

RESEARCH ARTICLE

Hydrochemical and isotopic tools to evaluate the groundwater role in the hydrological functioning of a Pampean lake, Buenos Aires province, Argentina

Uso de herramientas hidroquímicas e isotópicas para evaluar el rol del agua subterránea en el funcionamiento hidrológico de una laguna Pampeana, provincia de Buenos Aires, Argentina

Melisa Glok-Galli^{1,2,3}, Viviana Colasurdo^{1,4}, Daniel E. Martínez^{3,5}, Fabián Grosman⁴, Orlando M. Quiroz Londoño^{3,5}, Pablo Sanzano⁴

¹ Facultad de Ingeniería (UNCPBA). Av. del Valle 5737, 7400 Olavarría, Buenos Aires, Argentina.

² CIFICEN (UNCPBA-CICPBA-CONICET). Av. del Valle 5737, 7400 Olavarría, Buenos Aires, Argentina.

³ Grupo de Hidrogeología. IGCyC (UNMDP-CICPBA). Funes 3350, 7600 Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

⁴ ECOSISTEMAS (UNCPBA). Pinto 399, 7000 Tandil, Buenos Aires, Argentina.

⁵ IIMyC (UNMDP-CONICET). Funes 3350, 7600 Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

Corresponding author: melisaglokgalli@gmail.com (Melisa Glok-Galli)

ABSTRACT

Key points

Processes controlling waters composition were identified through ionic ratios, hydrochemical modelling and isotopes.

The cationic exchange and evaporation are the processes influencing the composition of the La Barrancosa lake waters (effluent).

A better understanding of the dynamic of the Tapalqué Creek Upper Basin hydrological system's components was achieved.

Waters from the fractured-karstic and detritic (Pampeano) aquifers, and from surface water bodies are closely interacting in the Tapalqué Creek Upper Basin (CSAT for its acronym in Spanish), southeast of the Chaco-Pampean plain, Argentina. The La Barrancosa lake, endorheic and of socio-economic and cultural relevance, is located in this basin headwater. Within the framework of an integrated vision of these water resources, the main objective of this work is to know this lake's water origin, as well as to identify and explain the processes involved in its interaction with the Pampeano aquifer. Hydrochemical and isotopic ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) tools were jointly used, with special emphasis on the ionic ratios study and the hydrochemical modelling. The rainwater evaporation during infiltration into aquifers and the dissolution/weathering of the geological materials rich in Ca^{2+} , Mg^{2+} and K^+ present in the study area, are the main processes that determine the composition of waters in the recharge zones. The dissolution of Na^+ -rich minerals and the cationic exchange are of relevance toward the plain zone. This last process and the concentration by evaporation control the composition of the La Barrancosa lake waters (effluent). These conclusions are validated by the $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ and d values characteristic of the CSAT waters and can be extrapolated to other basins developed in similar environments.

Keywords: Hydrochemical Modelling; Interaction; Ionic Ratios; La Barrancosa Lake; Stable Isotopes.

Article History:

Received: 29/09/2022

Accepted: 04/08/2023

RESUMEN

Puntos clave

Se identificaron los procesos determinantes de la composición de las aguas mediante relaciones iónicas, modelación hidroquímica e isótopos.

El intercambio catiónico y la evaporación son procesos delimitantes en la composición de las aguas de la laguna La Barrancosa (efluente).

Se logró una mejora en la comprensión de la dinámica de los componentes del sistema hidrológico de la cuenca superior del arroyo Tapalqué.

En la cuenca superior del arroyo Tapalqué (CSAT), al sudeste de la llanura Chaco-Pampeana, Argentina, las aguas de los acuíferos fracturados-kársticos y detrítico (Pampeano) y de los cuerpos de agua superficial se encuentran interactuando estrechamente. En su sector de cabecera se localiza la laguna La Barrancosa, endorreica y de relevancia en lo socioeconómico y cultural para la región. En el marco de una visión integrada de los recursos hídricos, este trabajo tiene como principal objetivo conocer cuál es el origen del agua de dicha laguna, así como identificar y explicar los procesos involucrados en su interacción con el acuífero Pampeano. Se utilizaron de manera conjunta herramientas hidroquímicas e isotópicas ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$), haciéndose especial hincapié en el estudio de las relaciones iónicas y la modelación hidroquímica. La evaporación del agua de precipitación durante su infiltración a los acuíferos y la disolución/meteorización de los materiales geológicos ricos en Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ presentes en el área de estudio, son los principales procesos que determinan la composición de las aguas en las zonas de recarga. La disolución de minerales ricos en Na^+ y el intercambio catiónico ganan relevancia hacia la zona de llanura. Este último proceso y la concentración por evaporación determinan la composición de las aguas de la laguna La Barrancosa, de funcionamiento efluente. Estas conclusiones son validadas por los valores de $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ y d característicos de las aguas del área bajo estudio y pueden ser extrapoladas a otras cuencas desarrolladas en ambientes similares.

Palabras clave: Interacción; Isótopos Estables; Laguna La Barrancosa; Modelación Hidroquímica; Relaciones iónicas.

Historial del artículo:

Recibido: 29/09/2022

Aceptado: 04/08/2023

1. Introducción

Los cuerpos de agua superficial (arroyos, lagunas y humedales en general) están conectados al agua subterránea, siendo parte activa del sistema de flujo subterráneo (Winter, 1999). Esta compleja interacción tiene un importante rol en el ciclo hidrológico, con fuerte impacto en la sustentabilidad y calidad del recurso hídrico, siendo necesario su entendimiento para una gestión eficaz del mismo (Sophocleous, 2002). La comprensión de estas relaciones entre acuíferos y cuerpos de agua superficial es un insumo esencial a la hora de favorecer su adecuado aprovechamiento.

Las lagunas son un componente importante dentro del ciclo global del agua, estando influenciadas tanto por la precipitación, como por procesos de evaporación y los flujos de agua subterránea y/o superficial (Burkert *et al.*, 2004). En adición a las actividades bióticas y abióticas que tienen lugar dentro de estos cuerpos de agua, el material orgánico, los nutrientes y otros elementos del entorno son transferidos dentro del sistema por medio del flujo de agua. La composición química del agua de las lagunas es el resultado de factores litológicos, climáticos, biológicos y antropogénicos, y de distintos procesos geoquímicos interactuando en los acuíferos y a través de la cuenca (Fernández Aláez *et al.*, 2006). Las lagunas son consideradas centinelas del cambio climático, ya que se caracterizan por responder rápidamente a los cambios en el clima y en el uso de la tierra (Adrian *et al.*, 2009; Williamson *et al.*, 2009, 2014). Por lo tanto, los estudios medioambientales a largo plazo que las involucran aportan información valiosa para el entendimiento de su funcionamiento y el seguimiento de los cambios complejos que ocurren en sus cuencas.

La llanura Chaco-Pampeana argentina es una de las regiones de planicie más extensas del planeta. Sus características climáticas, geológicas y geomorfológicas hacen posible el desarrollo de numerosas lagunas poco profundas. Solamente en la provincia de Buenos Aires, se han contabilizado más de cien mil de distinta extensión (Iriondo, 1989; Dangavs, 2005). Las mismas son, en su mayoría, endorreicas, no recibiendo aportes de cursos de agua superficial. El mayor movimiento de agua se da en sentido vertical: los aportes se deben fundamentalmente a las precipitaciones y las pérdidas se dan esencialmente por evaporación. También existe una vinculación con los acuíferos, siendo los flujos locales de agua

subterránea la descarga básica de estos cuerpos lacustres (Sala *et al.*, 1983). Asimismo, estas lagunas bonaerenses son humedales de gran valor ecológico que contribuyen al equilibrio de sistemas físicos y biológicos a través de numerosos bienes y servicios ambientales (motonáutica, goce del paisaje y otras actividades de recreación, núcleos de biodiversidad, caza y pesca comercial y/o deportiva, recepción de efluentes industriales, agropecuarios y domiciliarios, sumideros de carbón, regulación hídrica y climática, etc.). Dicho equilibrio puede ser alterado por la existencia de actividad antrópica intensa (Fernández Cirelli and Miretzky, 2004). La misma causa efectos negativos, entre los que se pueden citar los cambios en el nivel hidrológico, el aumento en la carga de nutrientes, contaminación, ingreso de especies exóticas y el calentamiento global (Vitousek *et al.*, 1997; Carpenter *et al.*, 2011).

La región Chaco-Pampeana ofrece entonces un alto potencial para analizar las modificaciones y tendencias morfoclimáticas, a través del origen y evolución de sus lagunas, como una herramienta integradora de los efectos de las variaciones climáticas. Sin embargo, no existe un grado de desarrollo adecuado en la adquisición y registro de información hidrológica y limnológica, lo que limita estas aplicaciones. Es aquí en donde el uso de técnicas basadas en trazadores químicos e isotópicos adquiere especial relevancia, al ser éstos integradores de procesos a diferentes escalas, proveyendo una buena aproximación a la comprensión de los fenómenos naturales que dan origen a las composiciones observadas.

La aplicación conjunta de herramientas hidroquímicas e isotópicas en la evaluación de la relación agua subterránea-agua superficial resulta de vital interés en los estudios de sistemas hidrológicos. La interpretación hidroquímica facilita la caracterización de aguas de diferentes orígenes, el reconocimiento de procesos de mezcla y la cuantificación de la interacción entre ellas, así como la identificación de posibles procesos modificadores a lo largo de líneas de flujo (Wang *et al.*, 2006). El uso de la modelación hidroquímica permite analizar los procesos responsables de la configuración hidroquímica observada, pudiendo correlacionarse las condiciones con respecto al equilibrio con parámetros ambientales. Por su parte, la utilización de los isótopos estables del agua (contenido de deuterio, $\delta^2\text{H}$, y oxígeno 18, $\delta^{18}\text{O}$) en este tipo de investigaciones hace posible la validación y ajuste de modelos hidrogeológicos

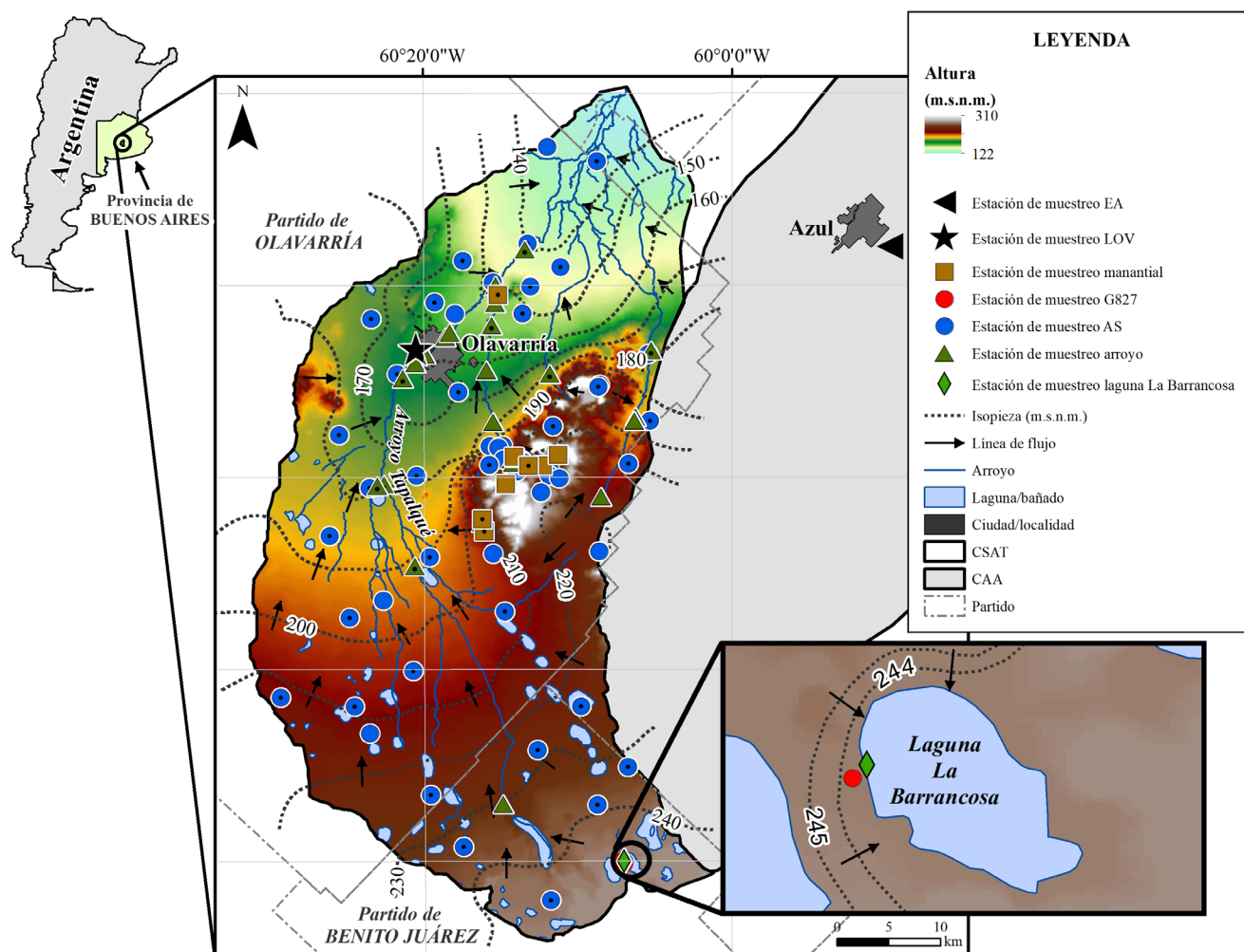


Figura 1. Mapa de localización de la cuenca superior del arroyo Tapalqué (CSAT) (los símbolos que caracterizan a las distintas estaciones y contienen un punto en su interior representan aquellas estaciones cuyas muestras de agua han sido analizadas no sólo fisicoquímicamente, sino también isotópicamente $-\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$). El mapa piezométrico fue modificado de Glok-Galli *et al.* (2016, 2020) y el límite de la cuenca del arroyo Del Azul (CAA) fue elaborado por el Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo J. Usunoff” (UNCPBA-CICPBA-Ayuntamiento de Azul) (m.s.n.m.: metros sobre el nivel del mar; EA: Estación Azul; LOV: Estación Olavarría; AS: agua subterránea).

Figure 1. Tapalqué Creek Upper Basin (CSAT) location map (symbols that characterize the different stations and contain a point inside them represent those stations whose water samples have been analyzed not only physicochemically, but also isotopically $-\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$). The piezometric map was modified from Glok-Galli *et al.* (2016, 2020) and the Del Azul Creek Basin (CAA) limit was elaborated by the Instituto de Hidrología de Llanuras “Dr. Eduardo J. Usunoff” (UNCPBA-CICPBA-Azul city Council) (m.s.n.m.: meters above sea level; EA: Azul Station; LOV: Olavarría Station; AS: groundwater).

conceptuales (Mazor, 1991). Estos proveen información útil sobre la relación existente entre el agua de lluvia, el agua subterránea y el agua superficial, así como facilitan la determinación de zonas de recarga-descarga, mezclas de agua, líneas de flujo y tiempos de residencia del agua en los acuíferos (Clark and Fritz, 1997; Kendall and McDonnell, 1998; Mook, 2002).

En la región sudeste de la llanura Chaco-Pampeana (al centro de la provincia de Buenos Aires) se ubica la cuenca superior del arroyo Tapalqué (CSAT) (Figura 1), en la cual los recursos hídricos merecen especial atención. En el sector de cabe-

cera de la misma se encuentra la laguna La Barrancosa, con características de localización y régimen que la hacen representativa de las lagunas del área y, por lo tanto, de las condiciones ambientales de la misma. Investigaciones previas, basadas tanto en técnicas hidroquímicas como isotópicas, han demostrado que el agua subterránea es una importante fuente de agua en diversas lagunas de la llanura (Miretzky *et al.*, 2000; Fernández Cirelli and Miretzky, 2004; Bocanegra *et al.*, 2013; Romanelli *et al.*, 2014; Bécher Quinodóz *et al.*, 2015; 2017; Santucci *et al.*, 2019). Para el caso de la CSAT, Glok-Galli *et*

al. (2016, 2020) y Glok-Galli and Colasurdo (2019) estudiaron la relación agua subterránea-agua superficial y acuífero detrítico-acuíferos fracturados/kársticos utilizando la misma metodología.

En la CSAT, las aguas subterráneas del acuífero detrítico, denominado acuífero Pampeano (Auge, 2004), constituyen la mayor fuente de abastecimiento para distintos usos (urbanos, agrícolas, industriales), mientras que las aguas superficiales (arroyos, lagunas), aunque poco significativas para el abastecimiento, son de gran importancia en diversos procesos hidrológicos. Por su parte, si bien los acuíferos fracturados-kársticos presentes en la zona no son actualmente explotados, las rocas que los conforman (hospedantes) son objeto de una importante extracción minera. En el marco de una visión integrada de los recursos hídricos, el presente artículo tiene como principal objetivo conocer cuál es el origen del agua de la laguna La Barrancosa en la CSAT, así como identificar y explicar los procesos involucrados en su interacción con el acuífero Pampeano. Para ello, se utilizaron de manera conjunta herramientas hidroquímicas e isotópicas ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$), haciéndose especial hincapié en el estudio de las relaciones iónicas y la modelación hidroquímica. De esta manera, se amplían los conceptos plasmados en el trabajo preliminar de

Glok-Galli and Colasurdo (2019) y en la investigación de Glok-Galli et al. (2020), mencionados anteriormente, mejorándose la comprensión de la dinámica de los componentes que conforman el sistema hidrológico bajo estudio.

2. Descripción del área de estudio

La CSAT, localizada al centro de la provincia de Buenos Aires (Figura 1), cuenta con una superficie aproximada de 2 100 km² y se caracteriza por presentar una baja pendiente topográfica regional (0.3 %) (Frenguelli, 1950). Ésta forma parte del complejo orográfico del Sistema de Tandilia (Nágera, 1940; Dalla Salda et al., 2006), en su porción noroccidental (denominación genérica: Sierras de Olavarría). El mismo se encuentra estructuralmente conformado por bloques alineados de acuerdo con tres sistemas de fallas Terciarias, con tendencia noroeste-sudeste, noreste-sudoeste y este-oeste, las cuales producen estructuras de horst y graben, y con estratos que se inclinan suavemente hacia el sudoeste (Nágera, 1940; Dalla Salda et al., 2006). Se define así en la cuenca un ámbito serrano de escasa expresión areal (al este y oeste) y con alturas de hasta 310 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). El ambiente predominante es el de llanura, con elevaciones

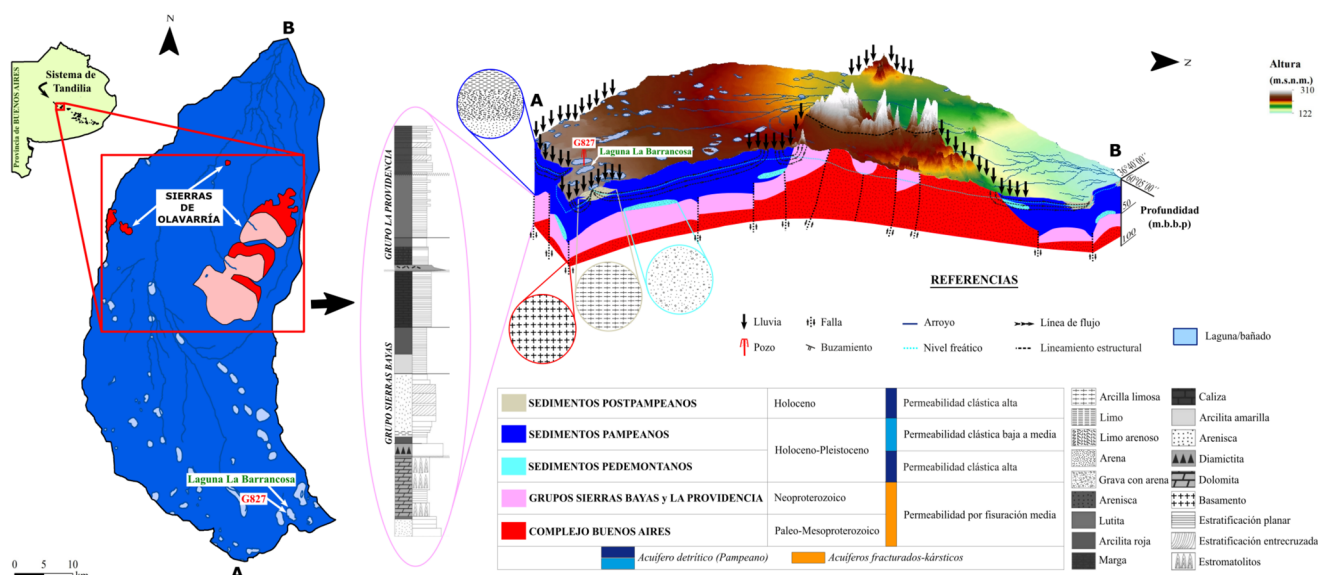


Figura 2. Mapa geológico (izquierda) y modelo geológico/hidrogeológico (derecha; perfil A-B) de la cuenca superior del arroyo Tapalqué. La litología (y sus respectivas referencias) de la cubierta sedimentaria Neoproterozoica del Sistema de Tandilia (Grupos Sierras Bayas y La Providencia) fueron modificadas del trabajo de Arrouy et al. (2015) (m.b.b.p.: metros boca de pozo; m.s.n.m.: metros sobre el nivel del mar).

Figure 2. Geological map (left) and geological/hydrogeological model (right; A-B profile) for the Tapalqué Creek Upper Basin. The lithology (and the respective references) of the Tandilia System Neoproterozoic sediments (Sierras Bayas and La Providencia Groups) were modified from Arrouy et al. (2015) (m.b.b.p.: meters below ground surface; m.s.n.m.: meters above sea level).

de hasta 160 m.s.n.m., que excepcionalmente llegan a los 250 m.s.n.m. en el sector sur, donde se localiza la laguna La Barrancosa. Existe un ambiente de transición, el piedemonte, que enlaza a los anteriormente mencionados (Varela, 1992; Auge, 1993) (Figura 2).

El tipo climático dominante en la región, según la clasificación de Thornthwaite (1948), es “*sub-húmedo-húmedo, con nula o pequeña deficiencia de agua, mesotermal*” (Varela, 1992; Auge, 1993). Existen grandes variaciones estacionales, espaciales e interanuales, tanto de temperaturas (media anual de 15.3 °C, con un mínimo de 14.6 °C y un máximo de 16 °C; período 1988-2015; Glok-Galli *et al.*, 2016) como de precipitaciones (promedio anual de 908.1 mm; período 1988-2017; Glok-Galli *et al.*, 2018), definiendo períodos húmedos y secos que condicionan la estructura y el funcionamiento de los distintos cuerpos de agua presentes en la cuenca bajo estudio (Merlos *and* Grosman, 2019). El tipo de explotación en el área es mixto, es decir, agrícola-ganadera, con predominio de esta última. En la agricultura sobresalen principalmente los cultivos de soja, trigo, girasol y maíz (Merlos *and* Requesens, 2019).

La CSAT es considerada como de tipo heterogénea, ya que en ella se reconocen dos unidades hidrogeológicas (Varela, 1992; Glok-Galli *et al.*, 2020). Por un lado, las rocas con permeabilidad secundaria (permeabilidad por fisuración media; Silva Busso *and* Amato, 2012) que conforman las Sierras de Olavarría del Sistema de Tandilia, son hospedantes de los acuíferos fracturados-kársticos de la zona y afloran en las áreas de relieve más alto de la misma: rocas graníticas del basamento cristalino Paleo-Mesoproterozoico, llamado Complejo ígneo-metamórfico Buenos Aires; y rocas carbonáticas de la informalmente denominada cubierta sedimentaria Neoproterozoica (calizas del Grupo Sierras Bayas, que subyacen en discordancia al Grupo La Providencia; Arrouy *et al.*, 2015). Por otro lado, los sedimentos Cuaternarios con permeabilidad primaria: sedimentos Pampeanos (Pleistoceno-Holoceno) y Postpampeanos (Holoceno) (Frenguelli, 1950), con permeabilidad clástica baja a media y alta, respectivamente (Silva Busso *and* Amato, 2012). Estos sedimentos Cuaternarios sobreyacen a las rocas de las serranías del Sistema de Tandilia (Figura 2).

Los sedimentos Pampeanos y Postpampeanos se encuentran vinculados hidráulicamente, ya que conforman el sistema acuífero detrítico del área, el acuífero Pampeano (Figura 2). Los mismos pre-

sentan granulometría variable, entre arenas y limos con intercalaciones de minerales arcillosos en la parte superior (illita y montmorillonita, con caolinita subordinada) y grava y arena en la parte inferior. Ocasionalmente aparecen niveles de tosca o bien carbonato de calcio (CaCO_3) pulverulento (calcreta) y de ceniza volcánica. La composición mineralógica es principalmente cuarzo, plagioclasas, feldespato potásico con variable cantidad de sílice amorfa en forma de vidrio volcánico, pudiendo aparecer micas y minerales opacos. También se ha descrito la presencia de yeso, halita, calcita y dolomita intra-sedimentarios (Teruggi, 1954, 1957; Dangavs *and* Blasi, 2002; Quiroz Londoño *et al.*, 2008; Vital *et al.*, 2018).

El acuífero Pampeano se caracteriza por ser libre a semiconfinado y por tener un espesor variable entre 20 y 100 m (Quiroz Londoño *and* Martínez, 2021). A través de estudios hidráulicos llevados a cabo en un pozo de bombeo localizado en la CSAT (36°59'14.4" S, 60°13'36.7" O; 156 m.s.n.m.), Fernández *and* Frigerio (1984) describieron un espesor de ~ 50 m para este acuífero y ~ 15 m de espesor fisurado en las calizas del Grupo Sierras Bayas. Asimismo, Auge (2004) señaló que “*la parte superior del acuífero Pampeano contiene el manto freático, mientras que el grado de confinamiento aumenta con la profundidad, hasta semiconfinarse por debajo de los 40 ó 50 m*”. Por su parte, Silva Busso *and* Amato (2012) propusieron que los acuíferos fracturados-kársticos son probablemente no confinados en las secciones aflorantes de las serranías del Sistema de Tandilia y semi-confinados a confinados donde los sedimentos Pampeanos cubren la zona de piedemonte (Glok-Galli *et al.*, 2020) (Figura 2).

En la CSAT, el valor promedio de nivel freático encontrado es de 196.3 m.s.n.m., con un valor mínimo de 139.1 m.s.n.m. y un valor máximo igual a 247.1 m.s.n.m (Glok-Galli *et al.*, 2016). Como puede observarse en el mapa de la Figura 1, si bien el límite de la cuenca está marcado por la topografía, se asume que en algunos sectores (al norte y al sur) la morfología freática, de tipo radial convergente, no es coincidente con la topográfica. Por lo tanto, su límite no se considera de tipo impermeable en su totalidad, no descartándose aportes subterráneos de cuencas vecinas, excepto en los sectores de afloramientos de rocas del Sistema de Tandilia. Además, la homogeneidad y equidistancia de las líneas isofreáticas no muestran cambios de permeabilidad importantes en el

acuífero detrítico, a excepción del contacto entre el sector serrano y el área más llana (Varela, 1992; Glok-Galli *et al.*, 2016, 2020). La distribución de las isopiezas determina la existencia de un flujo regional con dirección NO-N-NE, que se recarga en el sector sur y recibe aportes locales de agua subterránea desde las sierras, al este y oeste. La descarga natural del sistema ocurre a través de la red hidrográfica en el arroyo Tapalqué (de comportamiento ganador, al igual que sus tributarios) y en los cuerpos lacustres, como la laguna La Barrancosa (también efluente). Las salidas de origen antrópico están representadas por la explotación de pozos para la actividad rural y para el suministro urbano del partido de Olavarría (figuras 1 y 2).

En la mayoría de los estudios realizados en la región, el modelo hidrogeológico conceptual para el acuífero Pampeano interpreta que la recarga se debe principalmente a la infiltración directa de los excedentes de agua de lluvia (Varela, 1992; Auge, 1993; Glok-Galli *et al.*, 2016). Glok-Galli *et al.* (2020) demostraron por primera vez en su investigación la importancia del papel hidrológico que tienen también los acuíferos fracturados-kársticos en la cuenca, reconociéndose a los mismos como otra fuente de recarga al acuífero detrítico en las zonas de afloramientos de serranías. De esta manera, los acuíferos Pampeano y fracturados-kársticos se encuentran conectados y su recarga es conjunta, a partir de la precipitación, y/o diferida, cuando el agua de recarga se transfiere desde los acuíferos fracturados-kársticos al acuífero detrítico (Figura 2).

A través del método de balance hídrico a nivel edáfico, Glok-Galli *et al.* (2018) estimaron un valor de recarga al acuífero Pampeano en la CSAT del 7.5 % (67.8 mm/año) del total de la precipitación (908.1 mm) para el período 1988-2017, asumiendo como única entrada al agua de lluvia y como salidas, a la evaporación y al escurrimiento superficial (escorrentía superficial que no se ha llegado a infiltrar). Este valor de recarga se obtuvo considerando los valores medio anual de evapotranspiración y de excedente de agua anual (cantidad de agua de lluvia que se infiltró y no se evaporó, entre los meses de junio y octubre) calculados, iguales a 794.9 mm y 113.2 mm, respectivamente. También se tuvo en cuenta el valor de escurrimiento superficial del 5 % (45.4 mm/año) del total de la precipitación calculado por Varela (1992), siendo este último mínimo debido al bajo gradiente topográfico que caracteriza a la cuenca en estudio (Figura 1).

Finalmente, desde un punto de vista hidrográfico, en la CSAT se diferencian dos sectores: uno al centro-norte, caracterizado por una red de drenaje integrada, escasamente desarrollada (densidad de drenaje: 0.05 km/km²), en donde el colector principal es el arroyo Tapalqué, de rumbo general NO-N-NE; y otro al sur, con depresiones y bañados aislados que no mantienen vinculación con dicho arroyo, y en donde se sitúa la laguna La Barrancosa. La misma se localiza específicamente al norte del partido de Benito Juárez (inmediatamente al norte de la divisoria principal de la CSAT, en su zona de recarga) y presenta una relevancia en lo socioeconómico y cultural en la región, ya que por su ubicación cercana a importantes centros urbanos (ciudades de Olavarría y Azul) (Figura 1) fue utilizada como balneario en el pasado y, desde la década de los 90', para llevar a cabo la actividad pesquera.

La laguna La Barrancosa es considerada como endorreica y de carácter permanente. Presenta una forma ligeramente alargada con dirección norte-sur, con una longitud de unos 1 600 m y un ancho de 1 000 m (Gentile, 2007). Abarca una superficie promedio de 1.6 km², alcanzando un área mínima de 1 km² y un área máxima de 2.2 km² (período 1984-2004; Canziani *et al.*, 2019). En referencia a su área de recarga, ésta se localiza hacia el este-noreste y oeste-noroeste de la laguna y, en menor medida, hacia el suroeste (ampliación Figura 1), en donde la divisoria de aguas subterráneas podría estar algo desplazada hacia el sur, como se mencionó anteriormente. Si bien esta laguna no se conecta directamente con ningún arroyo principal, durante períodos de inundación suele vincularse a otros cuerpos de agua, generándose vías de intercambio de flora y fauna entre ellos (Grosman, 2008).

El contexto geológico-geomorfológico para la laguna La Barrancosa indica que la depresión fue el resultado de procesos vinculados con la acción eólica, es decir, una cubeta de deflación elaborada sobre los sedimentos Cuaternarios (Pampeanos y Postpampeanos). Posteriormente, la evolución del paisaje continuó con la acumulación de depósitos eólicos, entre 30 000 y 10 000 años atrás, bajo condiciones más secas que las actuales. Entre los 10 000 y 9 000 años atrás se produjo, a nivel regional, un momento de mayor temperatura y humedad, dando lugar a la estabilidad del paisaje. Este evento se registró en la laguna con el desarrollo de un suelo antiguo enterrado (denominado paleosuelo). A partir de los 8 000

años atrás, se produjo el retorno a condiciones áridas y secas en la región. En la laguna La Barrancosa se identificó un segundo evento de deflación y la consecuente acumulación de depósitos eólicos, los cuales generaron las barrancas que le dan el nombre a la misma. Alrededor de los 1 000 años antes del presente, las evidencias indican que el clima se tornó más templado y húmedo, adquiriéndose las características de los ecosistemas modernos (Fidalgo *et al.*, 1986; Mesineo and Barros, 2009; Tonni *et al.*, 1999).

En relación al efecto que tienen las variables climáticas, fisicoquímicas y antropogénicas sobre la laguna La Barrancosa, Alfonso *et al.* (2019) llevaron a cabo un monitoreo ambiental de la misma a través del uso de una boya multiparamétrica instalada en su sector central (período 2013-2016). Como resultado del estudio y análisis de estas variables medidas en alta frecuencia, se concluyó que las fluctuaciones diarias en los parámetros salinidad y turbidez en la laguna son producto de los cambios en la temperatura del aire (valor promedio: 14.3 °C) y la velocidad del viento (valor medio: 16.4 km/h), los cuales aumentan la evaporación y, por lo tanto, la concentración de sales. El efecto del viento provoca además la re-suspensión de los sedimentos (valor medio: 251 mg/L) en el fondo de la laguna, y el aumento en la temperatura del aire origina, luego de unas horas, un aumento en la temperatura del agua (valores mínimo y máximo de 5.8 °C en invierno y 28.9 °C en verano, respectivamente) y la conductividad eléctrica (CE) (valor medio: 2 070 $\mu\text{S}/\text{cm}$) de este cuerpo de agua. Por último, se observó una disminución en los valores de CE ($\sim 1\,000\ \mu\text{S}/\text{cm}$) cuanto mayor fue el nivel del agua medido en la laguna (valor máximo medido: 4.6 m de profundidad; Fusé *et al.*, 2019).

3. Metodología

3.1. Toma de muestras y análisis hidroquímico

Se consideraron en total 34 muestras de agua de la estación situada en la orilla de la laguna La Barrancosa y 33 muestras de agua subterránea (correspondientes al acuífero Pampeano) colectadas de un pozo localizado aproximadamente a 220 m de dicha laguna y de alrededor de 12 m de profundidad (G827) (Figura 1). Estas campañas de muestreo se realizaron desde el año 2009 al año 2021, recolectándose, cuando fue posible, 1 muestra de agua subterránea del pozo G827 y 1

muestra de agua de la laguna, esta última tomada sub-superficialmente y en el mismo sitio (~ 50 m hacia el interior de la misma). Además, la base de datos a tener en cuenta para la caracterización hidroquímica se complementó con los análisis fisicoquímicos llevados a cabo en 17 muestras mensuales de agua de lluvia correspondientes a un colector identificado como LOV, instalado en la CSAT (Estación Olavarría; $36^{\circ}53'19.1''$ S, $60^{\circ}20'33.9''$ O; 163 m.s.n.m.); 11 muestras de manantiales y pozos desarrollados/perforados en rocas graníticas y calizas de los acuíferos fracturados-kársticos, 67 muestras de agua subterránea (AS) recolectadas de pozos de abastecimiento domiciliario, molinos y pozos de riego, y correspondientes al acuífero Pampeano; y 106 muestras de agua superficial tomadas en las estaciones situadas en el arroyo Tapalqué y en sus arroyos tributarios (Figura 1). La mayoría de estas muestras se recolectaron en el período de 2015 a 2021, aunque se consideraron también algunos análisis hidroquímicos previos realizados en muestras de arroyos colectadas desde el año 1993 y en muestras correspondientes a ambos tipos de acuíferos (detritico y fracturados-kársticos) tomadas desde el año 2002. Se asume que no existe una variabilidad significativa en la composición fisicoquímica de aquellas muestras de agua subterránea correspondientes a la misma estación y tomadas en diferentes fechas (Glok-Galli *et al.*, 2020). Por su mayor tiempo de residencia y las características dispersivas del acuífero detritico, el agua subterránea tiende a homogeneizar dicha composición, sin responder de manera brusca a variaciones temporales breves.

Los parámetros pH, temperatura y CE fueron determinados "in situ", y las muestras tomadas en botellas de PET de 1 L. Los análisis químicos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Química de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires. A la totalidad de muestras se les determinó iones mayoritarios a través de métodos estándar. Los iones calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}) fueron determinados por titulación complejométrica con EDTA, sodio (Na^{+}) y potasio (K^{+}) por fotometría de llama, cloruro (Cl^{-}) por el método de Mohr, bicarbonato (HCO_3^{-})-carbonato (CO_3^{2-}) por valoración con ácido clorhídrico y sulfato (SO_4^{2-}) por gravimetría. Dichas determinaciones se efectuaron siguiendo la metodología detallada en APHA-AWWA-WPCF (1992).

La información hidroquímica se almacenó utilizando el programa AQUACHEM (Calmbach and

Waterloo Hydrogeologic Inc., 2003) y se analizó mediante una caracterización estadística general, diagramas de cajas y de Piper (Hem, 1992) y relaciones iónicas. Se utilizó el software PHREEQC (Parkhurst and Appelo, 1999) para el cálculo de los índices de saturación de calcita y yeso ($IS_{calcita}$ e IS_{yeso} , respectivamente).

3.2. Modelación hidroquímica

Los modelos hidroquímicos se realizaron también a través del software PHREEQC (Parkhurst and Appelo, 1999). Se eligieron para ello los análisis más completos (con la mayor cantidad de parámetros fisicoquímicos medidos), llevados a cabo en muestras de agua recolectadas en los meses y años (diciembre de 2014 y marzo de 2018) en los cuales la laguna La Barrancosa se encontró en un estado hidrológico promedio. En este caso, el uso de análisis pertenecientes a fechas en concreto es más representativo que el empleo de un valor promedio de todos los análisis con los que se cuenta, y esto se debe a que lo que se interpreta a partir de la modelación hidroquímica es la variación de moles en un momento dado.

Por un lado, se efectuó una modelación hidroquímica directa con la finalidad de explicar los cambios en los valores de pH y de $IS_{calcita}$ que ocurren a partir de la interacción acuífero Pampeano-laguna La Barrancosa. En primer lugar, se calculó el logaritmo de la presión parcial de dióxido de carbono ($\log P_{CO2(g)}$ (atm)) para una muestra del pozo G827 (fecha de muestreo: 12/12/2014), a partir de la Ecuación (1) (Appelo and Postma, 1993), teniendo en cuenta los valores de HCO_3^- (420.5 mg/L) y pH (7.5) medidos "in situ" en el campo (se eligió esta muestra por su cercanía a la laguna y se tomó como representativa de la composición del agua subterránea del acuífero detrítico de la cuenca):

$$\log P_{CO2(g)}(atm) = \log[HCO_3^-] + 7.8 - pH \quad (1)$$

Posteriormente, se efectuó el modelo hidroquímico directo, tomándose como solución inicial (SI) a esta muestra de agua subterránea, la cual fue puesta en equilibrio con calcita bajo dos condiciones diferentes de $P_{CO2(g)}$: condiciones atmosféricas ($\log P_{CO2(g)}$ (atm): -3.5) y a un valor de $P_{CO2(g)}$ cuyo $\log P_{CO2(g)}$ (atm): -3, considerando algunas variaciones en la $P_{CO2(g)}$ debido a la actividad de los organismos que habitan la laguna (Izaguirre and Vinocur, 1994). Valores de $P_{CO2(g)}$ (atm) en ese

rango fueron utilizados anteriormente (Glok-Galli et al., 2014) en estimaciones de secuestro de CO_2 en el sector sudeste de la llanura Chaco-Pampeana. Se tomó como solución de referencia para la validación de dicho modelo a una muestra representativa de la laguna (fecha de muestreo: 12/12/2014). Los valores de pH e $IS_{calcita}$ modelados para la misma fueron tenidos en cuenta al momento del análisis final de la modelación.

Por otro lado, se llevaron a cabo dos modelos hidroquímicos inversos con el fin de identificar los principales procesos geoquímicos que ocurren como consecuencia de la relación acuífero Pampeano-laguna La Barrancosa. Partiendo del modelo hidrogeológico conceptual para la CSAT, se asume que la composición del agua de la laguna se debe a un proceso de evaporación del agua del acuífero Pampeano que descarga en ella y es representada por la composición del pozo G827, como se mencionó previamente. Para comprender cómo se alcanza la composición de esta muestra representativa de la descarga de agua subterránea, en el primer modelo se tomó como SI a una muestra de agua de lluvia correspondiente al colector LOV y como solución final (SF) a una muestra del pozo G827 (fecha de muestreo: 07/03/2018) (Figura 1). Se simuló la evaporación del agua durante la infiltración por sustracción de agua de la solución, hasta obtenerse un contenido de Cl que se acerque a la concentración de este mismo ión observada en la SF. Así, la solución resultante a partir de la simulación de evaporación es tomada como la composición efectiva del agua que recarga al acuífero. Posteriormente tienen lugar los diferentes procesos geoquímicos que llevan a la composición final observada en el agua subterránea. La inexistencia de otro aporte de Cl, tal como el que puede resultar de la interacción agua-roca, es un supuesto altamente utilizado, por ejemplo, en el cálculo de recarga por balance de cloruros (Custodio, 1973). Como se mencionó anteriormente, Vital et al. (2018) determinaron la presencia de halita en el acuífero Pampeano. Sin embargo, se considera que la existencia de esta fase mineral podría ser también el resultado de la evaporación del agua de precipitación, que luego sería re-disuelta y transportada al acuífero en lluvias posteriores.

En la segunda modelación inversa, se tomó como SI a la muestra del pozo G827 y como SF a una muestra de la laguna recolectada en la misma fecha (fecha de muestreo: 07/03/2018). Ésta se realizó con la finalidad de poder corroborar si el modelo hidroquímico de balance de ma-

sas se corresponde con el modelo conceptual del origen del agua de la laguna La Barrancosa.

Para los dos modelos inversos se aceptó una incertidumbre analítica variable entre el 5% y el 11%. Las fases minerales seleccionadas fueron: calcita, $\text{CO}_{2(g)}$, yeso, halita, e intercambio iónico de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ y K^+ . Las mismas se eligieron considerando que: 1) puede asumirse que el acuífero Pampeano es un sistema abierto al $\text{CO}_{2(g)}$ por su condición freática en su sector superior (Auge, 2004); 2) la textura de los sedimentos incluye el tamaño arcilla (Teruggi, 1957), lo que implica una mayor capacidad de intercambio catiónico; 3) en las secciones aflorantes, el CaCO_3 es abundante (Bonorino *et al.*, 2001); 4) la presencia de yeso en el acuífero Pampeano fue revelada en trabajos como los de Dangavs and Blasi (2002) y Quiroz Londoño *et al.* (2008). Además, Vital *et al.* (2018) confirmaron la precipitación de halita y también de yeso en sectores de la zona no saturada del acuífero; y 5) los estudios previos existentes en el área de estudio.

3.3. Toma de muestras y análisis isotópico ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$)

Se analizaron isotópicamente 9 muestras de agua correspondientes a la estación localizada en la laguna La Barrancosa y 7 muestras de agua subterránea del pozo G827 (período 2015-2021). En adición, se consideraron para una mejor caracterización los contenidos de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ determinados durante el período 2015-2021 en 19 muestras mensuales de agua de lluvia del colector LOV, 6 muestras de manantiales y pozos desarrollados/perforados en las rocas de los acuíferos fracturados-kársticos, 48 muestras de agua subterránea (AS) correspondientes al acuífero Pampeano (además de las pertenecientes al pozo G827) y 45 muestras de arroyos (Figura 1). Todas las muestras se tomaron en botellas de PET de 50 mL. Los análisis isotópicos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Hidrogeoquímica e Hidrología Isotópica de la Universidad Nacional de Mar del Plata, mediante espectroscopía láser (Lis *et al.*, 2008), siguiendo lo establecido por el OIEA (2009), utilizando un espectroscopio láser “Los Gatos Research” 45-EP. Los resultados se expresaron como desviaciones isotópicas en valores en permil (‰) (Ecuación (2)):

$$\delta = 1000 \frac{(R_s - R_p)}{R_p} \quad (2)$$

en donde δ : desviación isotópica en ‰, s : muestra, p : referencia internacional, y R : relación isotópica ($^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$); y se analizaron mediante una caracterización estadística general a través del programa AQUACHEM (Calmbach and Waterloo Hydrogeologic Inc., 2003). La referencia utilizada fue “Vienna Standard Mean Ocean Water” o “V-SMOW” (Gonfiantini, 1978), y las incertidumbres: ± 0.8 ‰ para $\delta^2\text{H}$ y ± 0.12 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$. Se utilizó la Línea Meteorica Local (LML) obtenida mediante análisis de regresión ortogonal a partir de muestras compuestas mensuales de precipitación de la Estación Azul (EA; $36^\circ 47' 59.5''$ S, $59^\circ 49' 47.8''$ O; 137 m.s.n.m.; Figura 1) (Dapeña *et al.*, 2010), incluida en la “Red Mundial de Isótopos en las Precipitaciones” (OIEA/OMM, 2006), ya que actualmente no se cuenta con un registro de más de 3 años de contenidos isotópicos en el colector LOV.

4. Resultados

4.1. Caracterización hidroquímica

Como puede observarse en el diagrama de Piper de la Figura 3, en el cual se considera la clasificación de las fases hidroquímicas de las

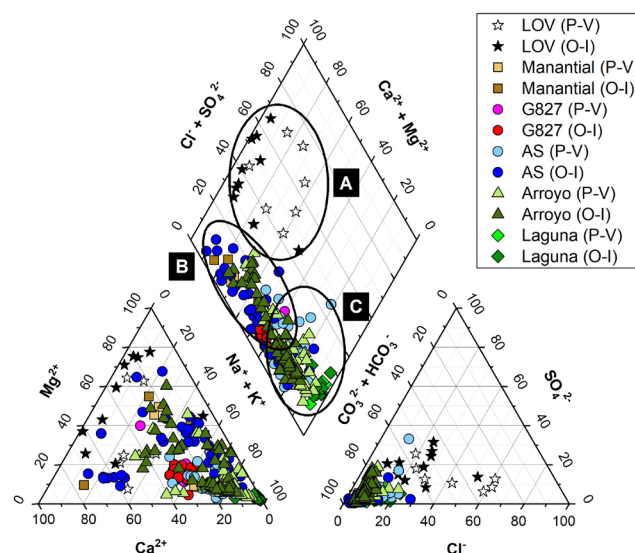


Figura 3. Diagrama de Piper para las muestras de agua del colector de agua de lluvia LOV, de los acuíferos fracturados-kársticos (manantiales), del acuífero Pampeano (G827+AS), de los arroyos y de la laguna La Barrancosa (P-V: primavera-verano; O-I: otoño-invierno).

Figure 3. Piper diagram for water samples from the LOV rainfall collector, fractured-karstic (springs) and Pampeano (G827+AS) aquifers, streams and La Barrancosa lake (P-V: spring-summer; O-I: autumn-winter).

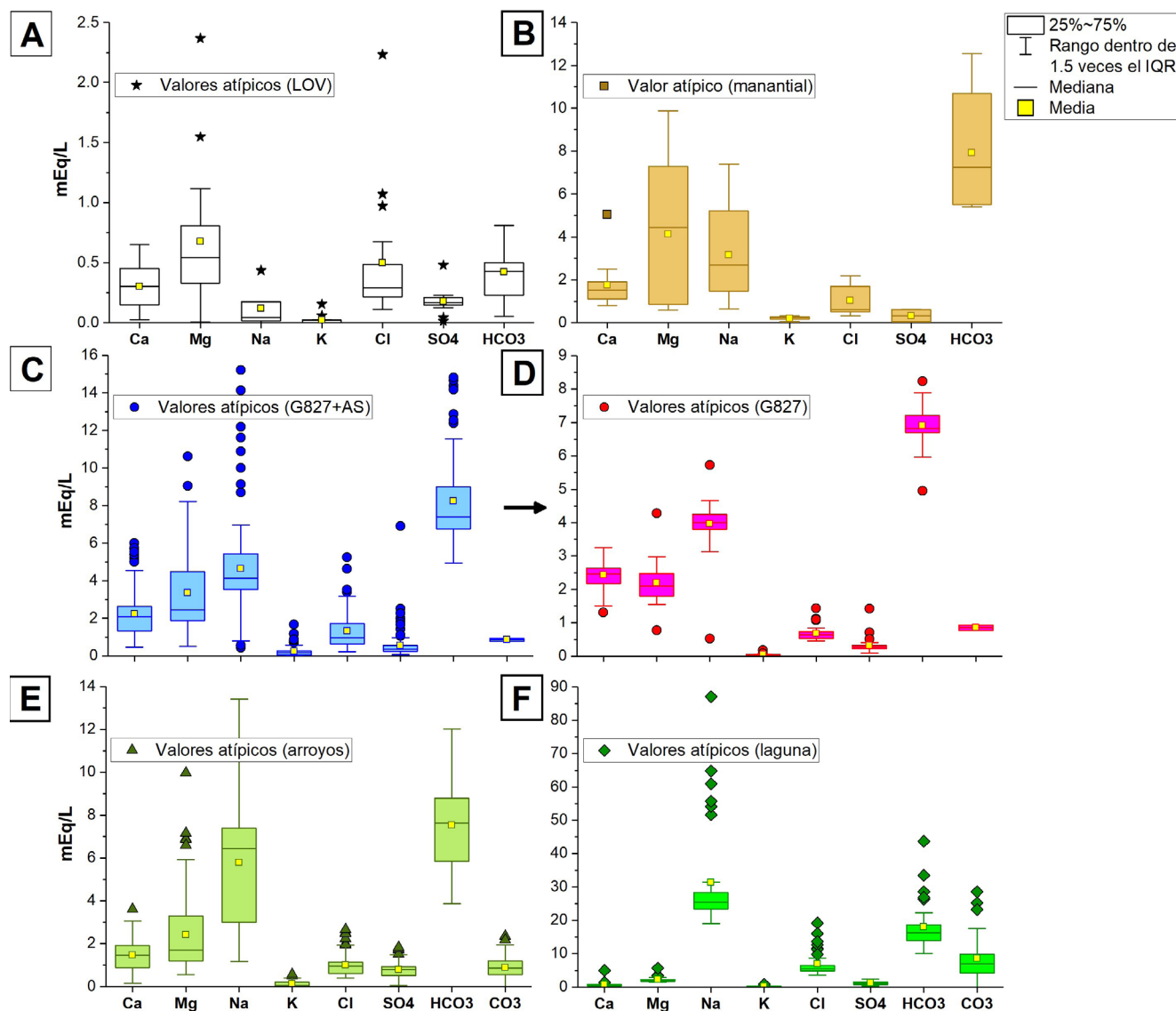


Figura 4. Composición iónica (mEq/L) de las muestras de agua pertenecientes A. al colector LOV, B. a los acuíferos fracturados-kársticos (manantiales), C. al acuífero Pampeano (G827+AS), D. al pozo G827, E. a los arroyos y F. a la laguna La Barrancosa.

Figure 4. Ionic composition (mEq/L) of water samples from the A. LOV rainfall collector, B. fractured-karstic aquifers (springs), C. Pampeano aquifer (G827+AS), D. well G827, E. streams and F. La Barrancosa lake.

aguas de la CSAT según la época del año: P-V (primavera-verano: diciembre-enero-febrero-marzo-abril-mayo) y O-I (otoño-invierno: junio-julio-agosto-septiembre-octubre-noviembre), existen 3 grupos principales de tipos de agua: A) Mg-Ca-HCO₃-Cl, B) Mg-Ca-HCO₃ y C) Na-HCO₃. Dentro del primero (grupo A) se encuentran las muestras de agua del colector de agua de lluvia LOV (Figura 1). Los puntos de muestreo correspondientes a la mayor parte de los manantiales y pozos desarrollados/perforados en las rocas que constituyen los acuíferos fracturados-kársticos, así como las muestras de agua subterránea del acuífero detrítico (Pampeano) y de los arroyos

localizadas hacia las zonas de recarga de la cuenca (mayoritariamente hacia el este y oeste, donde se sitúan las sierras, y hacia el sur; Glok-Galli *et al.*, 2020), se corresponden con el segundo grupo (B). Por su parte, dentro del tercer grupo (C) se ubican algunas muestras de agua pertenecientes a los acuíferos fracturados-kársticos y aquellas muestras de agua subterránea del acuífero Pampeano y de arroyos situadas en la zona de descarga de la cuenca y hacia el este, sobre la divisoria de aguas con la vecina cuenca del arroyo Del Azul (CAA; Figura 1) (Glok-Galli *et al.*, 2020). Se encuentran también dentro de este grupo las muestras de agua tomadas en la esta-

ción localizada en la laguna La Barrancosa. Excepto las muestras de agua de lluvia del colector LOV tomadas en la época de P-V, que se caracterizan por presentar una composición que tiende a ser más clorurada con respecto a aquellas recolectadas en O-I, no se observan diferencias significativas en la composición hidroquímica del resto de las muestras de agua según la época del año.

Para las muestras de agua de lluvia del colector LOV (Figura 1), el valor promedio de pH es igual a 6.3. La CE varía entre 19 $\mu\text{S/cm}$ y 125 $\mu\text{S/cm}$, presentando un valor medio de 71 $\mu\text{S/cm}$. En referencia a los componentes mayoritarios, los cationes en orden de abundancia promedio (y concentración media) son: Mg^{2+} (0.7 mEq/L), Ca^{2+} (0.3 mEq/L), Na^+ (0.1 mEq/L) y K^+ (0.02 mEq/L); y los aniones: Cl^- (0.5 mEq/L), HCO_3^- (0.4 mEq/L) y SO_4^{2-} (0.2 mEq/L) (Figura 4A). Las muestras de agua pertenecientes a los acuíferos fracturados-kársticos se caracterizan por un pH promedio de 7.8 y una CE promedio de 594 $\mu\text{S/cm}$, con valores mínimo y máximo de este parámetro de 470 $\mu\text{S/cm}$ y 790 $\mu\text{S/cm}$, respectivamente. En este caso, los cationes en orden de abundancia promedio (y concentración media) son: Mg^{2+} (4.1 mEq/L), Na^+ (3.2 mEq/L), Ca^{2+} (1.7 mEq/L) y K^+ (0.2 mEq/L); y los aniones: HCO_3^- (7.9 mEq/L), Cl^- (1.0 mEq/L) y SO_4^{2-} (0.3 mEq/L) (Figura 4B).

Todas las muestras de agua subterránea correspondientes al acuífero Pampeano presentan valores promedio de pH y CE de 7.5 y 850 $\mu\text{S/cm}$ (variable entre 523 $\mu\text{S/cm}$ y 1 932 $\mu\text{S/cm}$), respectivamente. Los cationes en orden de abundancia promedio (y concentración media) son: Na^+ (4.6 mEq/L), Mg^{2+} (3.3 mEq/L), Ca^{2+} (2.2 mEq/L) y K^+ (0.2 mEq/L); y los aniones: HCO_3^- (8.2 mEq/L), Cl^- (1.3 mEq/L), CO_3^{2-} (0.9 mEq/L) y SO_4^{2-} (0.5 mEq/L) (Figura 4C). Particularmente para las muestras de agua subterránea del pozo G827, el valor promedio de pH es igual a 7.5 y el de CE igual a 754 $\mu\text{S/cm}$ (siendo el valor mínimo de CE el valor más bajo medido para este parámetro en el total de las muestras de agua subterránea y el valor máximo igual a 952 $\mu\text{S/cm}$). Los iones predominantes en cuanto a concentración son el Na^+ y el HCO_3^- , con contenidos promedio de 4.0 mEq/L y 6.9 mEq/L, respectivamente (Figura 4D).

En relación a las muestras de agua superficial, aquellas colectadas en las estaciones localizadas en los arroyos de la CSAT se caracterizan por presentar un pH promedio de 8.2 y una CE promedio de 858 $\mu\text{S/cm}$ (variable entre 460 $\mu\text{S/cm}$ y

1 316 $\mu\text{S/cm}$). Los cationes en orden de abundancia promedio (y concentración media) son: Na^+ (5.8 mEq/L), Mg^{2+} (2.4 mEq/L), Ca^{2+} (1.5 mEq/L) y K^+ (0.1 mEq/L); y los aniones: HCO_3^- (7.5 mEq/L), Cl^- (1.0 mEq/L), CO_3^{2-} (0.9 mEq/L) y SO_4^{2-} (0.8 mEq/L) (Figura 4E). Por último, las muestras de agua recolectadas en la laguna La Barrancosa presentan un valor promedio de pH de 9.1 y de CE de 2 858 $\mu\text{S/cm}$, con valores mínimo y máximo de este parámetro de 1 589 $\mu\text{S/cm}$ y 6 930 $\mu\text{S/cm}$, respectivamente. Los cationes en orden de abundancia promedio (y concentración media) son: Na^+ (31.4 mEq/L), Mg^{2+} (2.2 mEq/L), Ca^{2+} (0.7 mEq/L) y K^+ (0.2 mEq/L); y los aniones: HCO_3^- (18.0 mEq/L), CO_3^{2-} (8.6 mEq/L), Cl^- (7.0 mEq/L) y SO_4^{2-} (1.2 mEq/L) (Figura 4F).

4.2. Caracterización isotópica ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$)

Para la CSAT, los resultados de las determinaciones isotópicas realizadas en las muestras de agua correspondientes al colector LOV y a las estaciones localizadas en los acuíferos fracturados-kársticos y Pampeano, en los arroyos y en la laguna La Barrancosa, se volcaron en un diagrama convencional $\delta^2\text{H}$ vs. $\delta^{18}\text{O}$. Las mismas se representaron junto con las líneas de tendencia para las muestras de los arroyos y la laguna, la Línea Meteorica Global (LMG) (Craig, 1961) y la LML de la EA (Dapeña *et al.*, 2010). Todas las líneas de tendencia se obtuvieron mediante análisis de regresión ortogonal (Figura 5).

La LML de la EA está caracterizada por la Ecuación (3) ($R^2 = 0.98$):

$$\delta^2\text{H}\text{‰} = (8.16 \pm 0.12)\delta^{18}\text{O} + (13.20 \pm 0.66)(3)$$

Dapeña *et al.* (2010) calcularon valores promedio ponderados para el agua de lluvia de la EA de -31.0 ‰ para el $\delta^2\text{H}$ y de -5.50 ‰ para el $\delta^{18}\text{O}$; y un valor promedio de exceso de deuterio (d) igual a 13.3 ‰. Para la CSAT, las muestras de agua de lluvia correspondientes al colector LOV se caracterizan por presentar valores de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ variables entre -55.9 ‰ y 2.5 ‰, y entre -8.78 ‰ y -1.50 ‰, respectivamente. El valor promedio ponderado es de -23.4 ‰ para el $\delta^2\text{H}$ y de -4.74 ‰ para el $\delta^{18}\text{O}$, y el valor promedio de d es de 14.4 ‰ (Figura 5).

Las muestras de los manantiales y pozos desarrollados/perforados en las rocas que conforman los acuíferos fracturados-kársticos presen-

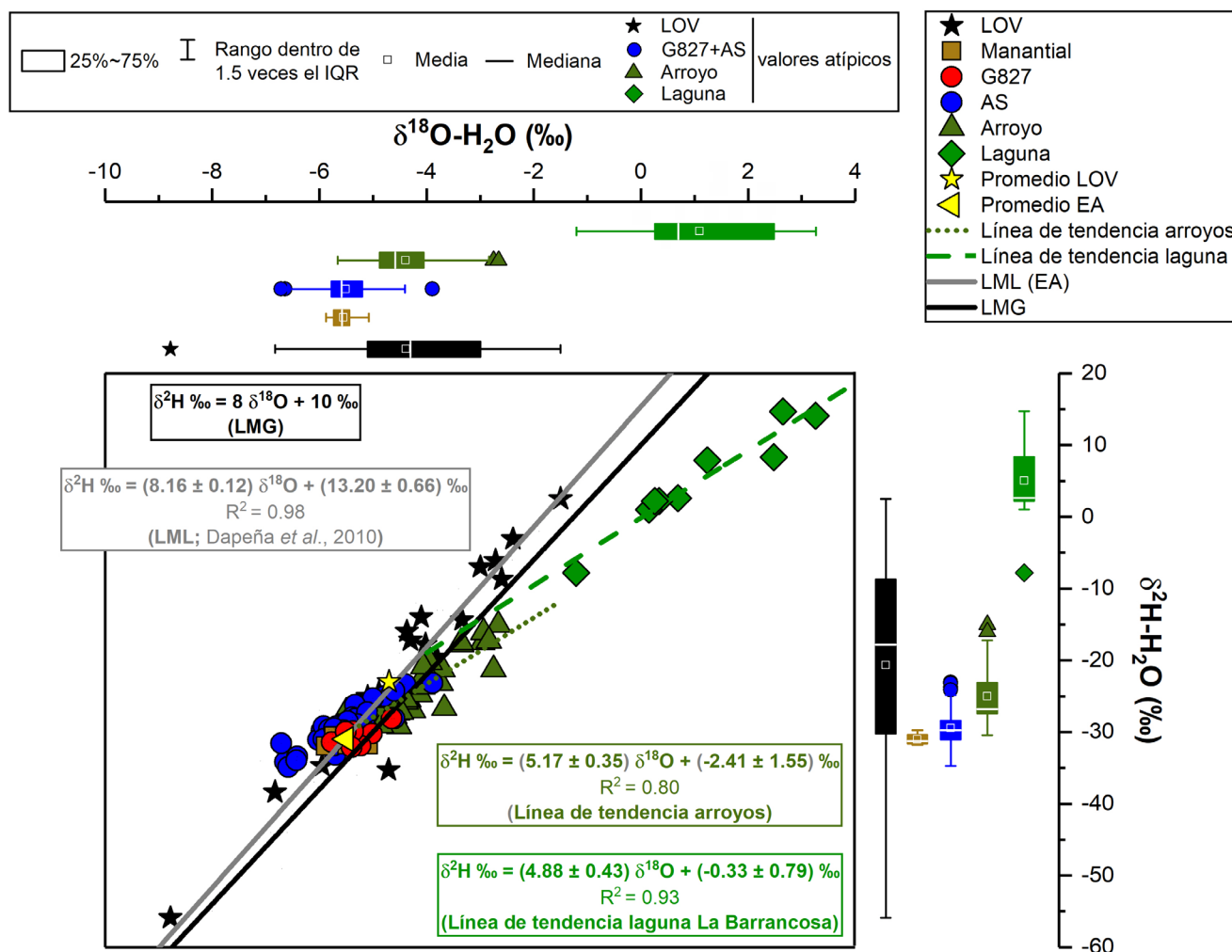


Figura 5. Contenido isotópico ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$) de las muestras de agua de los colectores de agua de lluvia LOV y EA, de los acuíferos fracturados-kársticos (manantiales), del acuífero Pampeano (G827+AS), de los arroyos y de la laguna La Barrancosa.

Figure 5. Isotopic content ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) of water samples from the LOV and EA rainfall collectors, fractured-karstic (springs) and Pampeano (G827+AS) aquifers, streams and La Barrancosa lake.

tan valores de $\delta^2\text{H}$ variables entre -32.0 ‰ y -29.9 ‰, con una media de -31.2 ‰; y de $\delta^{18}\text{O}$ variables entre -5.88 ‰ y -5.08 ‰, con una media de -5.55 ‰. El valor promedio de d calculado es de 13.2 ‰. Las muestras de agua subterránea (G827+AS) del acuífero detrítico (Pampeano) se disponen agrupadas a lo largo de la LML, mostrando una composición relativamente constante, cercana a los contenidos isotópicos promedio de las muestras de agua de lluvia, pertenecientes tanto al colector LOV como a la EA (Figura 5). Éstas presentan valores de $\delta^2\text{H}$ que varían entre -34.9 ‰ y -23.2 ‰, con una media de -29.6 ‰; y de $\delta^{18}\text{O}$ que varían entre -6.71 ‰ y -3.89 ‰, con un promedio de -5.51 ‰; siendo el valor promedio de d igual a 14.4 ‰.

En el caso de las muestras de agua superficial, las recolectadas en las estaciones situadas en los arroyos presentan una composición isotópica si-

milar a la de las muestras de agua subterránea del acuífero Pampeano (Figura 5). Los valores de $\delta^2\text{H}$ que las caracterizan varían entre -30.5 ‰ y -15.1 ‰, con un promedio de -25.1 ‰; y los de $\delta^{18}\text{O}$ varían entre -5.66 ‰ y -2.66 ‰, con una media de -4.40 ‰. El valor promedio de d calculado es de 10.0 ‰ y la línea de tendencia sobre la que se disponen se corresponde con la Ecuación (4) ($R^2 = 0.80$):

$$\delta^2\text{H}\text{‰} = (5.17 \pm 0.35)\delta^{18}\text{O} + (-2.41 \pm 1.55)(4)$$

Por otro lado, los valores promedio de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ que caracterizan a las muestras recolectadas en la estación localizada en la laguna La Barrancosa son 5.0 ‰ y 1.10 ‰, respectivamente. Los valores varían entre -7.8 ‰ y 14.7 ‰ para el $\delta^2\text{H}$, y entre -1.21 ‰ y 3.26 ‰ para el $\delta^{18}\text{O}$; y el

valor promedio de d calculado es igual a -3.7 ‰. La línea de tendencia a lo largo de la cual se disponen estas muestras de la laguna está caracterizada por la Ecuación (5) ($R^2 = 0.93$) (Figura 5):

$$\delta^2 H\text{‰} = (4.88 \pm 0.43)\delta^{18} O + (-0.33 \pm 0.79)(5)$$

5. Discusión

Las aguas de los acuíferos fracturados-kársticos y detrítico (Pampeano) y de los cuerpos de agua superficial (arroyos, lagunas) se encuentran interactuando estrechamente en la CSAT. A su vez, existe una relación entre las facies hidroquímicas características de las aguas de la cuenca y los ambientes geomorfológicos presentes en la misma. El ambiente de serranías, al este y oeste, así como el sector meridional donde se localiza la laguna La Barrancosa, constituyen las zonas de recarga (Glok-Galli *et al.*, 2016) (figuras 1 y 2), determinando la huella isotópica y el origen en la evolución hidroquímica.

Posteriormente a la infiltración del agua de lluvia, de tipo Mg-Ca-HCO₃-Cl, numerosas son las reacciones que se producen desde las zonas de recarga hacia la zona de descarga (red hidrográfica del arroyo Tapalqué) de la cuenca bajo estudio. La mineralización débil (Mg-Ca-HCO₃) característica de las aguas de los acuíferos fracturados-kársticos es producto de la interacción del agua de lluvia con las calizas que conforman al Grupo Sierras Bayas (sección superior) de las serranías del Sistema de Tandilia (acuífero no confinado en los sectores aflorantes; Silva Busso *and* Amato, 2012). En las áreas en donde los acuíferos fracturados-kársticos se encuentran cubiertos por los sedimentos Pampeanos (zonas de piedemonte; Silva Busso *and* Amato, 2012), se observa una composición química más evolucionada (Na-HCO₃) de algunas muestras de agua recolectadas de los pozos perforados en las calizas fisuradas y de los manantiales desarrollados sobre las rocas ígneas (graníticas) que constituyen al Complejo Buenos Aires, basamento del Sistema de Tandilia (Glok-Galli *et al.*, 2020) (Figura 2).

El HCO₃⁻ es el anión predominante en las aguas de la CSAT y su contenido se mantiene constante en toda el área de estudio, como es de esperarse en los acuíferos freáticos/no confinados y/o en regiones donde prevalece el equilibrio con calcita (Glok-Galli *et al.*, 2020). Sin embargo, la composición catiónica es menos homogénea.

Las relaciones molares de Ca/Cl, Mg/Cl, K/Cl y Na/Cl vs. Cl⁻ (mmol/L) (Figura 6) demuestran la influencia que tiene la ocurrencia de procesos como la meteorización de rocas/minerales, el intercambio catiónico y la evaporación en la composición de las aguas que conforman al sistema hidrológico de la CSAT (Glok-Galli *et al.*, 2020).

En general, los niveles de evaporación son bajos durante la recarga directa del agua de lluvia en las aguas de los acuíferos fracturados-kársticos y detrítico (Pampeano) de baja mineralización (Mg-Ca-HCO₃; en las zonas de recarga). Asimismo, el proceso de intercambio catiónico toma un papel relevante en las aguas del acuífero Pampeano, principalmente en las altamente mineralizadas (Na-HCO₃; hacia la zona de descarga), y esto se refleja claramente en las variaciones observadas sobre el eje Y de cada uno de los gráficos de la Figura 6. El mismo patrón se observa en las aguas recolectadas en los arroyos, lo que se debe al comportamiento ganador de los mismos (Glok-Galli *et al.*, 2016, 2020) (ver mapa piezométrico en Figura 1). La ocurrencia de altos niveles de evaporación es sobresaliente en las muestras de agua que pertenecen a la estación localizada en la laguna La Barrancosa, tanto en aquellas tomadas en O-I como en P-V, siendo en estas últimas aún más notoria (mayores contenidos de Cl⁻) (Figura 6). La evaporación se origina en la laguna producto de los cambios en la temperatura del aire y la velocidad del viento (Grosman, 2008; Alfonso *et al.*, 2019), provocando la disminución de su superficie y volumen, y generando una importante concentración de sales. Esto se traduce en los valores de CE característicos de este cuerpo de agua superficial, los cuales son los más altos medidos en la cuenca.

Las proporciones relativamente altas de Ca/Cl (Figura 6A) y Mg/Cl (Figura 6B) características de las muestras de agua (recolectadas principalmente en O-I) pertenecientes a los acuíferos fracturados-kársticos y Pampeano (entre las que se encuentran algunas pertenecientes al pozo G827), y también a los arroyos, pueden explicarse a través del proceso de disolución/meteorización de los materiales geológicos presentes en el área de estudio (Teruggi, 1954, 1957; Dangavs *and* Blasi, 2002; Quiroz Londoño *et al.*, 2008; Vital *et al.*, 2018): dolomita, caliza/calcita, yeso y silicatos (anortita y minerales máficos -por ejemplo, biotita o piroxeno-). Asimismo, la relación relativamente alta de K/Cl (Figura 6C) que caracteriza a algunos de estos puntos de muestreo (indistintamente de la estación del año en la que las muestras se

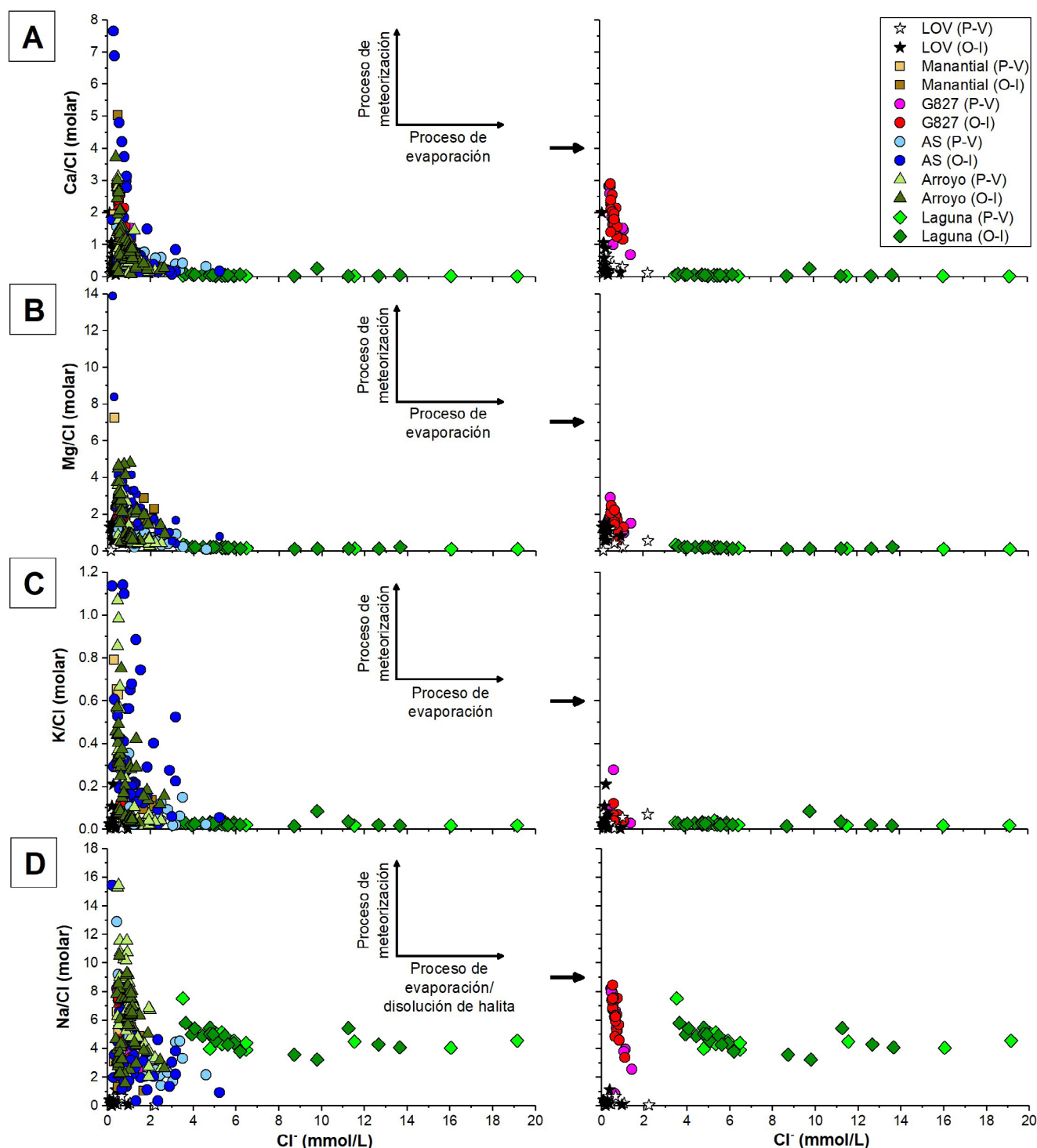


Figura 6. Relaciones molares de A. Ca/Cl , B. Mg/Cl , C. K/Cl y D. Na/Cl vs. Cl^- (mmol/L) para las muestras de agua del colector de agua de lluvia LOV, de los acuíferos fracturados-kársticos (manantiales), del acuífero Pampeano (G827+AS), de los arroyos y de la laguna La Barrancosa (P-V: primavera-verano; O-I: otoño-invierno).

Figure 6. A. Ca/Cl , B. Mg/Cl , C. K/Cl and D. Na/Cl molar ratios vs. Cl^- (mmol/L) for water samples from the LOV rainfall collector, fractured-karstic (springs) and Pampeano (G827+AS) aquifers, streams and La Barrancosa lake (P-V: spring-summer; O-I: autumn-winter).

hayan colectado), puede ser producto de la meteorización del feldespato potásico (microclina) y/o de los minerales máficos (biotita) presentes en la zona (Glok-Galli *et al.*, 2020).

Con respecto a la relación Na/Cl (Figura 6D), los bajos valores característicos de algunas muestras de agua pertenecientes a los acuíferos fracturados-kársticos y Pampeano y a los arroyos,

cuyos contenidos de Cl^- medidos también son bajos, se asemejan a aquellos valores observados en la precipitación (entre 0 y 1.1 Na/Cl molar para las muestras del colector LOV; Figura 1) cuando los procesos de evaporación tienen lugar durante la infiltración en las zonas de recarga (Cartwright and Weaver, 2005; Hofmann and Cartwright, 2013; Santoni *et al.*, 2016; Glok-Galli *et al.*, 2020). Cuando esta relación Na/Cl sigue siendo baja, pero los contenidos de Cl^- se incrementan, como ocurre en el caso de algunas muestras de agua de los diferentes tipos de acuíferos y de arroyos situadas hacia la zona de llanura, la disolución de halita y la concentración por evaporación son los procesos que entran en juego, acompañados, a su vez, por el proceso de intercambio catiónico (Na^+ adsorbido y Ca^{2+} liberado).

Por otra parte, los procesos de disolución de albita y de intercambio catiónico (Ca^{2+} adsorbido y Na^+ liberado) podrían explicar las más altas proporciones de Na/Cl (Figura 6D) en algunas muestras (Glok-Galli *et al.*, 2020), como las recolectadas de los pozos perforados en las calizas fisuradas y de los manantiales desarrollados sobre las rocas graníticas y las que pertenecen al pozo G827. Debido al funcionamiento efluente que caracteriza a la laguna La Barrancosa (ver

mapa piezométrico en Figura 1), la ocurrencia de los procesos que determinan la composición de las muestras del pozo G827 se ve reflejada en la composición de las muestras correspondientes a la estación localizada en la misma. Los contenidos de Cl^- se incrementan significativamente en dicha laguna por efecto de la evaporación, como se mencionó anteriormente.

El origen del exceso en la concentración de Na^+ en el agua de la laguna también puede ser explicado graficando la relación $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - (\text{SO}_4^{2-} + \text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$ (mEq/L) vs. $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ (mEq/L) (Figura 7A). A partir del análisis de la misma, se observa una muy buena correlación lineal ($R^2=0.96$) y un valor de pendiente (-0.97) que tiende al valor teórico de -1, resultados similares a los obtenidos para otras lagunas pampásicas (Miretzky *et al.*, 2000; Fernández Cirelli and Miretzky, 2004). Esto se debe a la ocurrencia de procesos de intercambio catiónico. El exceso de SO_4^{2-} con respecto al Ca^{2+} en casi la totalidad de las muestras de agua de la laguna es producto del intercambio catiónico y las limitaciones geoquímicas para las concentraciones de Ca^{2+} (precipitación de calcita). El exceso de Ca^{2+} con respecto al SO_4^{2-} característico de las aguas del pozo G827 (y de pocas muestras de la laguna)

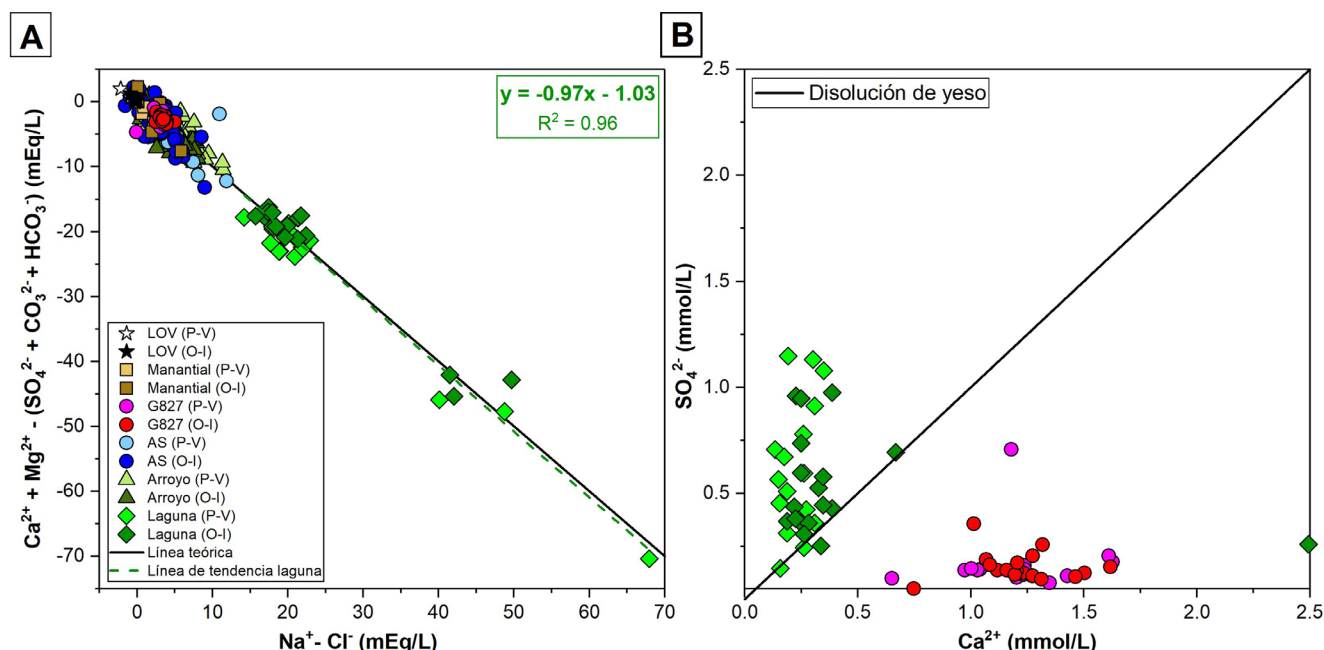


Figura 7. A. Relación $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - (\text{SO}_4^{2-} + \text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$ (mEq/L) vs. $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ (mEq/L) para las muestras de agua del colector de agua de lluvia LOV, de los acuíferos fracturados-kársticos (manantiales), del acuífero Pampeano (G827+AS), de los arroyos y de la laguna La Barrancosa; B. Diagrama de SO_4^{2-} vs. Ca^{2+} para las muestras de agua del pozo G827 y de la laguna La Barrancosa (P-V: primavera-verano; O-I: otoño-invierno).

Figure 7. A. $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - (\text{SO}_4^{2-} + \text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-)$ (mEq/L) vs. $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$ (mEq/L) ratio for water samples from the LOV rainfall collector, fractured-karstic (springs) and Pampeano (G827+AS) aquifers, streams and La Barrancosa lake; B. Plot of SO_4^{2-} vs. Ca^{2+} for well G827 and La Barrancosa lake water samples (P-V: spring-summer; O-I: autumn-winter).

Fecha de muestreo	IS _{calcita}		IS _{yesso}	
	G827	Laguna La Barrancosa	G827	Laguna La Barrancosa
22/06/2009	0.0	1.2	-2.7	-3.1
17/02/2010	0.5	1.6	-3.1	-3.4
09/08/2010	0.9	1.7	-2.6	-2.8
16/02/2011	0.4	1.4	-2.7	-3.3
08/08/2011	0.4	1.6	-2.4	-3.0
22/03/2012	0.0	1.6	-2.8	-3.1
29/10/2012	0.0	1.3	-2.6	-3.0
15/02/2013	0.1	1.4	-2.5	-3.3
26/03/2013	0.1	1.4	-2.9	-2.9
15/04/2013	0.0	1.4	-2.7	-3.2
19/06/2013	0.0	1.2	-2.6	-3.0
29/07/2013	0.5	1.4	-2.7	-3.1
02/09/2013	0.3	1.4	-2.5	-3.0
27/09/2013	0.3	1.2	-2.7	-2.9
11/10/2013	-0.1	0.2	-2.7	-2.8
21/11/2013	-0.3	1.2	-2.7	-3.1
04/12/2013	-0.2	0.6	-2.7	-2.8
01/01/2014	1.3	1.0	-2.8	-3.4
26/02/2014	1.2	1.2	-2.8	-3.4
26/03/2014	0.1	1.2	-2.7	-3.7
21/04/2014	-0.2	1.0	-2.6	-3.2
28/05/2014	0.0	0.9	-2.6	-3.3
27/06/2014	0.3	1.3	-2.7	-3.4
31/07/2014	-0.3	0.8	-3.3	-3.2
29/09/2014	-0.1	1.2	-2.8	-3.2
21/10/2014	-0.2	1.0	-2.5	-3.1
12/12/2014	0.1	1.4	-2.8	-3.6
30/03/2015	0.6	1.4	-2.4	-3.8
15/06/2015	0.2	1.2	-2.7	-3.3
30/03/2016	0.7	1.5	-2.8	-3.4
26/06/2016	0.4	1.2	-2.6	-3.5
24/08/2016	0.4	1.3	-2.4	-3.4
07/03/2018	0.5	1.3	-2.0	-4.3
Valor promedio	0.2	1.2	-2.7	-3.2

Tabla 1. Valores de los índices de saturación de calcita (IS_{calcita}) y yeso (IS_{yesso}) calculados (PHREEQC) para las muestras de agua del pozo G827 y de la laguna La Barrancosa.

Table 1. Calcite (SI_{calcite}) and gypsum (SI_{gypsum}) saturation indexes values calculated (PHREEQC) for well G827 and La Barrancosa lake water samples.

puede ser explicado por el proceso de disolución de anortita (como se mencionó previamente) (Figura 7B).

La modelación hidroquímica llevada a cabo permitió validar la plausibilidad de las observaciones previamente mencionadas, es decir, la correspondencia entre el modelo hidroquímico de balance de masas y el modelo conceptual del origen del agua de la laguna La Barrancosa. Esto es, en primer lugar, la ocurrencia de la evaporación del agua de lluvia que se infiltra en el acuífero Pampeano y, posteriormente, de otros procesos geoquímicos, los cuales llevan a la composición final del agua subterránea que lo compone. Finalmente, la descarga de dicha agua subterránea en la laguna y posterior evaporación, lo que genera la composición final característica de este cuerpo de agua superficial.

Como puede verse en la Tabla 1, la calcita se presenta en equilibrio con el agua subterránea (valor promedio del $IS_{calcita}$ para las muestras del pozo G827: 0.2, las cuales fueron tomadas como representativas de la composición del acuífero Pampeano en la cuenca), pero sobresaturada en las muestras de la laguna (valor promedio: 1.2), limitándose la concentración de Ca^{2+} en la solución. Esto, a su vez, se encuentra acompañado de un aumento en el pH de aproximadamente dos unidades (~7 a 9). Los resultados obtenidos a partir de la modelación hidroquímica directa (Tabla 2) explican dichos cambios, que ocurren cuando el agua subterránea, saturada respecto a la calcita y con valores de $P_{CO_2(g)}$ del orden de -1.9 atm debido a la recarga a través de la zona no saturada, descarga en la laguna La Barrancosa. De acuerdo a lo expresado en la Ecuación (1), una variación en la $P_{CO_2(g)}$ produce modificaciones en el pH y la alcalinidad. Al descargar el agua subterránea en la laguna, se manifiesta un cambio de la $P_{CO_2(g)}$ al re-equilibrarse la misma en con-

diciones atmosféricas o similares. En este caso, los resultados obtenidos se ajustan mejor a los valores de los parámetros medidos al exponer los puntos de muestreo a condiciones atmosféricas ($\log P_{CO_2(g)}$ (atm): -3.5). El proceso de precipitación de calcita es cinéticamente más lento que la difusión del gas, lo que genera una sobresaturación del agua superficial en esta fase, sin que se alcance el equilibrio en el sistema.

Por su parte, del análisis de los resultados obtenidos a partir de la modelización inversa (dos modelos; Tabla 3), se deduce que los principales procesos hidroquímicos que tiene lugar desde que el agua se recarga en el acuífero Pampeano hasta que se descarga en la laguna La Barrancosa son la disolución de calcita (y $CO_{2(g)}$), yeso y halita, y el intercambio catiónico (figuras 6 y 7). Cabe aclarar que cuando en el 2° modelo el output indica que habría precipitación (y no disolución) de yeso (valor subrayado en la Tabla 3), este resultado no se consideró como válido y fue descartado al momento de la interpretación, ya que se conoce que la muestra de la laguna tenida en cuenta (como todas las demás) se encuentra subsaturada en dicho mineral (IS_{yeso} : -4.3; Tabla 1). La meteorización de las plagioclasas, los minerales máficos más inestables y el vidrio volcánico (Logan *et al.*, 1999), y la disolución del $CaCO_3$, halita y yeso presentes en los sedimentos loésicos del acuífero Pampeano, explican el origen de los iones predominantes en las aguas subterráneas (y, por ende, en la laguna). La disolución de calcita es, a su vez, complementada por los procesos de intercambio catiónico. Cuando el agua subterránea que contiene Ca^{2+} alcanza a la laguna, se produce el intercambio, siendo este ión adsorbido en la superficie de las arcillas del loess Pampeano (se adsorben 1.88 mmol/L en el 1° modelo hasta 9.51 mmol/L en el 2° modelo) y el Na^+ liberado a la solución (se liberan 3.38 mmol/L

pH medido “in situ”		log P _{CO2(g)}	pH modelado		IS _{calcita} modelado	
		atm				
G827	Laguna La Barrancosa	G827	Laguna La Barrancosa			
			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
7.5	9.1	-1.9	8.5	9.0	1.1	1.5

Tabla 2. Valores de los parámetros modelados a partir de la modelación hidroquímica directa (PHREEQC) (*a*: $\log P_{CO_2(g)}$ (atm): -3; *b*: $\log P_{CO_2(g)}$ (atm): -3.5). Los valores de $IS_{calcita}$ calculados para las muestras de agua involucradas en el modelado se muestran en la Tabla 1.

Table 2. Values of modeled parameters from the direct hydrochemical modelling (PHREEQC) (*a*: $\log P_{CO_2(g)}$ (atm): -3; *b*: $\log P_{CO_2(g)}$ (atm): -3.5). Calculated $IS_{calcite}$ values for water samples involved in the modelling are shown in Table 1.

Fase mineral	1° modelo		2° modelo	
	<i>SI</i>	<i>SF</i>	<i>SI</i>	<i>SF</i>
	LOV	G827		Laguna La Barrancosa
Calcita	2.30		9.25	
CO _{2(g)}	1.68		0.73	
Yeso	0.58		-0.64	
Halita			2.85	
CaX ₂	-1.88		-9.51	
MgX ₂	0.19		0.30	
NaX	3.38		18.34	
KX	-0.01		0.08	

Tabla 3. Valores (mmol/L) obtenidos a partir de la modelación hidroquímica inversa (PHREEQC) (*SI*: solución inicial; *SF*: solución final).

Table 3. Values (mmol/L) obtained from the inverse hydrochemical modelling (PHREEQC) (*SI*: initial solution; *SF*: final solution).

en el 1° modelo hasta 18.34 mmol/L en el 2° modelo) (Tabla 3).

Por otro lado, los valores de $d > 10$ ‰ calculados para las muestras de agua de lluvia correspondientes a los colectores de la EA (d promedio = 13.3 ‰; Dapeña *et al.*, 2010) y LOV (d promedio = 14.4 ‰) son característicos de las masas de aire originadas por vapor reciclado (Jiménez-Martínez and Custodio, 2008). Los mismos se ven reflejados en la composición isotópica de las aguas de los acuíferos fracturados-kársticos (d promedio = 13.2 ‰) y detrítico (d promedio = 14.4 ‰). Las muestras de agua subterránea de este último, el acuífero Pampeano, se ubican mayoritariamente entre los valores promedio ponderados de las muestras de precipitación de los colectores EA y LOV, indicando que la recarga principal se manifiesta hacia el área de serranías. Los acuíferos fracturados-kársticos afloran en esta región de sierras y las aguas que los recargan presentan contenidos de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ más empobrecidos debido a un ligero efecto de altitud (Dansgaard, 1964). Así, la composición isotópica del agua del acuífero Pampeano se caracteriza por ser más empobrecida cuando el mismo se encuentra en contacto con los acuíferos fracturados-kársticos (figuras 2 y 5).

Hacia la zona de llanura de la CSAT, los contenidos de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ de las aguas del acuífero Pampeano son también más empobrecidos, en comparación con el valor promedio ponderado calculado para las muestras de agua de lluvia del colector LOV (Figura 5). En general, la composi-

ción isotópica de las muestras de precipitación de la EA representa al agua de recarga en el área de sierras, que se transfiere desde los acuíferos fracturados-kársticos hacia el acuífero Pampeano; mientras que los contenidos isotópicos de las muestras del colector LOV representan el agua de lluvia recargada directamente en el mismo (Figura 2).

Los contenidos de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ de las muestras de los arroyos son similares a aquellos correspondientes a las muestras de agua del acuífero Pampeano (Figura 5), corroborándose el importante aporte de dicho acuífero al caudal de los mismos (comportamiento ganador; ver mapa piezométrico en Figura 1). Estas muestras de agua superficial se disponen a lo largo de una línea de tendencia (Ecuación (4)) cuya pendiente es ~ 5 , lo que se atribuye a los efectos de la evaporación. La ocurrencia de este proceso se refleja en el menor valor promedio de d (10.0 ‰) calculado para las mismas, en comparación con el valor medio de d obtenido para las muestras de agua de lluvia (Jiménez-Martínez and Custodio, 2008). A su vez, algunas muestras de los arroyos presentan una dispersión significativa con respecto a su línea de tendencia y, en adición, el aumento correlativo esperado en sus valores de CE no se observa. En este caso, la explicación de su enriquecimiento isotópico es que lluvias enriquecidas (P-V) forman parte de los arroyos como aguas de intercepción en sus canales. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ del orden de -2.00 ‰ se determinaron en muestras de agua de lluvia correspondientes al colector

LOV, siendo sus fechas de muestreo coincidentes con aquellas en la que las muestras enriquecidas de los arroyos fueron recolectadas (Glok-Galli *et al.*, 2020).

Finalmente, la línea de tendencia sobre la que se disponen las muestras de la laguna La Barrancosa (Ecuación (5)) presenta un trazo que se origina en el área de la Figura 5 representativa de la composición isotópica de las muestras del acuífero Pampeano y una pendiente ~ 5 . Esto corrobora tanto el comportamiento ganador de la laguna (ver mapa piezométrico -ampliación- en Figura 1) como la ocurrencia del proceso de evaporación inferida por medio del análisis hidroquímico (Figura 6). Al igual que en las aguas de los arroyos, lo mencionado se refleja claramente en el bajo valor promedio de d (-3.7‰) calculado para las aguas de la laguna, en comparación con el valor medio de d obtenido para las muestras de agua de lluvia (Jiménez-Martínez *and* Custodio, 2008).

6. Conclusiones

La utilización conjunta de técnicas hidroquímicas e isotópicas ($\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$), en el marco de una visión integrada de los recursos hídricos en la CSAT, permitió ampliar los conceptos plasmados en investigaciones previas realizadas en la zona de estudio, mejorándose la comprensión de la dinámica de los componentes que conforman el sistema hidrológico de la misma.

La interpretación de las relaciones iónicas posibilitó un conocimiento más preciso de las interacciones existentes entre los acuíferos fracturados/kársticos-acuífero detrítico (Pampeano) y, a su vez, entre las aguas subterráneas-aguas superficiales en la cuenca, con foco en el estudio de la laguna La Barrancosa y su relación con el acuífero Pampeano. También se identificaron los principales procesos que determinan la composición química e isotópica de las aguas, los cuales fueron validados por los modelos hidroquímicos llevados a cabo.

La disolución/meteorización de los materiales geológicos presentes en el área de estudio (dolomita, caliza/calcita, yeso, anortita, biotita, piroxeno, microclina) controla la presencia de los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ en algunas de las muestras de agua pertenecientes a ambos tipos de acuíferos y a los arroyos (de comportamiento ganador), y mayoritariamente localizadas en las zonas de recarga. Aquí, la ocurrencia de procesos de evaporación en las aguas de lluvia durante su infiltra-

ción en los acuíferos determina los bajos contenidos de Na^+ y Cl^- de ciertas muestras de agua subterránea y, por ende, de los arroyos. Hacia la zona de llanura de la cuenca, la disolución de halita y la concentración por evaporación, acompañadas por el proceso de intercambio catiónico (Na^+ adsorbido y Ca^{2+} liberado), incrementan los contenidos de Cl^- en las aguas que conforman los distintos tipos de acuíferos y los arroyos, cuya relación Na/Cl es baja.

Por otro lado, los procesos de disolución de albita y de intercambio catiónico (Ca^{2+} adsorbido y Na^+ liberado) podrían explicar las más altas proporciones de Na/Cl en algunas muestras, como las pertenecientes al pozo (G827) situado en las inmediaciones de la laguna La Barrancosa, en la zona de recarga, al sur de la CSAT. Debido también a su funcionamiento efluente, este proceso de intercambio catiónico, en conjunto con la ocurrencia de evaporación, son los principales delimitantes de la composición química e isotópica de las aguas de la laguna. El comportamiento que presenta este cuerpo de agua superficial es similar al de otras lagunas pampásicas de la provincia de Buenos Aires.

El modelo de evolución hidroquímica planteado para las aguas de la CSAT también es consistente con los valores de $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ y d que caracterizan a las mismas. Esto es, en primer lugar, desde que las aguas de precipitación se infiltran, ya sea directamente al acuífero Pampeano o indirectamente, desde los acuíferos fracturados-kársticos hacia este acuífero detrítico suprayacente (valores más empobrecidos debido al efecto de altitud). Finalmente, hasta que las aguas de dicho acuífero Pampeano se descargan en los cuerpos de agua superficial, es decir, la red hidrográfica del arroyo Tapalqué y la laguna La Barrancosa (enriquecimiento isotópico por evaporación).

Los resultados aquí expuestos pueden servir de base en estudios que involucren la caracterización integrada de recursos hídricos en cuencas desarrolladas en zonas de llanura, contribuyendo con la mejora en las políticas públicas y la gestión sostenible de sus aguas. Si bien la elevada dinámica de las lagunas pampeanas dificulta la elaboración de planes de gestión a largo plazo, el manejo adaptativo, considerando la aplicación de medidas acorde a la información existente (historia y uso actual de la laguna y su perilago, aspectos físicos, químicos, isotópicos y biológicos -estructura de la comunidad de peces, como principal atractivo del ambiente-), se planteó como una

alternativa válida al momento de proponer un plan de gestión para la toma de decisiones en la laguna La Barrancosa y su entorno. Por lo tanto, la mayor cantidad y calidad de información disponible se hace sumamente necesaria: proyección a futuro de una monitorización estacional continua de la laguna y alrededores, y de la instalación de un colector de agua de lluvia en el área de recarga de la cuenca donde se localiza, que permita contar con datos hidroquímicos e isotópicos. También sería de vital importancia lograr una profundización en los estudios que relacionen las variables climáticas con el funcionamiento hidrológico propio de la laguna, considerando los escenarios planteados ante el cambio climático.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico de la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (Agencia I+D+i, Argentina) a través de los PICT 2014-1529 y 2016-1625; así como también al Dr. Rubén Díez Fernández, Editor en Jefe, al Editor Científico y a los revisores anónimos, quienes contribuyeron en gran medida a la mejora del manuscrito presentado.

Referencias

- Adrian, R., O'Reilly, C. M., Zagarese, H., Baines, S. B., Hessen, D. O., Keller, W., and Weyhenmeyer, G. A. (2009). Lakes as sentinels of climate change. *Limnology and oceanography*, 54, 2283-2297.
- Alfonso, M. B., Vitale, A. J., Perillo, G. M. E., and Piccolo, M. C. (2019). Utilidad del monitoreo lagunar ambiental con boyas multiparamétricas en la región Pampeana: laguna La Barrancosa. In: Grosman, F., Sanzano, P., and Bertora, A. Tandil, UNCPBA. Destino: La Barrancosa. Una invitación a conocer las lagunas pampeanas. Capítulo 7, 100-112. ISBN 978-950-658-495-5. Primera Edición. Archivo Digital disponible en: <http://hdl.handle.net/11336/119694>.
- APHA-AWWA-WPCF (1992). Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales. Ediciones Díaz de Santos. S. A. Madrid. España.
- Appelo, C. A. J., and Postma, D. (1993). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Rotterdam, Brookfield: A. A. Balkema. 536 pp.
- Arrouy, M. J., Poiré, D. G., Gómez Peral, L. E., and Canalicchio, J. M. (2015). Sedimentología y estratigrafía del Grupo La Providencia (nom. nov.): cubierta superior neoproterozoica, Sistema de Tandilia, Argentina. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 22(2), 171-189.
- Auge, M. P. (1993). Abastecimiento de agua potable a la ciudad de Olavarría, provincia de Buenos Aires-Informe final. 121 pp. CFI, Municipalidad de Olavarría, Obras Sanitarias Prov. Bs. As.
- Auge, M. P. (2004). Regiones Hidrogeológicas: República Argentina y provincias de Buenos Aires, Mendoza, Santa Fe. E-Book. <http://tierra.rediris.es/hidrored/ebooks/miguel/RegionesHidrogeol.pdf>.
- Bécher Quinodóz, F. N., Blarasin, M. T., and Panarello, H. O. (2015). Geochemical and isotopical modeling of groundwater-surface water relationships in the sand plain of the south of Cordoba province. *Revista de la Asociacion Geologica Argentina*, 72(4), 506-518.
- Bécher Quinodóz, F. N., Blarasin, M. T., Panarello, H. O., and Ducos, E. (2017). Assessing interactions between groundwater and surface water in a Pampean stream. *Hydrology Research*, 48(4), 1045-1057. doi: 10.2166/nh.2016.100.
- Bocanegra, E. M., Quiroz Londono, O. M., Martínez, D. E., and Romanelli, A. (2013). Quantification of the water balance and hydrogeological processes of groundwater-lake interactions in the Pampa Plain, Argentina. *Environmental earth sciences*, 68(8), 2347-2357. doi: 10.1007/s12665-012-1916-4.
- Bonorino, G., Albouny, R., and Rossi, S. (2001). La influencia del sistema carbonatado sobre el quimismo del agua subterránea (cuenca superior del arroyo Chasicó). *Geoacta*, 26, 1-11.
- Burkert, U., Ginzler, G., Babenzien, H. D., and Koschel, R. (2004). The hydrogeology of a catchment area and an artificially divided dystrophic lake-consequences for the limnology of Lake Fuchskuhle. *Biogeochemistry*, 71, 225-246.
- Calmbach, L., and Waterloo Hydrogeologic Inc. (2003). Water quality data analysis, plotting, and modeling. *Aquachem user's manual v.4.0.*, co-developed by Lukas Calmbach and Waterloo Hydrogeologic, Inc., Estados Unidos. 276 pp.
- Canziani, G., Castets, F., Maestri, M. L., and Ferrati, R. (2019). Uso de imágenes satelitales para el estudio de las lagunas pampeanas. El caso de la laguna La Barrancosa. In: Grosman, F., Sanzano, P., Bertora, A. Tandil, UNCPBA. Destino: La Barrancosa. Una invitación a conocer las lagunas pampeanas. Capítulo 6, 77-98. ISBN 978-950-658-495-5. Primera Edición. Archivo Digital disponible en: <http://hdl.handle.net/11336/119694>.
- Carpenter, S. R., Stanley, E. H., and Vander Zanden, M. J. (2011). State of the world's freshwater ecosystems: physical, chemical, and biological changes. *Annual review of Environment and Resources*, 36, 75-99. doi: 10.1146/annurev-environ-021810-094524.
- Cartwright, I., and Weaver, T. R. (2005). Hydrogeochemistry of the Goulburn Valley region of the Murray Basin, Australia: implications for flow paths and resource vulnerability. *Hydrogeology Journal*, 13(5-6), 752-770.

- Clark, I. D., and Fritz, P. (1997). Environmental isotopes in hydrogeology. CRC, Boca Raton, FL. 328 pp.
- Colautti, D. C., Baigún, C. R. M., Llompert, F., Maiztegui, T., Garcia De Souza, J. R., Solimano, P., Balboni, L., and Berasain, G. E. (2015). Fish assemblage of a pampean shallow lake, a story of instability. *Hydrobiologia*, 752, 175-186.
- Craig, H. (1961). Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. *Science*, 133 (3467), 1833-1834.
- Custodio, E., (1973). Planteamiento de estudios geohidrogeológicos en pequeñas zonas sin datos sistemáticos. En: Simposio de la UNESCO sobre Previsión de recursos de aguas con datos inadecuados. Madrid, España. Volumen 1.
- Dalla Salda, L., Spalletti, L., Poiré, D., De Barrio, R. E., Echeveste, H. J., and Benialgo, A. (2006). Tandilia. In: Aceñolaza F. (Ed.) *Temas de la geología Argentina I. Serie de Correlación geológica*, 21, 17-46.
- Dangavs, N. V. (2005). Los ambientes acuáticos de la provincia de Buenos Aires. En: R. E., Barrio, R. O., Etcheverry, M. F., Caballé, and E. J., Llambías (eds.) *Geología y recursos minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino Buenos Aires (Argentina)*. Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Argentina, pp. 219-236.
- Dangavs, N., and Blasi, A. (2002). Los depósitos de yeso intrasedimentario del arroyo El Siasgo, partidos de Monte y General Paz, Provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 57(3), 315-327.
- Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16(4), 436-468.
- Dapeña, C., Varni, M., Panarello, H. O., Ducós, E., Weinzentel, P., and Usunoff, E. (2010). Composición isotópica de la precipitación de la Estación Azul, provincia de Buenos Aires. *Red Nacional de Colectores Argentina*. In: Varni, Entraigas y Vives (Eds.). *I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*, Libro de Actas 386-393. Azul, Provincia de Buenos Aires.
- Elisio, M., Chalde, T., and Miranda, L. A. (2015). Seasonal changes and endocrine regulation of pejerrey (*Odontesthes bonariensis*) spermatogenesis in the wild. *General and Comparative Endocrinology*, 221, 236-243.
- Fernández, A., and Frigerio, G. (1984). Ensayos de Acuíferos en la Universidad Nacional del Centro de Buenos Aires. Informe AHS, 65, INCyTH, Buenos Aires, Argentina, 33 pp.
- Fernández Aláez, C., Fernández Aláez, M., Trigal Domínguez, C., and Santos, B. L. (2006). Hydrochemistry of northwest Spain ponds and its relationships to groundwaters. *Limnetica*, 251(2), 433-452. doi: 10.23818/limn.25.31.
- Fernández Cirelli, A., and Miretzky, P. (2004). Ionic relations: a tool for studying hydrogeochemical processes in Pampean shallow lakes Buenos Aires, Argentina. *Quaternary International*, 114, 113-121. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(03\)00046-6](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(03)00046-6).
- Fidalgo, F., Gentile, R. O., and Correa, H. A. (1986). *Geología y geomorfología en la cuenca del Arroyo Tapalqué*. Informe 30. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. La Plata.
- Frenguelli, J. (1950). Rasgos generales de la morfología y geología de la Provincia de Buenos Aires. M.O.P., LEMIT, La Plata, Buenos Aires, Argentina. Serie 2, 33.
- Fusé, V. S., Priano, M. E., Juliarena, M. P., and Guzmán, S. A. (2019). Contribución natural de la laguna La Barrancosa a los Gases de Efecto Invernadero: aspectos metodológicos y estudio de las emisiones de metano. In: Grosman, F., Sanzano, P., and Bertora, A. *Tandil, UNCPBA. Destino: La Barrancosa. Una invitación a conocer las lagunas pampeanas*. Capítulo 10, 131-142. ISBN 978-950-658-495-5. Primera edición. Archivo Digital disponible en: <http://hdl.handle.net/11336/119694>.
- Gentile, R. O. (2007). *Geología del Cenozoico superior en el área de la Laguna La Barrancosa (Partido de Benito Juárez, Provincia de Buenos Aires)*. Departamento de Arqueología, Facultad de Ciencias Sociales, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Olavarría.
- Glok-Galli, M., Martínez, D. E., and Kruse, E. E. (2014). The carbon budget of a large catchment in the Argentine Pampa plain through hydrochemical modeling. *Science of the Total Environment*, 493, 649-655. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.06.032>.
- Glok-Galli, M., Martínez, D. E., Colasurdo, V., Grosman, F., Sanzano, P., and Trezza, M. A. (2016). Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de la cuenca alta del arroyo Tapalqué, provincia de Buenos Aires. *IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea*, Catamarca, pp. 272-279.
- Glok-Galli, M., Quiroz Londoño, O. M., and Martínez, D. E. (2018). Evaluación comparativa de métodos de cálculo de recarga en la cuenca superior del arroyo Tapalqué, provincia de Buenos Aires, Argentina. *XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología-X Congreso Argentino de Hidrogeología-VIII Seminario Hispano-Latinoamericano sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea*. El Agua Subterránea: Recurso sin Fronteras: Hidrogeología Regional. Volumen I. Rodolfo Fernando García (*et al.*). 1ª Edición. Editorial de la Universidad Nacional de Salta, Salta, Argentina, pp. 223-230. ISBN 978-987-633- 538-6.
- Glok-Galli, M., and Colasurdo, V. (2019). El "ADN" de la laguna La Barrancosa: su origen y características

- hidrogeoquímicas e isotópicas. In: Grosman, F.; Sanzano, P. y Bertora, A. Tandil, UNCPBA. Destino: La Barrancosa. Una invitación a conocer las lagunas pampeanas. Capítulo 8, 114-124. ISBN 978-950-658-495-5. Primera edición. Archivo Digital disponible en: <http://hdl.handle.net/11336/119694>.
- Glok-Galli, M., Martínez, D. E., Vadillo-Pérez, I., Silva Busso, A., Barredo, S. P., Quiroz Londoño, O. M., and Trezza, M. A. (2020). Multi-isotope ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$ -TDIC, $\delta^{18}\text{O}$ -TDIC, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and hydrochemical study on fractured-karstic and detritic shallow aquifers in the Pampean region, Argentina. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 56(5-6), 513-532. DOI: 10.1080/10256016.2020.1825412.
- Gonfiantini, R. (1978). Standards for stable isotope measurements in natural compounds. *Nature*, 271, 534-536.
- Grosman, F. (2008). Espejos en la llanura. Nuestras lagunas de la región Pampeana. Grosman, F. (Ed.). 1a ed. UNCPBA, Tandil, Buenos Aires, Argentina. 174 pp.
- Hem, J. D. (1992). Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Waters. U.S.G.S. Water-Supply Paper, 2254, 4ta impresión. 263 pp.
- Hofmann, H., and Cartwright, I. (2013). Using hydrogeochemistry to understand inter-aquifer mixing in the on-shore part of the Gippsland Basin, southeast Australia. *Applied Geochemistry*, 33, 84-103.
- Iriondo, M. (1989). Quaternary lakes of Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 70(1-3), 81-88.
- Izaguirre, I., and Vinocur, A. (1994). Typology of shallow lakes of the Salado river basin (Argentina), based on Phytoplankton Communities. *Hydrobiologia*, 277, 49-62.
- Jiménez-Martínez, J., and Custodio, E. (2008). El exceso de deuterio en la lluvia y en la recarga a los acuíferos en el área circum-mediterránea y en la costa mediterránea española. *Boletín Geológico y Minero* 119(1), 21-32.
- Kendall, C., and McDonnell, J. J. (Eds.) (1998). *Isotope Tracers in catchment Hydrology*. Elsevier Science B.V., Amsterdam. 839 pp.
- Lis, G., Wassenaar, L. I., and Hendry, M. J. (2008). High precision laser spectroscopy D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ measurements of microliter natural water samples. *Analytical Chemistry*, 80, 287-293. <https://doi.org/10.1021/ac701716q>.
- Logan, W. S., Auge, M. P., and Panarello, H. O. (1999). Bicarbonate, sulphate and chloride water in a shallow, clastic-dominated coastal flow system, Argentina. *Groundwater*, 37(2), 287-295.
- Mazor, E. (1991). Chemical and isotopic groundwater hydrology. Marcel Dekker, 413 pp. Nueva York.
- Merlos, C. S., and Grosman, F. (2019). Contexto, laguna y territorio. La pesca deportiva en La Barrancosa. In: Grosman, F., Sanzano, P., and Bertora, A. Tandil, UNCPBA. Destino: La Barrancosa. Una invitación a conocer las lagunas pampeanas. Capítulo 20, 255-263. ISBN 978-950-658-495-5. Primera Edición. Archivo Digital disponible en: <http://hdl.handle.net/11336/119694>.
- Merlos, C. S., and Requesens, E. (2019). Lagunas y agroecología. El valor de los cuerpos de agua como factor de agrobiodiversificación regional. In: Grosman, F., Sanzano, P., and Bertora, A. Tandil, UNCPBA. Destino: La Barrancosa. Una invitación a conocer las lagunas pampeanas. Capítulo 5, 67-75. ISBN 978-950-658-495-5. Primera Edición. Archivo Digital disponible en: <http://hdl.handle.net/11336/119694>.
- Messineo, P. G., and Barros, M. P. (2009). Las ocupaciones arqueológicas del Holoceno tardío en la cuenca superior del Arroyo Tapalqué (partido de Olavarría). In: M.L. Endere y J.L. Prado (Eds.) *Patrimonio, Ciencia y Comunidad. Un abordaje preliminar en los partidos de Azul, Olavarría y Tandil*. INCUAPA, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Olavarría. 167-186.
- Miretzky, P., Conzonno, V., and Fernández Cirelli, A. (2000). Hydrochemistry of Pampean ponds in the lower stream bed of Salado river drainage basin Argentina. *Environmental Geology*, 39, 951-956.
- Mook, G. (Ed.) (2002). *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie Guías y Manuales N° 1. IGME, Madrid, España. 596 pp.
- Nágera, J. J. (1940). Historia Física de la Provincia de Buenos Aires. Tomo I Tandilia. Biblioteca Humanidades y Ciencias de la Educación. Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Buenos Aires, Argentina. 24, 1-272.
- OIEA/OMM (2006). Global Network of Isotopes in Precipitation. Viena, Austria. The GNIP Database. <https://www.iaea.org/services/networks/gnip>.
- OIEA (2009). Laser Spectroscopic Analysis of Liquid Water Samples for Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes. Viena. Serie de cursos No. 35.
- Parkhurst, D. L., and Appelo, C. (1999). User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Water-Resour. Invest. Rep.(US Geol. Surv. Denver, Colorado.), 99-4259.
- Quiroz Londoño, O. M., Martínez, D. E., Dapeña, C., and Massone, H. E. (2008). Hydrogeochemistry and isotope analyses used to determine groundwater recharge and flow in low-gradient catchments of the province of Buenos Aires Argentina. *Hydrogeology Journal*, 16(6), 1113-1127. DOI: 10.1007/s10040-008-0289-y.
- Quiroz Londoño, O. M., and Martínez, D. E. (2021). Distribución espacial de isótopos estables en el

- acuífero Pampeano en el sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Boletín Geológico y Minero*, 132(1-2), 175-184. DOI: 10.21701/bolgeomin.132.1-2.018.
- Romanelli, A., Quiroz Londoño, O. M., Martínez, D. E., Massone, H. E., and Escalante, A. H. (2014). Hydrogeochemistry and isotope techniques to determine water interactions in groundwater-dependent shallow lakes, Wet Pampa Plain, Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 71(4), 1953-1966. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2601-y>.
- Sala, J., Gonzalez, N., and Kruse, E. E. (1983). Generalización Hidrológica de la Provincia de Buenos Aires. *Coloquio Int. de Grandes Llanuras*. Unesco. Olavarría, Prov. Bs. As., VIII, 975-1008.
- Santoni, S., Huneau, F., Garel, E., Aquilina, L., Vergnaud-Ayraud, V., Labasque, T., and Celle-Jeanton, H. (2016). Strontium isotopes as tracers of water-rocks interactions, mixing processes and residence time indicator of groundwater within the granite-carbonate coastal aquifer of Bonifacio (Corsica, France). *Science of the Total Environment*, 573, 233-246.
- Santucci, L., Sancí, R., Carol, E., Esteban, V., and Panarello, H. O. (2019). Using H, O, Rn isotopes and hydrometric parameters to assess the surface water-groundwater interaction in coastal wetlands associated to the marginal forest of the Río de la Plata. *Continental Shelf Research*, 186, 104-110. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.08.002>.
- Silva Busso, A. A., and Amato, S. D. (2012). Aspectos hidrogeológicos de la región periserrana de Tandilia (Buenos Aires, Argentina). *Boletín Geológico y Minero*, 123(1), 27-40.
- Sophocleous, M. A. (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10, 52-67. DOI: 10.1007/s10040-001-0170-8.
- Teruggi, M. E. (1954). El mineral volcánico-piroclástico en la sedimentación cuaternaria argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 9(3), 184-191.
- Teruggi, M. E. (1957). The nature and origin of Argentine Loess. *Journal of Sedimentary Research*, 27(3), 322-332.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *The Geographical Review*, 38, 55-94.
- Tonni, E. P., Cione, A. L., and Figini, A. J. (1999). Predominance of arid climates indicated by mammals in the pampas of Argentina during the Late Pleistocene and Holocene. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 147, 257-281.
- Varela, L. B. (1992). Escurrimiento subterráneo en la cuenca del arroyo Tapalqué. In: López, H. L., and Tonni, E. P. (eds.). *Situación Ambiental de la Provincia de Buenos Aires. A. Recursos y rasgos naturales en la evaluación ambiental*. Año II, N° 11, 15 pp. CIC, Provincia de Buenos Aires.
- Vital, M., Daval, D., Clément, A., Quiroga, S., Fritz, B., and Martinez, D. E. (2018). Importance of accessory minerals for the control of water chemistry of the Pampean aquifer, province of Buenos Aires, Argentina. *Catena*, 160, 112-123. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.005>.
- Vitousek, P. M., Aber, J. D., Howarth, R. W., Likens, G. E., Matson, P. A., Schindler, D. W., and Tilman, D. G. (1997). Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological applications*, 7(3), 737-750. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1997\)007\[0737:HAOTGN\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1997)007[0737:HAOTGN]2.0.CO;2).
- Wang, Y., Guo, Q., Su, C., and Ma, T. (2006). Strontium isotope characterization and major ion geochemistry of karst water flow, Shentou, northern China. *Journal of Hydrology*, 328, 592-603. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.01.006>.
- Williamson, C. E., Saros, J. E., Vincent, W. F., and Smol, J. P. (2009). Lakes and reservoirs as sentinels, integrators, and regulators of climate change. *Limnology and Oceanography*, 54(6, part 2), 2273-2282. https://doi.org/10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2273.
- Williamson, C. E., Brentrup, J. A., Zhang, J., Renwick, W. H., Hargreaves, B. R., Knoll, L. B., and Rose, K. C. (2014). Lakes as sensors in the landscape: optical metrics as scalable sentinel responses to climate change. *Limnology and Oceanography*, 59(3), 840-850. <https://doi.org/10.4319/lo.2014.59.3.0840>.
- Winter, T. C. (1999). Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal*, 7, 28-45.

