

HIDROGEOQUÍMICA Y ANÁLISIS MULTIVARIADO EN EL ACUÍFERO FREÁTICO DE UNA CUENCA DE LLANURA AL SUR DE CÓRDOBA, ARGENTINA.

Cabrera, A.¹ & M. Blarasin ¹

Resumen - Se elabora el modelo conceptual del funcionamiento hidrogeoquímico del acuífero freático en la cuenca Los Jagüeles. La cuenca, típica de la Llanura Chaco-Pampeana Argentina, está desarrollada sobre sedimentos, eólicos y fluviales, Cuaternarios. La morfología freática es suavemente ondulada, de circulación principal NW-SE. El agua presenta una evolución geoquímica normal, cambiando de joven, dulce y bicarbonatada sódica en cuenca alta y media, a más madura, salobre y sulfatada/clorurada sódica en cuenca baja. El condicionante más importante en la evolución es el trayecto recorrido. Además se observan, subordinadamente, condicionantes litológicos, geomorfológicos y pedológicos. Los mecanismos que definen la calidad son principalmente: disolución-precipitación, reacciones redox e intercambio iónico. Cabe destacar la presencia de F⁻ y As^{+3/+5} (contaminantes naturales en la llanura) y de NO₃⁻ (contaminante de origen antrópico). Se observa que, los mayores contenidos en F⁻ y As^{+3/+5} se corresponden con los mayores tenores en CO₃H⁻, los mayores índices Na⁺/Ca⁺⁺, y el predominio de materiales loésicos con mineralogías características (fluorapatita, vidrio volcánico).

El modelo conceptual elaborado ha sido validado a través del tratamiento multivariado (cluster y de componentes principales), obteniéndose como resultado tres grupos químicos principales (variables mayoritarias, oligoelementos y contaminante antrópico junto al pH y CO₃⁼).

Palabras claves - Acuífero Freático, Hidrogeoquímica, Oligoelementos.

¹ Dpto. de Geología. Universidad Nacional de Río Cuarto. Ruta Nacional Nº 36, Km 601. 5800 - Río Cuarto. Córdoba. Argentina. Tel.: 0054 358 4676198. Fax: 0054 358 480280. Email: acabrera@exa.unrc.edu.ar

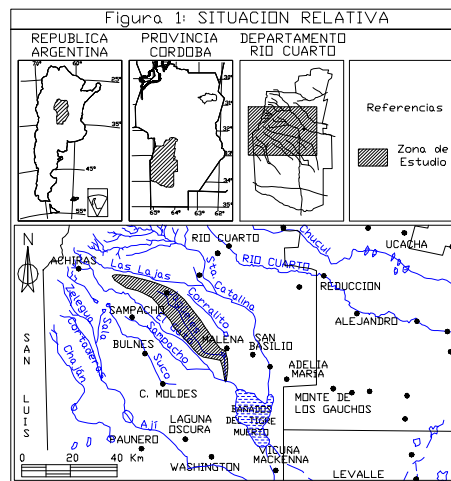
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVO

La cuenca del arroyo Los Jagüeles es una cuenca típica de aquellas desarrolladas totalmente en las áreas de llanura ubicadas al Sur de la provincia de Córdoba. En este tipo de cuencas, los recursos hídricos subterráneos revisten un interés estratégico ya que son los utilizados para todos los fines (consumo humano, ganadero y riego). Sin embargo, se trata de recursos muy susceptibles de deterioro tanto antrópico como natural debido al peligro que implica la existencia de diversas fuentes contaminantes y al predominio de materiales loésicos, con mineralogías características, en la columna estratigráfica que conforma a los acuíferos. Es así, que las problemáticas más importantes están vinculadas a la presencia de contaminantes de origen antrópico, tales como el Nitrato, y de contaminantes naturales tales como el Flúor y el Arsénico, en cantidades que sobrepasan los límites de aptitud para consumo humano establecidos por los organismos pertinentes. El estudio sobre la presencia de estos iones disueltos en el agua de bebida, sobre todo en tenores muy elevados, es muy importante ya que puede producir graves afectaciones a la salud de los pobladores que la consumen. Esta situación ha preocupado a los pobladores rurales y urbanos de la cuenca en diversas oportunidades, problemática que ha sido manifestada a través de requerimientos de estudios vinculados principalmente a la calidad y disponibilidad del agua subterránea para diferentes usos.

Por estos motivos es que surge la necesidad de estudios vinculados principalmente a la calidad de los recursos hídricos, no solamente para favorecer al progreso en el nivel de conocimientos, sino también a la mejora de la calidad de vida de la gente desde una visión sustentable, es decir, manteniendo la calidad ambiental. Se establece entonces, como objetivo principal, elaborar el modelo conceptual sobre el funcionamiento hidrogeoquímico del acuífero freático, teniendo en cuenta su vinculación con la hidrología superficial y con los condicionantes geológicos e hidrogeológicos, de manera de realizar una mejor planificación de uso del recurso.

UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La cuenca del arroyo Los Jagüeles, ubicada al Sur de la provincia de Córdoba, Argentina, entre los 33° 10' y 33° 40' de Latitud Sur y los 65° 00' y 64° 15' de Longitud Oeste, drena una superficie aproximada de 40.000 has e incluye a las zonas rurales y urbanas de las localidades de Las Vertientes, Los Jagüeles y Malena (figura 1).



METODOLOGÍA EMPLEADA

Se trabajó sobre imágenes satelitarias, fotografías aéreas y cartas topográficas, a escala 1:50.000, del Instituto Geográfico Militar (IGM). Se realizó el relevamiento geológico-geomorfológico con la obtención del mapa correspondiente y se describieron 15 perfiles de suelos. Con los datos climáticos recogidos se obtuvieron los histogramas de distribución de promedios mensuales y las curvas cronológicas anuales. La evapotranspiración potencial se calculó según Thornthwaite (1948). El balance hídrico seriado a nivel del suelo se obtuvo a través del programa PDIMES (1990).

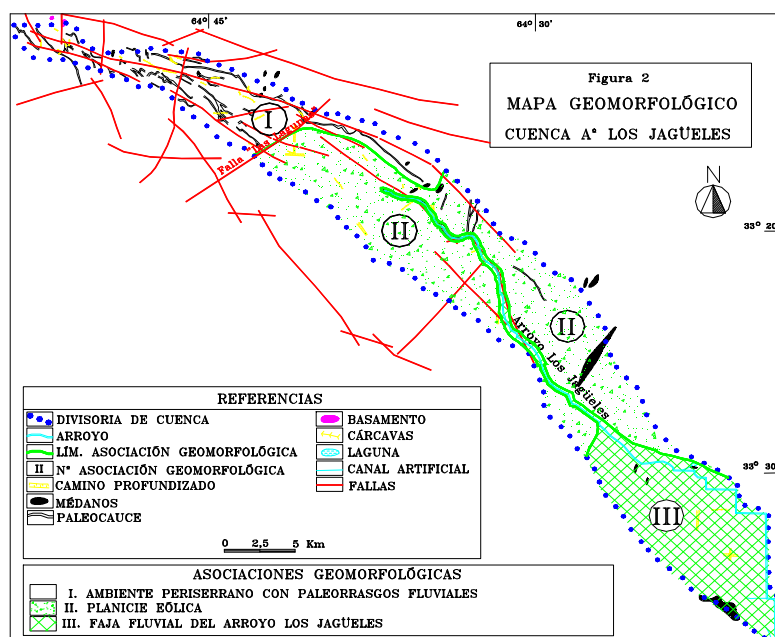
Se efectuó el relevamiento hidrológico de superficie, con mediciones in situ de calidad y caudales en distintos tramos del arroyo, obteniéndose muestras para su análisis físico-químico. Para el estudio hidrogeológico, se estableció una red de 96 perforaciones distribuidas homogéneamente en la zona con una densidad de muestreo de 1 pozo cada 4 Km². Se midieron profundidades del agua subterránea y se determinaron in situ, temperatura, conductividad y pH. Además, se obtuvieron muestras para análisis físico-químico de 68 pozos elegidos con criterio hidrogeológico. Se relevó, también, la información disponible respecto a los materiales existentes en el subsuelo y al detalle del diseño de las obras preexistentes. Se elaboraron los mapas equipotencial y de isoconas del acuífero libre. En los análisis físico-químicos se determinaron pH, componentes mayoritarios (CO_3^- , CO_3H^- , SO_4^- , Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{++} y Mg^{++}), minoritarios (F^- y NO_3^-) y trazas ($\text{As}^{+3/+5}$). Se calcularon también relaciones iónicas $\text{Na}^+/\text{Ca}^{++}$ y $\text{CO}_3\text{H}^-/\text{Cl}^-$ y se determinaron alcalinidad y dureza. Se clasificó geoquímicamente a las muestras analizadas según Piper-Hill. Se elaboraron, además, los mapas de pH, de isolíneas de contenidos en los iones analizados y de las relaciones iónicas de interés, a escala 1:50.000.

Finalmente, se analizaron en forma multivariada los resultados físico-químicos mediante el análisis de agrupamiento (cluster) y factorial (componentes principales), para sustentar y verificar el modelo hidrogeoquímico dominante en la cuenca.

GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

La cuenca Los Jagüeles está ubicada en la Provincia Geológica Llanura Chaco-Pampeana. El basamento cristalino, de edad Precámbrica superior-Paleozoica media, presente en pequeños afloramientos, arealmente subordinados en cuenca alta, está formado por rocas ígneas (graníticas) y metamórficas (principalmente esquistos y gneisses). Los depósitos sedimentarios observados, de edad Cuaternaria (Pleistoceno superior-Holoceno), son materiales clásticos (gravas, arenas gruesas, medias y finas, y limos) de origen eólico y fluvial, que fueron depositados durante una sucesión de períodos secos y húmedos correspondientes a distintos eventos climáticos. Las principales estructuras que afectaron la depositación y evolución geológica de la cuenca son de orientación Az 120°-130°N y Az 035°-040°N. Una de las correspondientes a este último sistema, denominada “Las Lagunas”, es de interés remarcar por la gran afectación que produce en la cuenca y porque es considerada sismo generadora. Los dos sistemas de estructuras han sufrido movimientos verticales diferenciales, configurando una morfología de bloques basculados hacia el SE. Estos sistemas y su neoactividad ejercen un importante control sobre la morfología y el diseño de la red de drenaje actual.

Geomorfológicamente, se distinguen tres asociaciones con características propias (figura 2). La asociación “*Ambiente periserrano con paleorrasgos fluviales*” se caracteriza por una intensa actividad fluvial, presentando numerosos paleorrasgos con distinto grado de preservación, cubiertos por un manto eólico más moderno. Se observan sedimentos psamíticos y psefíticos en paleocanales, y psamíticos y pelíticos en interfluvios. Los suelos son Haplustols típicos y en los bajos más importantes Argiustols. La asociación “*Planicie eólica*” es una extensa planicie con una importante cubierta eólica de materiales arenosos finos-limosos que cubre los rasgos y depósitos más antiguos, con presencia de numerosos médanos longitudinales. Se observan, además, muy localmente, rasgos de erosión eólica e hídrica, y en el sector sudoriental, la faja fluvial actual del arroyo. Los suelos son Haplustols típicos de escaso desarrollo. La asociación “*Faja fluvial del arroyo Los Jagüeles*” incluye la traza actual y al área de derrames, está controlada en parte por



las estructuras del área y se encuentra reinstalada en un paleocauce importante de la antigua red de drenaje, aunque en el tramo final se trata de un canal de carácter antrópico. Los suelos desarrollados son Entisols y Haplustols típicos. Los procesos geomorfológicos dominantes en toda la cuenca son la erosión eólica y la hídrica, los cuales quedan evidenciados por la presencia de algunos médanos activos y cárcavas en predios y red vial. Hacia cuenca baja predominan, además, los procesos de derrames.

CLIMA

El clima es de tipo mesotermal subhúmedo. La precipitación media anual es de 793 mm, con una estacionalidad muy manifiesta, concentrándose el 85,3% del total anual en primavera-verano y el 14,7% en otoño-invierno. La evapotranspiración real media anual es de 711 mm, lo que produce un exceso de 82 mm. El análisis detallado del balance hídrico seriado indica que en los meses de enero a marzo y de noviembre a diciembre se produce, además de escurrimiento superficial en las lluvias más intensas (120 mm/h), la posibilidad de recarga del acuífero. Los registros históricos permiten corroborar que, durante los períodos más húmedos, se producen los mayores procesos de erosión hídrica en la zona. Esta evidencia permite confirmar que el aspecto climático se suma a la actividad neotectónica y antrópica como condicionante en la evolución del relieve.

HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

La red de drenaje es de escaso desarrollo, presenta un único colector, el arroyo Los Jagüeles, controlado estructuralmente, de régimen permanente y carácter torrencial, registrándose bajos caudales durante todo el año ($0,12 \text{ m}^3/\text{seg}$), y muy altos ($70 \text{ m}^3/\text{seg}$) durante las tormentas de gran intensidad, lo que excede su capacidad normal de desagüe, provocando erosión y desbordes. Sin embargo, si se analizan los bajos topográficos que conducen agua durante las tormentas se obtiene una red bien jerarquizada, de orden 5, con alta potencialidad de retroceso y de bifurcación del curso colector, debido a las características hidrometeorológicas, geomorfológicas y tectónicas de la zona. El arroyo nace por afloramiento de la freática en un bajo estructural ubicado en el área central de la cuenca, circula con dirección NW-SE hasta su antigua área de derrames, al SE de la localidad de Malena y desde aquí, es conducido artificialmente hasta su desembocadura en el arroyo Del Gato. El agua es dulce y bicarbonatada sódica, presentando una evolución geoquímica normal en la dirección de su recorrido.

HIDROGEOLOGÍA

HIDROLITOLOGÍA

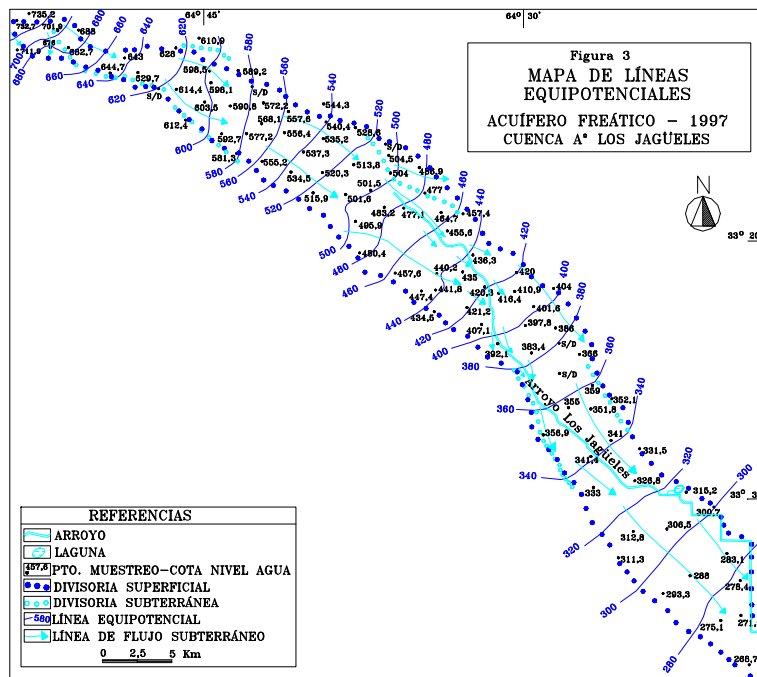
El acuífero freático, compuesto por materiales de granulometría muy variada vinculadas principalmente a las formas y procesos acaecidos durante el Pleistoceno superior-Holoceno, presenta tres características hidrolitológicas diferentes vinculadas a las asociaciones geomorfológicas descritas. Un sector en donde predominan granulometrías de medias a gruesas (arenas finas, medias, gruesas, y gravas), asociado al *“Ambiente periserrano con paleorrasgos fluviales”* y a la faja fluvial actual del arroyo hasta donde comienza a ser canalizado, en donde el acuífero es heterogéneo y anisótropo, y en el que las facies más permeables están representadas por los paleocauces. Otro sector, asociado a la zona NE de la *“Planicie eólica”* y a las áreas afectadas por los derrames del arroyo, que presenta granulometrías medias (limos con menor porcentaje de arenas finas, medias, gruesas y limos cementados (calcretos)), en donde se interpreta una mayor homogeneidad del acuífero, estando más localizadas las facies más gruesas. Finalmente el sector que presenta sedimentos de granulometrías finas a medias (limos y arenas finas, y limos cementados (calcretos)), que corresponde a un ámbito del acuífero más homogéneo e isótropo, el cual comprende la zona SW de la *“Planicie eólica”* y al área afectada por las inundaciones del arroyo.

En cuenca alta el basamento cristalino actúa como hidroapoyo del acuífero freático, mientras que en toda la cuenca media y baja, el piso estaría conformado por una capa impermeable, ubicada a una profundidad promedio de 100 m, compuesta por arcillas.

Las captaciones censadas en la zona tienen todas molino instalado, por lo tanto los caudales de servicio son muy bajos (1.500 - 3.000 l/h). En todos los casos la profundidad de captación se encuentra entre 6 y 15 m por debajo del nivel estático. Sin embargo, se tienen datos de altos caudales de servicio (de hasta 100.000 l/h) en perforaciones de mayor porte, realizadas en zonas de paleocanales de gran espesor (Las Vertientes), utilizadas para consumo humano y, en cuenca media y baja, para riego.

HIDRODINÁMICA

La dirección de flujo es prácticamente W-E, en cuenca alta, y cambia a NW-SE hacia cuenca media y baja. La morfología de la capa es radial con gradientes hidráulicos del 1,6% y divisorias de aguas bien definidas coincidentes en tramos con las divisorias superficiales, en cuenca alta y media; y casi plana con gradientes de 0,5% y divisorias muy poco notorias, en cuenca baja. Para estas situaciones hidrodinámicas diferentes, el condicionante más importante es estructural. El área neta de recarga regional del acuífero es el área periserrana, aunque toda la cuenca se recarga del agua de lluvia que se infiltra. El área actual de nacientes del arroyo es zona de descarga, notándose una convergencia de filetes de flujo subterráneos hacia el mismo. El tramo medio se comporta, en su margen derecha, como influente a la freática, con filetes de flujo divergentes, mientras que su margen izquierda es efluente con filetes que convergen hacia él. El tramo final, totalmente antrópico, mantiene una relación de indiferencia con la freática (figura 3).



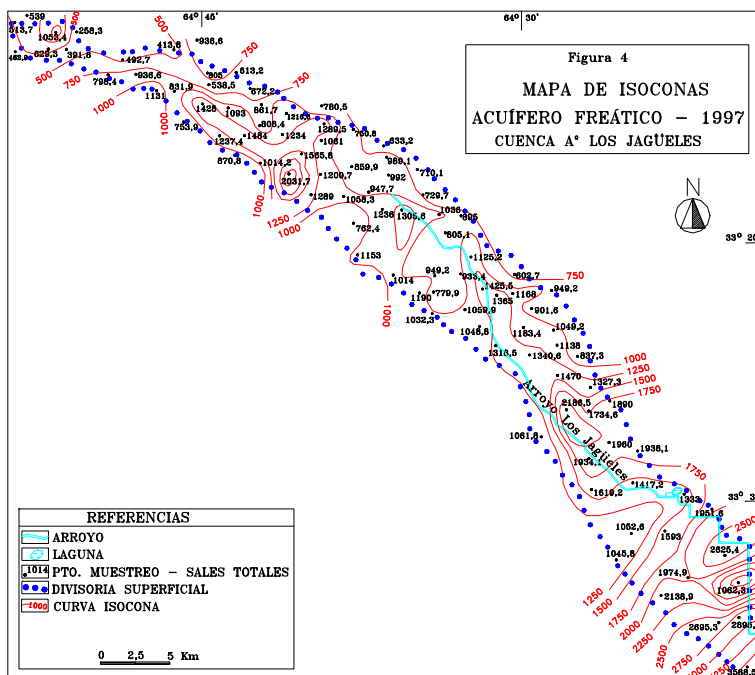
HIDROGEOQUÍMICA

El contenido en sales disueltas totales del acuífero (figura 4) aumenta, en general, en dirección del flujo subterráneo, NW-SE. Los tenores determinados varían de 250 mg/l a 3.500 mg/l, datos que permiten inferir que el trayecto recorrido es uno de los condicionantes más importantes de la salinidad, a lo que se suman las diferentes litologías descritas para las distintas unidades hidrolíticas y las formas del relieve, ambas condicionadas por las estructuras del área. Existen variaciones o anomalías locales sobre la tendencia regional en la evolución del agua del acuífero, lo cual se observa en tres sectores. Uno de ellos, ubicado en cuenca alta, en el sector más bajo de la depresión tectónica ubicada al pie de la escarpa occidental de la falla “Las Lagunas”, en el que se determinaron contenidos salinos del orden del doble (2.032 mg/l) que el de la tendencia regional para ese mismo sector (1.000 mg/l). Un segundo sector, ubicado en cuenca media, entre Los Jagüeles y Malena, en donde los contenidos medidos (2.187 mg/l) también superan a los que le correspondería por su ubicación en la cuenca (1.500 mg/l). Finalmente, el tercer sector se ubica en cuenca baja, en el área de canalización del arroyo y a diferencia de los anteriores, presenta aguas con salinidades del orden de la mitad (1.062 mg/l) de lo que le correspondería por su ubicación (2.500 mg/l). Las muestras analizadas han sido clasificadas en función del contenido en sales, resultando el 90% del tipo dulce y el 10% restante del tipo salobre. Geoquímicamente, el 63% de las muestras son del tipo bicarbonatada sódica, las que se ubican principalmente en cuenca

alta y media, mientras que el 37% corresponde al tipo sulfatada y/o clorurada sódica, en cuenca baja. En cuanto a la dureza, el 31% son aguas blandas, el 37% algo duras, el 23% duras y el 9% restante muy duras. Con respecto al pH, se determinaron valores entre 7,06 y 8,47. Ejemplos de los análisis físico-químicos realizados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: EJEMPLOS DE RESULTADOS DE ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DE AGUAS.
Acuífero Libre. Cuenca arroyo Los Jagüeles. 1997

Nº	pH	S.D.T. [mg/l]	CO ₃ ⁼ [mg/l]	CO ₃ H ⁻ [mg/l]	SO ₄ ⁼ [mg/l]	Cl ⁻ [mg/l]	Na ⁺ [mg/l]	K ⁺ [mg/l]	Ca ⁺ [mg/l]	Mg ⁺ [mg/l]	As [mg/l]	F ⁻ [mg/l]	NO ₃ ⁼ [mg/l]
J6	8,38	391,8	4,9	230,0	29,1	6,4	81,4	5,9	8,8	3,9	0,02	1,4	20,0
J30	7,78	2031,7	0,0	465,0	669,0	268,7	534,4	23,4	29,6	14,2	0,1	2,3	25,0
J41	7,68	1058,3	0,0	425,0	190,1	120,9	238,6	19,2	27,2	10,2	0,1	2,0	25,0
J55	7,89	1425,5	0,0	780,0	201,6	41,1	366,5	12,2	8,8	6,1	0,4	8,8	0,0
J73	7,98	2186,5	0,0	557,5	733,8	234,0	554,1	10,6	40,0	22,2	0,3	4,1	30,0
J92	8,06	2695,3	0,0	620,0	711,5	520,0	682,5	21,7	56,8	39,8	0,1	3,0	40,0
J93	7,69	3588,5	0,0	787,5	806,2	837,1	969,7	28,9	68,8	47,8	0,2	2,4	40,0



CONSTITUYENTES QUÍMICOS MAYORITARIOS

Bicarbonato y Carbonato: Su presencia depende fuertemente de los valores de pH existentes. No son oxidables ni reducibles en aguas naturales, y suelen precipitar con mucha facilidad como CO₃Ca. Su presencia no produce problemas de toxicidad, su nocividad determina corrosividad o incrustabilidad de cañerías. El acuífero presenta aguas con contenidos en CO₃H⁻ que varían de 230 a 789 mg/l, observándose un incremento en las concentraciones hacia cuenca baja. Con respecto a CO₃⁼ sólo en 5 muestras se determinó su presencia y en muy bajas concentraciones debido a los pH presentes.

Sulfato: Forma sales de moderadas a muy solubles y precipita con mayor dificultad, particularmente cuando existe concentración por procesos de evaporación importantes. Su presencia puede producir propiedades laxantes. Además, si está presente en altos tenores puede resultar perjudicial para las plantas. En cuanto a las concentraciones en el acuífero, existe un aumento de SO_4^- en dirección del flujo de circulación regional NW-SE. Así, las concentraciones medidas se incrementan de 24 mg/l en cuenca alta, a 806 mg/l en cuenca baja. Sin embargo, se observan tres sectores, con contenidos diferentes al que le correspondería por la evolución geoquímica normal, coincidentes con los descritos anteriormente. En el sector de cuenca alta, correspondiente al bajo tectónico, los tenores de SO_4^- hallados (670 mg/l) triplican a los de su entorno (< 200 mg/l). En cuenca media, los tenores determinados (734 mg/l) también superan los valores esperados por su ubicación (< 400 mg/l). Finalmente, en cuenca baja, en áreas de contenido de SO_4^- superiores a 600 mg/l, se determinaron concentraciones de 54 mg/l.

Cloruro: Es muy estable en disolución y muy difícil de precipitar. Además, no se oxida ni reduce en aguas naturales. Es un ion esencial para la vida, comunicando sabor salado al agua cuando superan los 300 mg/l. En cantidades elevadas es perjudicial para las plantas y comunican corrosividad al agua. El acuífero presenta contenidos que varían entre 6 y 840 mg/l. En casi toda la cuenca los tenores son inferiores a 200 mg/l, observándose un aumento considerable del mismo en cuenca baja en donde se alcanzan concentraciones que superan los 800 mg/l. Cabe destacar la presencia de dos sectores importantes en donde se determinaron concentraciones anómalas. El sector que corresponde a la depresión tectónica, en donde se determinaron contenidos de hasta 270 mg/l en ámbito con tenores del orden de 100 mg/l y, el otro sector que corresponde a cuenca baja, área de derrames, en donde los contenidos medidos son inferiores a 100 mg/l en zonas con tenores superiores a 500 mg/l.

Sodio: Presenta solubilidad muy elevada y es muy difícil de precipitar. Se encuentra afectado fuertemente por el intercambio de bases. Su presencia en cantidades elevadas es perjudicial para las plantas ya que reduce la permeabilidad del suelo. Los tenores determinados en la cuenca varían de 80 a 970 mg/l predominando las concentraciones inferiores a 400 mg/l en cuenca alta y media. Se destacan como zonas de concentraciones anómalas, los tres sectores antes descritos. En el bajo tectónico de cuenca alta, se determinaron tenores del orden de 500 mg/l rodeado por valores del orden

de 200 mg/l. En cuenca media existen tenores de hasta 554 mg/l en zonas de 300 mg/l y en cuenca baja, en áreas del orden de 600 mg/l, se determinaron contenidos de 228 mg/l.

Calcio: Forma sales desde moderadamente solubles a muy solubles y es muy fácil de precipitar como CO_3Ca . Está muy asociado al CO_3H^- - CO_3^{2-} , pudiendo precipitar y disolver con facilidad ante cambios de pH o de presión parcial de CO_2 . Se encuentra afectado por el intercambio de bases. Se midieron en el acuífero, concentraciones entre 4 y 70 mg/l, predominando los contenidos inferiores a 30 mg/l. Se observan los tres sectores descriptos anteriormente como zonas anómalas de concentración por su ubicación en la cuenca. En cuenca alta se midieron tenores del orden de 36 mg/l en áreas de concentraciones inferiores a 20 mg/l. En cuenca media se determinaron tenores de 40 mg/l en zonas de 20 mg/l. Finalmente, en cuenca baja, en áreas de tenores superiores a 50 mg/l, se observan concentraciones inferiores a 30 mg/l.

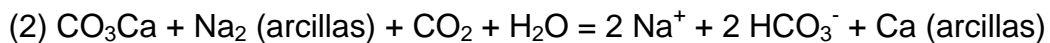
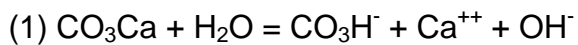
Magnesio: Forma sales moderadamente solubles a muy solubles, similares al Ca^{++} . Genera dureza en el agua y produce incrustaciones. Los valores medidos en la cuenca son, en general, inferiores a 20 mg/l. Sin embargo, en cuenca baja se observa un incremento del mismo que supera dicho tenor y alcanza tenores de hasta 64 mg/l, a excepción del sector de cuenca baja con concentraciones (13 mg/l) inferiores a las que le correspondería por su ubicación (40 mg/l).

Potasio: Presenta solubilidad muy elevada, pero se encuentra fuertemente afectado por el cambio de bases y es adsorbido de forma muy poco reversible por las arcillas en formación (paso de montmorillonita a illita) a diferencia del Na^+ , por lo que las aguas naturales tienen mucho menos K^+ que Na^+ . Este elemento no presenta problemas especiales en cuanto a su nocividad o toxicidad a las concentraciones habituales. En el agua del acuífero se determinaron tenores entre 6 y 29 mg/l. Cabe destacar que en aproximadamente toda la cuenca las concentraciones medidas son inferiores a 20 mg/l, sin embargo se determinaron tenores superiores en el bajo tectónico y en cuenca baja.

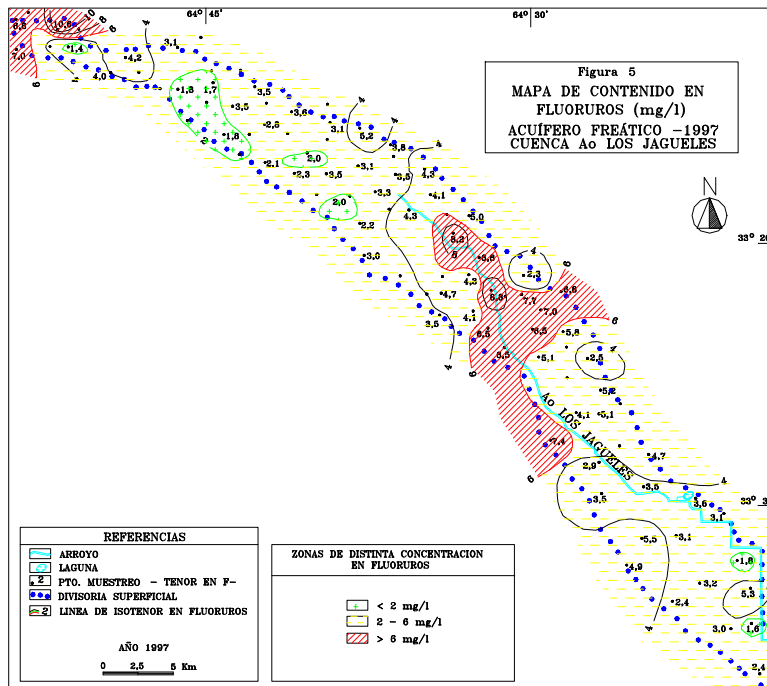
CONSTITUYENTES QUÍMICOS MINORITARIOS

Se prestó especial interés a F^- y As, por ser oligoelementos muy abundantes y característicos de la llanura Chaco-Pampeana, y a NO_3^- , por ser un excelente indicador de contaminación antrópica debido al uso de agroquímicos (fertilizantes) y otras fuentes.

Flúor: Los altos tenores de F^- producen como efecto principal la fluorosis dental. El límite admitido para consumo humano por el organismo que controla y regula el agua en la provincia de Córdoba, Argentina, ex DIPAS (Dirección Provincial del Agua), actual DAS (Dirección de Aguas y Saneamiento) es de 1,3 mg/l para la temperatura media ambiente de la zona (16°C). En la cuenca, se determinaron concentraciones, entre 1,4 y 10,6 mg/l, que superan el límite establecido (figura 5). Según Zack (1980), el F^- puede quedar liberado al acuífero por intercambio aniónico en minerales que ceden F^- y retienen OH^- o Cl^- . Se cree como probable fuente de F^- en este proceso a la fluorapatita ($Ca_5(PO_4)_3F$), mineral que si bien es insoluble, puede intercambiar iones (Zack, 1980). Otra fuente probable es el vidrio volcánico (Nicolli et al., 1997). La disolución del CO_3Ca libera OH^- y CO_3H^- (1) y permite el intercambio Na^+-Ca^{++} en arcillas (2):



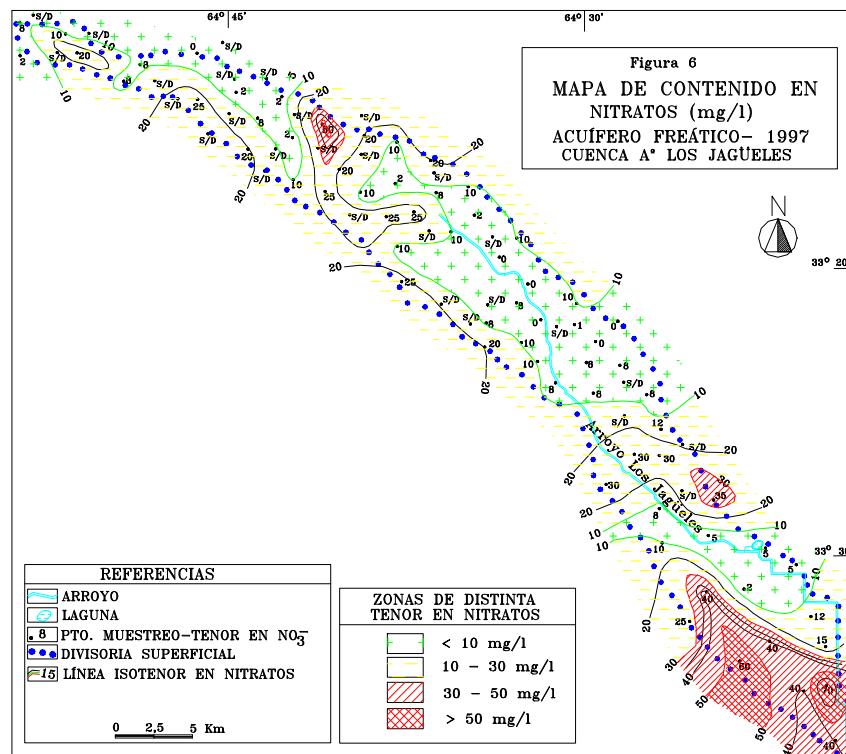
Esto, sustenta la hipótesis de lo que ocurre en la cuenca, ya que predomina en el acuífero aguas de tipo bicarbonatadas sódicas, con alto porcentaje en F^- . Además, en los sectores con mayores concentraciones de F^- , se observan los mayores tenores en CO_3H^- , altos niveles en Na^+ y las menores concentraciones en Ca^{++} . Se observa también que los sectores que presentan los mayores tenores en F^- se correlacionan con el predominio de materiales de granulometrías finas (loésicos) que, como indican estudios realizados en la región (Blarasin, 1984), poseen altos porcentajes de fluorapatita y se encuentran parcialmente cementados con CO_3Ca (calcretos). Cabe destacar que en algunos sectores no se observa la correspondencia planteada debido posiblemente a la heterogeneidad de los materiales presentes. Tampoco se pueden establecer vinculaciones importantes entre pH y F^- . Por otra parte, tampoco se observa una correlación importante entre F^- y profundidades del nivel freático, ya que si bien los sectores con mayor contenido en F^- (6-9 mg/l) corresponden a profundidades intermedias (10 a 15 m), esto sólo se da en cuenca media y no en el resto de la cuenca. Finalmente, cabe aclarar que, sólo en cuenca media, existe una importante correlación positiva entre los oligoelementos: F^- y As.



Arsénico: La ingesta diaria y continua de dosis elevadas de $As^{+3/+5}$ producen como efecto principal en el hombre el arsenicismo crónico. En Argentina, se trata de una enfermedad endémica conocida como HACRE (Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico), y se manifiesta por espesamiento de la epidermis, úlceras en la boca, desórdenes de tracto intestinal, melanosis, cáncer arsenical. El límite establecido en Córdoba es de $100 \mu\text{g/l}$ y para la OMS (Organización Mundial de la Salud) es de $10 \mu\text{g/l}$. En el caso del agua destinada a ganadería, la presencia en más de $300 \mu\text{g/l}$ de $As^{+3/+5}$, puede resultar tóxica, y está asociada a pobre crecimiento, caída de pelo y problemas dérmicos. Las especies químicas más importantes en aguas naturales son As , H_3AsO_3 , $H_2AsO_4^-$, $HAsO_4^{2-}$, altamente solubles y estables bajo un amplio rango de Eh y pH. Las formas As^{+3} (arsenitos) son más comunes bajo condiciones reductoras y en un amplio rango de pH, mientras que As^{+5} (arseniato) en ambientes oxidantes y para los mismos pH. Sin embargo, bajo condiciones reductoras y en presencia de S^{2-} , la movilidad del As se reduce por precipitación. Además, la movilidad del As está fuertemente restringida por sorción sobre $Fe(OH)_3$ y $Al(OH)_3$, siendo la forma As^{+5} más fuertemente sorbida que As^{+3} . Esto produce, potencialmente, mucho más concentración de As disuelto bajo condiciones reductoras, no solamente por la menor afinidad de sorción, sino también, porque el $Fe(OH)_3$ es más soluble a bajos Eh (Smedley, 1996). Es decir que, como As aparece a diversos Eh, su presencia depende principalmente de la disponibilidad de As de los materiales del acuífero o de la introducción del mismo a partir de fuentes contaminantes

(Smedley, 1996). En la cuenca, el 99 % de las muestras analizadas presenta As, en tenores entre 20 a 500 $\mu\text{g/l}$. Se considera para la zona que el As es un contaminante natural y de acuerdo con Nicolli et al. (1997) procedería del vidrio volcánico, componente principal de los sedimentos loésicos de la zona (Blarasin, 1984). En la cuenca, aquellos sectores en donde se determinaron los mayores tenores de As, superiores a 100 $\mu\text{g/l}$, se corresponden con las áreas en donde predominan los materiales de granulometría más fina, loésicos, lo que corrobora la hipótesis planteada. Además, si bien en general, se asocia a condiciones reductoras, en la cuenca está presente en condiciones oxidantes.

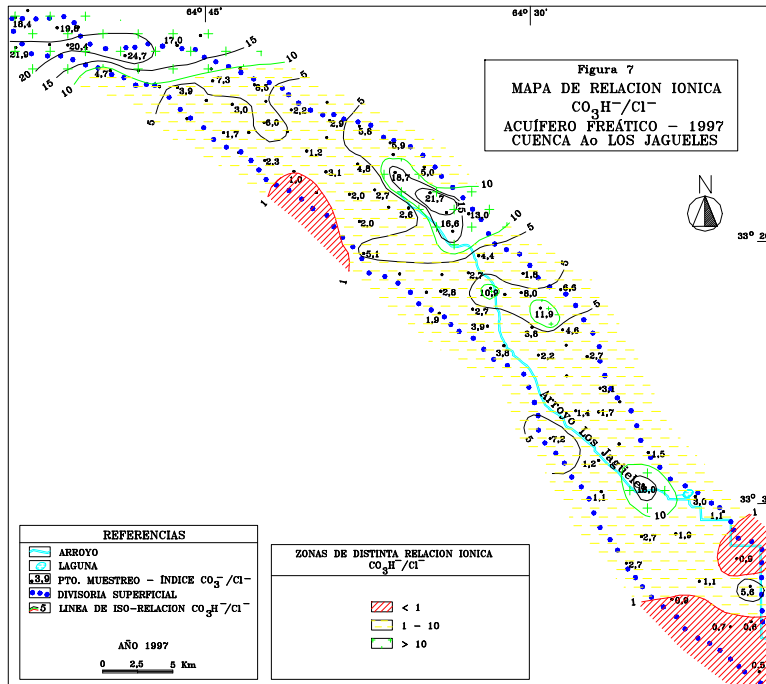
Nitrato: Es el indicador más generalizado de contaminación debido a su alta movilidad y estabilidad en aguas subterráneas. El límite máximo admitido para consumo humano es de 50 mg/l. Los efectos más importantes que produce en el hombre son metahemoglobinemia en niños, cáncer de esófago y gástrico, y diabetes. En la cuenca, el 7,5 % de las muestras no presenta NO_3^- , el 68,6 % tiene tenores entre 1 y 20 mg/l, el 20,9% tiene entre 21 y 50 mg/l y el 3 % posee cantidades superiores a 50 mg/l, llegando el tenor máximo, para la época de relevamiento, a 70 mg/l (figura 6). No se observa correlación importante entre tenores de NO_3^- y edad de las captaciones, debido probablemente a la existencia de múltiples factores que interfieren en la relación y varían dentro de la cuenca (cantidad de agua caída e infiltrada; textura, granulometría y espesor de la zona no saturada; profundidad, edad, zona filtrante y caudales de extracción de las captaciones; diversidad de fuentes contaminantes; etc.). Respecto a la relación con la profundidad del nivel freático, se determinó que en cuenca baja, a profundidades entre 10 y 20 m, se dan los mayores tenores de NO_3^- . Sin embargo, no se observa una relación definida para el resto de la cuenca debido posiblemente a la desigualdad de fuentes contaminantes, a las litologías de zonas no saturadas, al tipo de suelos, a tasas de infiltración, etc. Tampoco se puede arribar a conclusiones contundentes respecto a una única fuente contaminante. Se observa relación de correspondencia entre los sectores con tenores de más de 20 mg/l de NO_3^- y algunas áreas de uso agrícola-ganadero con fuerte uso de agroquímicos, particularmente fertilizantes, en cuenca alta; y con el sector de cuenca baja, en donde existen numerosos tambos en actividad y en el que, algunas superficies sometidas a uso agrícola, se encuentran además bajo riego, lo que potencia la llegada de NO_3^- al acuífero.



ÍNDICES HIDROGEOQUÍMICOS DE INTERÉS

CO₃H/Cl: Es de utilidad para interpretar la evolución geoquímica del acuífero. Los índices obtenidos en el área neta de recarga, superan el valor de 10, lo que indica aguas muy jóvenes en su evolución (principalmente bicarbonatadas). En las áreas de conducción, se determinaron índices entre 1 y 10, lo que indica aguas bicarbonatadas pero más evolucionadas debido a una mayor concentración de sales (figura 7). Aquí, se destacan cuatro sectores con índices superiores a 10, los que corresponden a áreas preferenciales de recarga (sectores medanosos y áreas de aportes de agua desde el arroyo) en donde se produciría una dilución de las concentraciones por el aporte de aguas más dulces vinculadas a la fase atmosférica y superficial del ciclo hidrológico. Finalmente, cabe mencionar un sector con índice inferior a 1, que corresponde al bajo tectónico en donde se produciría una mayor concentración de sales por evolución del agua de infiltración en el perfil del suelo que se encuentra muy bien desarrollado (principalmente Argiustols), y por los materiales del subsuelo, sedimentos de granulometrías más finas. En la parte inferior de cuenca baja, los índices hallados son inferiores a 1, lo que corresponde a aguas más evolucionadas y de tipo sulfatadas-cloruradas. En general, se observa que los índices obtenidos en el acuífero disminuyen en dirección del flujo de circulación regional NW-SE desde 24,7, en áreas netas de recarga, a 0,5 en los sectores más bajos del área de conducción, lo que implica un aumento de concentración de sales

en dirección del flujo de circulación regional debido a un largo tiempo de contacto del agua con los sedimentos por los que circula (evolución normal del agua). A pesar de la evolución sufrida y de algunos sectores localizados con aguas sulfatadas-cloruradas, casi toda la cuenca puede caracterizarse por la presencia de aguas no muy maduras con índices $\text{CO}_3\text{H}^-/\text{Cl}^-$ superiores a 1.

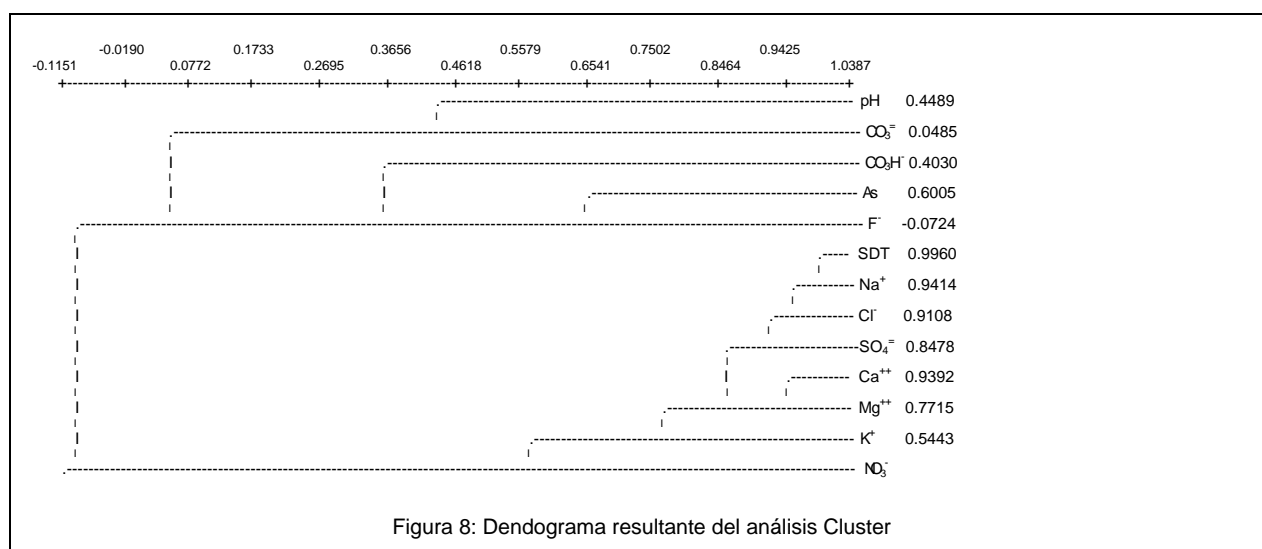


$\text{Na}^+/\text{Ca}^{++}$: Es de utilidad para hacer inferencias sobre la posibilidad de intercambio catiónico. Un aumento en este índice indica una mayor liberación de Na^+ al medio y una mayor retención de Ca en los materiales del terreno. En toda la cuenca se obtuvieron valores superiores a 1, por lo que se trata en general de aguas sódicas con bajos contenidos en calcio, esto sugiere una fuerte retención de este último en los materiales del terreno y una gran liberación de Na^+ al medio acuoso. Los índices obtenidos varían entre 5 y 52, predominando en prácticamente toda la cuenca los valores inferiores a 20, a excepción del sector superior de cuenca alta, en donde se observan índices de hasta 46 y el sector de cuenca media en donde se alcanzan valores de hasta 52, lo que implica una mayor concentración de Na^+ en el agua. Esta amplia variedad en los índices obtenidos (más marcada en cuenca alta) se debe a la heterogeneidad de los materiales de la cuenca, los que producirían diversas posibilidades de intercambios de bases.

TRATAMIENTO MULTIVARIADO DE DATOS QUÍMICOS

Se aplicó tratamiento multivariado (cluster y factorial (componentes principales)) a los resultados físico-químicos de las muestras analizadas, de manera de validar el modelo hidrogeoquímico conceptual obtenido. Se trata de un conjunto de métodos estadísticos y matemáticos, que permiten analizar, describir e interpretar las observaciones multidimensionales, es decir, el material estadístico que proviene de la observación de más de una variable. Los datos analizados corresponden a 68 muestras y 13 variables: pH, SDT, $\text{CO}_3^{=}$, CO_3H^- , $\text{SO}_4^{=}$, Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , $\text{As}^{+3/+5}$, F^- y NO_3^- .

En primera instancia se realizó el tratamiento univariado de cada una de las series químicas, caracterizando la variación regional de las concentraciones iónicas expresadas por sus estadísticos, como así también sus leyes de distribución estadística.



Posteriormente, se efectuó el análisis multivariado entre variables (modo R), aplicando el método Cluster, que permite determinar agrupaciones (tipos, subtipos) a partir de la matriz de similitud resultante del conjunto de datos, y el método Factorial, que permite reemplazar las variables medidas por nuevas variables, no correlacionables entre sí, que son combinaciones lineales de las originales.

El dendrograma resultante del análisis Cluster (figura 8) entre variables permite visualizar la existencia de dos grupos hidroquímicos principales. El grupo 1 definido por un núcleo (SDT, Na^+), y las variables Cl^- y $\text{SO}_4^{=}$, y el núcleo (Ca^{++} , Mg^{++}) a los que se asocian las variables K^+ y NO_3^- . El grupo 2 definido por un núcleo (As , F^-), y la variable CO_3H^- y el núcleo (pH, $\text{CO}_3^{=}$).

En el análisis Factorial, se obtuvieron las componentes principales a partir de la matriz de correlación (figura 9) que mide el grado de dependencia lineal que existe entre variables, cualquiera sea su distribución.

	pH	SDT	CO ₃ ²⁻	CO ₃ H ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	As ^{3/5}	F ⁻	NO ₃ ⁻
pH	1.0000												
SDT	0.0359	1.0000											
CO ₃ ²⁻	0.4438	-0.2503	1.0000										
CO ₃ H ⁻	0.1427	0.7142	-0.2342	1.0000									
SO ₄ ²⁻	0.0074	0.8612	-0.2645	0.3722	1.0000								
Cl ⁻	-0.0049	0.9004	-0.2529	0.4489	0.9072	1.0000							
Na ⁺	0.0628	0.9942	-0.2307	0.7093	0.8664	0.8984	1.0000						
K ⁺	-0.0529	0.8194	-0.2581	0.4146	0.8368	0.8654	0.8106	1.0000					
Ca ⁺⁺	-0.2540	0.7033	-0.3519	0.2317	0.6977	0.7671	0.6459	0.7036	1.0000				
Mg ⁺⁺	-0.1085	0.7830	-0.2857	0.3567	0.7188	0.7781	0.7334	0.7270	0.8958	1.0000			
As	0.2295	-0.0831	-0.0125	0.3015	-0.1654	-0.1655	-0.0636	-0.2258	-0.3586	-0.3223	1.0000		
F ⁻	0.2548	-0.1407	0.0456	0.3485	-0.2959	-0.3391	-0.1037	-0.4307	-0.5801	-0.4624	0.6391	1.0000	
NO ₃ ⁻	0.1577	0.2583	0.0753	-0.0627	0.3163	0.3912	0.2272	0.3812	0.4527	0.4269	-0.2877	-0.4012	1.0000

Figura 9: Matriz de correlación entre variables

Los valores de correlación más altos se observan entre sólidos disueltos totales y iones mayoritarios, entre CO₃H⁻ y Na⁺, entre SO₄²⁻ y Cl⁻ y cationes mayoritarios, entre Cl⁻ y cationes mayoritarios, entre cationes mayoritarios y entre As y F⁻. Con frecuencia se interpreta a las correlaciones altas como resultado de un origen hidroquímico común, tal es el caso de la asociación As-F. Sin embargo, las demás asociaciones son el resultado de la evolución geoquímica normal del agua con la circulación.

A partir de la matriz de correlación se calcularon las componentes principales y se seleccionaron, para su interpretación, las tres primeras, por ser las que representan el 80,4 % de la varianza total y con el criterio de seleccionar aquellas que tienen valor propio (autovalores) mayores a 1 y que el porcentaje de varianza representada por cada componente sea mayor que el 10%.

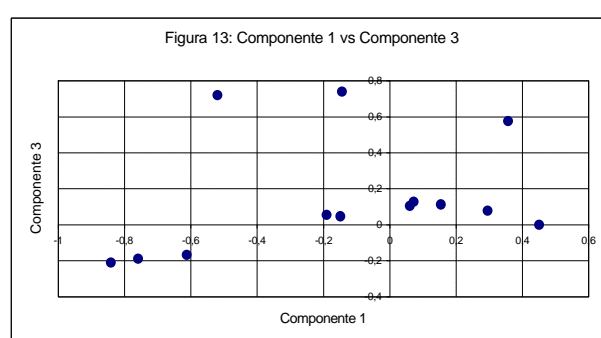
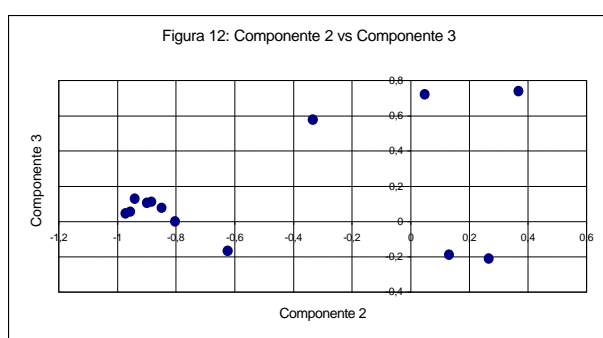
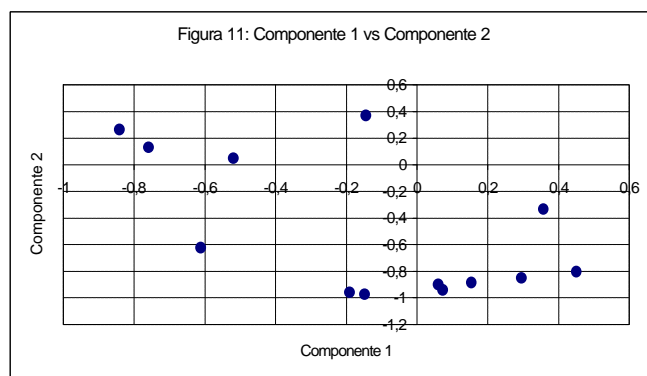
Se obtuvo una comunalidad (porcentaje de varianza representado de cada variable al retener los factores), en general, alta. Así, al retener tres componentes, la variable que tiene la menor comunalidad es el NO₃⁻, con un 57%. Para interpretar las componentes se calculó el porcentaje de reconstrucción de cada variable en cada una de ellas en base a los datos de la correlación componente-variable (figura 10). De esta manera se define a la componente 1 constituida por la asociación F⁻ y As, lo que representaría un origen químico común posiblemente debido a la mineralogía del loess pampeano; la componente 2 por la asociación SDT, Na⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, K⁺, Mg⁺⁺, Ca⁺⁺ y CO₃H⁻, que representaría al factor de mineralización de las aguas en función de su evolución geoquímica normal; y la componente 3 por la asociación CO₃²⁻, pH y NO₃⁻, que comprende al factor de contaminación antrópica.

	C1	C2	C3
PH	-0.5192	0.0474	0.7208
SDT	-0.1487	-0.9726	0.0460
CO ₃ ²⁻	-0.1444	0.3682	0.7389
CO ₃ H ⁻	-0.6121	-0.6235	-0.1665
SO ₄ ²⁻	0.0603	-0.8999	0.1054
Cl ⁻	0.0727	-0.9416	0.1287
Na ⁺	-0.1908	-0.9568	0.0550
K ⁺	0.1540	-0.8847	0.1122
Ca ⁺⁺	0.4506	-0.8036	-0.0003
Mg ⁺⁺	0.2949	-0.8498	0.0784
As	-0.7593	0.1306	-0.1887
F ⁻	-0.8411	0.2659	-0.2100
NO ₃ ⁻	0.3572	-0.3338	0.5773

Figura 10: Matriz de correlación entre las componentes principales elegidas y las variables

Se realizaron los gráficos entre las componentes seleccionadas (figuras 11, 12 y 13) con el fin de visualizar la distribución y asociación de variables. Los gráficos muestran los tres grupos hidroquímicos, lo que da resultados compatibles con el análisis cluster, el de variables principales, el de variables

minoritarias As y F⁻ (contaminantes naturales) y el del contaminante antrópico NO₃⁻ asociado al pH y al CO₃⁼, lo cual se corresponde con el particular origen de este ion.



DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

MODELO CONCEPTUAL DEL FUNCIONAMIENTO HIDROGEOQUÍMICO DE LA CUENCA

La interpretación conjunta de la geología, hidrolitología, hidrodinámica y físico-química obtenida en el acuífero freático permite elaborar el modelo sobre el funcionamiento hidrogeoquímico en la cuenca. Se trata, en general, de un acuífero con aguas jóvenes de tipo bicarbonatadas sódicas, en cuenca alta y media, y con aguas moderadamente maduras de tipo sulfatadas y/o cloruradas sódicas, en cuenca baja. Por lo tanto el acuífero ha sufrido una evolución geoquímica normal dada por un aumento en las concentraciones de sales y un cambio en los facies aniónicas en dirección del flujo de circulación NW-SE, siendo el condicionante más importante el trayecto recorrido. Sin embargo, sobre esta tendencia general de la calidad del agua se observan algunos sectores anómalos si se tiene en cuenta su ubicación en la cuenca, debido a condicionantes locales de tipo geológico-geomorfológicos que luego se detallan.

Las reacciones más importantes que determinan la calidad físico-química del agua de la cuenca son, principalmente, la disolución de sales, en función del producto de solubilidad (Kps) para los distintos elementos presentes, y las reacciones de óxido-

reducción, para NO_3^- y As. Sin embargo, sumados a estos mecanismos de ganancia en sales se producen las reacciones de intercambio iónico (Na^+ - Ca^{++} y OH^- - F^-), que también definen la calidad, lo que depende principalmente de la capacidad de intercambio de los materiales presentes.

En el modelo descrito cabe destacar la presencia de F^- y As, elementos muy solubles cuyas movibilidades se encuentran fuertemente afectadas por mecanismos de intercambio aniónico (F^-) y condiciones redox (As). El condicionante más importante en la presencia de estos oligoelementos está dado principalmente por la mineralogía de los sedimentos del área (fluorapatita, vidrio volcánico). Con respecto al NO_3^- , es importante remarcar que es un elemento fuertemente condicionado por las características redox del medio y que, raramente, aparece en forma natural en el agua. En la cuenca el NO_3^- es un contaminante de origen antrópico, cuya presencia se debe, exclusivamente, a la oxidación de sustancias nitrogenadas derivadas de diversas fuentes contaminantes, que permiten su llegada al acuífero.

Respecto a las citadas áreas anómalas se infiere que, para el sector ubicado en cuenca alta, en la zona del bajo tectónico limitado por la falla "Las Lagunas", los aumentos en salinidad, Cl^- , SO_4^{--} , Na^+ , K^+ y Ca^{++} se deberían a la presencia de suelos muy bien desarrollados (Argiustols) y de materiales de granulometría más fina en el perfil de la zona no saturada, lo que produciría una disminución en las velocidades de infiltración del agua, permitiendo un mayor ataque químico a los sedimentos presentes. Es decir que los factores condicionantes de esta anomalía son el relieve, la litología de zona no saturada y las características pedológicas. Para el sector anómalo ubicado en cuenca media se infiere, también, un condicionante de tipo litológico, debido a la presencia de materiales de granulometrías más finas, lo que produce una disminución de las velocidades de circulación lateral del agua en el propio acuífero, que permitiría una mayor ganancia en sales disueltas totales y de algunos elementos mayoritarios tales como Cl^- , SO_4^{--} , etc. Finalmente, para el sector ubicado en cuenca baja, la anomalía corresponde a un solo pozo cuyo dato de profundidad de extracción se desconoce, por lo que se descarta como elemento suficiente para obtener conclusiones.

Los resultados obtenidos en el análisis multivariado muestran una estructura de asociación de variables que permiten corroborar y validar el modelo hidrogeoquímico establecido.

BIBLIOGRAFÍA

- Thorntwaite C., and J. R. Matter**, 1948. The water balance. Publ. in Climatol., Drexel Inst. of Techn., 8: 1-104.
- Blarasin, M.**, 1984. Hidrología subterránea de la zona de Laguna Oscura. Dpto. Río Cuarto, prov. de Cba. Trabajo Final de Licenciatura UNRC.
- Zack, A.**, 1980. Geochemistry of fluoride in the Black Creek aquifer system of horry and Georgetown counties, South Carolina and its Physiological implications. Geological Survey water-supply paper 2067.
- Smedley, P.**, 1996. Arsenic in rural groundwater in Ghana. Journal of African Earth Sciences. Vol. 22, No. 4, pp. 459-470.
- Nicolli, H., P. Smedley y J. Tullio**, 1997. Aguas subterráneas con altos contenidos de flúor, arsénico y otros oligoelementos en el Norte de la prov. de La Pampa: estudio preliminar. Congreso Internacional del Agua. Bs. As.