

## **EVOLUCIÓN Y ORIGEN DE LAGUNAS EN LA LLANURA INTERSERRANA MEDIANTE EL USO DE TRAZADORES Y SENSORES REMOTOS**

Solana, María Ximena<sup>1,2</sup>; Quiroz Londoño, Orlando Mauricio<sup>1,2</sup>; Martínez, Daniel Emilio<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de Mar del Plata. Funes 3350, 7600 Mar del Plata. Tel: +54 223 475 4060  
e-mail: ximesolana@hotmail.com

<sup>2</sup> IIMyC Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras. Rodríguez Peña 4046, 7600 Mar del Plata. Tel: +54 223 473 4635

### **Resumen**

El seguimiento del estado hídrico de una región a lo largo del tiempo resulta de gran importancia a la hora de elaborar modelos conceptuales que expliquen el funcionamiento y la relación entre los cuerpos de agua presentes en la zona. Mediante el uso de sensores remotos y mediciones de parámetros fisicoquímicos e isotópicos, se tiene como objetivo caracterizar los cuerpos de agua presentes en el sur de la Cuenca del Río Quequén Grande. Las variaciones en dichos parámetros reportadas por diversos autores, así como la presencia de lagunas de diferentes tamaños y en su mayoría arreicas, indican una dinámica diferente del acuífero, asociada a flujos ascendentes. En la última década, estas lagunas han experimentado un crecimiento areal significativo, y a partir del estudio de las imágenes satelitales existentes para esta región se ha podido realizar un seguimiento de la superficie cubierta por agua en los últimos 30 años y relacionarla con datos de precipitación anual. Se muestrearon lagunas para la medición de parámetros fisicoquímicos e isotópicos. Al mismo tiempo se realizó un relevamiento de captaciones de agua subterránea, y tras comparar esta información se pudieron inferir fuentes y procesos diferentes en el agua que conforma los cuerpos de agua superficial.

**Palabras clave:** Conductividad, isótopos, índices, teledetección, hidrogeología.

### **Abstract**

Regional water monitoring through time is important when elaborating conceptual models in order to understand the hydrological functioning and the interaction among the different water bodies in an area. With the application of remote sensing techniques besides physicochemical and isotopic measurements, the aim of the present paper is to describe the water bodies of the southern Quequén Grande basin. Differences between physicochemical and isotopic parameters reported by some authors, in addition to arreic systems with varied lagoon sizes, suggest a different dynamic in the aquifer with an upward groundwater flow. Last decade, lagoons have experienced a significant growth. The use of remote sensing imagery has permitted the monitoring of the surface covered by water in the last 30 years and related it with annual precipitation data. Lagoons and groundwater sources were sampled for physicochemical and isotopic analysis. Comparing data allowed us to deduce different water sources and processes in water bodies of this area.

**Key-words:** Conductivity, isotopes, index, remote sensing, hydrogeology.

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El sudeste de la provincia de Buenos Aires es reconocido como una zona de alta productividad agrícola en la Argentina. La cuenca del río Quequén Grande (CRQG) es una de las más extensas de este sector, ocupando una superficie aproximada de 10.000 km<sup>2</sup>. Se encuentra en la región geográfica denominada Llanura Interserrana Bonaerense, que consiste en una amplia planicie comprendida entre los dos elementos estructurales positivos más destacados de la provincia: los sistemas de Tandilia y Ventania.

La CRQG presenta una geometría compleja, fuertemente asimétrica, en la que el río principal recibe todos sus afluentes desde la margen izquierda (fig. 1). Esto ha sido explicado por Cortizo e Isla (2000) como consecuencia de un proceso de captura fluvial. La definición del proceso de captura implica que con anterioridad al mismo existía una red de flujo subparalela según la cual cursos como los de los arroyos Calanguyú o Calaveras continuaban con sentido norte-sur para desembocar directamente en el Océano Atlántico. Asociado a esto, existen referencias bibliográficas de la aparición en superficie de rocas de basamento que pertenecerían al sistema de Ventania (Llambías y Prozzi, 1975) en el límite sur de la CRQG, lo cual implica la existencia de un elemento estructural positivo intermedio entre los sistemas de Tandilia y Ventania. Estas rocas corresponderían a lo que hidrogeológicamente Sala (1975) definió como basamento impermeable, por lo que su presencia constituiría una barrera para el flujo subterráneo. Geográficamente, este positivo estructural coincide con la presencia de una serie de lagunas, lo que ha llevado a Teruggi et al. (2004) denominarlo como “zona de divisorias con lagunas”. Este cambio litológico podría ser el causante de flujos ascendentes con características fisicoquímicas e isotópicas particulares, propuestos por Quiroz et al. (2015) y Romanelli et al. (2010).

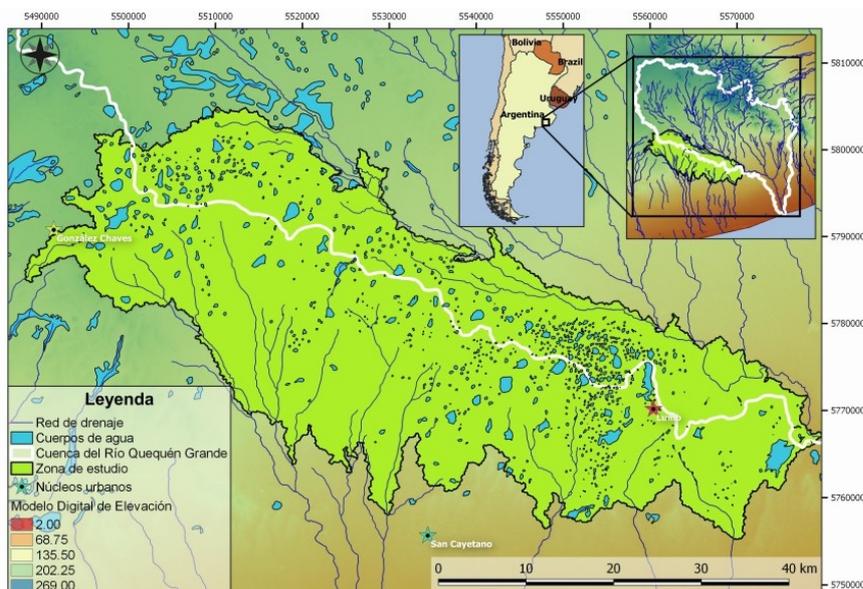


Figura 1: Situación geográfica de la Cuenca del Río Quequén Grande y de la zona de estudio.

El objetivo del presente trabajo consiste en caracterizar la dinámica del acuífero pampeano en el límite sur sureste de la CRQG utilizando técnicas hidrogeoquímicas, isotópicas y de sensores remotos, determinando la relación del acuífero con los cuerpos de agua superficial que allí se localizan. A partir del análisis de datos del nivel freático y parámetros fisicoquímicos e isotópicos, se plantea el origen de las diferentes lagunas y su relación con el acuífero. Los resultados obtenidos brindan información relevante para la gestión del recurso hídrico de la región. Este trabajo corresponde a una primera parte de la tesis doctoral de la autora principal, por lo que sus resultados deben tomarse como preliminares.

## METODOLOGÍA

Se realizaron tanto actividades de gabinete como de campo. En las primeras se incluye la recopilación de información previa de aspectos geológicos, hidrogeológicos, modelos digitales de elevación y sensores remotos. Se descargaron las imágenes satelitales correspondientes al *Path* (franja vertical) 225 y *Row* (fila horizontal) 86 de los satélites Landsat 4 MSS, Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+SLC y Landsat 8 OLI/TIRS comprendidas entre el año 1983 y 2016. Las imágenes fueron seleccionadas en función de su distribución temporal, aproximadamente una por estación del año, desechando aquellas cuya nubosidad fuese superior al 20%.

A cada imagen seleccionada se le aplicó la corrección atmosférica. Para ello fue utilizado el *Plug-in Semi-Automatic Classification* (Congedo et al., 2013), instalado dentro del software QGIS (Quantum GIS Development Team, 2016). Con este proceso es posible obtener los valores de reflectancia (TOA) en el techo de la atmósfera. Dicho *plug-in* está basado en el método de la sustracción de objetos oscuros (DOS) para la corrección atmosférica. Las imágenes, una vez corregidas fueron utilizadas para cartografiar la superficie cubierta de agua, que en este caso estaría asociada a las lagunas. Para ello se probaron diferentes índices denominados Índices Diferenciales de Agua Normalizados (NDWI) (tabla 1). El rango de variación de estos índices es de -1 a 1, siendo los valores altos agua, los intermedios vegetación y los bajos tierra. Dichos índices utilizan en su cálculo las bandas infrarrojo cercano (IRC), infrarrojo medio (IRM), verde (V) y rojo (R).

Tabla 1: Índices Diferenciales de Agua Normalizados.

Índice	Operación	Observaciones
NDWI1 (Gao, 1996)	$(IRC-IRM) / (IRC+IRM)$	Tiene en cuenta el agua de la vegetación
NDWI2 (Mc Feeters, 1996)	$(V-IRC) / (V+IRC)$	No discrimina todas las lagunas
NDWI3 (Rogers & Kearney, 2004)	$(R-IRM) / (R+IRM)$	Los valores altos corresponden al agua y los bajos a la tierra
NDWI4 (Xu, 2006)	$(V-IRM) / (V+IRM)$	Incluye las zonas urbanas como agua
NDVI (Rouse et al., 1974)	$(IRC-R) / (IRC+R)$	Útil para discriminar cuerpos de agua

Las observaciones y generalidades de cada uno de los índices utilizados se documentan en la tabla 1. Tras varias pruebas, el índice que mejor discriminó las lagunas fue el NDWI3 (Rogers & Kearney, 2004). Para ajustar la selección hecha por este índice y evitar incluir en el mapeo zonas anegadas, se combinó el resultado del NDWI3 con el Índice de Vegetación Normalizada o NDVI (Rouse et al., 1974), el cual resulta útil al momento de separar de una imagen los diferentes cuerpos de agua. El NDVI utiliza en su análisis las bandas IRC y R (tabla 1). El diagrama ilustrado en la figura 2 muestra el proceso completo que se realizó para cartografiar los diferentes cuerpos de agua. Con la información resultante se obtuvo el área cubierta por agua en las diferentes fechas analizadas, que se comparó y analizó frente a los valores de precipitación anuales registrados en la zona de La Dulce.

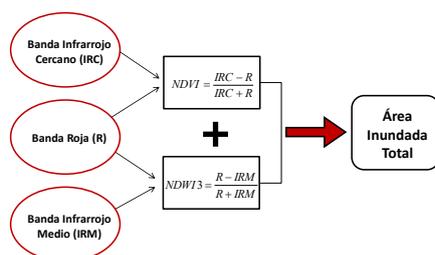


Figura 2: Diagrama de flujo en el que se muestra el cálculo realizado en la determinación del área inundada total.

Durante las campañas realizadas en los meses de septiembre de 2015 y febrero de 2016 se inventariaron un total de 31 puntos de agua superficial y 28 de agua subterránea. De éstos se colectaron 31 muestras de agua de laguna y 19 muestras de agua de pozo que se enviaron al laboratorio para su análisis hidroquímico e isotópico. En los 10 puntos restantes de agua subterránea sólo se registró el nivel freático. La conductividad eléctrica (CE), pH y temperatura fueron medidos in situ. El nivel freático se registró en 20 pozos. Todos los puntos fueron georreferenciados con un GPS Garmin eTrex Vista, y sus características y mediciones fueron incluidas en el SIG del Grupo de Hidrogeología del Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario de la UNMdP.

En el laboratorio se determinó la composición de iones mayoritarios y dureza total mediante los siguientes métodos: cloruros por el método de Mohr, sulfatos por turbidimetría, calcio y magnesio por titulación complejométrica con EDTA, sodio y potasio por espectrometría de llama y bicarbonatos-carbonatos por titulación potenciométrica. Se utilizó la metodología detallada en APHA (1992) en las determinaciones químicas, y la información hidroquímica fue analizada con el programa AQUACHEM 4.0 (Calmbach y Waterloo Hydrogeologic Inc., 2003), efectuándose una caracterización estadística general del agua superficial y subterránea y diagramas convencionales de Piper (Hem, 1992) para la interpretación de los resultados obtenidos.

La determinación de isótopos estables ( $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$ ) se realizó con un espectroscopio láser para agua líquida modelo DLT-100 desarrollado por Los Gatos Research. Los resultados son expresados en forma de desviaciones isotópicas en ‰ (ecuación 1), donde  $\delta$  es la desviación isotópica, S la muestra, P la referencia internacional y R la relación isotópica  $\left(\frac{^2\text{H}}{\text{H}}, \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}\right)$ .

$$\delta = \frac{1000 \cdot (R_S - R_P)}{R_P} \text{‰}$$

Ecuación 1: Definición de relación isotópica ( $\delta$ ).

La referencia utilizada ha sido Vienna Standard Mean Ocean Water (V-SMOW) (Gonfiantini, 1978). Los valores de incertidumbre son  $\pm 0,3 \text{‰}$  para  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\pm 1,0 \text{‰}$  para  $^2\text{H}$ . Como Línea Meteórica Local (LML) fue utilizada la establecida por Quiroz et al. (2015) para la CRQG.

## RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

### Sensores remotos

A partir de la combinación de los índices NDWI3 y NDVI se obtuvo para cada fecha una imagen binaria en la que el 0 representa a la tierra y el 1 al agua. La conversión de los archivos raster resultantes a formato vector permitió realizar el cálculo del área cubierta por agua.

Las áreas calculadas en las diferentes épocas se representaron en un gráfico en conjunto con datos mensuales de precipitación de la localidad de La Dulce (fig. 3). En general se observa una relación directa entre ambos valores, ya que los meses en los que se han registrado altas precipitaciones llevan asociado un aumento del área inundada. Sin embargo, esto no siempre se cumple. Este es el caso de fechas como las comprendidas entre enero de 1994 y junio de 1999, donde a pesar de observarse un aumento significativo de las precipitaciones, éste no se ve reflejado en el área inundada, la cual se mantiene sin cambios significativos. Por otro lado, también se observan casos con una respuesta diferente a valores similares de precipitación, pues si comparamos los picos destacados en violeta y verde vemos que estos eventos no tienen la misma respuesta en lo que se refiere a zonas inundadas. Asimismo, se han destacado en amarillo picos en los que se observa un aumento significativo del área inundada a pesar de registrarse valores menores de

precipitación. Este hecho sugiere que los cuerpos de agua son recargados con un retardo en relación a las precipitaciones.

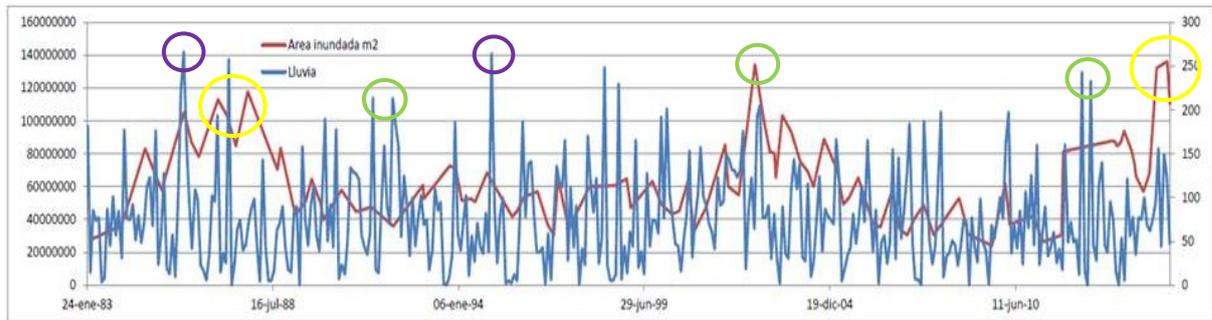


Figura 3: Gráfico del área inundada en m<sup>2</sup> frente al registro mensual de precipitaciones. Se han destacado picos en los valores con comportamiento anómalo.

### Caracterización hidroquímica

En la figura 4 se muestran dos diagramas triangulares de Piper donde están representadas las muestras de agua subterránea (A) y superficial (B). Para mejorar la interpretación, se han añadido resultados de los análisis fisicoquímicos e isotópicos de otros puntos de muestreo cercanos a la zona, descargados del SIG del Grupo de Hidrogeología del Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario de la UNMdP.

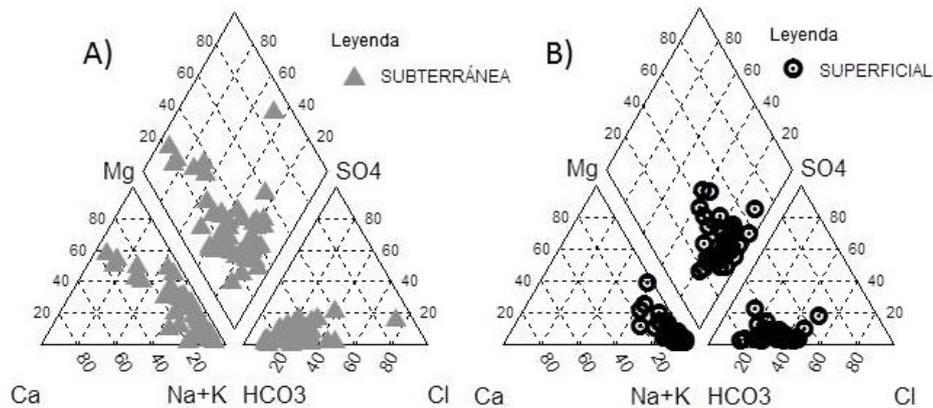


Figura 4: Contenido iónico de las aguas subterráneas (A) y superficiales (B) y de la zona objeto de estudio.

### Agua subterránea

La mayoría de muestras analizadas presenta una composición química bicarbonatada sódico-magnésica con poco contenido en calcio, y su distribución espacial en la zona de estudio es bastante homogénea. Existe otro grupo de muestras de tipo bicarbonatadas calco-magnésicas, con valores de CE inferiores a 1150  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , las cuáles fueron colectadas en el límite SSE de la zona de estudio (fig. 5). Valores de CE superiores a los 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  son registrados en otro grupo de muestras que presentan una composición química de tipo bicarbonatada clorurada sódica, con un contenido en cloruros que oscila entre los 60 mg/l y los 227 mg/l. En el mapa de CE (fig. 5), la mayoría de muestras de este grupo se encuentran localizadas al norte del Arroyo Pescado Castigado, y esa composición podría estar indicando que se trata de aguas más antiguas o bien haber sufrido procesos de evaporación previos a su infiltración. En el diagrama destacan dos muestras que se desvían de la composición química general. Se trata de las muestras G020 con CE de 2792  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y G220, con la CE más alta registrada en las muestras de agua subterránea, con un valor de 6835  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Ambas son de tipo sódico-magnésica con alto contenido en cloruros. En estas

dos muestras los sulfatos se encuentran en proporciones elevadas, alcanzando los 470 mg/l en la primera y 855 mg/l en la segunda.

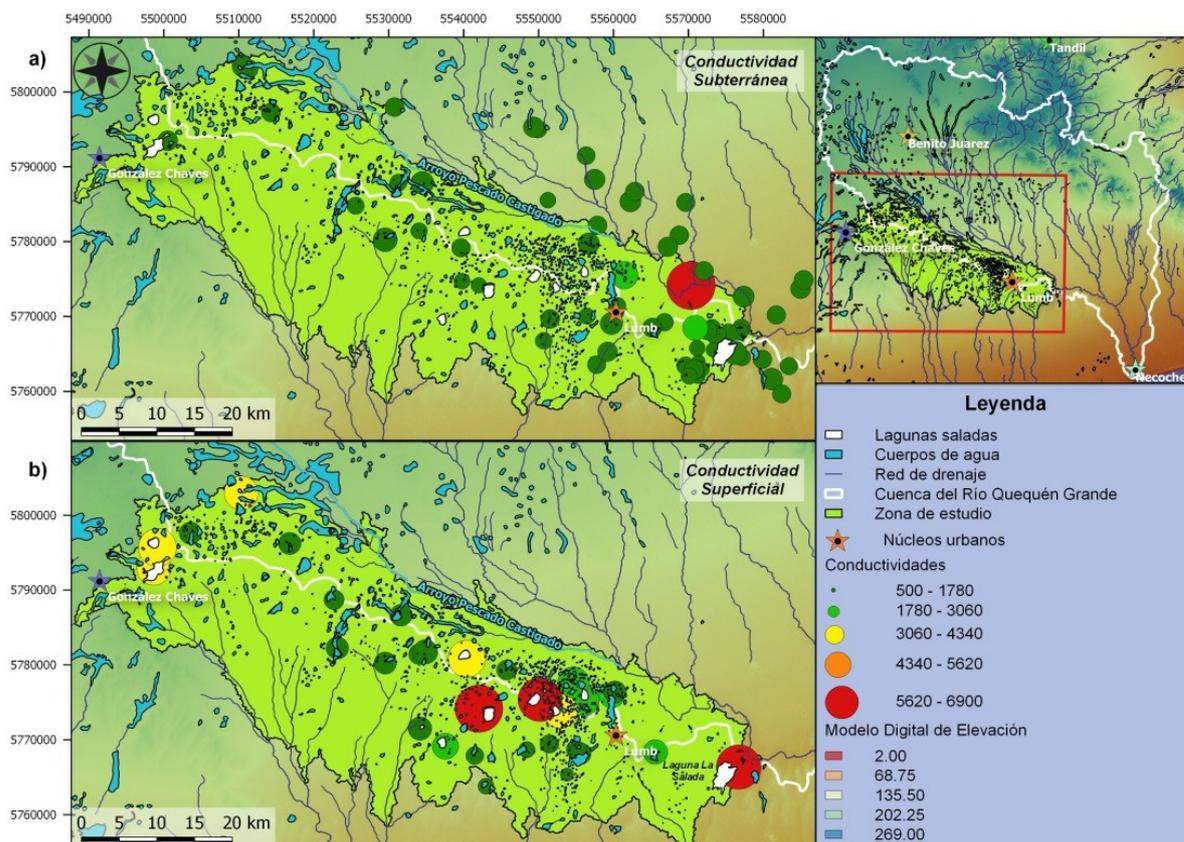


Fig. 5: Mapa de valores de CE subterránea (a) y superficial (b) del área de estudio en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , representados por puntos.

### Agua superficial (Lagunas)

En el diagrama de Piper de la figura 4 (B) se observa que, por lo general, las muestras de agua superficial presentan una composición química de tipo bicarbonatada sódica. El análisis hidroquímico de estas muestras indica que su composición es similar a la del agua subterránea, diferenciándose de esta última en su contenido en cloruros. Se distinguen dos tipos de muestra: uno de ellos de tipo bicarbonatado sódico, con valores de CE comprendidos entre los 1000 y los 1800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Estas características sugieren una recarga por aguas subterráneas con importante aporte de agua de lluvia. El otro grupo que se distingue posee mayor contenido de cloruros y CE más altas, llegando a alcanzar los 6680  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En la figura 5 (b) se observa cómo este grupo de muestras se localiza en la parte central de la zona de estudio, coincidiendo con el límite sur de la CRQG. Las lagunas con mayor salinidad se asocian a la divisoria de aguas sur de la CRQG (figura 5b), lo que podría explicarse con una fuente de recarga subterránea de tipo regional generada por flujos ascendentes, los cuales a su vez pueden ser explicados por la presencia de una litología diferente, coincidiendo con el límite sur de dicha cuenca.

### Caracterización isotópica

Se utilizó un diagrama convencional  $\delta^{18}\text{O}$  vs  $\delta^2\text{H}$  junto con las líneas meteóricas mundial (LMM) y local (LML). La Línea Meteórica Local (LML) utilizada ha sido la calculada a partir de datos de precipitación reportados para la CRQG por Quiroz et al. (2015), que es definida por la siguiente ecuación:

$\Delta^2\text{H}\text{‰} = 8.19 \pm (0.14) \cdot \delta^{18}\text{O}\text{‰} + 13.15 \pm (0.82)$  Ecuación 2: Definición de la Línea Meteórica Local

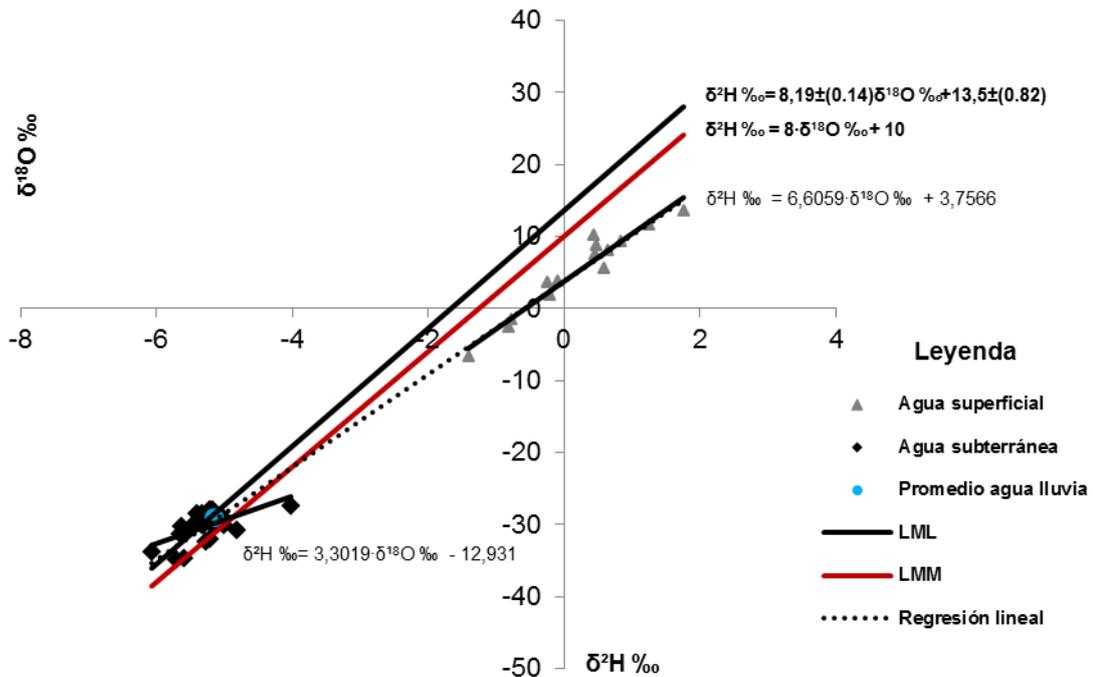


Figura 6: Contenido isotópico promedio de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  del agua superficial y subterránea.

La mayoría de las muestras de agua superficial analizadas se agrupan hacia el lado positivo de los ejes (fig. 6), tratándose de muestras menos empobrecidas que las de agua subterránea. La línea de regresión lineal entre los datos isotópicos de las muestras de agua superficial y subterránea indica que las lagunas proceden de la evaporación del agua subterránea de la que se recargaron con una mezcla de aguas provenientes de precipitaciones, presentando diferentes grados de evaporación. En cuanto al agua subterránea, los resultados obtenidos en los análisis muestran en general un buen agrupamiento alrededor del valor promedio de agua lluvia reportado por Quiroz et al. (2015), lo que indicaría que se trata de un acuífero recargado por lluvia y bien mezclado.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos hasta ahora, se plantea la existencia de diferentes orígenes de agua para las lagunas. La correlación entre las muestras de agua superficial y subterránea sugiere a esta última como fuente de recarga principal para las mismas con componente pluviométrico variado, reflejándose en los resultados isotópicos. El enriquecimiento progresivo de las muestras de laguna en isótopos estables indica diferentes grados de evaporación de agua procedente de la descarga subterránea, mientras que las muestras más alejadas a la línea de regresión sugieren una fuente de recarga diferente. La discriminación entre lagunas de tipo permanente e intermitente podría mejorar el análisis de estos datos.

## CONCLUSIONES

El uso de índices utilizando diferentes sensores remotos ha sido de gran utilidad en la cuantificación de superficies de lagunas al sur de la CRQG. Al combinar esta información con datos de precipitación, se pudo establecer el comportamiento hídrico del área de estudio ante diferentes valores de precipitación.

El análisis isotópico dejó en evidencia la existencia de descarga de agua subterránea a las lagunas, la cual pudo inferirse previamente con los análisis fisicoquímicos y los mapas de CE. Dichos mapas mostraron un lineamiento coincidente con el límite sur de la CRQG, y

al interpretarlos conjuntamente con los datos isotópicos pudo observarse que las muestras de agua superficial que se ajustaban a la línea de regresión coincidían con dicho límite.

## REFERENCIAS

- APHA**, 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th ed. American Public Health Association, Washington DC, 1100 pp.
- Calmbach y 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., United States of America, 276pp.
- Congedo, L., Munafò, M., Macchi, S.**, 2013. Investigating the Relationship between Land Cover and Vulnerability to Climate Change in Dar es Salaam, Working Paper, Rome: Sapienza University.
- Cortizo, L.C. e Isla, F. I.** 2000. Land-Cover Change and cliff retreat along the coasts of Necochea and Lobería, Argentina. 9. Simposio Latinoamericano de Percepción Remota Puerto Iguazú, Formato CD 525-533 p., Misiones.
- Gao B.**, 1996. NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, 58(3):257– 266.
- Gonfiantini, R.**, 1978. Standards for stable isotope measurements in natural compounds. *Nature* 271, 534-536.
- Hem, J. D.**, 1992. Study and interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Waters. U.S.G.S. Water-Supply Paper, 2254, fourth printing, 263 pp.
- Llambías, E. y Prozzi, C.R.**, 1975. Ventania. En: Geología de la Provincia de Buenos Aires, VI Congreso Geológico Argentino, Relatorio 79-101, Buenos Aires.
- McFeeters, S.K.**, 1996. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *International Journal of Remote Sensing*, 17(7):1425–1432.
- Quantum GIS Development Team**, 2016. Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.
- Quiroz Londoño, O. M., Martínez, D. E., Massone, H. E., Londoño Ciro, L. A. y Dapeña, C.**, 2015. Spatial distribution of electrical conductivity and stable isotopes in groundwater in large catchments: a geostatistical approach in the Quequén Grande River catchment, Argentina, *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 51:3, 411-425, DOI: 10.1080/10256016.2015.1056740.
- Rogers, A.S., and M.S. Kearney**, 2004. Reducing signature variability in unmixing coastal marsh Thematic Mapper scenes using spectral indices, *International Journal of Remote Sensing*, 25(12):2317–2335.
- Rouse, J. W., Hass, R. H., Deering, D. W., Schell, J. A.**, 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. Austin: Texas A. M. University, College Station.
- Sala, J. M.**, 1975. Recursos Hídricos (Especial Mención de las Aguas Subterráneas), Relatorio VI Con. Geol. Arg., 169-193.
- Teruggi L. B., Martínez, G. A., Billi, P. y Preciso, E.**, 2004. Geomorphologic units and sediment transport in a very low relief basin: Rio Quequén Grande, Argentina. In: *Geomorphological Processes and Human Impacts in River Basins*. Spain: Proceedings of the International Conference held at Solsona, Catalonia, IAHS Publ. 299, 2004.
- Xu, H.**, 2006. Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 27(14):3025–3033.