

# MODELADO GEOQUÍMICO E ISOTÓPICO DE LAS RELACIONES AGUA SUPERFICIAL-SUBTERRÁNEA EN LA PLANICIE ARENOSA DEL SUR DE CÓRDOBA

Fátima Noelia BÉCHER QUINODÓZ<sup>1,2</sup>, Mónica. T. BLARASIN<sup>2</sup> y Héctor O. PANARELLO<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). E-mail: fbecher@exa.unrc.edu.ar; mblarasin@exa.unrc.edu.ar

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Río Cuarto, Departamento de Geología, Río Cuarto.

<sup>3</sup> Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS), Ciudad de Buenos Aires.

## RESUMEN

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. El objetivo es realizar la caracterización dinámica y geoquímica (general e isotópica) del agua superficial y subterránea, para establecer el modelo de funcionamiento y sus interrelaciones. Se realiza además un modelado numérico para validar el modelo hidrogeológico conceptual. El río Quinto, con nacientes en las sierras de San Luis, desarrolla en el área de estudio su cuenca media-baja, registrando variaciones de caudal entre invierno-verano, velocidad promedio del agua de 0,8 m/s y tipo geoquímico sulfatado sódico. El acuífero libre estudiado presentó gradientes hidráulicos variables, baja velocidad del agua (0,2 m/d) y un patrón geoquímico complejo (aguas bicarbonatadas a sulfatadas-cloruradas sódicas). Considerando la conexión hidráulica demostrada entre ambos sistemas hidrológicos (río predominantemente efluente), se interpreta una preponderancia del agua superficial en verano, que diluye por dispersión hidrodinámica los solutos ingresados desde el acuífero, dadas las diferencias de velocidad del agua entre ambos sistemas hidrológicos. Los resultados isotópicos muestran que río y acuífero se alinean en una recta de evaporación con origen en la composición isotópica de cuenca alta, marcando procedencia. La baja pendiente de la recta indica además, procesos de mezcla río-acuífero. Así, en la provincia de Córdoba se observó en verano un dominio del agua superficial (72 %), incluyendo aporte desde embalses, mientras que en invierno, predomina el caudal de base (82 %). La cuenca muestra un típico caso de condicionamientos naturales y antrópicos, cuyo funcionamiento no reconoce fronteras políticas, indicando la utilidad de estudios interjurisdiccionales.

**Palabras clave:** *Acuífero libre, río Quinto, modelado geoquímico, isótopos estables*

## ABSTRACT

*Geochemical and isotopic modeling of groundwater-surface water relationships in the sand plain of the south of Cordoba province*

The sandy plain of the south of Cordoba is a palimpsest resulting from an Aeolian System (“Pampean Sand Sea”) and the Quinto River system’s juxtaposition. The aim of this work is to carry out the dynamic and geochemical characterization (general and isotopic) of surface water-groundwater relationships, validating with a numerical model. The Quinto River, with headwaters in the San Luis Mountains, develops its middle basin in the study area, registering flow variations between winter and summer. The average surface water velocity is 0.8 m/s and the geochemical type is sodium sulfate. The unconfined aquifer presented variable hydraulic gradients, low water velocity (0.2 m/d) and a complex geochemical pattern (sodium bicarbonate, sulfate or chloride types). Considering the hydraulic connection between the two hydrological systems (a predominantly gaining river) a dominance of surface water in summer is detected. Thus, surface water dilutes by hydrodynamic dispersion the salts supplied by the aquifer, due to differences in water velocity in both hydrological systems. Isotopes results show that the river and the aquifer lay on an evaporation line with origin in the upper basin water isotope composition, which indicates provenance. The low slope of the line indicates river-aquifer mixing processes. Thus, in Cordoba Province, it was observed the prevalence of surface water in summer (72 %), including contribution from dams, while the base flow is dominant in winter (82 %). This basin constitutes a paradigmatic case of natural and anthropogenic constraints, whose functioning does not recognize political boundaries, indicating the usefulness of inter-jurisdictional studies.

**Keywords:** *Unconfined aquifer, Quinto river, geochemical modeling, stable isotopes*

## INTRODUCCIÓN

Casi todas las aguas superficiales (ríos, lagos, embalses, humedales y estuarios) interactúan hidráulicamente con el agua subterránea (especialmente con acuíferos

libres). Estas interacciones toman numerosas formas, pueden ser naturales o modificadas por actividades humanas y presentar variaciones espacio-temporales (Caschetto *et al.* 2013, Bécher Quinodóz 2014, Bécher Quinodóz *et al.* 2013, Arau-

zo *et al.* 2006). En muchas situaciones los cuerpos de agua superficial obtienen agua y solutos de los sistemas de agua subterránea y en otros, los sistemas superficiales constituyen la fuente de recarga de acuíferos siendo por lo tanto responsables de

algunos de sus cambios en la composición química natural y en la cantidad de agua. Al sumar acciones humanas, la extracción de agua superficial puede generar variaciones del nivel freático en las intermedias o por el contrario, el bombeo del acuífero libre puede disminuir el agua disponible en arroyos, lagos o humedales (Blarasin *et al.* 2005, Manzano *et al.* 2009, Bécher Quinodóz 2014). Dependiendo de las relaciones entre los cuerpos de agua, la contaminación del agua superficial puede provocar una degradación de la calidad del agua del acuífero libre y por el contrario la contaminación del agua subterránea puede degradar la superficial (Navarro Mendoza *et al.* 2002, Bécher Quinodóz *et al.* 2013). Por lo tanto, para una gestión eficaz del recurso hídrico, en cualquier entorno hidrológico y de uso del territorio, se requiere de una clara comprensión de los vínculos físico- químicos entre el agua superficial y el agua subterránea.

El área de estudio del presente trabajo, localizada en el sector ubicado al norte y sur del río Quinto (2300 km<sup>2</sup>), en el ámbito de la planicie arenosa del sur de Córdoba (Fig. 1a), presenta desde fines del siglo XIX un importante desarrollo de las actividades agropecuarias. Desde 1950 la presión de uso del territorio fue creciendo notoriamente, debido al aumento de la mecanización y el empleo de agroquímicos. En las últimas décadas, se registran en la región procesos de concentración de tierras, aumento del tamaño de las parcelas de cultivos, desplazamiento de cereales por oleaginosas (soja y maíz) y despoblamiento rural (Blarasin *et al.* 2014). Simultáneamente con el propósito de sostener y expandir las áreas agrícolas, desde la década de 1950 se vienen llevando a cabo intervenciones directas en la red de drenaje y en humedales que incluyen canalizaciones y trasvases entre subcuencas. Además se hace un uso permanente de diferentes acuíferos, en particular el libre, para usos diversos, especialmente agropecuarios, con importantes consecuencias ambientales (potenciación de la recarga por riego y aumento de contaminación, derroche de agua desde perforaciones que captan de

capas acuíferas confinadas, permanentemente abiertas sin causas justificadas, etc.) (Blarasin *et al.* 2014, Giuliano Albo y Blarasin 2014, Blarasin *et al.* 2013, Giuliano Albo 2013). Específicamente en la planicie arenosa del Sur de Córdoba, los problemas ambientales vinculados a los sistemas hidrológicos subterráneos se relacionan a problemas de anegamiento por ascensos de nivel freático, composición química natural poco adecuada para algunos usos y contaminación. Entre los problemas ambientales derivados de los sistemas hidrológicos superficiales se resaltan la contaminación, las inundaciones de áreas deprimidas, la erosión lateral y profundización de los cursos de agua con afectación a la infraestructura vial. Como consecuencia de esto la calidad de vida puede verse afectada en distintos aspectos como salud, vivienda, trabajo, entre otros. Uno de los aspectos fundamentales a investigar es la posibilidad de contar con aguas de mejor calidad que las subterráneas, que poseen altos valores de salinidad, arsénico y flúor, para lo cual es necesario pensar en uso conjunto con aguas superficiales más dulces que atraviesan la zona y que proceden de cuencas altas, evaluando sus relaciones hidráulicas y de mezclas químicas con aguas locales. En este marco, se plantea como objetivo realizar la caracterización dinámica y geoquímica general e isotópica del agua superficial y subterránea, para establecer el modelo de funcionamiento y sus interrelaciones, como base para la planificación ambiental. Se realiza además un modelado numérico para validar el modelo hidrogeológico conceptual.

## METODOLOGÍA DE TRABAJO

Se realizó la recopilación y el análisis de antecedentes (bibliográficos, cartográficos, geológicos, geomorfológicos, de uso de la tierra, hidrológicos, etc.) del área a investigar, además de la integración de la información existente. Se decidió realizar la investigación a escala 1:150.000, partiendo de la base del análisis visual de imágenes satelitales (Google Earth) y hojas

topográficas disponibles pertenecientes al Instituto Geográfico Nacional (IGN): Villa Sarmiento (3366-36), Estancia La Madrugada (3563-1), Villa Valeria (3566-12) y Del Campillo (3563-7), a escala original 1:100.000 y Estación Laguna Oscura (3366-36-1) y Washington (3366-36-4) a escala 1:50.000.

Se efectuó la caracterización climática del área a través del tratamiento e interpretación de la información recolectada con énfasis en el tratamiento de precipitaciones, variable que constituye la función de entrada principal a los sistemas hidrológicos estudiados. Los datos de precipitación proceden de la estación La Perdiz con una serie temporal de 102 años (1911 - 2013). En lo que respecta al uso del territorio y su ocupación, se realizó el censo de actividades y uso de los recursos en la zona rural, registrándose aspectos vinculados principalmente a tipos y rotación de cultivos, agricultura intensiva, uso de agroquímicos, actividad ganadera, acumulación de residuos (microbasurales), usos del agua, etc., de manera de vincular estos tópicos con la composición química y dinámica del agua superficial y subterránea y así mejorar el modelo hidrogeoquímico conceptual. El estudio geológico-geomorfológico, se realizó a través de la descripción del relieve y perfiles litológicos aflorantes y procedentes de perforaciones. Para la elaboración del mapa geológico se tuvo en cuenta que algunos depósitos aflorantes no presentan una nominación formal, por lo que las unidades geológicas demarcadas tuvieron en cuenta características litológicas (estructura, granulometría y distribución espacial) asignándose nombre formacional sólo a las unidades reconocidas como tales (Cantú 1992).

Se seleccionaron muestras de depósitos aflorantes y de perforaciones para realizar análisis texturales (tamices ASTM, escala Udden - Wendworth), obteniéndose los histogramas con los porcentajes de las distintas fracciones granulométricas. El análisis y descripción mineralógica del área de estudio realizada por Bécher Quinodóz (2014) para la fracción retenida en el tamiz 270 (53-63  $\mu$ ) y fracción arcilla (<2  $\mu$ ), fue tenida en cuenta para disponer

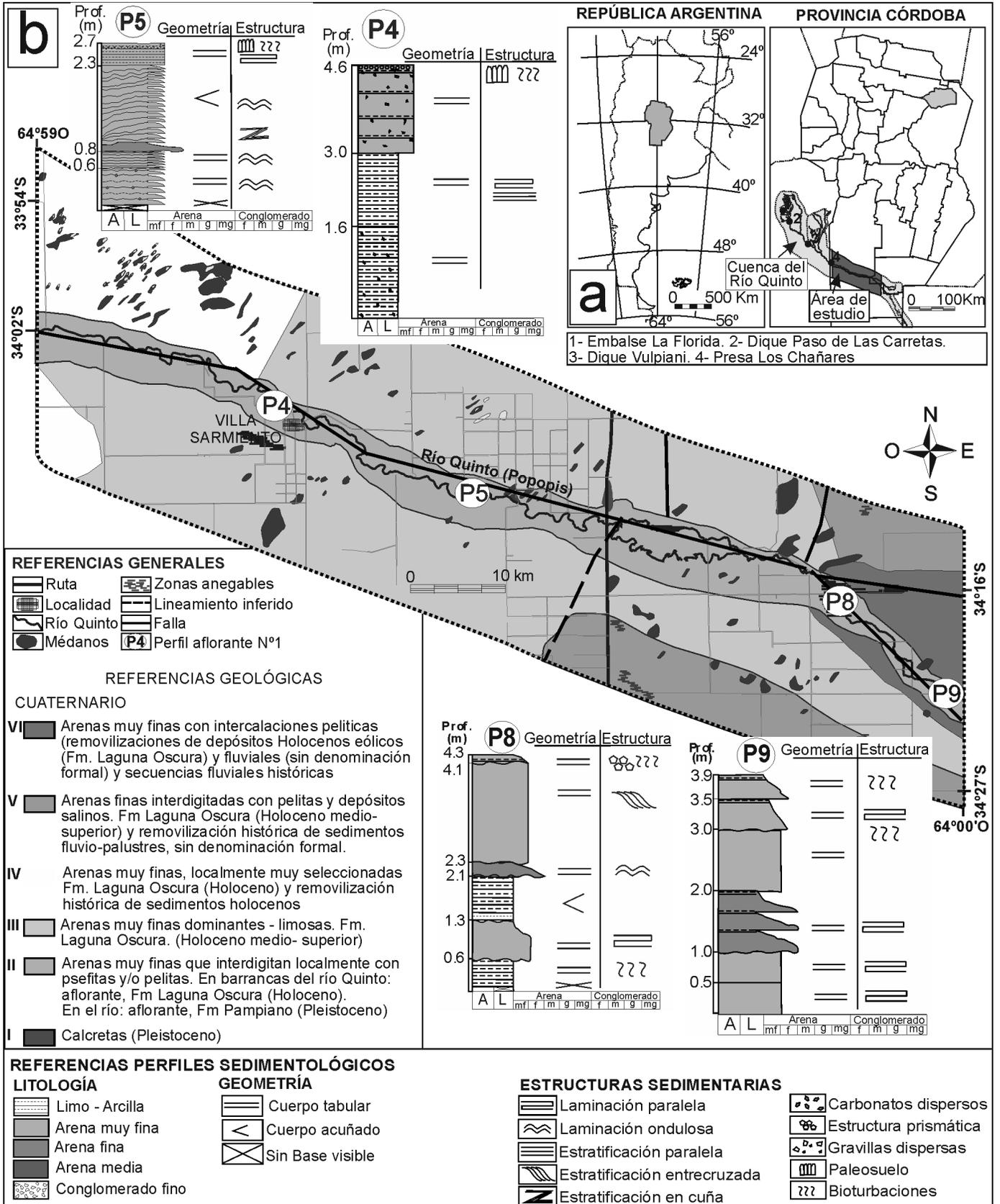


Figura 1: a) Mapa de ubicación del área de estudio; b) Mapa geológico de la cuenca media-baja del río Quinto y perfiles sedimentológicos relevados (modificado de Bécher Quinodóz 2014).

de las fases requeridas en el modelado numérico de la evolución hidroquímica del agua y posibles mezclas agua superficial - subterránea.

Para complementar la tarea de reconstrucción del subsuelo se realizó prospección geoelectrica mediante sondeos eléctricos verticales (SEV) según disposición Schlumberger (GEOMETER MPX-400 Ponti Electronics). Las curvas de resistencia aparente resultantes fueron procesadas con aplicación informática específica (IPI2Win -V 2.0) (Bobachev *et al.* 2000), comparándose los resultados con datos de perforaciones.

Respecto al 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 1:150.000, realizándose finalmente un censo de perforaciones con una densidad de muestreo aproximada de un pozo cada 75 km<sup>2</sup> para el acuífero libre, quedando la red censada conformada por 30 pozos, que captan de los primeros 20 metros del acuífero libre. El censo hidrogeológico consistió en el relevamiento de las perforaciones, recabándose información vinculada a litologías atravesadas, diseño de pozo (profundidad de captación, filtros, etc.) y diferentes aspectos hidráulicos. Además, se efectuó la medición de profundidad de nivel estático del acuífero libre, con una sonda piezométrica de señal lumínica y sonora (*Solinist*).

Para el análisis hidrodinámico del acuífero libre se elaboraron e interpretaron el mapa de equipotenciales hidráulicos y profundidad del nivel freático. El primero se usó como base para definir divisorias de agua subterránea, áreas de recarga y descarga del acuífero y para calcular gradientes hidráulicos. Teniendo en cuenta aspectos granulométricos del acuífero, se estimaron velocidades de flujo de agua subterránea. Con ambos mapas y la base topográfica se analizaron las relaciones hidráulicas entre los sistemas hidrológicos río Quinto - acuífero libre. En la toma de muestras de agua subterránea en cada perforación, se garantizó la renovación del agua de la captación dejan-

do fluir un mínimo de tres volúmenes de pozo (Vázquez-Suñé 2009), controlando además la temperatura, pH y conductividad del agua hasta su estabilización. Luego, el recipiente de muestreo fue enjuagado dos veces con el agua de la perforación y llenado por completo. Para el estudio hidrológico superficial se tuvo en cuenta la divisoria de agua superficial del río Quinto, la cual delimita una faja angosta que acompaña al curso colector, donde se aforaron y muestrearon 3 secciones (entrada a la provincia de Córdoba "A11", centro "A13" y salida del área de estudio "A15"), en dos estaciones del año (verano/invierno). Las muestras de agua del río se colectaron en el medio de la corriente y en proximidad del lecho, reduciendo así efectos de orilla, remolinos, etc. En ambos sistemas hidrológicos, se midieron in situ pH y temperatura con un medidor Hanna HI 98127, conductividad eléctrica (CE) con conductímetro Hanna HI 9033 y oxígeno disuelto con oxímetro YSI model 95. 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 de la Universidad Nacional de Río Cuarto. Se corroboraron los datos obtenidos en el campo respecto a CE y pH (con electrodo Orion), y se midieron: carbonatos (CO<sub>3</sub><sup>-2</sup>) y bicarbonatos (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), mediante titulación potenciométrica con electrodo selectivo Orion - Thermo; sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>) por turbidimetría (con centrifuga Macrotronic); cloruros (Cl<sup>-</sup>) mediante titulación colorimétrica con nitrato de plata, calcio (Ca<sup>2+</sup>) y magnesio (Mg<sup>2+</sup>) por titulación colorimétrica con EDTA; sodio (Na<sup>+</sup>) y potasio (K<sup>+</sup>) por fotometría de llama (fotómetro digital Metrolab 315), fluoruro (F<sup>-</sup>) y nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) con electrodo de ion selectivo (Orion - Thermo). Arsénico (As) fue determinado con ICPMS (Plasma inducido acoplado a espectrometría de masas) en el laboratorio ISIDSA de la Universidad Nacional de Córdoba. Posteriormente, con todos los datos obtenidos en laboratorio, se realizaron los cálculos para obtener las concentraciones de aniones, cationes (mayoritarios y minori-

tarios) y trazas en meq/l y mg/l, con un cierre del balance iónico aceptable cuando fue menor al 10%. Las determinaciones isotópicas, <sup>18</sup>O y <sup>2</sup>H, se realizaron en los laboratorios de Isótopos Estables y de Tritio del Instituto de Geocronología y Geología Isotópica, que cuenta con un sistema de gestión de calidad bajo normas ISO/IEC 17025 y cuyas técnicas son: 1) espectrometría de masas de relaciones isotópicas (IRMS) y 2) espectroscopia láser *Off-Axis Integrated Cavity Output Spectroscopy* (OA-ICOS). Los resultados se expresan como δ, definido como:  $\delta = 1000 (R_s - R_p) / R_p \text{ ‰}$ , donde: desviación isotópica en ‰; s: muestra; p: referencia internacional; R: relación isotópica (<sup>2</sup>H/<sup>1</sup>H, <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O). La referencia utilizada es *Vien-na Standard Mean Ocean Water* (V-SMOW) (Craig 1961, Gonfiantini 1986). Las incertidumbres son  $\pm 0,2 \text{ ‰}$  (IRMS) y  $\pm 0,3 \text{ ‰}$  (espectrometría láser) para  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\pm 1,0 \text{ ‰}$  para  $\delta^2\text{H}$  (IRMS y espectrometría láser) (Gat y Gonfiantini 1981).

La información resultante fue procesada obteniéndose los mapas hidroquímicos (diagramas de Stiff) que, junto a los restantes datos, permitieron elaborar el modelo hidrogeológico conceptual. El modelo hidrogeoquímico de las relaciones aguas superficial - subterránea, vinculados a procesos de mezcla en los diferentes sistemas analizados, fue corroborado mediante: 1) la construcción de una línea de mezcla, que resulta de correlaciones lineales entre los datos químicos, físicos e isotópicos obtenidos de varios puntos de muestreo próximos (Mazor *et al.* 1993). Para la construcción de la línea de mezcla se seleccionó el cloruro como elemento conservativo en este sistema, dado que no es previsible que intervenga en ninguna reacción de transferencia de masa, siendo además su concentración la de mayor rango de variación entre las muestras analizadas. Se tomaron como polos de la recta las dos muestras que presentan valores extremos (más alto y más bajo). Luego se calculó la fracción porcentual de participación de cada una de estas muestras extremas en la mezcla. 2) El modelado geoquímico de tipo inverso utilizando el programa computacional PHREEQC (Parkhurst y Ap-

pelo 1999) basado en balance de masas. La simulación seleccionada permitió establecer, a partir de una solución inicial y otra final, vinculadas hidráulicamente, las posibles reacciones químicas que tuvieron lugar en el medio y que condujeron a la evolución química observada, asumiendo flujo de tipo pistón. El programa seleccionado permite hacer las primeras aproximaciones de balances de masas y 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 los modelos realizados se consideraron como variables químicas 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 la selección de las fases fue realizada en función de la mineralogía descrita para la zona de estudio según Bécher Quinodóz (2014).

## 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 739 mm, concentrada principalmente en primavera - verano. La serie de precipitaciones anuales (P) analizada exhibe un mínimo de 119 mm y un máximo de 1331 mm. El balance hídrico edáfico seriado, de paso mensual, muestra que entre 58,5 y 100 % de P es devuelto a la atmósfera como evapotranspiración real (Bécher Quinodóz 2014). Los déficits se producen fundamentalmente en los meses de otoño - invierno y los excesos, que aportarán al escurrimiento superficial y/o a la recarga efectiva del acuífero, resultaron variables entre 0 y 204 mm, alojándose principalmente en primavera - verano, muy condicionados por el comportamiento de las precipitaciones. La tendencia de los excesos hídricos es creciente, fundamentalmente a partir de 1972, destacándose el período 1998-2004, por presentar los excesos más importantes de la serie (1673 mm de exce-

sos y 277 mm de déficit). A partir de 2004 y hasta 2013, los déficits hídricos se han incrementado (1130 mm de déficit y 501 mm de excesos).

### Caracterización geológica-geomorfológica

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. Posee control estructural que puede asociarse a la tectónica de bloques de la región, cuya conformación actual se relaciona a la orogenia ándica, destacándose el sistemas de estructuras NNO-SSE representado por el lineamiento río Quinto (Criado Roque *et al.* 1981, Kostadinoff y Gregori 2004), que controla la traza actual del río (Fig. 1b).

En el área de estudio no aflora basamento cristalino, correspondiendo los materiales a sedimentos cuaternarios (Fig. 1b). La mayoría de los depósitos aflorantes pertenecen a la Formación Laguna Oscura (Holoceno superior, Cantú 1992). También afloran depósitos históricos (últimos siglos), representados por materiales de origen eólico, aluvial y palustres. En general, representan ciclos de agradación controlados por eventos neotectónicos y fundamentalmente por oscilaciones climáticas (Degiovanni 2008). En la última centuria se agregaron importantes intervenciones antrópicas (canalizaciones, deforestación, entre otros), que modifican la dinámica natural de los ambientes de sedimentación. Los estudios mineralógicos para la fracción (53-63  $\mu$ ) indican la dominancia de vidrio volcánico y minerales como cuarzo, plagioclasa, feldespato potásico, biotita, anfíboles y piroxenos, mientras que para la fracción arcilla (< 2  $\mu$ ), destacan illita e illita-esmectita (Bécher Quinodóz y Blarasin 2014a).

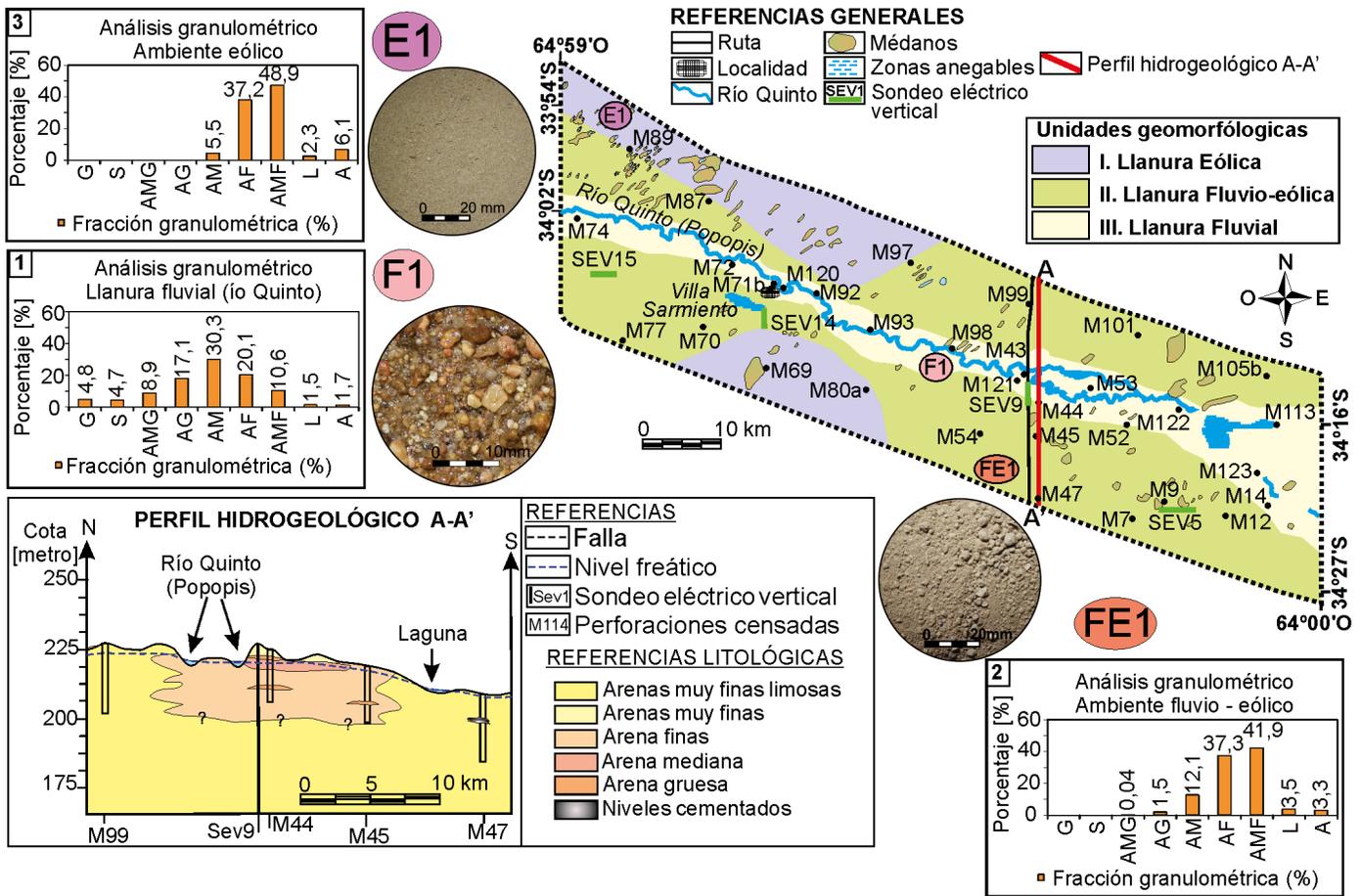
La zona está caracterizada por un relieve plano a suavemente ondulado, con viejas dunas longitudinales de orientación NO-SE, que fueron retrabajadas durante el clima actual por vientos del NE, generándose un paisaje de dunas parabólicas

(orientación NE-SO) cuyo cuerpo principal fue remobilizado por vientos secundarios, formando cadenas barjanoides en el cuerpo de las dunas. En la cubeta principal de las dunas parabólicas se instalan lagunas temporarias y/o permanentes de variado tamaño. En las áreas deprimidas se observan eflorescencias salinas sulfatadas -cloruradas (Bécher Quinodóz 2014). En algunos sectores se observan además paleocanales y antiguos derrames del río Quinto, los que interdigitan y se yuxtaponen con los sistemas medanosos, por lo que el sector bajo estudio constituye un verdadero palimpsesto (Bécher Quinodóz 2014).

En el área se identificaron tres grandes unidades geomorfológicas: I: Llanura Eólica, II- Llanura Fluvio-Eólica y III- Llanura Fluvial (Fig. 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 (Fig. 2).

### Caracterización hidrogeológica

El estudio de la geología superficial, de los perfiles expuestos, el inventario de perforaciones de profundidades variables y los resultados e interpretaciones de los SEV, permitieron generar un modelo hidrogeológico preliminar. El perfil hidrogeológico A-A' (Fig. 2), muestra las principales características del subsuelo, identificándose un amplio dominio de sedimentos finos (arenas muy finas limosas, Fig. 2). Si bien existen capas acuíferas confinadas a diferentes profundidades (Bécher Quinodóz 2014), el acuífero estudiado en este trabajo es el libre, de 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 pro-



**Figura 2:** Mapa geomorfológico de la cuenca media-baja del río Quinto. Ubicación y descripción del perfil hidrogeológico relevado (A-A') y análisis granulométrico en las correspondientes unidades geomorfológicas. 1 - Llanura Fluvial - Derrames río Quinto. 2- Llanura Fluvio-Eólica - Sector Villa Sarmiento. 3- Llanura Eólica - Sector medanoso Laguna Oscura. Basado en Bécher Quinodóz (2014).

porciones de 10 % hasta 37,2 % de arenas finas, o más gruesos (17,1 % y 30,3 % de arenas gruesas y medias respectivamente) asociados al ámbito de la faja fluvial del río Quinto y áreas de derrame (Fig. 2). Los materiales dominantes en toda la zona, 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 (Blarasin *et al.* 2013), estos valores alcanzan hasta 5-7 m/d en sedimentos arenosos finos y medios. Los sectores con mejores propiedades acuíferas están vinculados a la faja fluvial actual del río Quinto y a la antigua, como así también a los sistemas de médanos removilizados de la llanura arenosa. 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 hetero-

geneidad y anisotropía al acuífero (Bécher Quinodóz y Blarasin 2014b). Los sedimentos que abundan en el sector oriental más deprimido, tanto en superficie como a mayores profundidades, cuando son fundamentalmente limo-arcillosos o cementados, pueden presentar valores de K inferiores, del orden de 0,001-0,5 m/d y porosidades efectivas muy bajas, menores al 2%, lo que les otorga características acuitardas y aún acuicludas, si los materiales son muy finos o muy cementados (Bécher Quinodóz 2014).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización hidrodinámica del agua superficial (río Quinto) y subterránea (acuífero libre)

El río Quinto, con nacientes en las Sierras de San Luis, desarrolla dentro de la zona de estudio su cuenca media y media-ba-

ja, a lo largo de una longitud de 120 km, con una dirección general de escurrimiento NO-SE (Fig. 3a), que comprende los Bañados de La Amarga (vieja zona de derrames y antiguo nivel de base del curso de agua). El régimen hidrológico del río, condicionado por las características climáticas y geológicas regionales se encuentra también muy regulado por diferentes embalses en cuenca alta en la provincia de San Luis y por una presa en el este de la provincia de Córdoba ("Los Chañares") (Fig. 1a). El caudal que eroga el río es fundamentalmente el resultado de la contribución de los escurrimientos superficiales y del agua subterránea (Bécher Quinodóz 2014). Los datos obtenidos (Cuadro 1), indican un caudal promedio para el verano de 25 m<sup>3</sup>/s con una velocidad promedio de 0,92 m/s, mientras que durante el invierno, el caudal y velocidad promedio resultan ser de 4,22 m<sup>3</sup>/s y 0,68 m/s res-

**CUADRO 1:** Caudales líquidos (Q) y sólidos (Qs) medidos del río Quinto para la estación verano 2013 (arriba) e invierno 2013 (abajo).

Caudales líquidos (Q) y sólidos (Qs) medidos. Río Quinto (Verano 2013)					
Estaciones de aforo	Área m <sup>2</sup>	Velocidad m/seg	Q (Caudal) m <sup>3</sup> /seg	Carga Sólida gr/L	Qs (Caudal Sólido) g/seg
A <sub>11</sub>	30,9	0,923	28,6	0,17	4,83
A <sub>13</sub>	35,2	0,628	22,1	0,15	3,30
A <sub>15</sub>	20,0	1,215	24,3	0,48	11,78
Caudales líquidos (Q) y sólidos (Qs) medidos. Río Quinto (Invierno 2013)					
Estaciones de aforo	Área m <sup>2</sup>	Velocidad m/seg	Q (Caudal) m <sup>3</sup> /seg	Carga Sólida gr/L	Qs (Caudal Sólido) g/seg
A <sub>11</sub>	7,50	0,50	3,8	0,11	0,41
A <sub>13</sub>	6,30	0,68	4,3	0,12	0,51
A <sub>15</sub>	5,20	0,88	4,6	0,15	0,69

pectivamente. En verano se observan variaciones de caudal de una estación de aforo a la otra, con descenso e incrementos del mismo en el sentido de escurrimiento del flujo, mientras que para el invierno (estiaje) el caudal aumenta en sentido del flujo. Los incrementos de caudal (0,8 m<sup>3</sup>/s) observados en invierno, época en que no llueve, entre las estaciones A<sub>11</sub> (Ingreso a Córdoba) - A<sub>15</sub> (Salida del área) permite interpretar que existen aportes del acuífero libre (río efluente) (Cuadro 1), mientras que los descensos registrados en verano entre las estaciones A<sub>11</sub> (Ingreso a Córdoba) - A<sub>13</sub> (centro del área de estudio) (Cuadro 1), pueden atribuirse a relaciones de influencia por parte del río hacia el acuífero, aspectos que se explicarán más adelante.

El acuífero libre presenta una dirección de escurrimiento NO-SE, con morfología de la superficie freática casi planar (Fig. 3a). El diseño general de las líneas de flujo indica que el sector se comporta, en general, como un área de tránsito del agua subterránea procedente del sector occidental. Los gradientes hidráulicos del orden de 0,1 % a 0,4 % se asocian a áreas más planas y sectores medanosos, respectivamente. Las velocidades de escurrimiento del agua subterránea, teniendo en cuenta la porosidad efectiva de los sedimentos, son de 0,04 - 0,07 m/d (en ambientes planos) a 0,25 - 0,50 m/d (en los campos de dunas del sector NO). Considerando la morfología en planta de la superficie freática (Fig. 3a) podría interpretarse una relación de indiferencia entre ambos sistemas, dado el paralelismo entre el curso de agua y las líneas de flujo del

agua subterránea para la escala de trabajo empleada. Sin embargo, considerando los detalles a campo y los perfiles transversales realizados (Figs. 3a, b), 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. En general domina el aporte del acuífero hacia el río, y en aquellos tramos en los que el río aporta al acuífero se corroboró disminución del caudal (perfil transversal N° 2 y 3).

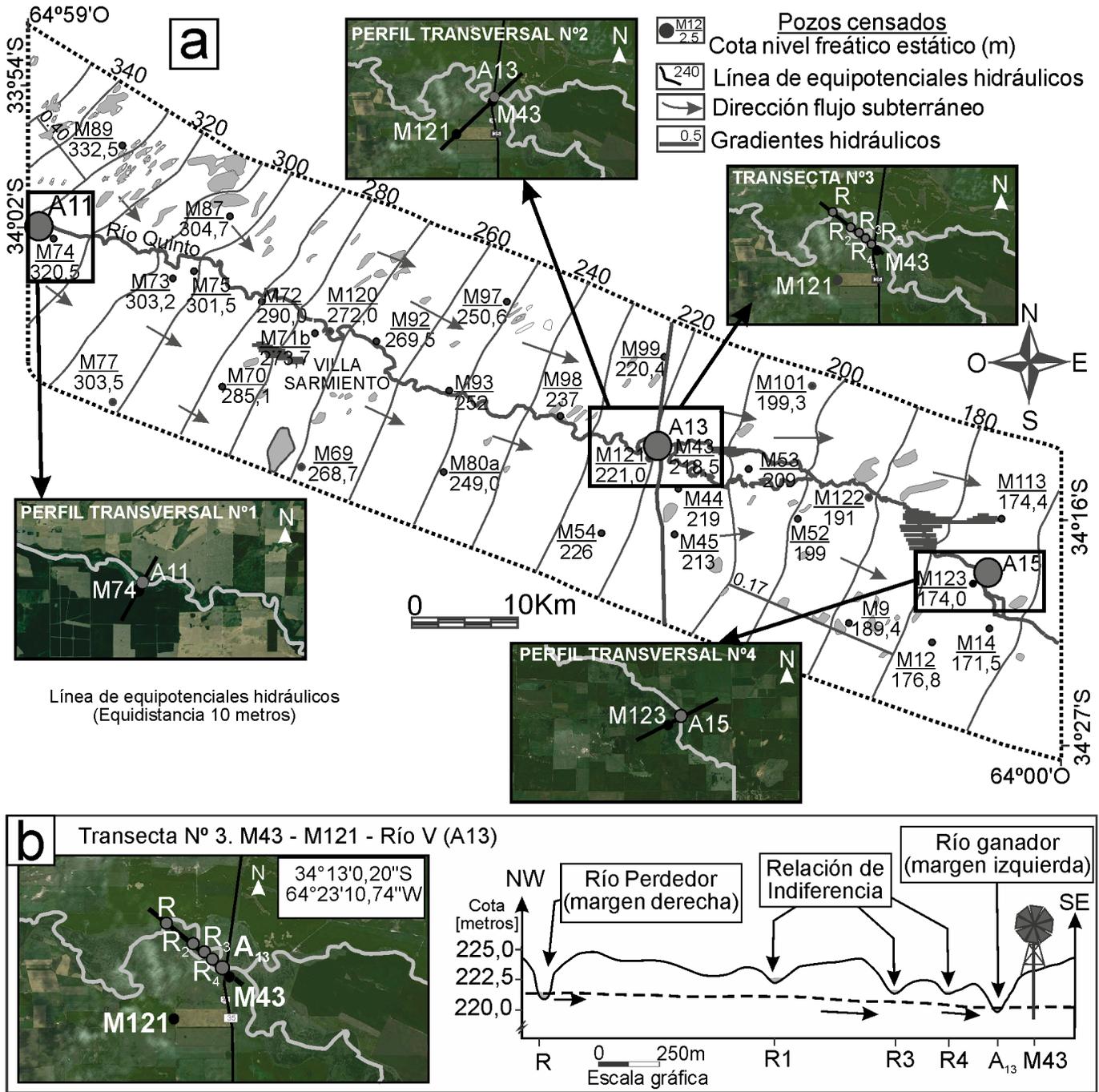
Las variaciones espaciales responden a las características geomorfológicas, destacándose que en los sectores de mayor sinuosidad (meandros) las relaciones observables son más complejas variando entre influencia - efluencia y/o indiferencia por parte del acuífero (transecta N°3 - Fig. 3b), mientras que en los tramos rectilíneos, donde el río ha profundizado y su orientación es paralela a la dirección general de escurrimiento (NO - SE), ambos sistemas entran en contacto, estableciéndose una relación en la que el río es ganador (perfil transversal N° 1, Fig. 3). Por otra parte, las variaciones temporales que experimentan las relaciones agua superficial - subterránea en el sector analizado se encuentran sujetas a las variaciones individuales de cada uno de los sistemas intervinientes (fundamentalmente cambios de caudal del río y niveles piezométricos del acuífero). En el caso del río Quinto, el caudal en la zona de estudio, se encuentra controlado por embalses ubicados aguas arriba (embalse La Florida, dique Paso de Las Carretas, dique Vul-

piani y presa Los Chañares) y por los escurrimientos superficiales originados en lluvias locales mientras que las fluctuaciones de nivel freático, se hallan influenciadas principalmente por el régimen de precipitaciones (Bécher Quinodóz 2014). Como se indicara, los excesos hídricos en la zona han disminuido y por lo tanto hay un incremento notorio en los déficit hídricos hacia finales de 2004 y hasta el año 2013, lo que se ha traducido en descenso de nivel freático que puede afectar la relación acuífero - río, especialmente en algunos tramos en los que debido a la topografía local, el descenso de nivel desconecta los cuerpos de agua (Bécher Quinodóz 2014).

#### Caracterización hidrogeoquímica general

El agua del río Quinto, para las dos épocas de muestreo (verano/invierno), presentó el mismo tipo geoquímico, sulfatada sódica (Fig. 4), con un leve incremento de la conductividad eléctrica, y consecuentemente de salinidad, en el sentido general del escurrimiento, en el verano (2400 a 2800 μS/cm) y más marcado en el invierno (3280 a 4500 μS/cm) (Fig. 5a). Si bien arsénico y flúor son componentes naturales del agua de la región dado que hay minerales fuente en los sedimentos (Blarasin *et al.* 2005, Blarasin *et al.* 2014), en el agua superficial resultaron bajos (35 a 45 μg/L y 1,8 a 2,8 mg/L, respectivamente) y los tenores de nitratos (indicadores de contaminación) fueron muy bajos (1,8 a 14 mg/L). Ambos resultados se vinculan fuertemente a la cantidad y calidad de agua superficial que procede de la cuenca alta.

El acuífero libre presenta valores de conductividad eléctrica muy variables entre 790 a 9370 μS/cm (Fig. 4), reconociéndose aguas del tipo bicarbonatadas sódicas hasta cloruradas sódicas, muchas de carácter aniónico mixto (Fig. 5b), resultando en un patrón geoquímico complejo en el sentido de que no se observa una evolución clásica de la composición química en el sentido del flujo del agua subterránea sino una importante variabilidad espacial en diferentes direcciones, fundamental-



**Figura 3:** a) Mapa de equipotenciales hidráulicos del acuífero libre y puntos de aforo del río Quinto. Ubicación de Perfiles hidrodinámicos transversales. Río Quinto - acuífero libre; b) Transecta N°3 con perfiles transversales locales.

mente ligada a variaciones geomorfológicas/litológicas. Estos cambios están influenciados por la presencia de médanos que permiten la recarga de agua dulce, cambios faciales litológicos en el acuífero (por ejemplo mayor cementación carbonática que propicia la disolución de sales y aumento de iones en la solución) ade-

más del tiempo de circulación desde el área de recarga regional (Bécher Quinodó 2014). Es decir que se acoplan procesos locales con otros regionales para producir mezclas de aguas. El análisis de las relaciones agua superficial - subterránea a través del trayecto del río Quinto en el área investigada (Fig. 4),

se realizó a través del trazado de perfiles hidroquímicos longitudinales (Figs. 5a, b) y transversales (Fig. 5c), habiéndose tenido en cuenta los aspectos hidrodinámicos discutidos previamente. El análisis de los perfiles (Fig. 5c) permite interpretar una mayor similitud de la marca iónica entre agua superficial y subterránea al

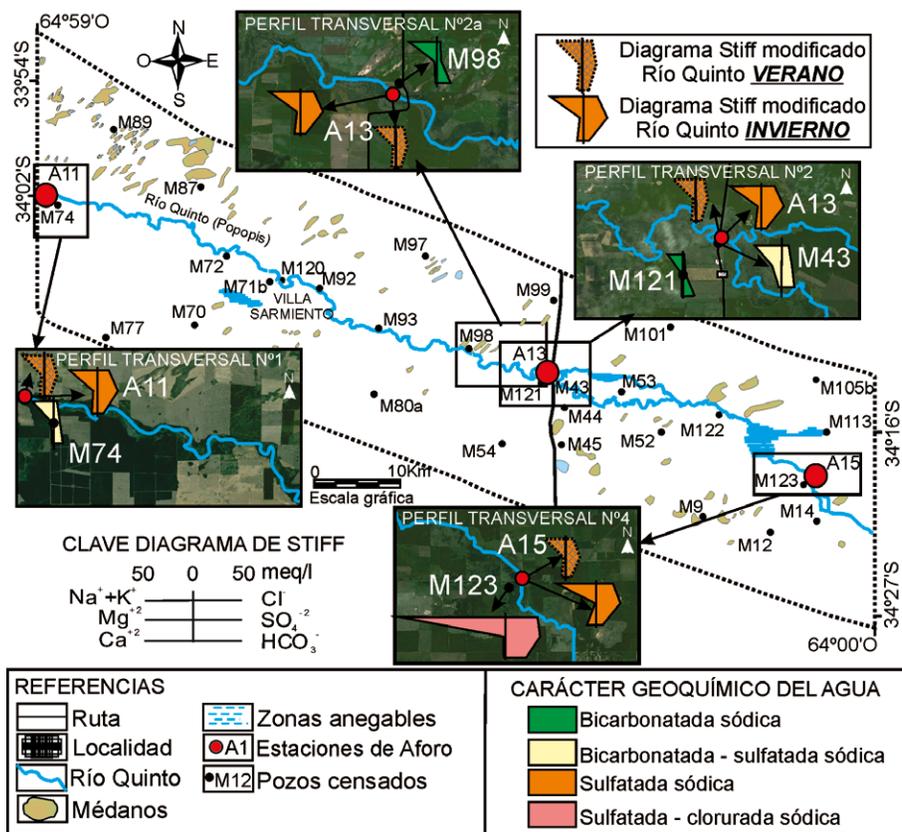


Figura 4: Localización perfiles hidrogeoquímicos transversales. Relaciones hidrogeoquímicas río Quinto - acuífero libre.

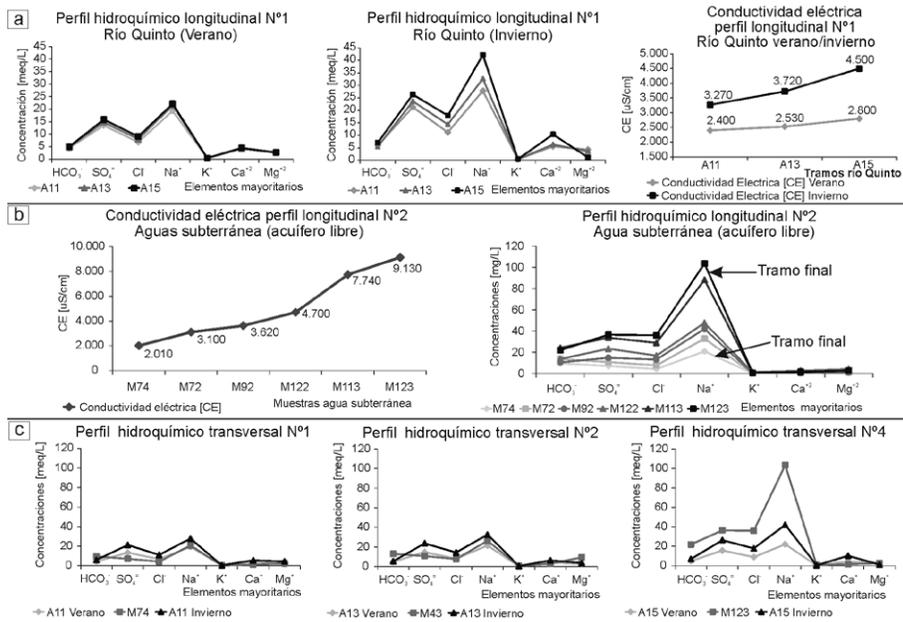


Figura 5: a) Gráfico de concentración de elementos mayoritarios, para cada tramo del río Quinto seleccionado. 1) Verano. 2) Invierno. 3) Gráfico de relación conductividad eléctrica (CE) vs. tramos del río Quinto en verano (diamantes) e invierno (cuadrados) para 3 sitios de muestreo; b) Gráfico de conductividad eléctrica vs. muestras de agua subterránea del acuífero libre (izquierda) y concentración de elementos mayoritarios para cada muestra de agua seleccionada - acuífero libre (derecha); c) Perfiles hidroquímicos transversales. Relación hidrogeoquímica río Quinto - acuífero libre.

ingreso del área de estudio (cuenca media), mientras que a la salida de la misma, el acuífero muestra mayor incremento en el contenido iónico.

Los resultados hidrodinámicos e hidroquímicos generales obtenidos permiten establecer que en el sector existe una interacción agua superficial-subterránea que, en general, muestra descarga del acuífero libre hacia el río. Así, en una primera instancia, la composición físico-química que el río Quinto presenta dentro del área de estudio, puede estar explicada por un proceso de mezcla en el que interviene una componente superficial (agua del río que viene circulando desde aguas arriba) y una componente subterránea (flujo de agua intermedio - regional que viene circulando desde el sector occidental).

En función de lo expuesto y con el fin de realizar un mayor ajuste del modelo hidrodinámico e hidrogeoquímico conceptual de la zona de trabajo, se llevó a cabo la determinación de isótopos estables ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ) en muestras de agua superficial y subterránea. Los resultados obtenidos se detallan a continuación.

### Caracterización hidrogeoquímica isotópica

La isotopía ambiental, como herramienta en hidrogeología, es importante porque permite identificar no sólo el origen, la ubicación de las fuentes de recarga al acuífero y procesos geoquímicos que puedan tener lugar en el medio (reacciones agua-roca, mezcla de distintas aguas y precipitación - disolución), sino también establecer posibles conexiones hidráulicas entre los sistemas superficiales y subterráneos. A partir de lo anterior y con el fin de profundizar el estudio de las relaciones río Quinto - acuífero libre, se llevó a cabo el estudio de isótopos estables ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$ ) en las muestras de agua correspondientes a ambos sistemas, lo que hizo necesario ampliar la investigación al área de aporte (cuenca alta y media del río Quinto - San Luis), (Fig. 6a).

A través del diagrama convencional  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$  (Fig. 6b), se interpreta que el acuífero libre en cuenca alta, presenta mayor empobrecimiento isotópico, atribuible a re-

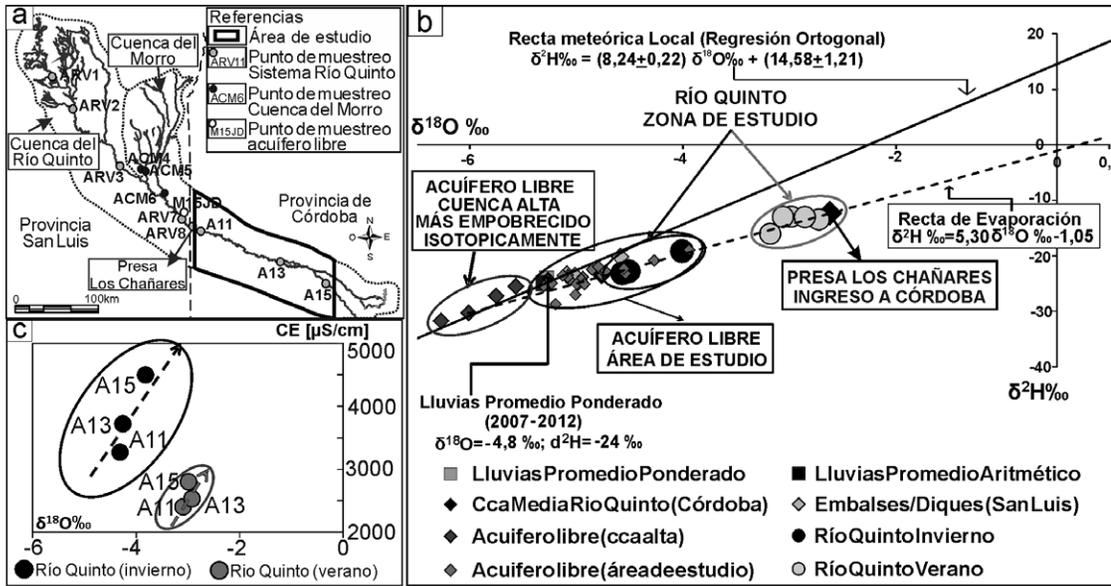


Figura 6: a) Localización puntos de muestreo, cuenca alta - media (sistema río Quinto/cuenca del Morro); b)  $\delta^{18}\text{O}$  vs.  $\delta^2\text{H}$  para las muestras de agua del sistema río Quinto y el acuífero libre en cuenca alta y zona de trabajo; c) Gráfico CE vs.  $\delta^{18}\text{O}$ . Tramos del río Quinto en el área de estudio para Invierno/Verano.

carga de agua procedente de lluvias más livianas isotópicamente, precipitadas en sectores serranos a partir de vapor de agua más empobrecido, debido al efecto de continentalidad y de altura (Dansgaard 1964, Panarello y Parica 1984, Bécher Quinodóz 2014). En la cuenca alta, los embalses ( $\delta^{18}\text{O}$  promedio =  $-4,4\text{‰}$  y de  $\delta^2\text{H}$  promedio =  $-22,4\text{‰}$ ), se encuentran más enriquecidos que el acuífero libre, debido al fraccionamiento que ocurre en ellos por efecto de evaporación.

En la zona de trabajo, el acuífero libre presenta valores isotópicos promedio ( $\delta^{18}\text{O}$  =  $-4,4\text{‰}$  y de  $\delta^2\text{H}$  =  $-23,8\text{‰}$ ), similares al promedio ponderado de las lluvias locales, mientras que el río Quinto (luego de haber egresado de la presa Los Chañares, cuya composición isotópica es  $\delta^{18}\text{O}$  =  $-2,1\text{‰}$  y de  $\delta^2\text{H}$  =  $-12,3\text{‰}$ ), muestra valores promedio para el invierno de  $\delta^{18}\text{O}$  =  $-3,9\text{‰}$ ;  $\delta^2\text{H}$  =  $-21,7\text{‰}$  y para el verano de  $\delta^{18}\text{O}$  =  $-2,5\text{‰}$ ;  $\delta^2\text{H}$  =  $-13,7\text{‰}$ .

Los valores isotópicos revelan que las aguas correspondientes al río Quinto presentan mayor enriquecimiento isotópico que el acuífero libre en ambos períodos de muestreo, lo que indica evaporación en el curso de agua. Sin embargo, al considerar el fraccionamiento isotópico que presenta el río Quinto en las dos épocas de muestreo, dentro de la zona de trabajo, y su evolución en el contenido salino (Fig. 6c) se observa que, a pesar del incre-

mento en salinidad que éste experimenta en el sentido del flujo, el fraccionamiento isotópico resulta muy bajo, sobre todo si se considera que los sistemas de agua superficial están expuestos a la atmósfera y por lo tanto presentan sensibilidad a sufrir fraccionamiento isotópico por evaporación. Este efecto de incremento en los valores de conductividad con bajo fraccionamiento se observa especialmente en invierno, situación que demuestra la mayor influencia del acuífero libre para esta época del año. A su vez la marca isotópica que presenta el río Quinto en la época de verano, se debería no sólo a un proceso de evaporación en el curso de agua, sino a un proceso de mezcla, en el que intervienen como componente principal el agua superficial que llega de la presa Los Chañares (dada la similitud que presentan en la marca isotópica) y, en menor medida, el aporte del acuífero libre. Estas diferencias estacionales quedan claras en la gráfica de la figura 7a en la que las muestras de invierno y de verano del río Quinto y las del acuífero libre en la zona de estudio, están alineadas según una recta de evaporación explicada por la ecuación  $\delta^2\text{H} = 5,30 * \delta^{18}\text{O} - 1,05\text{‰}$  (Fig. 7a).

A su vez, en función del modelo hidrodinámico e hidrogeoquímico planteado, esta recta puede ser considerada una recta de mezcla, pudiendo aplicarse entonces ecuaciones clásicas de mezcla ("regla

de la palanca") para calcular en función de los datos isotópicos, la fracción en que participan distintas fuentes de agua en la composición final del río Quinto en cada estación de aforo (Fig. 7b), para ambas épocas del año. En esta oportunidad, se eligió como caso para el modelado a la sección  $A_{11}$ , es decir el ingreso de la zona de estudio, en ambas épocas de muestreo. En la figura 7b, se exhiben los contenidos isotópicos de las muestras de agua del río Quinto en los sitios  $A_{11}$  (ingreso al área) para el período de invierno ( $A_{11V}$ ) y verano ( $A_{11V}$ ), además de los valores de la presa Los Chañares ( $ARV_8$ ) y una muestra de agua subterránea ( $M_{122}$ ), cuya marca isotópica resulta ser representativa del valor de las muestras de agua del acuífero libre. En función de la ecuación lineal resultante (Fig. 7b) y realizados los cálculos correspondientes, se encontró que, en la época de verano, las muestras del río Quinto al ingreso del área ( $A_{11V}$ ) poseen un 72 % de agua procedente de la presa Los Chañares ( $ARV_8$ ) y 28 % de agua subterránea, mientras que en invierno la proporción resultó de 82% de agua subterránea y 18% de agua procedente de la presa Los Chañares ( $ARV_8$ ).

Los resultados obtenidos permiten corroborar que en el sector existe una interacción agua subterránea-superficial que, en general, muestra influencia del acuífero hacia el río en diferente proporción

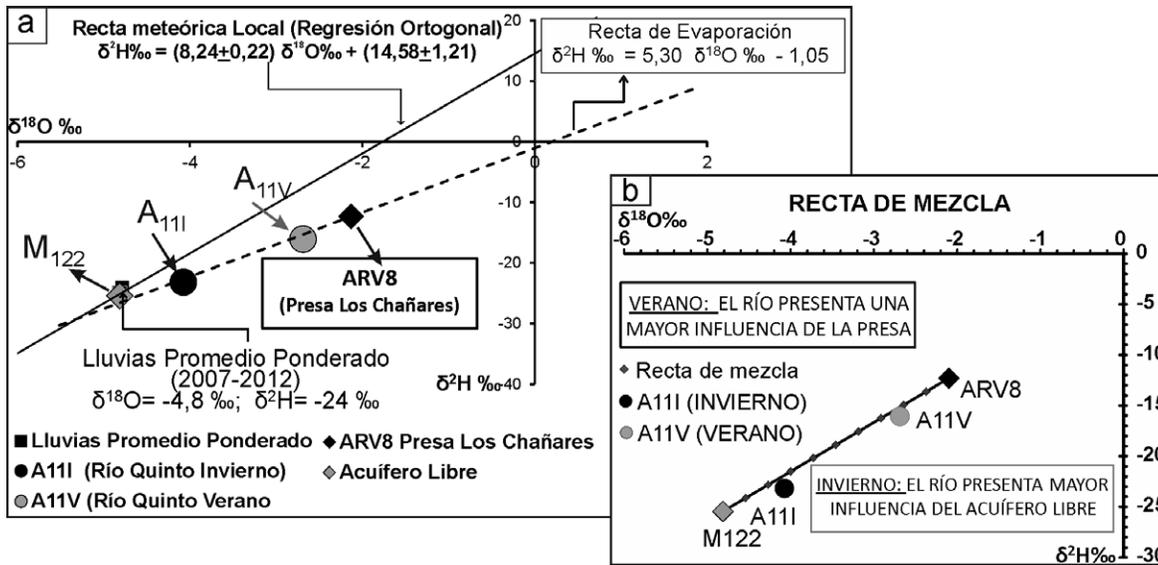


Figura 7: a)  $\delta^{18}\text{O}$  vs.  $\delta^2\text{H}$  para las muestras de agua del río Quinto, al ingreso (A<sub>11</sub>) de la zona de estudio en ambas épocas de muestreo y su relación con la muestra de la presa Los Chañares (ARV<sub>8</sub>) y del agua subterránea (M<sub>122</sub>) del acuífero libre; b) Recta de mezcla.

CUADRO 2: Análisis físico - químico de las muestras empleadas en el modelado numérico.

Nº Muestra	pH	CE $\mu\text{S}/\text{cm}$	SDT mg/L	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> mg/L	CO <sub>3</sub> H mg/L	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> mg/L	Cl <sup>-</sup> mg/L	Na <sup>+</sup> mg/L	K <sup>+</sup> mg/L	Ca <sup>+2</sup> mg/L	Mg <sup>+2</sup> mg/L
ARV <sub>7V</sub> (SI)	7,9	2240	1568	0	293	713	251	404	15	107	25
ARV <sub>8</sub> (SI)	8,2	3100	2170	0	325	832	337	556	18	92	57
M <sub>15JD</sub> (SI)	8,2	6300	4410	0	440	1698	1057	1607	28	104	83
A <sub>11V</sub> (SF)	8,7	2400	1680	12	278	643	243	450	16	84	32

CE: Conductividad eléctrica. SDT: Sales disueltas totales.

CUADRO 3: Resultado del modelado numérico realizado con PHREEQC (Modelo 7).

Muestras	Fraciones mezcla	NaX <sub>2</sub> mmol/L	CaX <sub>2</sub> mmol/L	MgX <sub>2</sub> mmol/L	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O mmol/L	ClNa mmol/L
ARV <sub>8</sub> (SI)	0,61	2,07	-1,37	0,33	1,96	1,66
ARV <sub>7V</sub> (SI)	0,14	0,47	-0,32	0,07	0,45	0,38
M <sub>15JD</sub> (SI)	0,25	0,85	-0,56	0,14	0,80	0,68

según la estación del año. Los datos indican fundamentalmente la dilución del agua durante la época de precipitaciones y la consecuente contribución de éstas fundamentalmente vía los escurrimientos superficiales al caudal del río, mientras que en invierno domina el caudal de base aportado por el acuífero y por lo tanto su impronta geoquímica. El agua del río mantiene el mismo patrón geoquímico sulfatado sódico desde que ingresa a la zona de estudio hasta que sale, sin embargo aumenta el contenido iónico en invierno dado el mayor aporte del acuífero. La vinculación isotópica entre el río y muestras cercanas del acuífero, indican también aporte subterráneo al sistema (Bé-

cher Quinodóz 2014).

Esta peculiar situación geoquímica, es decir una masa de agua superficial que se mantiene con el mismo tipo geoquímico y un leve aumento iónico a lo largo de 120 km, a pesar de que posee relación hidráulica con el acuífero (aspecto que se corrobora con los isótopos) puede explicarse considerando que el río, como entidad hidrogeoquímica, es el resultado de una mezcla de aguas debida a la convergencia de: 1) agua dulce superficial procedente de cuenca alta-media; 2) el agua retenida en la presa Los Chañares; 3) agua de flujos subterráneos del acuífero libre, que viene circulando desde el sector pedemontano. Un aspecto a destacar es que las veloci-

dades de las 2 masas de agua (río y acuífero), son completamente diferentes, 0,92 m/s la del río (verano), es decir 80 km/d y 0,2 m/d la del agua subterránea. Esto permite deducir que aunque haya aporte del acuífero al río, el agua de éste recorrerá la zona estudiada en menos de dos días, con lo cual la influencia de la composición química del acuífero en la del río se disipa dada la alta capacidad de éste último para diluir solutos por dispersión hidrodinámica. Para validar este modelo conceptual se realizó un modelado numérico inverso, la cual se describe e interpreta a continuación.

### Modelado numérico

El modelado geoquímico se llevó a cabo mediante el programa computación PHREEQC (Parkhurst y Appelo 1999), considerándose los componentes mayoritarios (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>) del agua, con el fin de poder explicar la evolución geoquímica de la misma a través de procesos de ganancia y/o pérdida de iones en la solución en relación con el medio sólido y gaseoso. Este modelo fue realizado considerando también los datos isotópicos, aspecto recomendable dado que la marca isotópica discrimina más fuertemente la procedencia del agua, aunque arroja menos modelos posibles. En función del modelo conceptual planteado anteriormente, la muestra A<sub>11</sub>, se considera el resultado de una mezcla en-

tre ARV<sub>7</sub> (agua superficial que viene circulando desde cuenca alta), ARV<sub>8</sub> (agua superficial de la presa los Chañares) y M<sub>15JD</sub> (agua subterránea que viene circulando desde el sector pedemontano). Los datos físico-químicos de las muestras de agua empleados en el modelado, se presentan en el Cuadro 2.

A través del programa PHREEQC, se han evaluado 49 modelos posibles de los cuales 21 satisfacen la mayoría de las restricciones consideradas en el modelo conceptual, presentándose el que mejor ajusta (Modelo 7) (Cuadro 3).

Los valores obtenidos indican que para alcanzar la composición sulfatada sódica del agua del río Quinto en el sitio A11V (solución final), las soluciones iniciales deben mezclarse en una razón aproximada de 14/61/25 (ARV<sub>7</sub>/ARV<sub>8</sub>/M<sub>15JD</sub>), además de producirse procesos de intercambio catiónico y disolución de sales (CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O, ClNa). Es decir que, para la época de verano en el sitio A<sub>11V</sub>, el agua subterránea aportada por el acuífero libre al río, representa el 25 %, mientras que un 75 % es agua superficial que procede de la presa ubicadas aguas arriba (61 %) y de la que viene circulando desde cuenca alta (14 %). Los porcentajes aportados por dichos sistemas, son similares a los obtenidos mediante el modelado isotópico (72 % agua superficial y 28 % agua subterránea).

## CONCLUSIONES

Las diferencias geomorfológicas y litológicas en el tramo estudiado del río Quinto resultaron ser, junto a los aspectos hidroclimáticos (lluvias concentradas en primavera-verano), los principales condicionantes naturales del comportamiento hidrológico hallado.

Los aspectos hidrométricos e hidrogeoquímicos muestran que el río Quinto presenta a lo largo del año variaciones de caudal, con agua dulces en verano a salobres en invierno, con leves incrementos en el contenido salino en la dirección del flujo, particularmente en invierno, manteniéndose el tipo geoquímico sulfatado sódico en tiempo y espacio.

Por su parte, la composición química del acuífero libre resultó en un mosaico geoquímico complejo, con aguas dulces - bicarbonatadas, de recarga reciente (flujos locales) en zonas medanosas y aguas salobres y saladas sulfatadas - cloruradas sódicas, más evolucionadas debido al largo tránsito (flujos intermedios - regionales) en el resto de la planicie. Esta particular situación, es decir un río cuya composición química del agua se mantiene con pocos cambios al atravesar una planicie donde el agua subterránea presenta, en general, valores elevados de sales, arsénico, flúor, nitratos, etc., se constituye en una oferta ambiental muy importante. A partir de la caracterización hidrodinámica, hidrogeoquímica general e isotópica y del modelado numérico, quedó demostrado que dicha particularidad es resultado de procesos de mezcla de agua entre dos sistemas hidrológicos cuyas velocidades de circulación son completamente diferentes, es decir agua subterránea de flujo lento y agua superficial de flujo rápido. Las mezclas resultantes obtenidas, dado que se trata de un río regulado (condicionantes antrópicos) indican que domina el agua superficial (incluyendo el aporte de las presas) en verano (en el orden de 72 %) mientras que en invierno, a pesar de estar regulado, hay un dominio (en el orden 82 %) de caudal de base (aporte subterráneo). Específicamente la herramienta isotópica fue de gran utilidad, ya que los valores de isótopos de O e H de aguas superficiales y subterráneas en la zona de estudio (Córdoba) mostraron la procedencia de la recarga e influencia de obras hidráulicas, al quedar alineados en una recta de evaporación y mezcla con los valores del agua de río y acuífero de la cuenca alta y media en San Luis. Los datos químicos muestran que el agua de río resultó ser una mezcla variable entre agua superficial y subterránea, con valores más elevados de sales disueltas totales, arsénico y flúor en el tramo inferior del río.

A partir de lo expuesto y considerando que si bien este trabajo contribuye en parte al conocimiento sobre el funcionamiento general que el río Quinto presenta dentro de la provincia de Córdoba y su

relación con el acuífero libre, surge la necesidad de más estudios locales e interjurisdiccionales, que permitan obtener un mayor conocimiento del sistema en su conjunto para afrontar posibles problemas ambientales (por ejemplo, los vinculados a contaminación ya detectados). En las cuencas interjurisdiccionales, los procesos hidrológicos dinámicos, químicos e isotópicos están concatenados y no reconocen fronteras políticas. Por este motivo, en este tipo de cuencas compartidas, los sistemas hidrológicos superficiales y subterráneos deben ser analizados integralmente evaluando el control que ejercen sobre su funcionamiento los factores naturales (climáticos y geológicos) y antrópicos (modo de ocupación y uso del territorio).

## AGRADECIMIENTOS

El trabajo de investigación fue subsidiado por FONCYT y MINCYT (PID 35/08 Préstamo BID). Se agradece al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- APHA, AWWA y WPCF. 2005. American Public Health Association & Eaton, Andrew D & Water Environment Federation & American Water Works Association. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st, Washington, D.C.
- Arauzo, M., Valladolid, M., Martínez-Bastida, J.J. y Gutiérrez, C. 2006. Dinámica espacio-temporal del contenido en nitrato de las aguas superficiales y subterráneas de la cuenca del río Oja (La Rioja, España): Vulnerabilidad del acuífero aluvial. *Limnetica*, 25: 753-762.
- 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 (inédita), 412 p. Río Cuarto, Córdoba.
- Bécher Quinodóz, F. y Blarasin, M. 2014a. Relaciones dinámicas y geoquímicas entre agua superficial y subterránea en la planicie arenosa del sur de Córdoba. Argentina. 19° Con-

- greso Geológico Argentino, Actas 1: 526-527, Córdoba.
- Bécher Quinodóz, F. y Blarasin, M. 2014b. Arsénico y flúor en aguas subterráneas en la planicie sudoccidental de Córdoba. Un problema ambiental analizado desde la perspectiva hidrogeológica. *Revista Estudios Ambientales* 2: 1-23.
- Bécher Quinodóz, F., Blarasin, M. y Damilano, G. 2013. Evaluación de Relaciones Geomorfología - Calidad de Agua Subterránea con apoyo de Técnicas Estadísticas en la Planicie Sudoccidental de Córdoba, Argentina. En: González, N., Kruse, E.E., Trovatto, M.M. y Laurencena, P (eds.) *Agua Subterránea Recurso Estratégico*, Tomo 2: 123-130, EDULP, La Plata.
- Blarasin, M., Degiovanni, S., Cabrera, A. y Villegas, M. 2005. Aguas superficiales y subterráneas en el Sur de Córdoba: una perspectiva geoambiental. 320 p. Editorial UNRC, Río Cuarto.
- Blarasin, M., Cabrera, A., Bécher Quinodóz, F., Felizzia, J. y Giuliano Albo, J. 2013. El Relieve y su Incidencia en el Hallazgo de Agua para Abastecimiento Humano en la Planicie Medana Sudoriental Cordobesa. En: González, N., Kruse, E.E., Trovatto, M.M. y Laurencena, P. (eds.) *Agua Subterránea Recurso Estratégico*, Tomo 1: 218-225. EDULP, La Plata.
- Blarasin, M., Cabrera, A., Matteoda, E., Aguirre, M., Giuliano Albo, J., Bécher Quinodóz, F., Maldonado, L. y Frontera, H. 2014. Recursos hídricos subterráneos Parte 2: Aspectos geoquímicos, isotópicos, contaminación y aptitudes de uso. En: Martino, R.D. y Guerreschi, A.B. (eds) *Relatorio de la geología y recursos naturales de la provincia de Córdoba*: 1263 - 1287, Córdoba.
- Bobachev, A., Modin, I. y Shevnin, V. 2000. IPI2WIN Software. Moscow State University. Moscow.
- Cantú, M. 1992. Holoceno de la provincia de Córdoba. Manual: Holoceno de la República Argentina. Simposio Internacional sobre el Holoceno en América del Sur, Tomo I: 24 p, Paraná.
- Caschetto, M., Barbieri, M., Galassi, D.M.P., Mastrorillo, L., Rusi, S., Stoch, F., Di Cioccio, A. y Petitta, M. 2013. Human alteration of groundwater-surface water interactions (Sagittario River, Central Italy): implication for flow regime, contaminant fate and invertebrate response. *Environmental Earth Sciences* 71:1791-1807.
- Craig, H. 1961. Isotope variations in meteoric waters. *Science* 133: 1702-1703.
- Criado Roque, P., Mombrú, C. y Ramos, V. 1981. Estructura e interpretación tectónica. 8º Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 155-192, San Luis.
- Dansgaard, W. 1964. Stable isotopes in precipitation. *Tellus* 16: 436-468.
- Degiovanni, S. 2008. Análisis geoambiental del comportamiento de los sistemas fluviales del Sur de Córdoba, en especial del Aº Achiras -del Gato, como base para su gestión sustentable. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita), 597 p. Río Cuarto, Córdoba.
- Gat, J. y Gonfiantini, R. 1981. Stable isotopes Hydrology. Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle. IAEA, Vienna, Technical Reports Series, 210: 337-357
- Giuliano Albo, M.J. 2013. Evaluación de la contaminación por nitratos en aguas subterráneas de agroecosistemas mediante el uso de isótopos estables  $^{15}\text{N}$ - $^{14}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}$ - $^{16}\text{O}$ , y otros solutos relacionados. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto (inédita), 385 p. Río Cuarto, Córdoba.
- Giuliano Albo, M.J. y Blarasin, M. 2014. Hidrogeoquímica y estimación del fondo natural de nitratos del agua subterránea en un agroecosistema del pedemonte de la sierra de Comechingones. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 71: 378-392.
- Gonfiantini, R. 1986. Environmental isotopes in lake studies. En Fretz, P. y Fontes, J.Ch. (eds) *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, The Terrestrial Environment B, II*: 113-168. Elsevier, Amsterdam.
- Kostadinoff, J. y Gregori, D.A. 2004. La Cuenca de Mercedes, provincia de San Luis. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59: 488-494.
- Manzano, M., Custodio, E., Higuera, H., Puig, R. y Soler, A. 2009. Influencia de la gestión del acuífero sobre los humedales del manto eólico de Doñana. *Boletín Geológico y Minero* 120: 377-392.
- Mazor, E., Drever, J.L., Finley, J., Huntoon, P.W. y Lundy, D.A. 1993. Hydrochemical implications of groundwater mixing: an example from the Southern Laramie Basin, Wyoming. *Water Resources Research* 29: 193-205.
- Navarro Mendoza, S., Bautista Belmonte, A. y Belmonte Jiménez, S. 2002. Río Atoyac y su relación con el acuífero alimentador de fuentes de agua potable en la ciudad de Oaxaca. *Memorias México, Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente*: 1-9, México.
- Panarello, H. y Parica, C. 1984. Isótopos del oxígeno en hidrogeología e hidrología. Primeros valores en aguas de lluvia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 39: 3-11.
- Parkhurst, D.L. y Appelo, C.A.J. 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 p.
- Vázquez-Suñé, E. 2009. Hidrogeoquímica. En: Escuder, R., Fraile, J., Jordana, S., Ribera, F., Sánchez-Vila, X. y Vázquez-Suñé, E. (eds.) *Hidrogeología. Conceptos básicos de Hidrología Subterránea*: 426-471, Barcelona.

Recibido: 29 de marzo, 2015

Aceptado: 16 de agosto, 2015