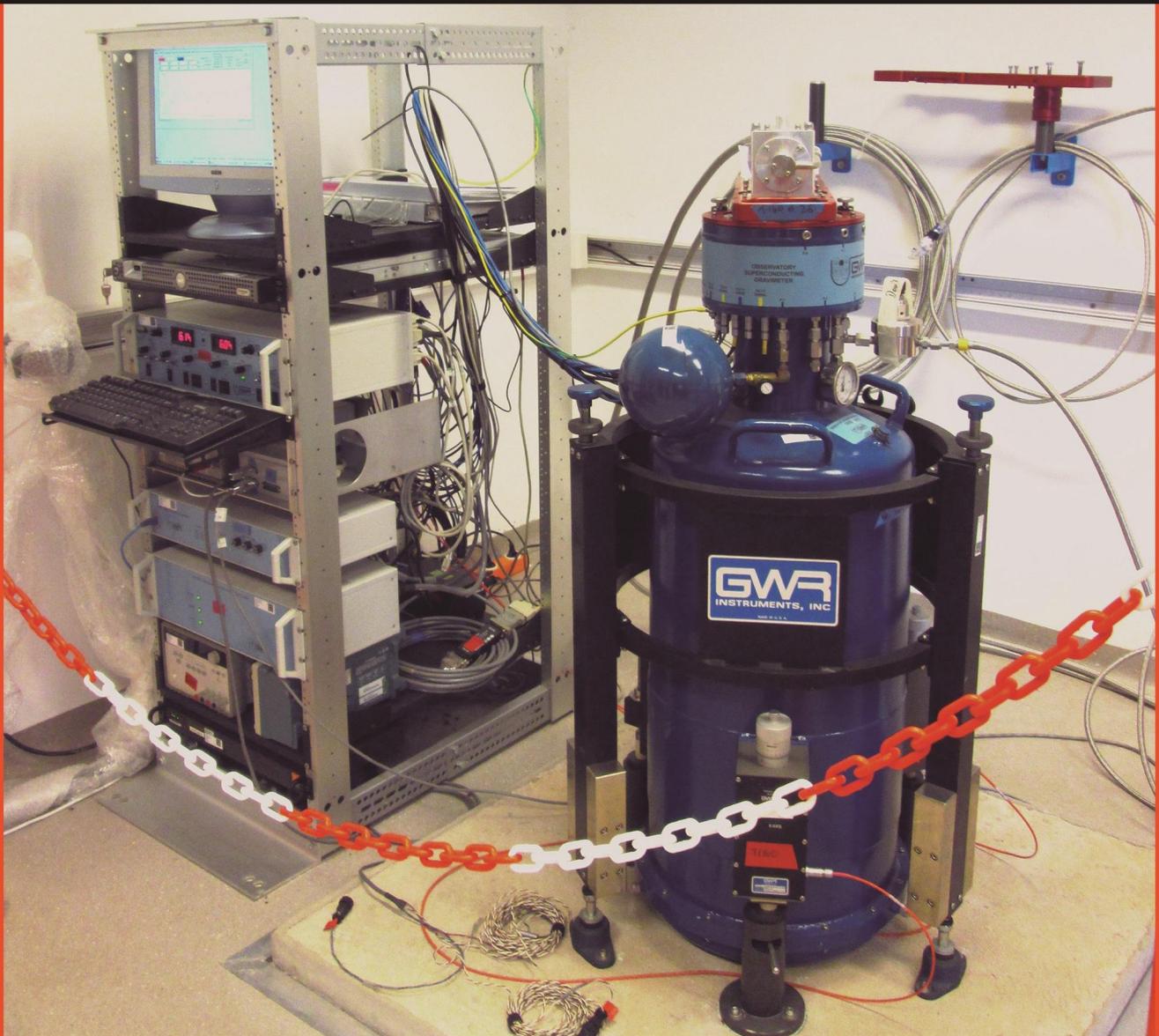




www.aagg.org.ar

Publicación de la Asociación Argentina  
de Geofísicos y Geodestas

# GEOACTA



Gravímetro Superconductor del Observatorio Argentino Alemán de Geodesia AGGO

**VOLUMEN 41(2)**  
**2017**

ISSN EN LINEA 1852-7744

BUENOS AIRES, ARGENTINA

## EVALUACION DE RELACIONES GEOMORFOLOGÍA – CALIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA MEDIANTE TÉCNICAS ESTADÍSTICAS Y MODELACIÓN NUMÉRICA EN LA PLANICIE ARENOSA DEL SUR DE CÓRDOBA, ARGENTINA

### ASSESSMENT OF GEOMORPHOLOGY-GROUNDWATER QUALITY RELATIONSHIPS USING STATISTICAL TECHNIQUES AND NUMERICAL MODELS IN THE SANDY PLAIN OF THE SOUTH OF CORDOBA. ARGENTINA

Fátima Noelia Bécher Quinodóz <sup>1,2</sup> y Mónica. T. Blarasin <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Río Cuarto, Departamento de Geología, Río Cuarto, Argentina. Ruta 36 km 601. X5804BYA Río Cuarto, Argentina  
E-mail: fbecher@exa.unrc.edu.ar

#### RESUMEN

El área de estudio localizada en la planicie arenosa del Sur de Córdoba, constituye un palimpsesto resultante de la yuxtaposición del sistema eólico (“Mar de Arena Pampeano”), con el sistema fluvial río Quinto. La zona presenta un relieve suavemente ondulado, caracterizado por la presencia de dunas longitudinales y médanos resultantes de reactivaciones modernas, paleocanales y antiguos derrames del río Quinto y lagunas permanentes/temporarias. Dada la complejidad de este ambiente, el objetivo del presente trabajo es realizar la caracterización hidrogeoquímica del acuífero libre, estableciendo relaciones con los principales rasgos geomorfológicos, utilizando análisis estadístico multivariado y modelación numérica para validar el modelo conceptual. El acuífero libre estudiado presentó un patrón espacial geoquímico complejo, con aguas dulces a saladas (0,4 a 10 g/L) y tipo geoquímico de bicarbonatadas a cloruradas sódicas, muchas de ellas de carácter aniónico mixto. El análisis estadístico en Modo Q presenta dos grupos:  $G_1$ , que asocia aguas dulces pertenecientes al ambiente fluvio-eólico y  $G_2$  agrupa las aguas salobres y saladas del ambiente fluvial ( $G_2^a$ ) y eólico ( $G_2^b$ ), respectivamente. Las aguas salobres y saladas, sulfatadas y cloruradas, son más evolucionadas y se consideran resultantes de un largo tránsito de flujos regionales que proceden del sector occidental, mientras que las aguas dulces bicarbonatadas se vinculan a médanos activos y/o lomas donde se desarrollan sistemas de flujos locales (recarga reciente de lluvias). La modelación numérica validó el modelo hidrogeológico conceptual, indicando que los procesos geoquímicos, fundamentalmente disolución de sales e intercambio catiónico, permiten explicar la evolución que experimenta el agua a lo largo de la línea de flujo regional, desde el sector periserrano (aguas dulces y del tipo bicarbonatadas sódicas) y hacia la zona de estudio (aguas saladas y cloruradas sódicas). Por su parte, a nivel local, las aguas subterráneas dulces bicarbonatadas sódicas localizadas en sectores medanosos pueden ser explicadas a través de la evolución geoquímica del agua de lluvia que ingresa al acuífero, debido a la disolución de sales e intercambio catiónico.

**Palabras clave:** aguas subterráneas - geomorfología - análisis estadístico - modelación.

#### ABSTRACT

The area studied, located on the sandy plain of the South of Cordoba, is a palimpsest resulting from the juxtaposition of the Aeolian (“Pampean Sand Sea”) and the Río Quinto river systems. The area has an undulated topography, with old longitudinal dunes and modern ones resulting from reactivations by present winds. Paleochannels, belonging to the Rio Quinto river, and temporary and permanent lagoons were observed. Given the complexity of this environment, the objective of this work is to characterize the unconfined aquifer from a dynamic and geochemical point of view, establishing relationships with geomorphological features. A multivariate statistical analysis was made

for the validation of the conceptual model. The unconfined aquifer presented a complex geochemical pattern with fresh and salt water (0.4 to 10.0 g/L) and sodium bicarbonate to sodium chloride geochemical type. There are also many samples with mixed anionic type. The Q mode multivariate analysis showed two groups:  $G_1$  explains fresh groundwater located in the fluvial-aeolian area and  $G_2$  represents brackish - salty groundwater in the fluvial ( $G_2^a$ ) and aeolian ( $G_2^b$ ) environment, respectively. Brackish-salty water is the result of regional flows and the fresh water is related to local flows and precipitation recharge in dunes. Furthermore, the conceptual hydrogeologic model was validated by numerical modeling, indicating that the geochemical processes (mainly dissolution of salts and cation exchange) may explain the geochemical evolution of water throughout a regional flow line, from the peri-mountain sector to the study area. Fresh groundwater of sodium bicarbonate type located in dunes sectors can be explained through the geochemical evolution of the rainwater that enters the aquifer where dissolution of salts and cation exchange take place.

**Keywords:** groundwater - geomorphology - statistical analysis - modeling.

## INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y UBICACIÓN DEL ÁREA ESTUDIADA

Los procesos de gestión de los recursos hídricos y del ambiente en general, involucrados en programas de desarrollo sustentable, necesitan anticipar o prever escenarios futuros y esto implica definir las características, los cambios y las tendencias ambientales en los sistemas considerados. En el caso de los sistemas hidrológicos subterráneos, cuyo comportamiento se encuentra condicionado por factores naturales y antrópicos, es necesario analizar, entre los primeros, las variables climáticas y geológicas y entre los segundos, el modo de ocupación del territorio y el uso al que se someten los recursos naturales (Sophocleous, 2002, Macklin y Lewin, 2008 y Gates et al., 2008). En diversos lugares del mundo, la disponibilidad y calidad del recurso hídrico superficial y subterráneo puede convertirse en un grave problema, sobre todo cuando la demanda de agua para diversos usos (humano, industrial, agropecuario, etc.) incrementa notoriamente. Numerosas zonas, con poblaciones que atraviesan por estas circunstancias, han sido sometidas en los últimos años a estudios hidrogeológicos para encontrar nuevas fuentes de agua potable (Blarasin et al., 2013, Bécher Quinodóz et al., 2013, Bécher Quinodóz et al., 2014). Casos particulares como los trabajos de Naik et al., (2007) y Rani et al., (2015), entre otros, plantean la búsqueda en sectores donde la frecuente escasez de agua es resultado de la combinación de la alteración en la estacionalidad de las lluvias, intrusión de agua salada y/o la contaminación procedente de aguas residuales y sistemas de drenaje deficientes. En la exploración hidrogeológica es de suma utilidad el estudio de las geoformas del paisaje, vinculándolas con las zonas de escorrentía/recarga. Esto ha permitido, por ejemplo, encontrar sectores de recarga de agua subterránea, no afectados por procesos de contaminación y aptas para diversos usos, incluso humanos (Rani et al., 2015, Blarasin et al., 2013, Bécher Quinodóz et al., 2013, Bécher Quinodóz et al., 2014). Sedhuraman et al., (2014), Alvarez et al., (2010) y Ramaiah et al., (2012) reconocen la importancia de la geomorfología como condicionante del agua subterránea y definen potencialidad y características de diferentes zonas sobre la base de unidades geomorfológicas. En los últimos años incrementa el número de trabajos (Martínez et al., 2000, Martínez y Osterrieth, 2013, Bécher Quinodóz y Blarasin, 2015, Bécher Quinodóz et al., 2015), que aplican modelación numérica geoquímica para comprender el origen y las causas de las variaciones espacio-temporales en la composición química del agua superficial y/o subterránea, como así también para verificar la verosimilitud de un modelo conceptual planteado.

En el caso del Sur de Córdoba, el recurso hídrico más utilizado para todas las actividades es el agua subterránea, en particular la del acuífero libre. Sin embargo, en numerosas ocasiones, presenta escasa aptitud como resultado del impacto de las actividades humanas o por la presencia de altos valores de iones disueltos que forman parte del fondo natural de la composición química del agua, como por ejemplo arsénico y flúor, entre otros (Bécher Quinodóz y Blarasin, 2015, Blarasin et al., 2014, Bécher Quinodóz y Blarasin, 2014, Bécher Quinodóz et al., 2014, Bécher Quinodóz et al., 2013). Las poblaciones rurales y urbanas requieren entonces de estudios hidrogeológicos específicos que permitan a través de exploraciones, definir cambios espacio-temporales y encontrar y cuantificar reservas de aguas dulces aptas, de manera de disminuir la amenaza que constituyen a la salud pública las aguas de mala calidad.

El área de estudio (3.900 km<sup>2</sup>) comprende un sector de la planicie medanosa al Sur del río Quinto, entre las localidades de Villa Valeria y Mattaldi, Córdoba (Fig. 1). Esta región, que integra el Mar de Arena Pampeano (Iriondo, 1999), presenta una historia alternada de ciclos dominados por deflación y fundamentalmente agradación eólica con construcción de dunas y otros de disipación de estas

geofomas. Se observa además actividad fluvial, existencia de lagunas y bañados y, en ambientes de interfluvios, pedogénesis dominante. En esta planicie el agua subterránea del acuífero libre es la más utilizada para todas las actividades, aunque en ocasiones, presenta una composición química natural no apta para diversos usos dados los elevados valores de salinidad, sulfatos, arsénico y fluoruro (Bécher Quinodóz et al., 2015; Bécher Quinodóz y Blarasin, 2015, Bécher Quinodóz y Blarasin, 2014, Bécher Quinodóz et al., 2013). En función de los antecedentes regionales y locales mencionados, resulta necesario conocer los condicionamientos geomorfológicos sobre la geoquímica del agua. En este marco, y dada la importancia de contar con información científica sobre el funcionamiento del sistema hidrológico subterráneo para mejorar su gestión y manejo, se plantea como objetivo realizar la caracterización hidrogeoquímica del acuífero libre en la planicie arenosa del Sur de Córdoba, estableciendo posibles relaciones con los principales rasgos geomorfológicos, utilizando análisis estadísticos multivariado y modelación numérica para tratar de validar el modelo hidrogeológico conceptual.

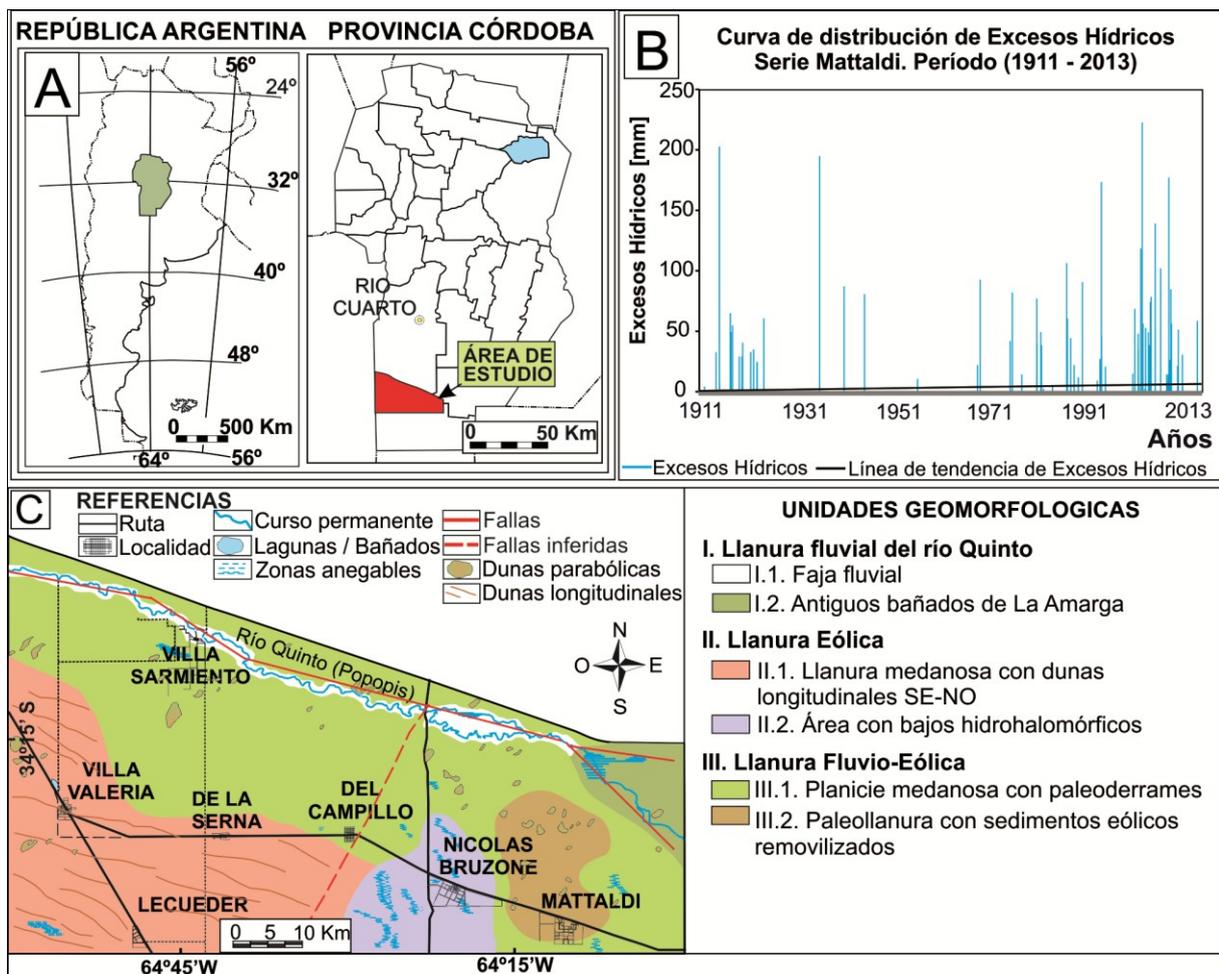


Figura 1. Localización área de estudio.  
Figure 1. Study area.

## CARACTERIZACIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

### Caracterización climática

El clima en la zona es de tipo mesotermal subhúmedo seco, con una precipitación media anual de 716 mm, concentrada principalmente en primavera-verano, con un mínimo de 317 mm y un máximo de 1.407 mm, según el tratamiento de datos realizado por Bécher Quinodóz (2014), de la serie de precipitaciones 1911-2014 de Mattaldi Cooperativa. Bécher Quinodóz (2014) determina que los déficit

se producen en los meses de otoño-invierno, mientras que los excesos (1-223 mm), en primavera-verano, condicionados fundamentalmente por el comportamiento de las precipitaciones. El análisis de tendencias utilizando la media móvil muestra que, a partir de 2005 y hasta la fecha, los déficit hídricos se han incrementado, comportamiento hidrológico que resultó en descensos del nivel freático y reducción de superficie de agua en lagunas instaladas en dunas parabólicas y en los corredores de deflación de las dunas longitudinales (Bécher Quinodóz, 2014).

### **Caracterización geológica e hidrológica superficial**

La zona de estudio se ubica íntegramente dentro de la provincia geológica Llanura Chaco Pampeana, al Este y Sudeste de las Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. En el extremo sudoriental de esta última, el Río Quinto desarrolla su área de nacientes. El área de estudio posee control estructural que se asocia a la tectónica de bloques de la región, cuya conformación actual se relaciona a la orogenia Andina, reconociéndose importantes lineamientos (Bécher Quinodóz et al., 2015). Se destaca el sistema de estructuras NNO-SSE, representado en la zona por el lineamiento río Quinto (Criado et al., 1981; Kostadinoff y Gregori, 2004) y el tramo final de las fallas del Tigre Muerto y San Basilio (Degiovanni, 2005), que en la zona toman dirección NE-SO y son responsables del leve hundimiento del sector oriental. En el área de estudio no aflora basamento cristalino, ni ha sido detectado en las perforaciones realizadas con fines de abastecimiento de agua. Los materiales reconocidos corresponden a sedimentos cuaternarios, perteneciendo la mayoría de los depósitos aflorantes a la Fm Laguna Oscura (Holoceno superior, Cantú, 1992). También afloran depósitos históricos (últimos siglos), representados por materiales de origen eólico, aluvial y palustres (Bécher Quinodóz, 2014). En general, representan ciclos de agradación controlados por eventos neotectónicos y fundamentalmente por oscilaciones climáticas (Degiovanni, 2005, Carignano et al, 2014).

El río Quinto, con nacientes en las Sierras de San Luis, desarrolla dentro de la zona de estudio su cuenca media y media-baja, a lo largo de una longitud de 120 km, con una dirección general de escurrimiento NO-SE, que comprende los Bañados de La Amarga (vieja zona de derrames y antiguo nivel de base del curso de agua). El caudal que eroga el río es fundamentalmente el resultado de la contribución de los escurrimientos superficiales, regulados por embalses, y del agua subterránea. Los datos obtenidos, indican un caudal promedio para el invierno de 4,22 m<sup>3</sup>/s con una velocidad promedio de 0,68 m/s (Bécher Quinodóz et al., 2015). Se observan además en la zona lagunas en médanos y pantanos en áreas deprimidas vinculados fundamentalmente al aporte de agua subterránea (Bécher Quinodóz et al., 2015).

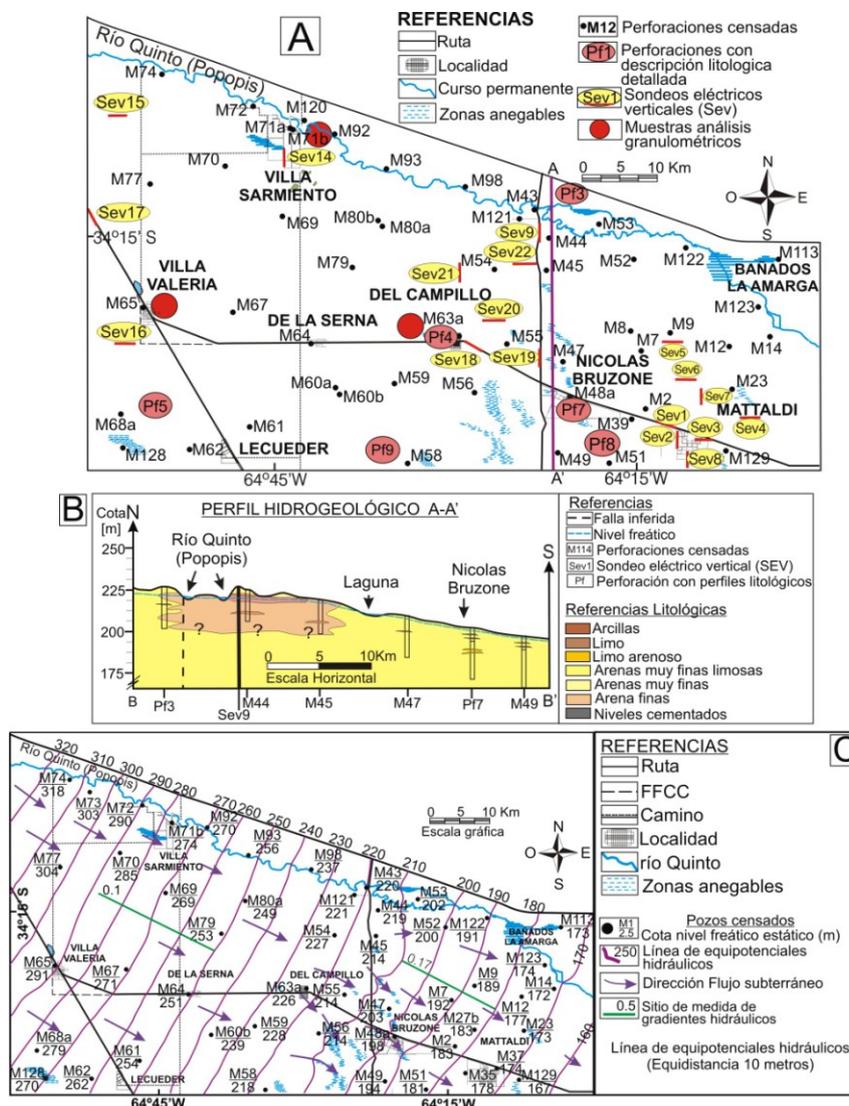
### **Caracterización hidrogeológica**

El acuífero estudiado es el libre, con un espesor aproximado de 80-100 m, el cual exhibe moderada homogeneidad dado el dominio de sedimentos finos, aunque se reconocen cambios faciales que a una escala local implican anisotropías desde el punto de vista hidráulico. Estos cambios están vinculados a materiales más cementados o bien a los sectores medanosos que tienen proporciones de 10 % a 37 % de arenas finas o al ámbito de la faja fluvial del río Quinto y áreas de derrames, que poseen sedimentos más gruesos (17 % y 30 % de arenas gruesas y medias, respectivamente), (Bécher Quinodóz et al., 2015).

Los materiales dominantes en el área estudiada (arenas muy finas), presentan valores de conductividad hidráulica (K) del orden de 1-2 m/día. En los ensayos de bombeo realizados en zonas medanosas de Mattaldi (Blarasin et al., 2013) y Villa Valeria – Villa Sarmiento (Bécher Quinodóz et al., 2013; Bécher Quinodóz, 2014), la K alcanza valores de hasta 5-7 m/d. Las curvas de resistividad resultantes de sondeos eléctricos verticales, realizados en el sector por Blarasin et al., 2013; Bécher Quinodóz et al., 2013 y Bécher Quinodóz, 2014, indican un dominio de materiales arenosos muy finos a limosos, los que intercalan con niveles fuertemente cementados, resultados que fueron constatados con los correspondientes registros litológicos de perforaciones del área (Pf3-Pf4-Pf5-Pf7-Pf8-Pf9) (Fig. 2A). Los sectores con mejores propiedades acuíferas están vinculados a la faja fluvial antigua y actual del río Quinto y a los sistemas de médanos removilizados de la llanura arenosa (Fig. 2B). Esto se debe al predominio de materiales arenosos finos, medios, gruesos y con gravillas dispersas, en donde los valores de K, muy localmente, pueden alcanzar los 5-10 m/día, lo que le otorga cierta heterogeneidad y anisotropía al acuífero (Bécher Quinodóz, 2014). Los sedimentos en el sector oriental más deprimido, limo-arcillosos o cementados, pueden presentar valores de K inferiores, del

orden de 0,001-0,5 m/d y porosidades efectivas muy bajas (< 2 %), (Bécher Quinodóz, 2014).

El acuífero libre se caracteriza por una dirección de escurrimiento general NO-SE, paralela a la traza del río Quinto (Fig. 2C). La superficie freática presenta morfología desde suavemente ondulada en el sector SE a casi planar en el sector centro. La traza de las líneas de flujo (Fig. 2C), indican que en su mayor parte el sector se comporta como un área de tránsito del flujo subterráneo procedente del sector occidental (provincia de San Luis), mientras que en el extremo sur los bajos topográficos actúan como zonas de descarga parcial (pantanos) del acuífero libre. Los gradientes hidráulicos calculados son muy bajos del orden de 0,1%, asociados con áreas más planas y bajos hidrohalomórficos y de 0,2% vinculado a los sistemas medanoso del sector SO. A partir de los gradientes y conductividades hidráulicas mencionadas para la zona, las velocidades reales de escurrimiento del agua subterránea son de 0,04-0,07 m/d (en ambiente más plano, sector centro) y 0,25-0,5 m/d (en arenas de los campos de dunas del sector SO y NO, respectivamente) (Bécher Quinodóz, 2014). Considerando la morfología en planta de la superficie freática (Fig. 2C) y los perfiles transversales de detalle realizados, se puede establecer que las relaciones acuífero libre – río Quinto son de influencia, efluencia e indiferencia según los tramos analizados y que las mismas presentan variaciones espacio – temporales, destacando en general una dominancia de aporte del acuífero hacia el río (Bécher Quinodóz et al. (2015).



**Figura 2.** A) Mapa de localización de perforaciones y perfil hidrogeológico. B) Perfil hidrogeológico A-A'. C) Mapa de equipotenciales del acuífero libre.

**Figure 2.** A) Location of wells and hydrogeological profiles. B) Hydrogeological profile A-A'. C) Equipotential map for the unconfined aquifer.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La descripción general del área de estudio (caracterización climática, geológica – hidrogeológica y geofísica mediante sondeos eléctricos verticales), se realizó a partir de la recopilación de antecedentes e integración de la información existente, en tanto que la información geomorfológica e hidrogeoquímica fue obtenida y procesada para este trabajo. La investigación se llevó a cabo a escala regional sobre la base de 4 Hojas topográficas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) a escala 1:100.000 y de imágenes satelitales (Google Earth, LANDSAT ETM<sup>+</sup>). El estudio geomorfológico se llevó a cabo a través de la descripción e interpretación del relieve, perfiles litológicos aflorantes y procedentes de perforaciones, efectuándose en ambos casos la recolección de muestras de sedimentos para posterior análisis textural (tamices ASTM, escala Udden - Wendworth), obteniéndose los histogramas con los porcentajes de las distintas fracciones granulométricas. Algunas muestras fueron seleccionadas para el análisis mineralógico de las fracciones retenidas en el tamiz 270 (53-63  $\mu$ ). Luego fueron preparadas y enviadas al Laboratorio de Petrotomía, donde se las preparó en un montaje de grano suelto para las determinaciones correspondientes por parte de personal del área de Mineralogía (Departamento de Geología, UNRC).

Para el análisis hidrogeológico se estableció en gabinete una red preliminar para el inventario de pozos, con una densidad adecuada a la zona y a la escala de trabajo seleccionada. Se trabajó a escala 1:100.000, realizándose finalmente un censo de perforaciones con una densidad de muestreo aproximada de un pozo cada 70 km<sup>2</sup> para el acuífero libre, quedando la red censada conformada por 55 pozos, que captan de los primeros 20 metros del acuífero. En la toma de muestras de agua subterránea en cada perforación, se garantizó la renovación del agua de la captación dejando fluir un mínimo de 3 volúmenes de pozo (Vázquez-Suñé, 2009), controlando además la temperatura del agua hasta su estabilización. Luego, el recipiente de muestreo fue enjuagado 2 veces con el agua de la perforación y llenado por completo. Se midieron in situ pH, temperatura y conductividad eléctrica (CE), con sonda multiparamétrica Hanna (HI 98127). Los análisis físico-químicos de las muestras, siguiendo Standard Methods (APHA-AWWA-WEF, 2005), fueron realizados en el Laboratorio de Geoquímica del Departamento de Geología (UNRC). Se corroboraron los datos obtenidos en el campo respecto a CE y pH (con electrodo Orion), y se midieron: carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) y bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), mediante titulación potenciométrica con electrodo selectivo Orion - Thermo; sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) por turbidimetría (con centrífuga Macrotronic); cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) mediante titulación colorimétrica con nitrato de plata, calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ) por titulación colorimétrica con EDTA; sodio ( $\text{Na}^+$ ) y potasio ( $\text{K}^+$ ) por fotometría de llama (fotómetro digital Metrolab 315). Los análisis físico-químicos de las muestras presentan un error inferior al 10%. Finalmente, se efectuó el análisis de la información hidrogeoquímica obtenida durante las etapas de campo y laboratorio para el acuífero libre.

Las muestras fueron clasificadas geoquímicamente en función de los iones dominantes (Custodio, 1993), elaborándose mapas de distribución areal de CE e hidroquímicos de interés (diagramas de Stiff). La información resultante de los antecedentes hidrogeológicos y los obtenidos en la caracterización hidrogeoquímica, permitió elaborar el modelo hidrogeológico conceptual. Para validar dicho modelo se aplicó la técnica multivariada de análisis de conglomerados (en Modo Q) mediante el programa computacional SSPS (IBM Statistics 21.0) y modelación numérica geoquímica a través del programa computacional PHREEQC 2.17 (Parkhurst y Apello, 1999), por ser este una buena herramienta para hacer las primeras aproximaciones de balance de masas. El programa ha sido diseñado para el cálculo de la distribución de especies químicas a partir de: a) disolución de minerales b) procesos de mezcla entre aguas de diferente composición c) cambios en la temperatura d) procesos de evaporación y e) cambios en las condiciones redox. En las modelaciones realizadas se consideraron como variables químicas (constraints) a los iones mayoritarios  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , mientras que las fases contempladas, seleccionadas en función de la mineralogía descrita para los sedimentos son: calcita (para representar la gran cantidad de carbonatos identificados, dispersos, en nódulos y en capas), halita y yeso (si bien pueden estar presentes en pequeñas cantidades, sobre todo como aportes en áreas de hidrohalmorfismo que producen voladuras de sales que luego en periodos lluviosos pueden ser incorporadas al acuífero se usan también como artilugios para explicar la entrada de cloruros y sulfatos atmosféricos), silicatos (albita, illita, feldespato potásico y biotita), fases de intercambio ( $\text{CaX}$ ,  $\text{NaX}$ ,  $\text{KX}$ ,  $\text{MgX}$ ), y  $\text{CO}_2(\text{g})$  disuelto en el agua y responsable principal de la agresividad del agua (fase considerada por tratarse el sistema analizado de un acuífero libre y por lo tanto abierto al intercambio con  $\text{CO}_2(\text{g})$  con la atmósfera, aunque también deriva de actividades biológicas y de algunos procesos de contaminación).

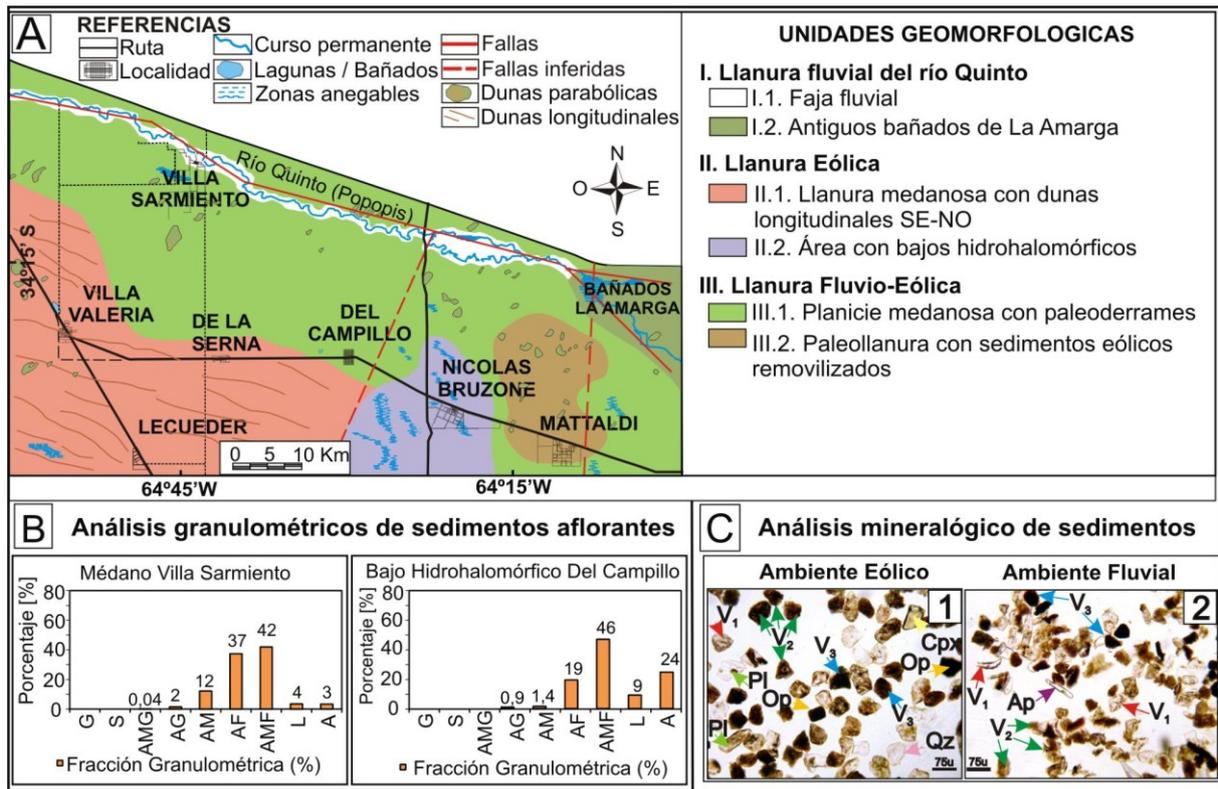
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización geomorfológica-litológica

Desde el punto de vista geomorfológico, el área presenta sólo relieves agradacionales del Pleistoceno superior - Holoceno, resultantes de la interacción/interdigitación y yuxtaposición del Mar de Arena Pampeano (Iriondo, 1999) con el sistema fluvial del río Quinto, el cual ha desarrollado un paleoabanico con ápices en diferentes posiciones. El paisaje constituye un verdadero palimpsest, reconociéndose tres grandes unidades geomorfológicas: I- Llanura Fluvial, II- Llanura Eólica y III- Llanura Fluvio-Eólica, en las que se han identificado subunidades para cada una de ellas (Fig. 3A). La Llanura fluvial del río Quinto (Unidad I), atraviesa la zona de estudio con dirección NO-SE, presentando un relieve moderadamente ondulado en el sector de cuenca media y en las áreas de derrames, a casi plano en la zona de bañados. En cuenca media-baja, dentro de la Faja Fluvial (Subunidad I.1), la faja fluvial tiene un ancho promedio de 1 km, alcanzando un máximo de 3 km al Este de Villa Sarmiento, donde presenta varios niveles de terrazas. En los Antiguos Bañados de la Amarga (Subunidad I.2), se reconocen paleocanales y paleoderrames y algunas lagunas permanentes y temporarias. Sin embargo, en la actualidad, constituye un área fundamentalmente de tránsito donde el curso ha profundizado (6 - 7 m) y exhibe una serie de saltos y ollas de erosión retrocedente, con procesos de erosión lateral e incisión vertical activos. Por consiguiente se ha trasladado el área de derrames/descarga hacia zonas sudorientales. La Llanura Eólica (Unidad II), caracterizada por un relieve plano a suavemente ondulado, presenta en el ángulo SO, dunas longitudinales de orientación NO-SE (pendientes inferiores al 2 %), con médanos resultantes de reactivaciones modernas (orientación NE-SO), coincidentes con la dirección de los vientos actuales (Subunidad II.1.). Esta planicie suavemente ondulada (desniveles locales entre 2-3 m), con pendientes inferiores al 2 %, presenta depresiones asociadas con antiguos corredores de deflación interdunas (espaciados 1,5 a 2 km), pero en algunos sectores se hacen imperceptibles y se observan extensas áreas planas como resultado de disipación de las geoformas. Los corredores muestran la acción de reiterados ciclos de deflación que generan depresiones elongadas, alojan bañados y lagunas encadenadas, permanentes y temporarias, que se hacen más notorias hacia el Este (Subunidad II.2.). Estas áreas deprimidas se caracterizan a su vez por presentar rasgos hidrohalmórficos. Los bordes de los cuerpos lagunares aparecen retrabajados por erosión eólica incipiente, durante los períodos más secos. El afloramiento del nivel freático en ciertas épocas y la posterior evaporación en períodos más secos, generan eflorescencias salinas sulfatadas –cloruradas (Bécher Quinodóz, 2014). La Llanura Fluvio-Eólica (Unidad III) está constituida por paleoabanicos aluviales del río Quinto, generados en los distintos estadios climáticos del cuaternario superior, y por geoformas erosivas y de acumulación asociadas a la actividad eólica. Los sedimentos eólicos pertenecen a la Fm. Laguna Oscura (Cantú, 1992) y a removilizaciones más modernas. En los paleocanales discontinuos y en corredores y cubetas de deflación, se sitúan cuerpos lagunares pequeños alimentados por aporte freático. El río Quinto ha desarrollado en la llanura arenosa del sur un paleoabanico aluvial que cubre una superficie aproximada de 4.000 km<sup>2</sup>. Se destacan dos ápices principales, uno de ellos a 8-10 km aguas abajo de Villa Sarmiento (Subunidad III.1.), previo al ingreso a los ambientes más deprimidos centro orientales (Carignano et al. 2014). Hacia el sudeste se reconocen médanos resultantes de reactivaciones modernas (norte de Mattaldi) superpuestos e interdigitados con los paleoabanicos (Subunidad III.2.).

En todas las unidades dominan sedimentos psamo - pelíticos con variable grado de cementación carbonática, reconociéndose en el ambiente fluvial, arenas muy gruesas y localmente gravas, en el ambiente fluvio-eólico aparecen subordinadamente arenas gruesas a muy gruesas, mientras que en el ambiente eólico se destaca la fracción arenas muy finas – limosas, con un aumento del porcentaje limo-arcilla en las áreas deprimidas (bajos hidrohalmórficos). En los ambientes medanosos (Fig. 3B), la fracción dominante es la de las arenas muy finas en el orden del 65 % con un porcentaje elevado de arenas finas (25 %), mientras que la fracción limo – arcilla no supera el 9 %. En el sector de bajos topográficos y bañados (Fig. 3B), se observa un alto porcentaje de la fracción limo – arcilla (34 %) aunque la fracción arenas muy finas continúa siendo la dominante (45 % a un 55 %).

Los estudios mineralógicos realizados en las 4 muestras seleccionadas de perforaciones y sedimentos aflorantes, permitieron identificar, para todas las muestras analizadas, la dominancia de vidrio volcánico y minerales como cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, biotita, anfíboles y piroxenos (Fig. 3C).



**Figura 3.** A)- Mapa geomorfológico. B) Descripción granulométrica de muestras de sedimentos aflorantes. C) Mineralogía de la fracción retenida en el tamiz 270 (53 – 63  $\mu$ ). 1) Muestra seleccionada del ambiente eólico. Nicols paralelos. 2) Muestra seleccionada del ambiente fluvial. Nicols paralelos. Nomenclatura: **V1** = Vidrio tipo 1. **V2** = Vidrio tipo 2. **V3** = Vidrio tipo 3. **Qz** = cuarzo. **PI** = Plagioclasa. **Hn** = Hornblenda **Cpx** = Clinopiroxeno. **Op** = opacos.

**Figure 3.** A)- Geomorphological map. B) Granulometry of selected sediment samples. C) Mineralogy of 270 - mesh fraction (53 - 63  $\mu$ ). 1) aeolian environment sample. Parallel nicols. 2) fluvial environment sample. Parallel nicols. Classification: **V1**: 1 Glass type. **V2**: 2 Glass type. **V3**: 3 Glass type. **QZ** = Quartz. **PI** = Plagioclase. **Hn** = Hornblende. **Cpx** = Clinopyroxene. **Op** = opaque.

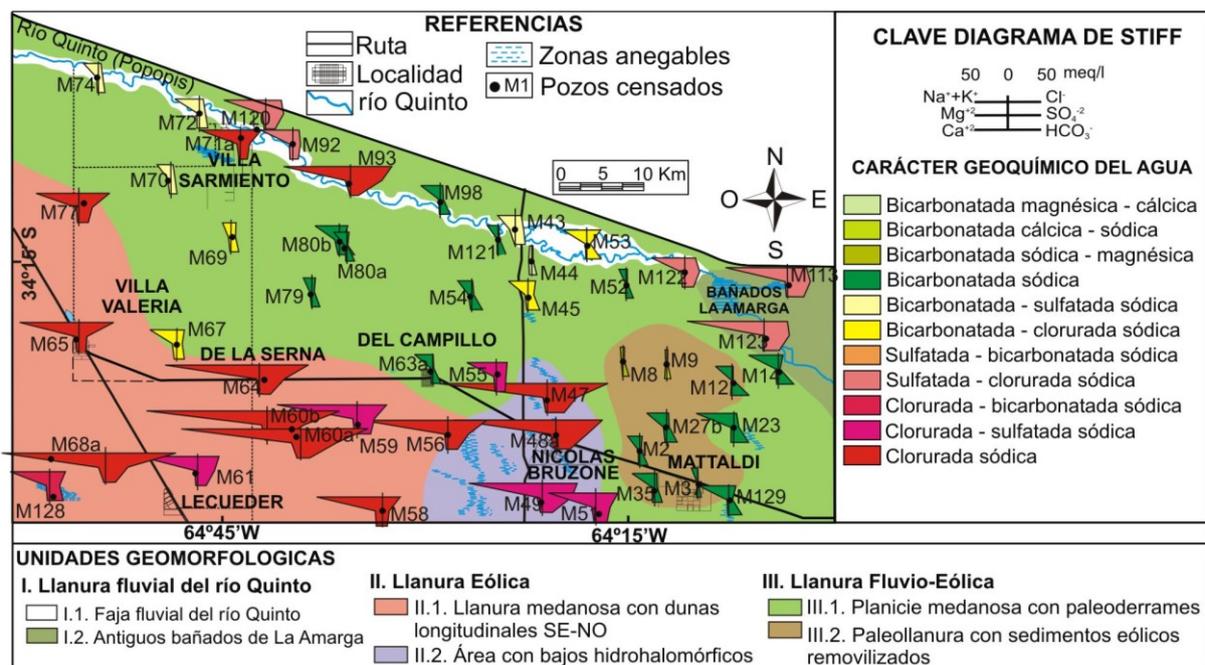
### Caracterización hidrogeoquímica

La calidad del agua puede en una primera instancia caracterizarse a partir de la conductividad eléctrica, la cual está directamente relacionada con la salinidad del agua. El estudio estadístico univariado de las 50 muestras de agua subterránea (Tabla 1) determinó que la conductividad eléctrica presenta una media de 4.825  $\mu$ S/cm, con mínimo de 700  $\mu$ S/cm, máximo de 14.530  $\mu$ S/cm y desviación estándar de 3615 (Tabla 1), lo que muestra una gran variabilidad en los valores de la variable analizada.

Los cambios en la composición química del agua subterránea y los resultados del relevamiento geológico, permiten deducir una asociación con los ambientes geomorfológicos (Fig. 4). En el caso del ambiente fluvial los valores de salinidad se encuentran entre 0,7 y 6,5 g/L, los más bajos vinculados a la faja fluvial del río Quinto (I.1) y los más elevados asociados al sector de los antiguos Bañados de la Amarga (I.2). En el ambiente fluvio-eólico los valores de salinidad resultaron entre 0,49 y 2,6 g/L, las más dulces vinculadas con médanos activos localizados en el sector SO, con paleoderrames al Sur del río Quinto y con paleocauces al sur de Villa Sarmiento, mientras que las de tipo salobres corresponden a sectores más deprimidos dentro de esta unidad geomorfológica. En el ambiente eólico (IIa- Llanura medanosa con dunas longitudinales y IIb- Área con bajos hidrohalomórficos), el agua alcanza valores de salinidad de 2 hasta 10 g/L (salobres-saladas). Las mayores concentraciones se asocian, en general, a perforaciones más profundas (15 - 45 metros), mostrando salinización en profundidad. La distribución espacial del tipo geoquímico del agua en la zona de estudio (Fig. 4) resultó variada, con aguas del tipo bicarbonatadas magnésicas – cálcicas hasta cloruradas sódicas, muchas de ellas de carácter aniónico mixto.

Parámetros	Número muestras	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.	Varianza
ph	50	1.6	7.3	9.0	8.2	0.3	0.1
CE	50	13,830.0	700.0	14,530.0	4,825.0	3,615.0	13,069,194.0
SDT	50	9,681.0	490.0	10,171.0	3,377.0	2,530.0	6,403,892.0
CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	50	61.6	0.0	60.6	6.7	12.8	164.0
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	50	1,212.5	287.5	1,500.0	877.9	286.8	82,284.0
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	50	2,559.9	15.7	2,575.6	708.3	710.7	505,166.0
Cl <sup>-</sup>	50	3,754.3	17.1	3,771.4	856.8	1,017.2	1,034,723.0
Na <sup>+2</sup>	50	4,495.5	54.6	4,550.1	1,288.8	1,126.1	1,268,277.0
K <sup>+</sup>	50	199.1	4.0	203.1	31.5	31.9	1,023.0
Ca <sup>+2</sup>	50	109.6	2.4	112.0	37.2	26.2	686.0
Mg <sup>+2</sup>	50	160.0	3.9	163.9	50.9	38.3	1,467.0

**Tabla 1.** Estadísticos descriptivos de las 50 muestras de agua subterránea del acuífero libre.  
**Table 1.** Descriptive statistics of the 50 groundwater samples unconfined aquifer.



**Figura 4.** Mapa Hidrogeoquímico (acuífero libre).  
**Figure 4.** Hydrogeochemical map (unconfined aquifer).

Las aguas dulces bicarbonatadas corresponden a muestras extraídas de perforaciones ubicadas cercanas a médanos activos y/o lomas topográficas. Las aguas salobres y saladas, sulfatadas y cloruradas, se corresponden con perforaciones ubicadas en áreas más planas, donde dominan menores velocidades del agua (0,06 m/día) y dado los sedimentos más finos, se intensifican los procesos de incorporación de iones al agua. Estos tipos geoquímicos se encuentran también en áreas deprimidas, donde se suman procesos de concentración de sales por evaporación y evapotranspiración.

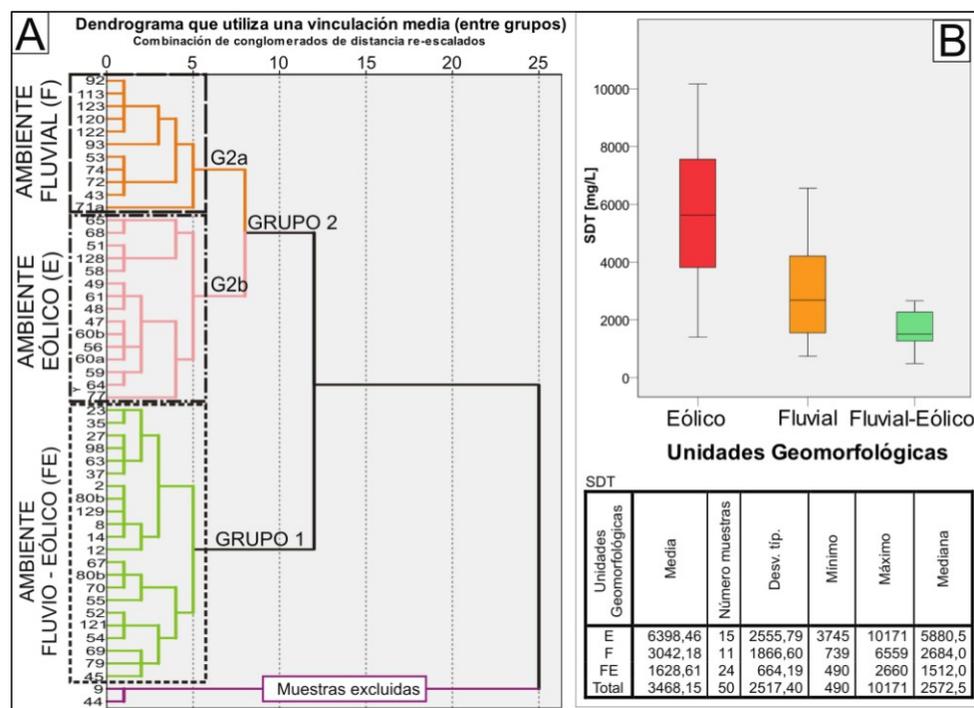
## Análisis estadísticos multivariado

Para validar el modelo conceptual se realizó el análisis de agrupamiento (cluster), de manera tal que permita establecer cuáles son las asociaciones entre la composición química del agua y las unidades geomorfológicas descriptas (Modo Q).

El análisis en Modo Q, es decir entre observaciones, permitió generar el dendrograma (Fig. 5A) donde se observa la presencia de dos grandes grupos, además de la exclusión de 2 muestras, que se caracterizan por presentar bajos valores de salinidad y de tipo geoquímico bicarbonatadas cálcicas – magnésicas, composición que se corresponde con aguas de recarga muy reciente, asociadas a perforaciones localizadas en cuerpos medanosos activos, dentro de la unidad geomorfológica llanura fluvio-eólica. En lo referente a los dos grupos principales, el grupo G<sub>1</sub> se caracteriza por asociar 22 muestras que se localizan en el ambiente fluvio-eólico, con aguas dulces y en menor medida salobres (SDT < 2.600 mg/L) del tipo bicarbonatadas sódicas. El grupo G<sub>2</sub>, está conformado por los subgrupos 2<sup>a</sup> y 2<sup>b</sup> pertenecientes a los ambientes fluvial y eólico, respectivamente. El subgrupo G<sub>2<sup>a</sup></sub> (ambiente fluvial) presenta aguas dulces a saladas, con valores de salinidad que no superan los 6,5 g/L (Fig. 5A) y tipo geoquímico mixto con el anión sulfato como dominante en general, mientras que el subgrupo G<sub>2<sup>b</sup></sub> (ambiente eólico) asocia las aguas saladas con valores que alcanza los 10 g/L y tipo geoquímico cloruradas sódicas.

Los resultados obtenidos a través del diagrama box-plot (Fig. 5B), indican claramente que en el ambiente fluvio-eólico se encuentran las aguas más dulces, en el ambiente eólico las aguas con mayor contenido salino y en el ambiente fluvial, la composición del agua resultó ser más variada con contenidos salinos intermedios.

Las aguas salobres y saladas, sulfatadas y cloruradas sódicas, localizadas en el ambiente eólico, se presentan más evolucionadas y por lo tanto se consideran resultantes de un largo tránsito de flujos regionales, procedentes del sector occidental, fuera del área de estudio. En el caso de las aguas dulces bicarbonatadas, además de localizarse en el ambiente fluvio-eólico, se vinculan principalmente a médanos activos o lomas donde se desarrollan sistemas de flujos locales, que son el resultado de recarga reciente a partir de precipitaciones. Estas dos situaciones generales (aguas salobres-saladas y dulces) son validadas mediante modelación numérica de tipo inversa (o de balance), de manera de poder predecir las reacciones químicas que tienen lugar en el medio y que condujeron a la evolución observada desde una solución inicial a una final en el sentido del flujo del agua subterránea.



**Figura 5. A)** Diagrama Cluster en Modo Q (entre observaciones). **B)** Diagrama de caja, relación entre sales disueltas totales (SDT) y unidades geomorfológicas.

**Figure 5. A)** Cluster in Q mode (observation sites). **B)** Boxplot for the relationship between total dissolved salts (TDS) and geomorphological units.

## Modelación hidrogeoquímica del acuífero libre

Se partió del modelo hidrogeológico conceptual descrito anteriormente, intentando corroborar los procesos de ganancia y/o pérdida de los componentes mayoritarios del agua en el acuífero. Se seleccionaron los siguientes casos.

### Caso N° 1. Modelación geoquímica inversa a lo largo de una línea de flujo regional.

La hipótesis que se plantea es que el incremento en el contenido salino que presentan las muestras de agua subterránea del acuífero libre, ubicadas en el ambiente eólico, se debe a una evolución natural que experimenta el agua subterránea como resultado de un largo tránsito de flujos regionales, procedentes del sector occidental.

Para corroborar la hipótesis planteada se han seleccionado tres situaciones a modelar, considerando como solución inicial (SI) a la muestra M<sub>136</sub> (dulce y bicarbonatada sódica, en el sector pedemontano de la cuenca del río Quinto, San Luis) y como soluciones finales a las muestras M<sub>65</sub> (caso N°1A) M<sub>64</sub> (Caso N°1B) y M<sub>48</sub> (Caso N°1C), ubicados a lo largo de la línea de flujo regional dentro del área de estudio y que presentan a su vez un incremento en el contenido salino (M<sub>65</sub>: 5.880 mg/L, M<sub>64</sub>: 7.560 mg/L y M<sub>48</sub>: 8.470 mg/L), (Fig. 6, Tabla 2).



Figura 6. Mapa de ubicación de la línea de flujo regional y local modelada.

Figure 6. Modeled regional and local groundwater flow line.

N°	pH	Cond.	S.D.T.	CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>
Muestra		μS/cm	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
M <sub>136</sub> (SI)	8.06	700	490	0.0	300.0	92.5	42.9	99.1	7.3	28.8	30.7
M <sub>65</sub> (SF)	8.08	8400	5880	0.0	675.0	615.4	1828.6	1941.4	32.0	30.0	54.6
M <sub>64</sub> (SF)	8.10	10800	7560	0.0	925.0	1640.0	2471.4	3159.8	34.8	35.2	62.4
M <sub>48</sub> (SF)	8.11	12100	8470	0.0	1500.0	2053.8	3142.9	3791.7	86.2	40.0	79.0

Tabla 2. Análisis químico de las soluciones iniciales (SI) y final (SF), caso regional  
Table 2. Chemical analysis of the initial (IS) and final (FS) solutions, regional case

A través del programa PHREEQC, se han testado para las tres situaciones (1A: M<sub>136</sub>-M<sub>65</sub>; 1B: M<sub>136</sub>-M<sub>64</sub> y 1C: M<sub>136</sub>-M<sub>48</sub>) entre 30 y 55 modelos posibles, seleccionándose los que satisfacen las restricciones tenidas en cuenta para cada situación modelada (Tabla 3).

Modelos obtenidos	Fases contempladas [mmol/L]												
	Calcita	Halita	Yeso	CO <sub>2</sub> (g)	NaX	CaX <sub>2</sub>	MgX <sub>2</sub>	KX	Illita	Biotita	Feld.K	Albita	
Caso 1A M136-M65	Nº 2	4.0	55.3	6.1	4.9	11.0	-96.2	--	--	0.01	--	0.01	0.01
	Nº 12	4.5	55.3	6.6	4.4	19.6	-10.1	--	--	--	--	--	--
	Nº 29	4.4	55.3	6.1	4.6	17.2	-9.9	--	--	--	--	--	--
	Nº 30	2.3	54.5	5.4	2.5	15.0	-7.8	-35.4	--	--	--	--	--
Caso 1B M136-M64	Nº 16	4.6	75.4	17.8	9.5	--	-22.1	20.0	3.2	76.9	--	43.5	46.0
	Nº 29	3.2	60.4	15.8	2.1	46.0	-24.6	1.3	0.7	--	--	--	--
	Nº 33	4.4	74.3	16.9	4.4	42.9	-21.7	--	0.5	--	--	--	--
	Nº 35	0.1	72.4	15.4	--	37.3	-16.9	-1.8	0.2	--	--	--	--
Caso 1C M136-M48	Nº 11	4.2	69.9	21.4	3.6	52.3	-26.1	--	--	-0.7	0.4	0.4	--
	Nº 36	0.3	67.7	19.7	--	44.0	-22.0	--	--	-3.5	1.9	--	2.1
	Nº 54	0.3	67.7	19.7	--	44.0	-22.0	--	--	-3.5	1.9	--	2.1

**Tabla 3.** Resultado de la modelación numérica realizada con PHREEQC (Nº1).  
**Table 3.** Numerical modeling results using PHREEQC (Case Nº1).

Para las tres situaciones modeladas 1A: M<sub>136</sub>-M<sub>65</sub>; 1B: M<sub>136</sub>-M<sub>64</sub> y 1C: M<sub>136</sub>-M<sub>48</sub> (Fig. 6; Tabla 3), los modelos que mejor explican la posible evolución geoquímica del agua en la dirección del flujo regional, lo hacen fundamentalmente a través de la disolución de sales (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O y ClNa), produciendo el aumento notable de Na<sup>+</sup>, Ca<sup>+2</sup>, Cl<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> acorde con los índices de saturación obtenidos para yeso y halita (Tabla 4). Con respecto a calcita, el índice de saturación (Tabla 4) incrementa desde 0,54 en la muestra inicial (M<sub>136</sub>) hasta 1,05 en la muestra final mas distal (M<sub>48</sub>), por lo que en la dirección del flujo, tiene que haberse producido la disolución de la misma para que las soluciones alcancen el equilibrio. La incorporación de CO<sub>2</sub> (g), en la dirección del flujo (Tabla 4) desde M<sub>136</sub> (-2,53) a M<sub>48</sub> (-2,06), favorece en las tres situaciones la disolución de calcita y el aumento leve de pH ya que la reacción puede producir OH<sup>-</sup>. Los incrementos de Mg<sup>2+</sup> y K<sup>+</sup> en la solución final pueden asociarse a la hidrólisis de silicatos (feldespato potásico, biotita), que liberan estos iones al agua, por su parte el intercambio catiónico (+) libera Na<sup>+</sup> y Mg<sup>+2</sup>, a la vez que retiene Ca<sup>+2</sup> en las posiciones de intercambio.

Si bien todos los modelos presentados en la Tabla 3 son válidos y explican la posible evolución del agua a lo largo de la línea de flujo regional. Dado que la biotita es escasa en los materiales del acuífero y el feldespato potásico y albita, son menos meteorizables y la formación de illita en el acuífero libre no han sido demostrada, los modelos Nº 30 (Caso Nº 1A), Nº 29 (Caso Nº1B) y Nº 11 (Caso Nº 1C) mostrados en la Tabla 3, son los que mejor ajustan a las situaciones modeladas.

Fases contempladas		MUESTRAS MODELADAS			
		M136	M65	M64	M48
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	0.54	0.57	0.63	1.05
Yeso	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	-2.07	-1.55	-1.36	-1.13
Halita	NaCl	-6.96	-4.16	-3.86	-3.85
CO <sub>2</sub> (g)	CO <sub>2</sub>	-2.53	-2.46	-2.2	-2.06

**Tabla 4.** Índice de Saturación (IS) de las fases contempladas en las muestras modeladas.  
**Table 4.** Saturation Index (SI) for the phases considered in the modeled samples.

### Caso N° 2: Modelación geoquímica inversa a lo largo de una línea de flujo local.

La hipótesis que se plantea es que las aguas dulces bicarbonatadas, se vinculan principalmente a médanos activos o lomas topográficas, donde se desarrollan sistemas de flujos locales como resultado de recarga reciente a partir de precipitaciones.

Para corroborar la hipótesis planteada se han seleccionado dos situaciones a modelar. En el caso N° 2 A, el agua dulce de la perforación (M<sub>9</sub>), considerada como solución final (SF), localizada en los médanos activos, es el resultado de la recarga reciente y consecuente evolución de las precipitaciones (L<sub>11</sub>). En el caso N° 2 B, la muestra de agua de la perforación M<sub>12</sub> (SF) es resultado de la evolución geoquímica de la muestra de agua dulce (M<sub>9</sub>), ubicada aguas arriba y en la dirección de la línea de flujo local (Fig. 6, Tabla 5).

N°	pH	Cond.	S.D.T.	CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	CO <sub>3</sub> H <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	
												Muestra
Caso N° 2	Lluvia <sub>(SI)</sub>	6.5	35.0	25.0	0.0	3.8	13.7	5.7	3.4	0.2	4.8	2.4
	M <sub>9</sub> (SF)	7.5	700.0	490.0	0.0	342.5	31.5	31.4	54.6	13.9	68.0	27.3
	M <sub>12</sub> (SF)	8.0	1900.0	1330.0	0.0	950.0	78.9	51.4	533.9	35.8	11.2	14.1

**Tabla 5.** Análisis químico de las soluciones iniciales (SI) y final (SF), caso local.  
**Table 5.** Chemical analysis of the initial (IS) and final (FS) solutions, local case.

A través del programa PHREEQC, se han testeado para las dos situaciones (2A: L<sub>11</sub>-M<sub>9</sub> y 2B: M<sub>9</sub>-M<sub>12</sub>) entre 25 – 30 modelos posibles, seleccionándose los que satisfacen las restricciones tenidas en cuenta para cada situación modelada (Tabla 6).

Modelos obtenidos	Fases contempladas [mmol/L]												
	Calcita	Halita	Yeso	CO <sub>2</sub> (g)	NaX	CaX <sub>2</sub>	MgX <sub>2</sub>	KX	Illita	Biotita	Feld.K	Albita	
Caso 2A Lluvia –M9	N°2	3.3	0.7	0.2	3.7	0.9	-1.9	1.3	0.4	-1.0	--	0.6	0.6
	N°8	3.3	0.5	--	3.6	1.5	-1.9	0.9	0.3	--	--	--	--
	N°13	3.3	0.7	0.2	3.8	--	-1.9	1.7	0.4	--	--	1.4	1.5
	N°24	3.4	0.7	0.2	3.7	1.5	-2.0	1.0	0.4	--	--	--	--
Caso 2B M9-M12	N°13	6.9	0.6	0.5	6.8	16.9	-8.8	--	0.6	-2.2	--	1.2	1.3
	N°30	6.9	0.6	0.5	6.7	18.2	-8.9	-0.5	0.6	--	--	--	--

**Tabla 6.** Resultado de la modelación numérica realizada con PHREEQC (Caso N°2).  
**Table 6.** Numerical modeling results (PHREEQC) (Case N°2).

Para las dos situaciones modeladas 2A: LI<sub>1</sub>-M<sub>9</sub> y 2B: M<sub>9</sub>-M<sub>12</sub> (Fig. 6; Tabla 6), los modelos que mejor explican la posible evolución geoquímica del agua en la dirección del flujo local, lo hacen a través de: la disolución de sales (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O y NaCl). En el caso de M<sub>9</sub>, se produce el aumento notable de Na<sup>+</sup>, Ca<sup>+2</sup>, Cl<sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> acorde con los índices de saturación obtenidos para yeso y halita (Tabla 7). Con respecto a Calcita, el índice de saturación (Tabla 7) incrementa desde -3,47 en la muestra inicial (LI<sub>1</sub>) hasta 0,44 en la muestra final (M<sub>9</sub>), por lo que en la dirección del flujo, tiene que haberse producido la disolución de la misma para que las soluciones alcancen el equilibrio. En el caso 2B: M<sub>9</sub>-M<sub>12</sub> se produce la disolución de las sales mencionadas, pero disminuyen Ca<sup>+2</sup> y Mg<sup>+2</sup>, por lo que se asume que aunque hubiera escasa disolución de calcita de acuerdo a los IS (Tabla 7), Ca<sup>+2</sup> y también Mg<sup>+2</sup>, pasan a las posiciones de intercambio como lo muestra el modelo (Tabla 6). La incorporación de CO<sub>2</sub> (g), en la dirección del flujo (Tabla 7) desde LI<sub>1</sub> (-2,81) a M<sub>12</sub> (-1,80), favorece en las dos situaciones la disolución de calcita y el aumento leve de pH ya que la reacción puede producir OH<sup>-</sup>.

Fases contempladas		MUESTRAS MODELADAS		
		LLUVIA	M9	M12
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	-3.47	0.44	0.45
Yeso	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	-3.33	-2.27	-2.10
Halita	NaCl	-9.24	-7.35	-6.19
CO <sub>2</sub> (g)	CO <sub>2</sub>	-2.81	-1.90	-1.80

**Tabla 7.** Índice Saturación (IS) de las fases contempladas en las muestras modeladas.

**Table 7.** Saturation Index (SI) for the phases considered in the modeled samples

Si bien todos los modelos presentados en la Tabla 6 son válidos y explican la posible evolución del agua, teniendo en cuenta lo mencionado para feldespato, plagioclasa e illita y considerando que el flujo es local de recarga reciente, los modelos N° 24 (Caso N° 2A) y N° 30 (Caso N° 2B) mostrados en la Tabla 6 son los que mejor ajustan a las dos situaciones modeladas.

El resto de los modelos obtenidos para los dos casos modelados (N° 1 y N° 2), no se presentan, por no contemplar las restricciones establecidas o bien proponer procesos (disolución, precipitación, entre otros), que no se corresponden con los índices de saturación de las fases contempladas para las respectivas muestras modeladas.

Si bien se han modelado dos casos, local y regional, nuevos modelos numéricos podrían plantearse para explicar las diferentes situaciones encontradas en la región.

## CONCLUSIONES

El estudio hidrogeoquímico dio como resultado aguas con salinidad entre 0,4 g/L (dulces) a 10 g/L (saladas), con tipos geoquímicos desde bicarbonatadas hasta cloruradas sódicas muchas de ellas de carácter aniónico mixto, lo que resulta en una distribución espacial no homogénea condicionada por la geomorfología. Así, desde el punto de vista de la salinidad, las aguas más saladas se asocian al ambiente eólico y las más dulces al fluvio-eólico. Analizando todas las variables químicas en conjunto, el análisis estadístico multivariado de tipo cluster (Modo Q), permitió corroborar la estrecha relación que existe entre la calidad del agua subterránea y los ambientes geomorfológicos, a partir de los dos grandes grupos encontrados, donde G<sub>1</sub> asocia las muestras pertenecientes al ambiente fluvio-eólico y G<sub>2</sub> las correspondientes al fluvial (G<sub>2</sub><sup>a</sup>) y eólico (G<sub>2</sub><sup>b</sup>).

Por último, se concluye que las aguas salobres y saladas, sulfatadas y cloruradas, son más evolucionadas y se consideran resultantes de un largo tránsito de flujos regionales, procedentes del sector occidental, además condicionadas por los sedimentos finos dominantes y los bajos gradientes hidráulicos y velocidades del agua, lo que permite un largo tiempo de contacto agua – sedimento y, consecuentemente, procesos que favorecen la transferencia de iones a la solución. Por su parte, las aguas dulces bicarbonatadas se vinculan a médanos activos o lomas, donde se desarrollan sistemas de flujos locales que son el resultado del condicionamiento topográfico y la recarga reciente a partir de precipitaciones. La modelación numérica permitió validar el modelo hidrogeológico conceptual, para los dos casos propuestos. Los procesos geoquímicos (fundamentalmente disolución de sales e intercambio catiónico), permiten explicar la evolución geoquímica que experimente el agua a lo largo de la línea de flujo regional, desde el sector periserrano (aguas dulces y del tipo bicarbonatadas

sódicas) y hacia la zona de estudio (aguas saladas y cloruradas sódicas). A nivel local, las aguas subterráneas dulces bicarbonatadas sódicas de muy bajo contenido iónico, localizadas en sectores medanosos pueden ser explicadas a través de la evolución geoquímica del agua de lluvia que ingresa al acuífero, debido a la disolución de sales e intercambio catiónico. Estos mismos procesos actúan en el sentido de flujo para dar como resultado aguas también dulces pero con mayor contenido iónico, en cercanías de los médanos.

Los estudios básicos y la validación mediante estadística y la modelación numérica permitieron definir que en el sector bajo estudio las características geomorfológicas (formas, pendientes, tipo de sedimentos, etc.), participan del control de aspectos hidrodinámicos (gradientes y velocidad del agua) y consecuentemente influyen en forma notoria en las propiedades hidroquímicas del acuífero. Los resultados obtenidos indican además la necesidad de estudios locales posteriores, para evaluar las aptitudes de uso y reservas disponibles para diferentes actividades.

**Agradecimientos.** El trabajo de investigación fue subsidiado por FONCYT y MINCYT (PID 35/08 Prestamo BID) y SECYT-UNRC. Se agradece al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

## REFERENCIAS

- Álvarez, M.P., N.E. Weiler, M.A. Hernández, (2010). Linking geomorphology and hydrodynamics: a case study from Peninsula Valdés, Patagonia, Argentina. *Hydrogeology Journal*, 18 (2): 473-486.
- APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association), WPCF (Water pollution Control Federation), (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 21th edn. Washington.
- Bécher Quinodóz, F.N., (2014). Implicancias ambientales de las relaciones hidrodinámicas e hidroquímicas entre aguas superficiales y subterráneas en la planicie arenosa del Sur de Córdoba. Argentina. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto (inérita), 412 p. Río Cuarto, Córdoba.
- Bécher Quinodóz, F. y M. Blarasin, (2014). Arsénico y flúor en aguas subterráneas en la planicie sudoccidental de Córdoba. Un problema ambiental analizado desde la perspectiva hidrogeológica. *Revista Estudios Ambientales*, 2 (1): 1-23.
- Bécher Quinodóz, F. y M. Blarasin, (2015). Evaluación de relaciones acuífero libre - lagunas mediante modelación hidrogeoquímica e isotópica en la planicie medanosa del sur de Córdoba - Argentina. *Serie de Correlación Geológica*; Lugar: San Miguel de Tucumán, 31: 155 - 172.
- Bécher Quinodóz, F., M. Blarasin, G. Damilano, (2013). Evaluación de Relaciones Geomorfología - Calidad de Agua Subterránea con apoyo de Técnicas Estadísticas en la Planicie Sudoccidental de Córdoba, Argentina. Congreso; VIII Congreso Argentino de Hidrogeología - VI Seminario Hispano Latinoamericano.
- Bécher, F., M. Blarasin, J. Felizzia, M. Gallo, (2014). Aguas subterráneas - Serie técnica Keipüentum - 9. Zona rural Villa Valeria - Del Campillo.
- Bécher Quinodóz, F., M. Blarasin, H. Panarello, (2015). Modelado geoquímico e isotópico de las relaciones agua superficial-subterránea en la planicie arenosa del Sur de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 72 (4): 506 - 518.
- Blarasin, M., A. Cabrera, F. Bécher Quinodóz, J. Felizzia, J. Giuliano Albo, (2013). El Relieve y su Incidencia en el Hallazgo de Agua para Abastecimiento Humano en la Planicie Medanosa Sudoriental Cordobesa. En González, N., E.E. Kruse, M. Trovatto, P. Laurencena, (eds). *Agua Subterránea Recurso Estratégico*, EDULP, La Plata. Tomo I: 218-225.
- Blarasin M., A. Cabrera, E. Matteoda, (2014). Aguas subterráneas de la provincia de Córdoba. Edición UniRio. Ebook. Río Cuarto-Córdoba: 147.
- Cantú, M., (1992). Holoceno de la provincia de Córdoba. Manual: Holoceno de la República Argentina. Simposio Internacional sobre el Holoceno en América del Sur, Paraná. T (I): 24.
- Carignano, C., D. Kröhling, S. Degiovanni, M. Cioccale, (2014). Geomorfología de la provincia de Córdoba (Argentina). Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba. Ed.: 1ra., Chapter: Geomorfología, Publisher: Asociación Geológica Argentina (AGA), Eds: Martino R., A. Guerreschi: 747-822.
- Criado Roque, P., C. Mombrú, V. Ramos, (1981). Estructura e interpretación tectónica. 8º Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 155-192, San Luis.
- Custodio, E., (1993). Hidrogeoquímica e Isotopía ambiental. En *Temas Actuales de la Hidrología*

- Subterránea. Ed. Bocanegra y Rapaccini Mar del Plata: 61-78.
- Degiovanni, S., (2005). Geomorfología Regional. En "Aguas superficiales y subterráneas en el Sur de Córdoba: Perspectiva Geoambiental". Ed. UNRC, Río Cuarto: 19 - 29.
- Gates, J.B., J.K. Bohlke, W.M. Edmunds, (2008). Ecohydrological Factors Affecting Nitrate Concentrations in a Phreatic Desert Aquifer in Northwestern China. *Environmental Science and Technology*, 42(10): 3531-3537.
- Iriondo, M., (1999). Climatic changes in the South American plains: Records of a continent-scale oscillation. *Quaternary International*, Elsevier Sciences, 57-58: 93-112.
- Kostadinoff, J., D.A. Gregori, (2004). La Cuenca de Mercedes, provincia de San Luis. *Revista Asociación Geológica Argentina*, 59 (3): 488-494.
- Macklin, M., J. Lewin, (2008). Alluvial responses to the changing Earth system. *Journal of Earth surface processes and landforms*, 33: 1374-1395.
- Martínez, D. E., M. Osterrieth, (2013). Hydrogeochemistry and pollution effects of an aquifer in Quaternary loess like sediments in the landfilling area of Mar del Plata, Argentina. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (66): 9-23.
- Martínez, D.E., E.M. Bocanegra, M. Manzano, (2000). La modelación Hidrogeoquímica como herramienta en estudios Hidrogeológicos. *Boletín Geológico y Minero*, 111 (4): 83-98.
- Naik, P.K., B.N. Dehury, A.N. Tiwari, (2007). Groundwater pollution around an industrial area in the coastal stretch of Maharashtra State, India. *Environ Monit Assess*, 132: 207-233.
- Parkhurst, D.L., C.A.J. Appelo, (1999). User's Guide to PHREEQC (version 2). A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, 99-4259: 312.
- Ramaiah, S.N., G.S. Gopalakrishna, S. Srinivasa Vittala, K. Md. Najeeb, (2012). Geomorphological Mapping for Identification of Ground Water Potential Zones in Hard Rock Areas Using Geo-spatial Information – A Case Study in Malur Taluk, Kolar District, Karnataka, India. *Nature Environment and Pollution Technology an International Quarterly Scientific Journal*. 11(3): 369-376.
- Rani, V.R., H.S. Pandalai, K.S. Sajinkumar, A.P. Pradeepkumar, (2015). Geomorphology and its implication in urban groundwater environment: case study from Mumbai, India. *Appl Water Sci* 5:137-151.
- Sedhuraman, M., S.S. Revathy, S. Suresh Babu, (2014). Integration of Geology and Geomorphology for Groundwater Assessment using Remote Sensing and GIS Techniques. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(3): 71- 85.
- Sophocleous, M., (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, Springer, 10 (1) 52-67.
- Vázquez-Suñé, E., (2009). Hidrogeoquímica. En Escuder, R., Fraile, J., Jordana, S., Ribera, F., Sánchez-Vila, X. y E. Vázquez-Suñé. (Eds.). *Hidrogeología. Conceptos básicos de Hidrología Subterránea*: 426-471.

Recibido: Octubre, 2015

Aceptado: Noviembre, 2016