertemente cementadas por carbonato de. Suprayacen a la Fm. Río Negro y en algunos sectores se ubican sobre los Limos Loessoides.	El nivel superior posee permeabilidad por fisuración, a través del cual se infiltra agua de lluvia. No forma acuíferos. (entre 2 y 4 m de espesor)
Formación Río Negro (Plioceno)	Arenisca de grano fino a medio, de coloración gris, con estratificación entrecruzada.	Buena porosidad y permeabilidad. Acuíferos de rendimiento variable. Aguas de mediana a alta mineralización. (espesores saturados entre 4 y 9 m)
Limos Loessoides. También denominados Formación Chasicó (Plioceno Inferior)	Limos arcillosos de color castaño rojizo, macizos, con intercalaciones de arenas y arcillas y niveles calcáreos y yesíferos.	Baja porosidad y permeabilidad. Es portadora de niveles acuíferos de carácter confinado aproximadamente entre los 50 y 200 m de profundidad. (entre 150 y 200 m de espesor)

Tabla II. Esquema hidroestratigráfico del área de estudio. Fuente: modificado de Lexow y Bonorino (2012).

Este acuífero libre se superpone y conecta hidráulicamente con el alojado en las formaciones Río Negro y Chasicó, que contiene aguas de mayor contenido salino (con conductividades generalmente superiores a 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y frecuentemente presenta importantes concentraciones de elementos traza no deseados (Fig. 3). Por debajo de los 50 m de profundidad se encuentran niveles acuíferos semiconfinados-confinados, con aguas naturalmente salinizadas.

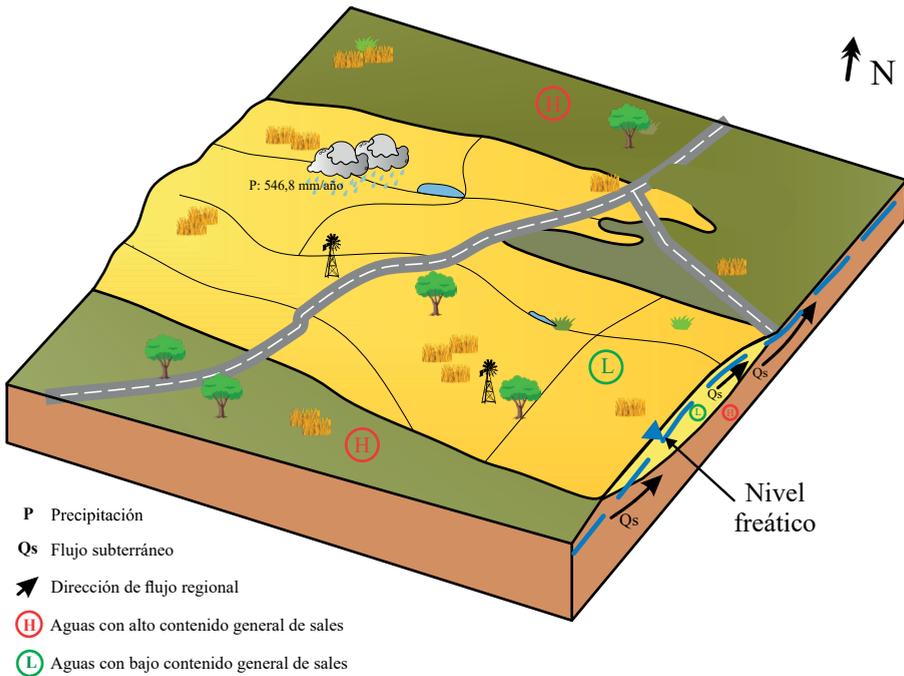


Figura 3. Modelo conceptual esquemático de funcionamiento del acuífero libre. Fuente: elaboración propia sobre la base de datos de campo.

Resultados

Caracterización química del agua de lluvia

La composición del agua de lluvia constituye el punto de partida para la elaboración de un modelo hidrogeoquímico que permita comprender el funcionamiento del sistema. En diversas situaciones, los iones disueltos en el agua subterránea provienen, casi exclusivamente, del agua de lluvia (Bonorino, 1994). Los constituyentes de la precipitación dependerán de la fuente de vapor de agua que la origina y los iones que son adquiridos (o perdidos) en su recorrido a través de la atmósfera (Appelo y Postma, 2004).

A su vez, la composición del polvo atmosférico es un factor de relevancia, ya que se encuentra íntimamente relacionada con la del agua de lluvia. La impronta química de esta es adquirida durante su precipitación por el arrastre de polvos atmosféricos y deposición seca y constituye la composición inicial en el ciclo de evolución hidrogeoquímica (Martínez et al., 2011). En muestras recolectadas en la zona de Bahía Blanca, a unos 30 km al NE del área de estudio, Bonorino (1994) determinó los constituyentes del mismo mediante difracción de rayos X, separándolo del agua de lluvia mediante filtrado simple. Su composición corresponde a cuarzo, sílice amorfa, calcita,

feldespatos y minerales arcillosos escasamente cristalizados. Estos mismos minerales son los que componen el loess pampeano, unidad ampliamente distribuida en la región.

En la tabla III se muestran las concentraciones de iones mayoritarios en 9 muestras de lluvia del área de estudio recolectadas en la localidad de Médanos, así como otras de zonas cercanas (69 en Bahía Blanca y 6 en la Laguna Chasicó). Se puede observar que en los aniones predomina el bicarbonato, con su concentración prácticamente duplicando a la del cloruro. Por el lado de los cationes, predomina claramente el calcio, seguido por el sodio. El potasio y el magnesio no presentan concentraciones relevantes.

	Cl ⁻	SO ₄ ⁼	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺	Mg ⁺⁺
Bahía Blanca							
Mínimo (meq/L)	0,023	0,052	0,107	0,009	0,005	0,010	0,018
Máximo (meq/L)	1,016	0,854	0,897	0,848	0,210	0,929	0,465
Promedio (meq/L)	0,164	0,163	0,339	0,153	0,038	0,185	0,159
Laguna Chasicó							
Mínimo (meq/L)	0,138	0,115	0,261	0,126	0,008	0,105	0,156
Máximo (meq/L)	1,325	0,404	1,389	1,953	0,125	1,198	0,403
Promedio (meq/L)	0,676	0,254	0,724	0,974	0,053	0,398	0,296
Médanos							
Mínimo (meq/L)	0,031	0,008	0,027	0,006	0,001	0,023	0,006
Máximo (meq/L)	0,132	0,075	0,322	0,089	0,018	0,339	0,027
Promedio (meq/L)	0,089	0,028	0,158	0,034	0,007	0,154	0,015

Tabla III. Concentración de iones mayoritarios del agua de lluvia el área de estudio y zonas cercanas. Fuente: elaboración propia sobre la base de datos de campo y datos antecedentes de Bonorino (1994).

Es destacable la diferencia composicional que se puede observar en un diagrama de Piper entre las muestras de la zona de Laguna Chasicó y las de la localidad de Médanos (Fig. 4), menos mineralizadas, pese a la cercanía entre ambos lugares. Si bien su composición aniónica es similar, dentro del grupo de los cationes se puede apreciar un claro contraste entre ambos.

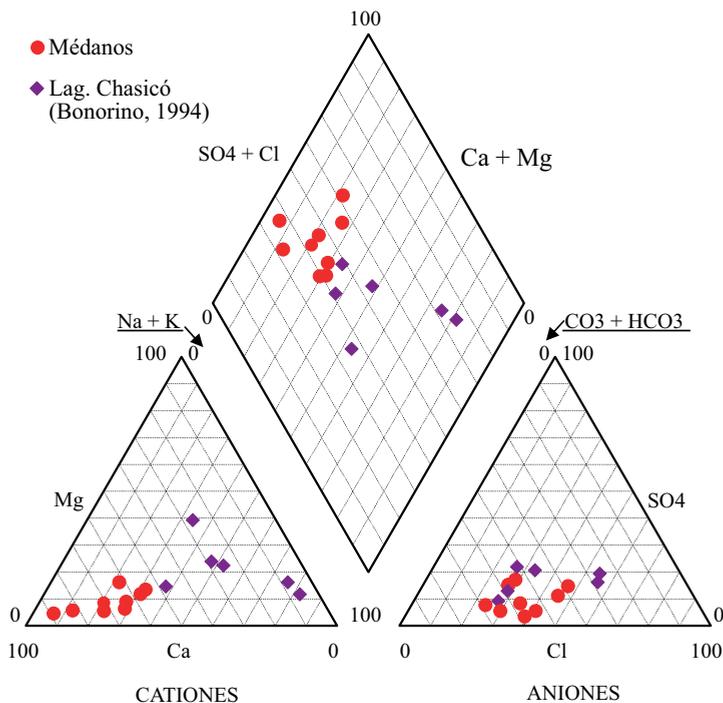


Figura 4. Diagrama de Piper de las muestras de lluvia de Médanos y Laguna Chasicó. Los valores se expresan en % de miliequivalentes. Fuente: elaboración propia sobre la base de datos de campo y datos antecedentes de Bonorino (1994).

Analizando las relaciones entre cationes y aniones (índices geoquímicos) de las muestras (Tabla IV), calculados con los promedios de la concentración iónica de la lluvia de cada localidad, la relación Na/Cl señala un posible origen común (aerosol marino y lacustre). Este valor es mayor en el caso de las muestras de la zona de la laguna Chasicó debido probablemente al efecto de la evaporación directa del cuerpo de agua. La relación Mg/Ca presenta valores bajos, causado por la alta concentración de Ca proveniente del polvo atmosférico anteriormente mencionado (calcita, feldspatos, etc.). La relación Cl/K es alta a raíz del contenido de cloruro presente en la lluvia y al hecho de que el K tiende a ser fijado irreversiblemente en el suelo.

	rNa/rCl	rMg/rCa	rCl/rK	rSO ₄ /rCl	rCl/rHCO ₃
Laguna Chasicó	1,44	0,74	12,75	0,37	0,93
Médanos	0,38	0,10	13,53	0,31	0,56

Tabla IV. Índices geoquímicos del agua de lluvia. Fuente: elaboración propia sobre la base de datos de campo y datos antecedentes de Bonorino (1994).

Por otro lado, la relación SO_4/Cl exhibe valores altos para tratarse de agua continental (típicamente entre 0,2 y 0,4), debido probablemente al aporte de sulfato a partir del yeso presente en los suelos del Salitral de la Vidriera, Salinas Chicas y Formación Chasicó. Por último, la relación Cl/HCO_3 arroja valores bajos (típicamente oscila entre 0,1 y 5 para agua continental), fuertemente influenciada por el aporte de carbonato del polvo atmosférico.

Caracterización química del agua subterránea

En la Tabla V se exponen los valores mínimos, medios y máximos de las concentraciones de los iones analizados. La falta de densidad de puntos de muestreo en la zona central de la cadena de dunas se debe principalmente a la escasez de perforaciones en el sector y falta de acceso a las mismas.

Analito	Unidad	Mínimo	Máximo	Promedio	Desv. Est.
pH	U de pH	7,07	8,25	7,55	0,3
Conductividad Eléctrica*	$\mu\text{S}/\text{cm}$	385	9090	1890,8	1877,3
Total de sólidos disueltos*	mg/L	256	6080	1261,5	1253,9
Alcalinidad	Mg/L de CaCO_3	200,5	750	386,7	147,2
Dureza	mg/L	24	616	276,3	171,1
Cl ⁻	mg/L	35,9	1602	309,4	395,8
$\text{SO}_4^{=}$	mg/L	19	930	186	217,3
$\text{CO}_3^{=}$	mg/L	0	28,2	8	8,9
HCO_3^{-}	mg/L	211	915	455,4	184,8
Na ⁺	mg/L	33	1159	316,3	295,9
K ⁺	mg/L	0,5	80,6	20,8	23
Ca ⁺	mg/L	4,1	134	49,8	34
Mg ⁺⁺	mg/L	3,3	74,1	36,9	23
F ^{-**}	mg/L	1	9,9	2,5	2,72
As ⁺	$\mu\text{g}/\text{L}$	10	216	48,8	47,9

Tabla V. Concentración de iones mayoritarios del agua freática de las muestras analizadas en laboratorio. *: Datos de análisis químicos sumados a los obtenidos in-situ con sonda multiparamétrica. **: Valores considerando únicamente mediciones por encima del límite de detección de 1 mg/L. Fuente: elaboración propia sobre la base de datos de campo.

Según la clasificación de iones mayoritarios (Custodio y Llamas, 1983), la composición aniónica de las aguas de la capa freática es predominantemente bicarbonatada (50 % de las muestras) y clorurada (19 % de las muestras), con las restantes representando una mezcla de estas dos anteriores, con excepción de una de ellas, ubicada en el extremo sureste de la cadena de médanos (muestra P19), que posee una componente sulfatada. El ploteo de las mismas en un diagrama de Piper se muestra en la figura 5. Aquellas muestras cuyo componente mayoritario es el bicarbonato tienden a ubicarse, a grandes rasgos, en el centro de la cadena. Por otro lado, las que poseen como componente mayoritario a los cloruros, se ubican sobre los bordes del cordón de dunas, en la dirección del sentido del flujo. Dado que la recarga se produce principalmente por infiltración del agua de lluvia a lo largo y ancho de todo el cordón medanoso y debido a las reacciones de hidrolisis y disolución ocurridas durante su infiltración en el suelo, la distribución espacial del ión HCO_3^- resulta relativamente homogénea. En cuanto a la composición catiónica de las muestras, predomina la sódica (65 % de las mismas), por sobre mezclas magnésicas, sódicas y cálcicas (45 %). El predominio del ión sodio por sobre el resto es posiblemente producto de la fuerte evapotranspiración en la zona de estudio.

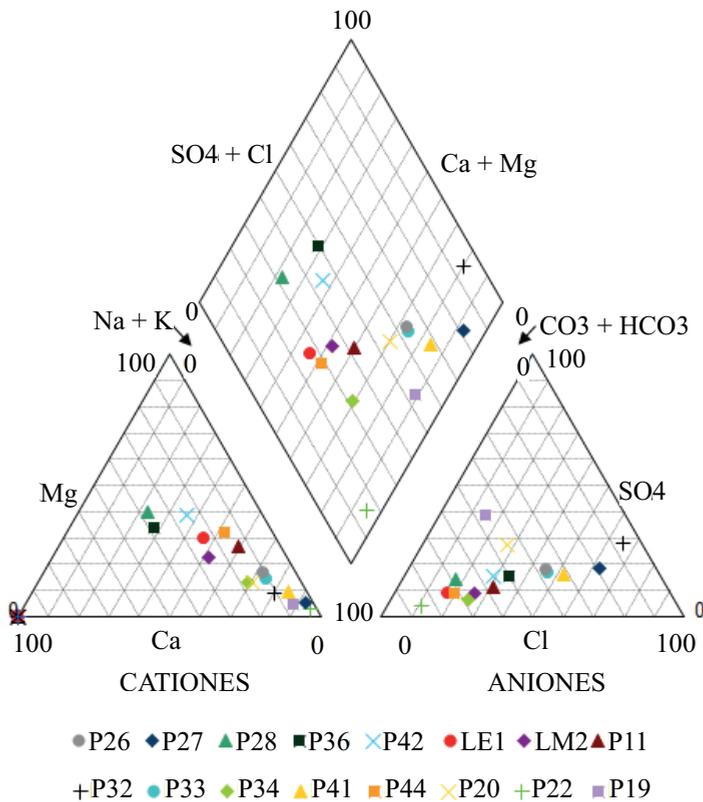


Figura 5. Diagrama de Piper de las muestras analizadas. Los valores se encuentran expresados en % de miliequivalentes. Fuente: elaboración propia sobre la base de datos de campo.

En los diagramas de Stiff (Fig. 6) se puede apreciar como los polígonos tienden a ser más estrechos en las zonas de recarga y más abiertos en las de descarga, con incrementos sobre todo en los cloruros, bicarbonatos y sodio, que se hacen más evidentes en las proximidades del Salitral de la Vidriera.

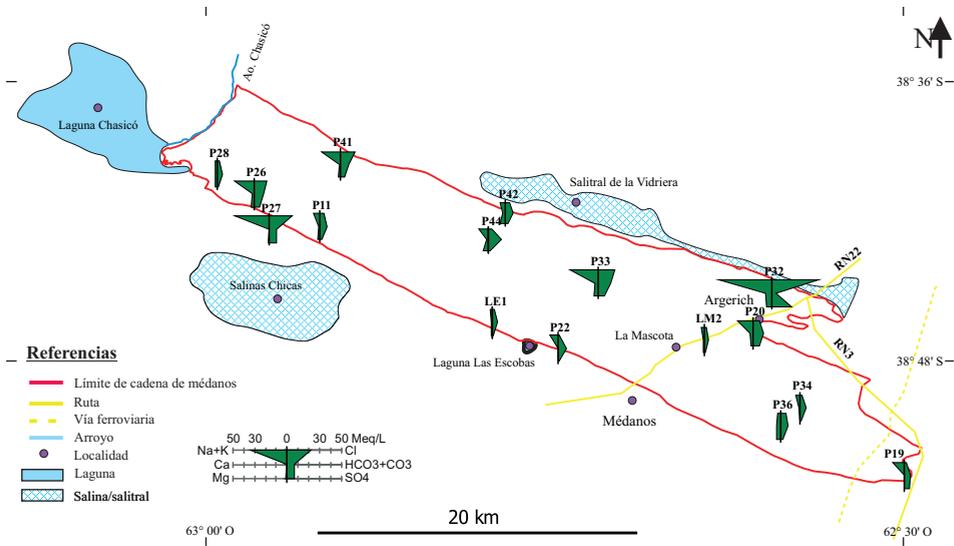


Figura 6. Mapa de diagramas de Stiff para las muestras de agua subterránea analizadas. Fuente: elaboración propia sobre la base de datos de campo.

En un diagrama de Schoeller-Berkaloff (Fig. 7) se observa que, en general, la composición de las muestras recolectadas puede entenderse como una evolución química desde aguas de zona de recarga, que tienden a ubicarse en la parte inferior del grupo, a aguas de zona de descarga, que tienden a ubicarse en la parte superior, con un enriquecimiento en sales debido al transporte y tiempo de residencia en los sedimentos. El agua de lluvia puede considerarse como el miembro inicial del sistema. No se observa una marcada diferenciación de los términos medios entre estos dos extremos.

Estratificación hidroquímica

Estudios geofísicos realizados con anterioridad en el área por Lexow y Bonorino (2012) detectaron un incremento apreciable de la salinidad en el agua subterránea entre los 14 y 29 m de profundidad. Según los autores, esto marcaría el límite vertical inferior de una lente de agua de baja salinidad, que descansa sobre una más salobre y extensa, dando lugar a una estratificación hidroquímica dentro del sistema, con una zona de transición debido a la miscibilidad de los fluidos. La profundidad donde se da el cambio en la salinidad del agua, según el resultado del censo de pozos y estudios geofísicos propios previos (Rey et al., 2023a), parece

coincidir a grandes rasgos con el techo de un paquete de pelitas rojizas asignables a la Fm. Chasicó. La mineralogía de las mismas afectaría la química del agua, limitando fuertemente su potabilidad y uso.

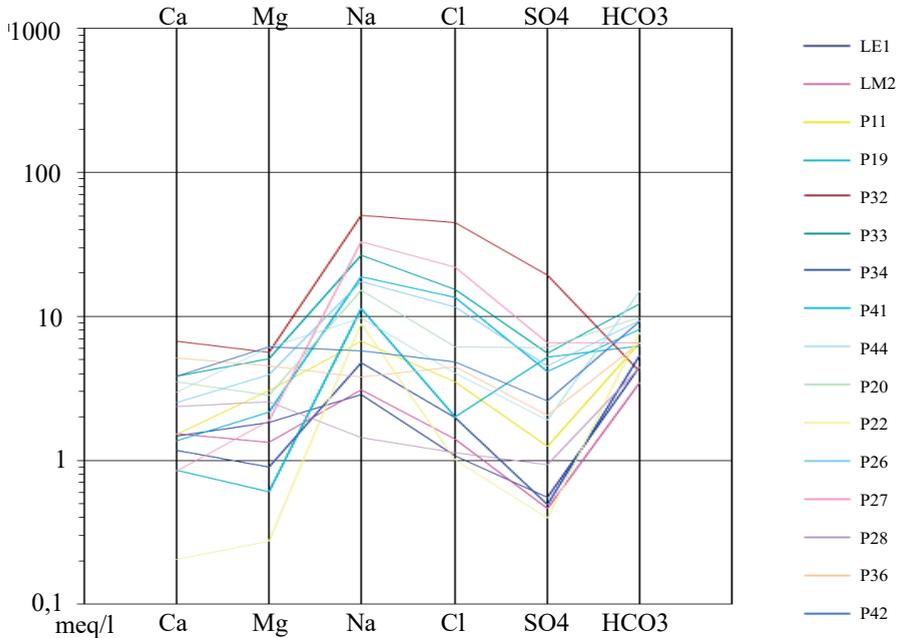


Figura 7. Diagrama de Schoeller-Berkaloff para las muestras de agua subterránea analizadas. Fuente: elaboración propia sobre la base de datos de campo.

Ph, Conductividad eléctrica y Total de Sólidos Disueltos (TSD)

El pH promedio, según los análisis químicos realizados, se ubica en 7,55, con máximos de 8,25 y mínimos de 7,07. Si se consideran datos antecedentes, el valor máximo que se registra es de 9, en una antigua batería de pozos fuera de uso al norte de la localidad de Médanos. Es en los alrededores de este núcleo urbano en donde tienden a observarse los mayores valores, que en general superan los 8 puntos.

Los valores de conductividad eléctrica medidos se ubican en promedio en los 1890 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con máximos de 9090 y mínimos de 385 $\mu\text{S}/\text{cm}$. De un total de 43 mediciones obtenidas durante el censo de puntos de agua, 8 presentan valores superiores a los 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (17 % del total). De acuerdo al mapa elaborado (Fig. 8), se puede observar una clara concordancia entre el sentido del flujo subterráneo y un aumento en la conductividad eléctrica, producto del enriquecimiento en sales disueltas en el agua subterránea a lo largo de su recorrido. Se pueden reconocer valores que se ubican en torno a los 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en las partes SE y NO del cordón de dunas y las áreas centrales, mientras que en los sectores NE y SO se registraron

valores más elevados, en torno a los 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, llegando incluso a extremos al norte de la localidad de Argerich, donde se midieron valores de más de 5440 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el máximo absoluto de la zona de estudio, de 9090 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (pozo P30).

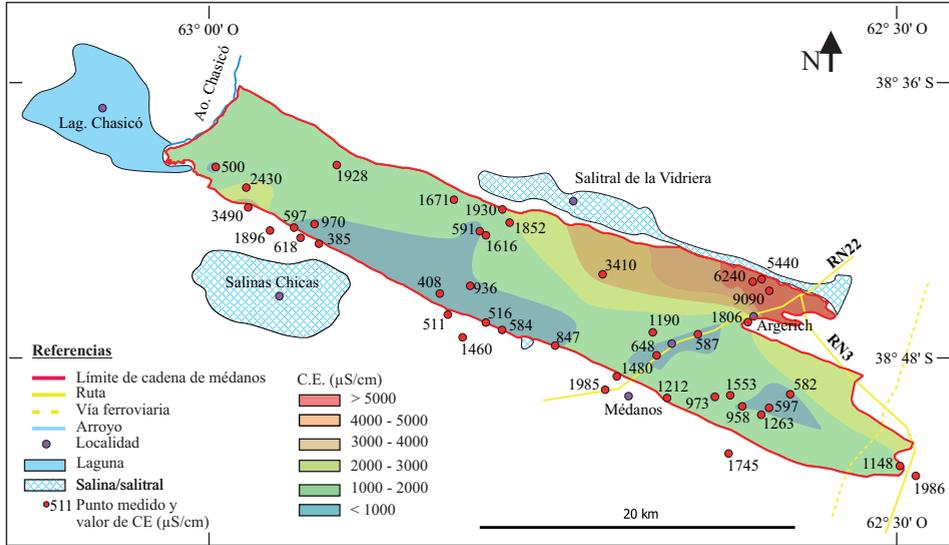


Figura 8. Mapa de isoconductividad eléctrica de la zona de estudio. Algunos de los puntos medidos no fueron representados debido a la proximidad entre ellos.
Fuente: elaboración propia sobre la base de datos de campo.

El TSD está estrechamente vinculado con la conductividad eléctrica, con valores promedio de 1261 mg/L, máximos de 6080 y mínimos de 256 mg/L. Al igual que la conductividad eléctrica, muestran un incremento en el sentido del flujo subterráneo y la misma distribución general.

Distribución de aniones mayoritarios en el agua subterránea

La concentración promedio de cloruro es de 309,4 mg/L, con máximos medidos de 1602 mg/L (pozo P32) y mínimos de 35,9 mg/L (pozo P22). Se reconoce un aumento de los mismos en el sentido del flujo. En la mayor parte del área de estudio se observan valores menores a los 300 mg/L (Fig. 9). Por otra parte, las muestras con mayor concentración, se ubican en las cercanías del Salitral de la Vidriera (mayores a 600 mg/L). Como es de esperar, se reconoce una gran concordancia entre los contenidos de este y la conductividad eléctrica medida en las muestras. Los tenores medidos de sulfatos presentan un valor promedio de 186 mg/L, con un máximo de 930 y un mínimo de 19 mg/L. En la mayor parte del área de estudio se registran valores por debajo de los 200 mg/L. Como en los casos anteriores, las menores concentraciones se ubican en zonas de recarga, aumentando en el sentido del flujo subterráneo. Los mayores valores se ubican en las proximidades

del Salitral de la Vidriera. A su vez, la muestra P19 presenta una concentración elevada teniendo en cuenta su ubicación dentro de la cadena de médanos (250 mg/L).

Los valores de sulfato muestran una considerable correlación con el cloruro, con un índice R^2 de 0,88, denotando posiblemente un origen común para ambos iones. Para constatar la posible disolución de yeso, se puede utilizar el índice K_y (Custodio y Llamas, 1983), donde:

$$K_y = \sqrt{rSO_4 * rCa}$$

Al realizar el cálculo para las muestras analizadas (Tabla VI) se observa que los tres valores más elevados obtenidos corresponden a las cercanías de la zona de descarga en el Salitral de la Vidriera, siendo el de la muestra P32 el mayor de todos. De esta manera, podría inferirse que el elevado contenido de sulfato en estas muestras provendría en parte de la disolución de yeso y evaporitas presentes en los sedimentos de este bajo topográfico.

Muestra	K_y	Muestra	K_y
LE1	0.906	P44	2.393
LM2	0.843	P20	4.621
P11	1.383	P22	0.286
P19	2.112	P26	3.381
P32	11.439	P27	2.364
P33	4.620	P28	1.490
P34	0.768	P36	3.272
P41	2.378	P42	3.164

Tabla VI. Índice K_y de las muestras analizadas. En negrita se resaltan los 3 valores más altos obtenidos. Fuente: elaboración propia sobre la base de datos de campo.

Debido al pH de las aguas subterráneas de la zona de estudio (menor a 8,3), no se encuentra cantidades significativas de $CO_3^{=}$ disuelto en las mismas, si bien en valores cercanos a 8,4 puede encontrarse cierta cantidad en equilibrio (Appelo y Postma, 2004), por lo que la especie disuelta presente es prácticamente HCO_3^- en su totalidad. El promedio de la concentración de bicarbonato en las muestras analizadas es de 455,4 g/L, con un máximo de 915 y un mínimo de 211 mg/L. De esta manera, es en promedio el anión disuelto más abundante en el agua subterránea de la zona de estudio. Su distribución en la cadena de médanos tiende a ser mayor en el centro de la misma y en áreas cercanas a la localidad homónima, disminuyendo hacia los bordes, si bien, en términos generales, puede considerarse relativamente homogénea.

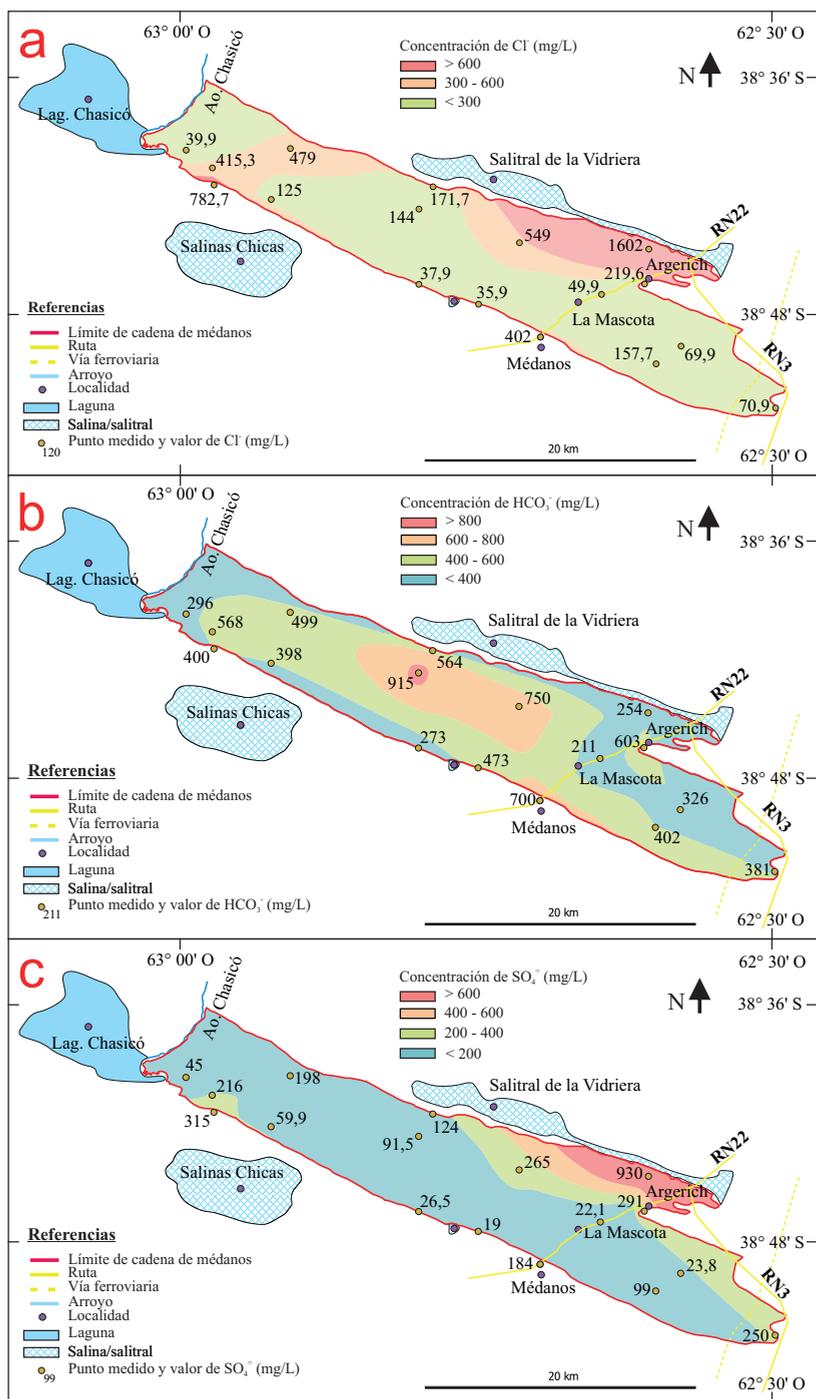


Figura 9. Mapas de isocontenido de cloruro (a), bicarbonato (b) y sulfato (c) de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia sobre la base de datos de campo.

Distribución de cationes mayoritarios en el agua subterránea

El sodio es el ión más abundante en las muestras dentro del grupo los cationes, con una concentración promedio de 316,3 mg/L, un máximo de 1159 y un mínimo de 33 mg/L. Su comportamiento es similar al del cloruro, con los menores tenores ubicados en las zonas de recarga preferencial y los mayores en las zonas de descarga (Fig. 10).

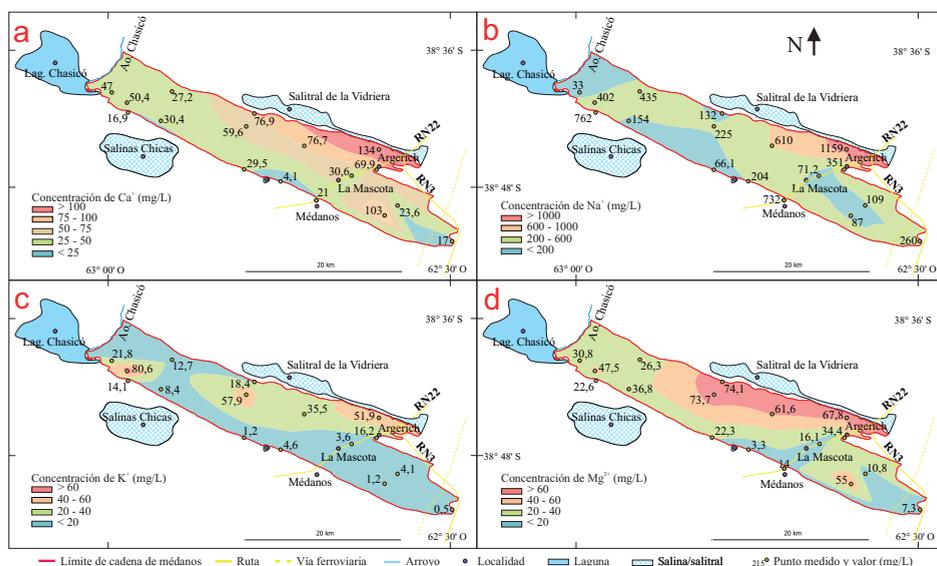


Figura 10. Mapas de isocontenido de calcio (a), sodio (b), potasio (c) y magnesio (d) de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia sobre la base de datos de campo.

La relación entre los contenidos de sodio y cloruro presenta una elevada concordancia, lo que permite inferir un origen común. Si se analizan las relaciones rNa/rCl y $rNa/r(Na+Cl)$ (Tabla VII), se pueden obtener algunos indicios de la fuente de sodio en el agua subterránea.

En todas las muestras, excepto una (P36), la relación Na/Cl es mayor a 1, indicando un aporte de sodio desde otra fuente diferente de la halita. Dicho aporte podría provenir del sodio contenido en las plagioclasas que conforman parte de los clastos de las arenas del cordón de dunas y por fenómenos de intercambio catiónico con la fracción arcillosa. Para verificar esto último, se consideró la relación $Na/(Na+Cl)$, que en caso de tomar valores superiores a 0,5 sugiere la existencia de este fenómeno (Hounslow, 1995). Teniendo esto en cuenta, en todas las muestras donde la relación Na/Cl es mayor a 1, se sugiere la ocurrencia de intercambio catiónico como fuente de aporte de sodio.

Muestra	rNa/rCl	rNa/r(Na+Cl)
LE1	2.678	0.728
LM2	2.191	0.687
P11	1.892	0.654
P19	5.632	0.849
P32	1.111	0.526
P33	1.706	0.630
P34	2.395	0.705
P41	1.395	0.582
P44	2.400	0.706
P20	2.455	0.711
P22	8.727	0.897
P26	1.487	0.598
P27	1.495	0.599
P28	1.270	0.559
P36	0.847	0.459
P42	1.181	0.541

Tabla VII. Índices geoquímicos de sodio de las muestras. Fuente: elaboración propia sobre la base de datos de campo.

El calcio presenta en las muestras analizadas un contenido promedio de 49,8 mg/L, con un valor máximo de 134 y un mínimo de 4,1 mg/L, mostrando un incremento en el sentido general del flujo y una baja correlación con el sulfato. Los valores extremos se ubican, similarmente a otros iones, hacia el Salitral de la Vidriera.

El potasio muestra un comportamiento similar al del calcio, con un tenor promedio de 20,8 mg/L, un máximo de 80,6 y un mínimo de 0,5 mg/L, mostrando un aumento en el sentido del flujo subterráneo. La muestra P26, ubicada en el extremo NO del área de estudio, presenta un valor anormalmente alto (el máximo registrado).

El magnesio muestra una distribución y comportamiento similares a los del calcio y el potasio. Se puede reconocer un incremento general del mismo en el sentido del flujo subterráneo. El promedio en el contenido del este catión es de 36,9 mg/L, con un máximo de 74,1 y un mínimo de 3,3 mg/L. Sus concentraciones máximas se encuentran en las cercanías del Salitral de la Vidriera.

Flúor y arsénico

La cantidad máxima permitida de F en el agua potable se da en función de la temperatura promedio de la zona, quedando el rango adecuado considerado para el caso entre 0,8 y 1,3 mg/L.

En las muestras analizadas dentro de la cadena de médanos, el fluoruro presenta un valor promedio de 2,5 mg/L, con un máximo de 9,9 mg/L y un mínimo de 1 mg/L (considerando sólo las muestras con tenores por encima del límite de detección de 1 mg/L, con 4 de ellas cayendo por debajo del mismo). Se verifica una gran variabilidad en su concentración y distribución. Los mayores tenores se ubican en la llanura circundante a la cadena de médanos, en las proximidades de la localidad homónima y particularmente en el sudeste del área de estudio. En general los valores dentro de la cadena de dunas suelen ser bajos.

En cuanto al arsénico, de acuerdo al CAA, el máximo valor permitido de As en el agua es de 10 µg/L, coincidente con el recomendado por la OMS, mientras que, para la provincia de Buenos Aires, el máximo permitido es de 50 µg/L. En las muestras analizadas dentro de la cadena de dunas, este elemento presenta un valor promedio de 48,8 µg/L, con un máximo de 216 µg/L y un mínimo de 10 µg/L. Se puede evidenciar una gran variabilidad en términos de concentración y distribución, al igual que en el caso del fluoruro. Cabe destacar que, en el sector de llanura, por fuera de la cadena de médanos, es donde se encuentran los mayores tenores (310 y 243 µg/L).

Aptitud del agua para distintos usos

Riego

Una de las principales problemáticas de las zonas áridas y semi-áridas es la salinización de los suelos debido a las altas tasas de evapotranspiración en estas áreas. Las sales tienden a concentrarse, alterando la estructura del suelo y disminuyendo además la capacidad de infiltración de los mismos y dificultando la captación de agua en la zona radicular de las plantas (Sánchez et al., 2016). El RAS mide el grado al cual el sodio en el agua de irrigación reemplaza al calcio y magnesio adsorbido en las arcillas del suelo, dañando así su estructura (Hounslow, 1995). La aptitud para riego del agua del área de estudio, puede ser determinada mediante el ploteo de las muestras en un gráfico de doble entrada RAS vs CE (Fig. 11).

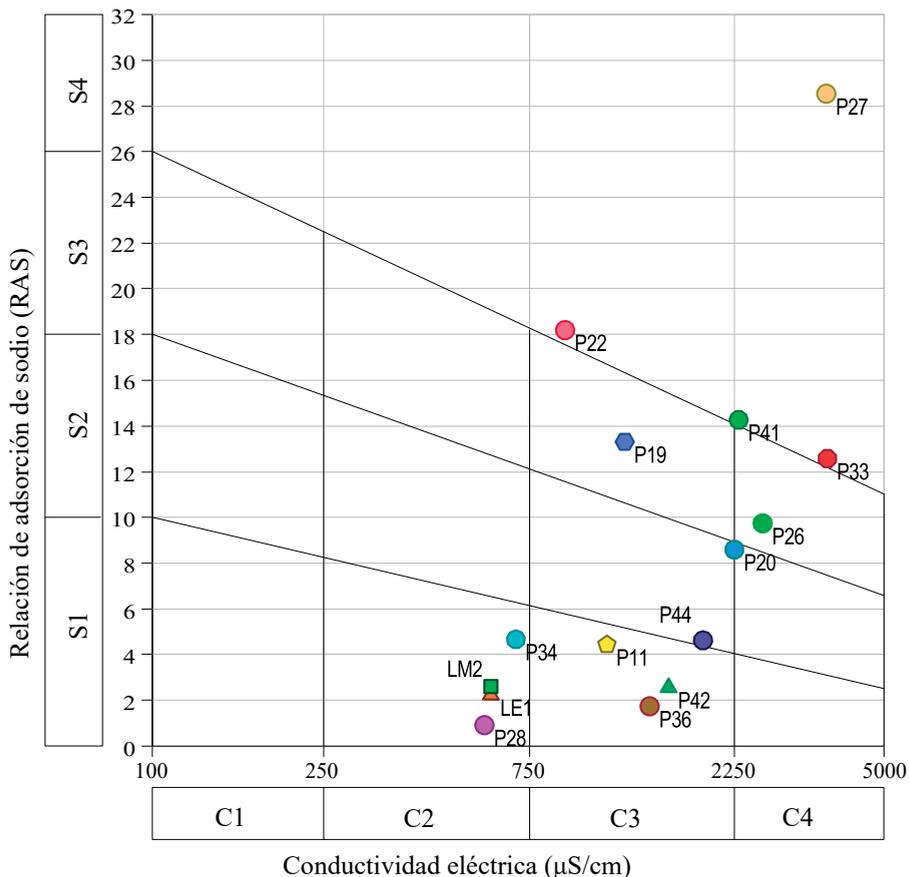


Figura 11. Ploteo de las muestras del acuífero freático en diagrama RAS vs CE. Fuente: elaboración propia sobre la base de datos de campo.

La muestra P32 no es considerada para la clasificación ya que superan los valores de conductividad admisibles, por lo que es automáticamente descartada como agua apta para riego de acuerdo a esta metodología. De las 15 muestras restantes:

- 26 % (4/15) clasifican como C2-S1.
- 20 % (3/15) como C3-S1.
- 20 % (3/15) como C4-S4.
- 13 % (2/15) como C3-S2.
- 7 % (1/15) como C3-S3.
- 7 % (1/15) como C3-S4.
- 7 % (1/15) como C4-S3.

El grupo C2-S1 puede ser utilizado para riego sin muchos inconvenientes cuando los suelos están sometidos a un lavado moderado. Todas las muestras que caen en una categoría C3 indica que pueden ser utilizadas con precauciones, siempre y cuando el drenaje del suelo no sea deficiente, condición que se cumple para los

suelos arenosos del área de estudio. La categoría C4 en general no se considera apta para riego, al tratarse de aguas con un contenido demasiado elevado de sales.

Por otro lado, los grupos S1 y S2 pueden ser considerados generalmente aptos, ya que no presentan riesgos significativos de alcanzar niveles tóxicos de sodicidad, mientras que las muestras de los grupos S3 y S4 no se suelen considerar aptas para riego, ya que pueden alcanzar niveles tóxicos de sodio intercambiable.

De esta manera, el 56 % de las muestras (9/16) resultan en mayor o menor medida, aptas para riego, teniendo en cuenta el excelente drenaje de los suelos arenosos en la zona de estudio, siendo el factor limitante en este caso la cantidad de sodio intercambiable. Dentro de las aguas con posibilidad de ser utilizadas, las mejores clasificadas son aquellas que se ubican en la porción central del sudeste de la cadena.

Consumo animal

El agua consumida por los animales posee una importancia fundamental en su correcto desarrollo y crecimiento, por lo que contar con una noción de su aptitud para tal fin se torna de gran importancia.

De acuerdo a los límites establecidos en la metodología utilizada, las muestras del área de estudio son, en general, aptas para consumo animal. Las conductividades son aceptables para ganado y aves (con excepción de la P32 que no es apta para consumo de estas últimas). En cuanto a los iones, una muestra se encuentra por encima del límite de As (P33) y dos por encima del de F (P19 y P22). Los iones restantes no presentan tenores por encima de los valores máximos permitidos. De esta manera, resulta que, de acuerdo a esta clasificación, el 81 % de las muestras (13/16) son aptas para bebida de ganado, mientras que el 75 % (12/16) son aptas para consumo aviar.

Consumo humano

Los límites máximos y mínimos admisibles para que el agua se considere potable para consumo humano se encuentran establecidos en el CAA en su Capítulo XII. En la tabla VIII se presenta la comparación entre los iones de las muestras analizadas y dichos límites. Cabe aclarar que el CAA contempla un número de elementos que no fueron obtenidos en análisis de laboratorio, mientras que, en otros casos, no establece normativa alguna para otros. Un caso algo particular es el del flúor, que como fue mencionado anteriormente, sus límites vienen dados por la temperatura promedio de la zona, por lo que en este caso el rango admisible es entre 0,8 y 1,3 mg/L.

Parámetro considerado	pH	TSD (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ⁼ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)	As (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	Dureza (mg/L)
Límite según CAA	6,5 – 8,5	1500	350	400	200	0,05*	0,8 – 1,3	400
LE1	7,7	271	37,9	26,5	66,1	0,036	1,4	165
LM2	7,8	273	49,9	22,1	71,2	0,023	< 1	142
P11	7,6	510	125	59,9	154	0,016	1,4	227
P19	7,8	560	70,9	250	260	0,023	9,9	73
P32	7,3	2990	1602	930	1159	0,081	< 1	616
P33	7,1	1680	549	265	610	0,216	< 1	445
P34	7,4	217	69,9	23,8	109	0,041	1,1	104
P41	7,3	837	479	198	435	0,026	1,2	176
P44	7,2	741	144	91,5	225	0,036	1,5	452
P20	7,85	1512	219,6	291	351	0,059	1,75	316
P22	8,25	673	35,9	19	204	0,045	6,1	24
P26	7,56	1729	415,3	216	402	0,078	1,5	321
P27	7,73	2344	782,7	315	762	0,055	1,4	135
P28	7,67	435	39,9	45	33	0,013	< 1	244
P36	7,07	910	157,7	99	87	0,023	1	483
P42	7,54	1090	171,7	124	132	0,01	1,3	497

Tabla VIII. Muestras analizadas según límites establecidos por el CAA. En negrita se resaltan las muestras cuyas concentraciones son aceptables para todos los analitos. *: Límite para el As aceptado en la provincia de Bs. As. Fuente: elaboración propia sobre la base de datos de campo.

Del análisis de esta tabla se desprende que, del total de las muestras, únicamente el 19 % (3/16) cumplen con los requisitos del CAA para ser consideradas aptas para consumo humano, con las muestras restantes con uno o varios parámetros por encima de los niveles permitidos. Los iones que constituyen las mayores limitantes para su aptitud son el sodio y el flúor. Sólo el 44 % y el 56 % de las muestras, respectivamente, son aptas de acuerdo a estos analitos.

Debido a que los valores en varios de los elementos analizados restringen el uso del agua del acuífero para su consumo humano, debe tenerse en cuenta la posibilidad de diferentes tratamientos que remuevan iones de la misma para llevarla a límites admisibles para ser considerada apta para consumo por parte de la población. Entre ellos, la ósmosis inversa es el método aplicado por la prestataria del servicio de agua de la localidad de Médanos, que posee allí una planta de tratamiento.

Discusión y conclusiones

Si se contrastan los análisis de agua de lluvia realizados por Bonorino (1994) en el área de la Laguna Chasicó, con muestras recogidas en estaciones cercanas (Médanos, Torquinst, Bahía Blanca, La Masallé, entre otras), se observa que las primeras son las únicas en las que el sodio predomina sobre los iones restantes. Esto podría deberse, tanto a las características morfológicas y la fuerte evapotranspiración en el cuerpo de agua, como a la cercanía de salinas y salitrales. El valor de sulfatos es también comparativamente alto, lo cual podría relacionarse a la presencia de suelos con yeso en el Salitral de la Vidriera, Salinas Chicas y la Fm. Chasicó, conjuntamente con el predominio de los vientos provenientes del O y NO en la región. Los índices geoquímicos de las muestras dejan de manifiesto, en primer lugar, la influencia del polvo atmosférico en la química del agua de lluvia, como también el efecto que tienen las condiciones de evapotranspiración y geomorfología en la zona de estudio.

El agua subterránea muestra un claro contraste entre las zonas de recarga y de descarga, si bien en general presenta una baja salinidad. Su composición es mayoritariamente bicarbonatada/clorurada-sódica, con el ión sodio prevaleciendo por sobre el resto de los cationes debido probablemente a la fuerte evapotranspiración en la zona.

Si bien la composición del agua subterránea puede entenderse como una evolución química desde aguas de zona de recarga a zonas de descarga (de mayor tenor salino y mineralización), no se observó una marcada diferenciación de los términos medios entre estas. La fuerte mineralización en zonas de descarga y particularmente en cercanías al Salitral de la Vidriera, estaría dada por las condiciones geomorfológicas de dicho sector en particular y principalmente a la presencia de costras de sales evaporíticas, que pueden ser depositadas o disueltas mediante ciclos sucesivos.

Las muestras que corresponden a sectores con mayor tiempo de tránsito presentan, en general, un incremento marcado principalmente en cloruro y sodio (como se vio ya reflejado en los diagramas de Stiff), evidenciando el transporte ocurrido, y tienen a desplazarse hacia arriba del diagrama de Schoeller-Berkaloff, con respecto a aquellas que han sufrido un tiempo de contacto menor con los sedimentos.

Dentro del acuífero, se reconoció un fenómeno de estratificación hidroquímica, donde mayor espesor de agua dulce se encontraría en el centro de la cadena medanosa, disminuyendo lateralmente. En acuíferos no confinados, de sedimentos permeables, tales como el caso de estudio, las precipitaciones infiltran continuamente y esta recarga contribuye al desarrollo de la lente de agua dulce, que desplaza hacia abajo al agua salada circundante (Falkland y Custodio, 1991). Una fuerte explotación puede alterar este equilibrio, provocando la entrada de agua salada en los pozos, induciendo contaminación por bombeo. Cuanto más elevado sea el caudal de extracción y mayor la profundidad de los pozos, el ingreso de aguas

de saladas puede darse con mayor intensidad, por lo que la determinación de caudales de explotación óptimos es de vital importancia. Esta situación puede ser monitoreada a través de un control periódico de la composición del agua. Por otro lado, este fenómeno puede verse dificultado por la existencia de capas de menor permeabilidad intercaladas en la secuencia de sedimentos. La profundidad donde se da el cambio en la salinidad del agua subterránea parece coincidir a grandes rasgos con el techo de un paquete de pelitas rojizas asignables a la Fm. Chasicó. La meteorización de ceniza y material volcánico presente en estos sedimentos, al ser alterados en contacto con el agua subterránea, pueden liberar elementos indeseables tales como flúor y arsénico al acuífero.

El flúor y el arsénico suelen ser una de las principales problemáticas en el agua subterránea del partido de Villarino y del área de estudio en particular, debido a la fuerte limitante que ejercen sobre su potabilidad y uso. Dentro de la cadena de dunas se verificó una gran variabilidad en su concentración y distribución, sin encontrar una buena correlación entre las concentraciones de ambos y con los mayores tenores ubicándose en la llanura circundante. Puede considerarse a estos oligoelementos como un indicador, asociando sus altas concentraciones a pozos que atraviesan las arenas de la cadena de dunas y captan aguas, al menos en parte, contenidas en las unidades subyacentes y en la llanura circundante. Estas unidades contienen ceniza y material volcánico, que aportaría las elevadas concentraciones de arsénico que se registran fuera del cordón de dunas. Los bajos valores registrados en las aguas subterráneas de las arenas del área de estudio se deberían al escaso material volcánico contenido en estas respecto a las unidades subyacentes.

Los valores antecedentes expuestos por diferentes autores (Bonorino, 1974; Bonorino, 1979; Albouy et al., 2003; Albouy, 2005; Farías et al., 2009; Lexow y Bonorino, 2012) son consistentes con los relevados en este estudio, por lo que se deduce que, a grandes rasgos, la distribución areal de la concentración de iones disueltos en el agua subterránea no ha cambiado de manera significativa en las últimas décadas. Esto posiblemente se debería tanto a la naturaleza poco reactiva del sedimento del acuífero, como a la falta de acciones antrópicas que alteren de manera significativa el balance hidrodinámico y/o hidroquímico del sistema en los puntos muestreados.

En cuanto la aptitud del agua subterránea para diferentes usos, el 56 % de las muestras resultan en mayor o menor medida, aptas para riego. Dentro de las aguas con posibilidad de ser utilizadas, las mejores clasificadas son aquellas que se ubican en la porción central del sudeste de la cadena. En el caso de su uso para consumo animal, el 81 % son aptas para ganado, mientras que el 75 % lo son para consumo aviar. Finalmente, la aptitud para consumo humano del agua subterránea del acuífero freático es fuertemente dependiente de la zona dentro del área de estudio, siendo, lógicamente, las aguas de zonas de recarga las de mejor aptitud química y en general admisibles según el Código Alimentario Argentino. Debido a que los valores de varios de los elementos analizados restringen el uso del agua del acuí-

fero para este fin, debe tenerse en cuenta la posibilidad de diferentes tratamientos que remuevan iones de la misma para llevarla a límites admisibles contemplados por la ley. Debe considerarse que esto acarrea un costo, logística e infraestructura extra que deben ser contemplados, por lo que lo estudiar y planear detalladamente las zonas de ubicación de captaciones de agua subterránea para extraer agua de la mejor calidad posible resulta de gran interés.

Referencias

Albouy, R. (2005). *Estudio hidrogeológico expeditivo en proximidades de la localidad de Argerich, provincia de Buenos Aires*. Informe FUNS, 7 pp. (Inédito).

Albouy, R., Carrica, J., Bonorino, A.G y Lexow, C. (2003). *Estudio hidrogeológico de las Salinas Chicas, Médanos, Villarino*. Bahía Blanca: UNS. 15 pp. (Inédito).

Andreis, R. (1965). *Petrografía y Paleocorrientes de la Formación Río Negro*. UNLP. La Plata.

Appelo, C. A. J. y Postma, D. (2004). *Geochemistry, groundwater and pollution*. 2nd Ed. Boca Raton: CRC Press.

Auge, M. (2004). *Regiones hidrogeológicas. República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza y Santa Fe*. UBA. 104 pp.

Bonorino, A. G. (1974). *Contribución al conocimiento de las aguas subterráneas de la zona de Médanos, partido de Villarino (Provincia de Buenos Aires)*. La Plata: C.I.C. de la provincia de Buenos Aires.

Bonorino, A. G. (1979). *Estudio hidrogeológico para la provisión de agua subterránea en la zona de Médanos, partido de Villarino, provincia de Buenos Aires*. Trabajo presentado en el VI congreso Geológico Argentino. Bahía Blanca. Actas 443-465.

Bonorino A. G. (1994). Geohidroquímica de la lluvia en la región del suroeste bonaerense. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 49 (1-2), 93-98.

Carrica J. C., Lexow, C. y Bonorino, A. G. (2012). *La recarga a través de cordones medanosos en zonas semiáridas. Estudio de caso: Médanos, Prov. de Buenos Aires, Argentina*. Trabajo presentado en el XI Congreso latinoamericano de Hidrogeología. Cartagena de Indias, Colombia. Memorias en CD.

Custodio, E., y Llamas, M. R. (1983). *Hidrología Subterránea (2° Ed.)*. Tomo II, Barcelona: Ed. Omega, 2350 pp.

Falkland, A. y Custodio, E. (1991). Hydrology and Water Resources of Small Islands: a Practical Guide. *Studies and Reports on Hydrology* (49), 435 pp.

Farías, S., Fernández-Turiel, J. L. y Gimeno, D. (2009). *Arsénico en aguas superficiales y subterráneas del partido de Villarino, Provincia de Buenos Aires*,

Argentina. Trabajo presentado en el IV Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de Hidrología Subterránea. VI Congreso Argentino de Hidrogeología. Santa Rosa, La Pampa.

Fidalgo, F. (1999). El Cuaternario de la provincia de Buenos Aires. En: Caminos, R. (Ed.). *Geología Argentina, Anales* 29 (pp. 700- 703), Buenos Aires: SEGEMAR.

Fidalgo, F., Tonni, E., Porro, N. y Laza, J. (1987). *Geología del área de la Laguna Chasicó (Partido de Villarino, Provincia de Buenos Aires) y aspectos bioestratigráficos relacionados*. Revista Asociación Geológica Argentina. 42 (3-4), 407-416.

Hounslow, A. W. (1995). *Water Quality Data. Analysis and Interpretation*. U.S.A: Lewis Publishers.

Lexow, C. y Bonorino, A. G. (2012). *Estudio hidrogeológico de Médanos*. Informe FUNSA.

Luque, J. L. (2018). *Calidad de agua para bebida de animales*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Recuperado de: <https://inta.gov.ar/documentos/calidad-de-agua-para-bebida-de-animales.pdf>

Martínez, D.E., Quiroz, O.M., Dapeña, C., Glog-Galli, M., Massone, H.E. y Ferrante, A. (2011). *Caracterización isotópica e hidroquímica de las precipitaciones en el sector sur de Tandilia*. Trabajo presentado en el VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Calidad y Contaminación de Agua Subterránea, Salta.

Pascual, R. (1961). Un Nuevo Cardiomyinae (Rodentia, Caviidae) de la Formación Arroyo Chasicó (Plioceno inferior) de la provincia de Buenos Aires. *Ameghiniana* 2(4): 57-71.

Rey, M., Ruffo, A. G., Giorgi, J. M., Albouy, E. R., Carrica, L. B., Bastianelli, N. V. (2023a). Cálculo de reservas hídricas subterráneas en el cordón de dunas septentrional del partido de Villarino a partir de tomografías de resistividad eléctrica. *GEOACTA* 44(2): 17-35. La Plata, Buenos Aires.

Rey, M., Ruffo, A. G., Albouy, E. R., Giorgi, J.M. (2023b). Hidrodinámica del acuífero freático del cordón de dunas septentrional del partido de Villarino, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista de geología aplicada a la ingeniería y al ambiente*, (50), e009. doi: <http://dx.doi.org/10.59069/24225703ee009>

Richards, L. A. (1969). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agriculture Handbook* 60, pp.

Rossetto, H. L. (1953). *Contribución al conocimiento psamográfico de los médanos de la zona oriental del partido de Villarino, Pcia. de Buenos Aires*. (Tesis doctoral). Museo de Ciencias Naturales de La Plata.

Sánchez, R., Pezzola, N. y Cepeda J. (1998). Caracterización edafoclimática del área de influencia del INTA E.E.A. Hilario Ascasubi, Partidos de Villarino y Patagones, provincia de Buenos Aires. *Boletín de divulgación* 18. INTA Hilario Ascasubi. 72 pp.

Sánchez, R. M., Dunel Guerra, L., Scherger. M. (2016). *Evaluación de las áreas bajo riego afectadas por salinidad y/o sodicidad en Argentina*. 1ra Ed. Hilario Ascasubi, Buenos Aires: Ediciones INTA.

Spaletti L. e Isla, F. (2003). *Características y Evolución del Delta del Río Colorado ("Colú- Leuvú") Prov. de Buenos Aires, República Argentina*. AAS. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*, 10(1), 23-37.

American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) y Water Pollution Control Federation (WPCF). (1989). *Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (17th edition)*. Washington D.C., U.S.A.: Díaz de Santos S.A.

Thornthwaite, C. W. (1948). *An approach toward a rational classification of climate*. *Geologic. Rev.* (38), 55-94. doi: <http://dx.doi.org/10.2307/210739>.

Fecha de recepción: 14 de agosto de 2024.

Fecha de aceptación: 20 de diciembre de 2024.

© 2025 por los autores; licencia otorgada a la Revista Universitaria de Geografía. Este artículo es de acceso abierto y distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia Atribución-NoComercial 4.0 Argentina de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.es>