

Impacto de la urbanización sobre las características hidroquímicas del acuífero libre

Comparación estadística con el entorno rural, Coronel Moldes, Argentina

Groundwater impact on urban area and statistical comparison with surrounding rural area, Coronel Moldes, Argentina

María Laura Gomez ¹

Gabriela Damilano ²

Originales: Recepción: 03/06/2009 - Aceptación: 02/12/2009

RESUMEN

El objetivo consistió en evaluar el impacto que la actividad urbana ocasiona sobre la calidad del agua subterránea del área de Coronel Moldes. Se realizaron consideraciones geoquímicas en relación con el cálculo de línea de base hidroquímica, comparando con muestras extraídas del mismo acuífero en el entorno rural. Los indicadores de contaminación entre las distintas zonas rural y urbana (evaluados con la prueba t para muestras independientes y prueba no paramétrica de Mann-Whitney), indicaron que los valores de las componentes resultaban diferentes. Conductividad eléctrica, bicarbonatos, cloruros y nitratos mostraron en el área urbana valores medios superiores a aquellos del entorno rural que en general corresponden a los valores representativos del fondo natural regional de la calidad del agua subterránea. Se detectó en el área urbana un aumento en la dureza y Cl/HCO_3^- con importante contaminación microbiológica. Para evaluar el fondo regional se ajustaron los datos de los componentes iónicos analizados a las distribuciones teóricas (Normal, Laplace y f_1).

SUMMARY

The main objective includes evaluate the impact of urban activities on groundwater quality. Geochemical considerations have been taken on baseline calculate, comparing samples taken from the same aquifer in rural area. The groundwater indicators show different components values in both zones (using test-t for independents samples and non parametric prove of Mann-Whitney). Electrical conductivity, bicarbonates, chloride and nitrate show higher value in urban area than ones measured in rural area which are representatives of groundwater baseline. Groundwater in urban area shows higher hardness, Cl/HCO_3^- and microbiologic contaminations. To evaluate the baseline for different ionic components, the indicators were adjusted to theoretic distribution (Normal, Laplace and f_1). It was found that the empirical distribution approached much better to f_1 than to the other two, determining that the baseline for each ion is best estimated with m^* (linear combinations of the mean and the median).

-
- 1 Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) CONICET. Av. Ruiz Leal s/n, Parque General San Martín. (5500) Mendoza, Argentina. lgomez@mendoza-conicet.gov.ar
 - 2 Facultad de Ciencias Humanas. Universidad Nacional de Río Cuarto. Ruta Nac. 36 - km 601. Río Cuarto, Córdoba, Argentina. X5804BYA.

Se encontró que la distribución empírica presentaba un mejor acercamiento a f_1 que a las otras dos, determinándose así como valor característico del fondo natural para cada ion, el estimador del parámetro de localización m^* (combinación lineal entre la media y la mediana).

Palabras clave

agua subterránea • geoindicadores • fondo natural • Pampa argentina

Keywords

groundwater • geoindicators • baseline • Chacopampean plain argentine

INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional en zonas urbanas ha aumentado notoriamente en los países subdesarrollados, de forma explosiva y muchas veces carente de estudio y protección de los recursos hídricos existentes. En este marco se hace necesario conocer y monitorear los recursos hídricos a fin de mejorar la gestión de problemas ambientales. El recurso hídrico subterráneo recibe especial atención dado que constituye el 97% de las reservas mundiales de agua dulce disponibles para el hombre (18).

El registro continuo de parámetros de calidad representativos de los sistemas geohidrológicos permite establecer umbrales o "fondo natural" de la calidad del agua subterránea (14) con el objeto de detectar tendencias evolutivas y diferenciar aquellos de origen natural (que son parte del fondo) de las debidas a contaminación producida por el hombre.

Así como en numerosas partes del mundo, en Argentina se ha observado un aumento progresivo y gradual de los niveles freáticos en las últimas décadas debido a la tendencia creciente de las magnitudes de los excedentes hídricos. Estudios en el Sur de la provincia de Córdoba (2) demostraron que el almacenamiento de tales excedentes en estos sistemas de llanura se traduce en importante aumento de los niveles freáticos. En 2004 Coronel Moldes sufrió un aumento progresivo del nivel freático en toda la ciudad. Ésta carece de sistema cloacal, por lo que numerosos sistemas de saneamiento *in situ* ("pozos domiciliarios") dejaron de funcionar por saturación, varios de ellos sufrieron derrumbes debido a que las paredes no estaban revestidas, con los consiguientes hundimientos en patios y jardines (figura 1, pág. 3). Junto a esta problemática se desarrolló aquella vinculada a la contaminación del acuífero libre como consecuencia de los efluentes derivados de los sistemas de saneamiento *in situ*. Numerosos trabajos (1, 10, 17, entre otros) han desarrollado los aspectos geoquímicos asociados a este tipo de escenarios de contaminación.

El presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar, mediante indicadores representativos, el impacto que la actividad urbana, específicamente la presencia de sistemas de saneamiento *in situ*, ocasiona sobre la calidad del agua del acuífero freático, como así también realizar consideraciones geoquímicas en relación con el cálculo de la línea de base hidroquímica del agua subterránea. Se realizó para ello comparaciones con muestras del entorno rural extraídas del mismo acuífero. El área de estudio (figura 2, pág. 3), localizada al Sur de la provincia de Córdoba, comprende 2,3 km² del ejido urbano y 440 km² del entorno rural.

Impacto de la urbanización sobre las características hidroquímicas del acuífero libre

RÍO CUARTO

El ascenso de napas hunde al sur cordobés

En Coronel Moldes se derrumban pozos negros y veredas. Y los sótanos se llenan de agua. Las cloacas son la solución.

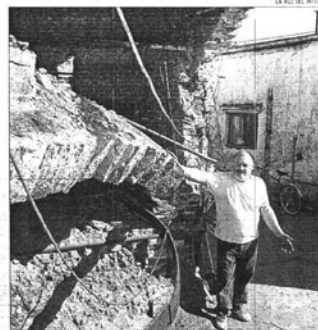
CORRESPONSALÍA

Coronel Moldes. "La situación es de crisis y de riesgo sanitario. En los últimos 10 meses se derrumbaron más de 40 pozos negros. Hay veredas hundidas, la gente camina atemorizada por las calles, tenemos medio pueblo con el agua a 50 centímetros de la superficie", testimonia el intendente de Coronel Moldes, Miguel Ángel Savini.

El generalizado ascenso de napas freáticas en el sur provincial tiene su origen en el aumento de las precipitaciones registrado en los últimos cinco años y la falta de servicio de cloacas en la mayoría de los pueblos. La problemática se nota más en las localidades erigidas en zonas bajas, las mismas que suelen tener problemas de inundaciones, porque actúan como áreas de descarga regional (reciben tanto el agua de escurri-



En el sur de Coronel Moldes los pozos colapsan y el agua servida sale a la cuneta.



En la panadería de Alfredo Moiso se derrumbó el horno de pan.

Figura 1. Evidencias de ascenso del nivel freático en Coronel Moldes (Fuente: Diario Puntal de Río Cuarto. Abril 2004).

Figure 1. Groundwater rise in Coronel Moldes (Source: Puntal newspaper, April 2004).

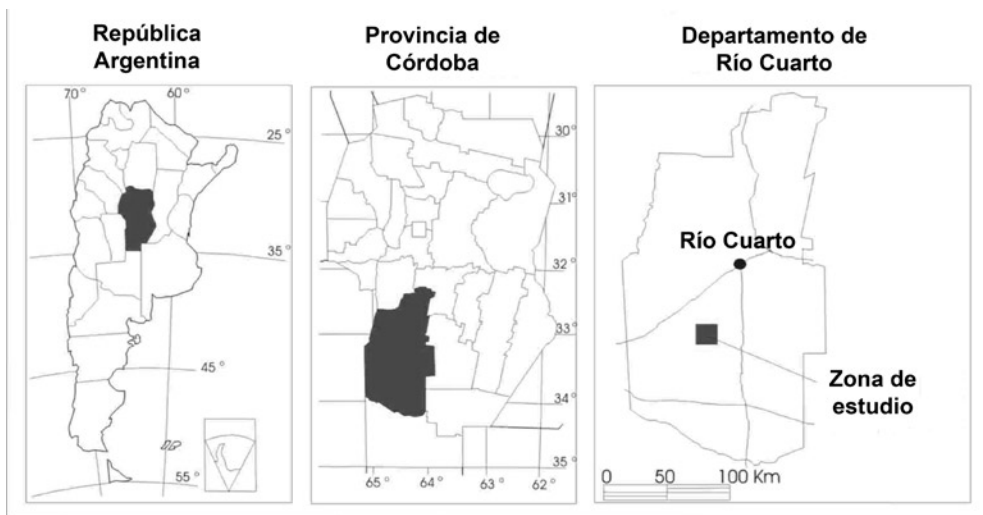


Figura 2. Mapa de ubicación del área de estudio.

Figure 2. Map of the study area.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para alcanzar el objetivo propuesto se realizó el relevamiento geológico-geomorfológico en el entorno rural de Coronel Moldes en un área de 440 km², sobre la base de la carta topográfica escala 1:50.000 del Instituto Geográfico Militar. Se recogieron datos de lluvia y temperatura procedentes de distintas fuentes (particulares y entes

oficiales) a partir de los cuales se elaboró el balance hídrico seriado, utilizando el software Pdimes (16). El estudio en el área urbana se realizó sobre la base planialtimétrica municipal a escala 1:2.500 y abarcó un área de 2,3 km² en el ámbito de la ciudad de Coronel Moldes.

Para el estudio hidrogeológico del área rural se evaluaron 32 pozos preexistentes, todos pertenecientes a pobladores rurales que captan el agua de los primeros 15-20 m del acuífero, con el objeto de realizar comparaciones, adoptando este escenario como referente de valores de fondo natural (14), dado que se trata de un ambiente geológicamente idéntico aunque no urbanizado.

Para el estudio hidrogeológico del sector urbano se recolectaron 19 muestras extraídas de perforaciones realizadas en la ciudad. Estas perforaciones, de 50 mm de diámetro, se realizaron con barreno y fueron entubadas con caños de PVC y filtro con el ranurado del mismo caño. Las perforaciones alcanzaron entre 3 y 6 m de profundidad, en las que se pudo observar las características litológicas y la profundidad del nivel freático en el área urbana.

El censo en distintos sitios abarcó el período julio 2004 - marzo 2005, en función de la problemática hidrogeológica planteada y de las posibilidades de muestreo. Las muestras fueron recolectadas en envases de plástico de 2 L y acondicionadas para su transporte al laboratorio, esto es, convenientemente refrigeradas y protegidas de la exposición solar.

Se realizaron análisis físico-químicos y microbiológicos, determinándose iones mayoritarios disueltos, algunos minoritarios y propiedades de interés. De este modo se determinaron HCO₃⁻, CO₃⁼, Cl⁻, SO₄⁻², Na⁺, K⁺, Ca⁺², Mg⁺², pH, F⁻, As_(Total), NO₃⁻, NO₂⁻, conductividad eléctrica, alcalinidad, dureza y microorganismos aerobios mesófilos totales, coliformes totales y fecales, *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*.

Los análisis bacteriológicos fueron realizados en el departamento de Microbiología de la Universidad Nacional de Río Cuarto. Las determinaciones químicas de Na⁺ y K⁺ se realizaron con un fotómetro de llama; HCO₃⁻, SO₄⁻², Cl⁻, Ca⁺² y Mg⁺² se determinaron siguiendo el procedimiento del Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA y AWWA, 1995); mientras que para NO₃⁻, NO₂⁻ y F⁻ se utilizaron electrodos de ion selectivo. La determinación analítica de As_(Total) se realizó luego de la remoción de los sólidos por filtrado, con espectrofotómetro UV-VIS y espectrofotómetro de absorción atómica en un laboratorio privado de la ciudad de Río Cuarto.

Para la representación química de las muestras se utilizaron métodos gráficos y, a fin de determinar valores de fondo natural para la zona, se ajustaron los datos de algunos de los componentes iónicos analizados a las distribuciones teóricas de Laplace, f₁ y Normal.

Los parámetros hidráulicos correspondientes al acuífero libre fueron tomados de estudios realizados por Blarasin *et al.* (3).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización hidrometeorológica

El clima en la zona es de tipo mesotermal subhúmedo-húmedo. La temperatura media anual es de 16,5°C y la precipitación media anual para una serie de 109 años (1896-2007), es de 831 mm (figura 3). El 80% de lluvias se concentra en primavera-verano.

Se observa una ciclicidad de períodos secos y húmedos y una tendencia notoria de aumento en las lluvias en los últimos 30 años, alcanzando la media anual para este período 936 mm. Los últimos 10 años fueron los más lluviosos (figura 4) y registran un promedio de 1.090 mm. Varios autores coinciden en señalar que la Región Pampeana muestra una tendencia positiva de las lluvias en las últimas décadas (11, 15, entre otros).

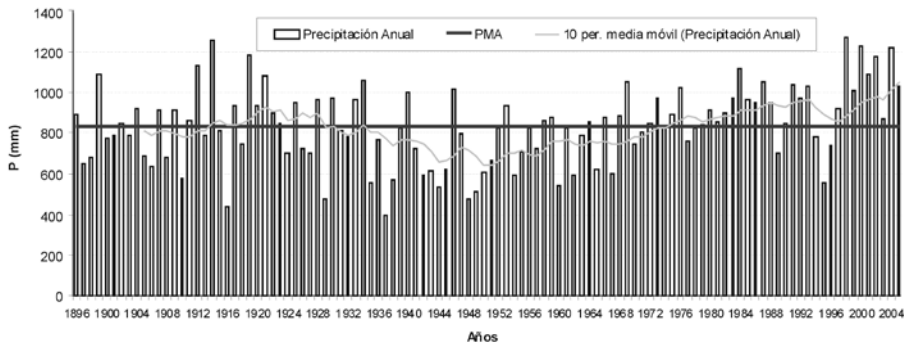


Figura 3. Curva cronológica anual de precipitaciones en la zona de Coronel Moldes-Intervalo 1896-2007. PMA: Precipitación Media Anual (831 mm/año). Media móvil cada 10 años.

Figure 3. Time variation of annual precipitation. Coronel Moldes (1896-2007). PMA: average annual precipitation (831mm). Moving average each 10 years.

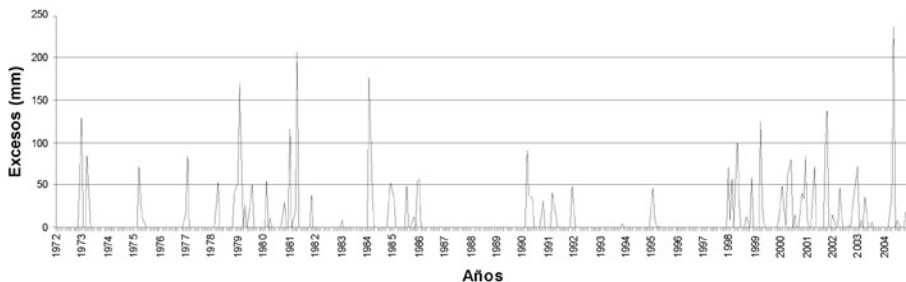


Figura 4. Excesos hídricos resultantes del balance seriado a partir del registro de precipitaciones de la zona de Coronel Moldes (1896-2007).

Figure 4. Hydric excess in Coronel Moldes (1896-2007).

Del balance hídrico seriado de paso mensual se desprende que, salvo excepciones, en los meses de primavera-verano se registran excesos hídricos, mientras que en los meses de otoño-invierno ocurren los mayores déficits. Los mayores excesos se manifiestan principalmente luego de los años '70.

En la zona de Coronel Moldes son evidentes los excesos durante 2004, coincidentes con el ascenso importante registrado en el nivel freático. El almacenamiento de excedentes que se transforma en recarga efectiva al acuífero genera la elevación de los niveles freáticos.

Caracterización hidrogeológica

El acuífero freático se extiende hasta una profundidad del orden de los 50 m y su base es un material arcillo-limoso a limo-arenoso de gran espesor. Por debajo de la base del acuífero freático se distingue un nivel acuífero confinado, entre 152 y 159 m, el cual es explotado para la distribución del agua corriente en la ciudad.

En el área de estudio los sedimentos aflorantes son predominantemente eólicos, de edad Holocena (4). Por la acción de los vientos dominantes (NE) estos materiales fueron removilizados localmente dando lugar a depósitos medanosos. Se trata de la típica planicie loésica del Sur de Córdoba ya descrita por Cantú y Degiovanni (5). El relieve presenta características homogéneas con un promedio de 0,55%.

En cuanto a la litología que conforma el acuífero freático son sedimentos arenolimosos y limo-arenosos, y a diferentes profundidades es común encontrar niveles entoscados con distinto grado de cementación carbonática.

La conductividad hidráulica es del orden de 0,2-1 m/día, la transmisividad del orden de 10-50 m²/día y el coeficiente de almacenamiento del 7% (3).

El mapa potenciométrico del área evaluada (figura 5, pág. 7) permitió observar que el escurrimiento subterráneo regional presenta una dirección NO-SE y morfología de la capa freática del tipo muy suavemente ondulada.

En el tramo del arroyo Sampacho el acuífero presenta una relación general de influencia. Se midieron gradientes hidráulicos generales del orden de 0,4%, gradientes locales del orden de 1,6% y velocidades de escurrimiento entre 0,01 y 0,16 m/día. Estos bajos valores se asocian al relieve muy plano de la zona, lo que además resulta en la indefinición de divisorias subterráneas.

La recarga del acuífero freático a partir de las lluvias se produce arealmente en todo el sector. Los valores de recarga, obtenidos a través del método de balance del ion Cl⁻, fueron del 25% para la zona de médanos y del 11% en el resto de la llanura. El monitoreo realizado en algunos pozos permitió corroborar la rápida respuesta del acuífero a la recarga en los períodos húmedos y descensos en los períodos más secos.

Impacto de la urbanización sobre las características hidroquímicas del acuífero libre

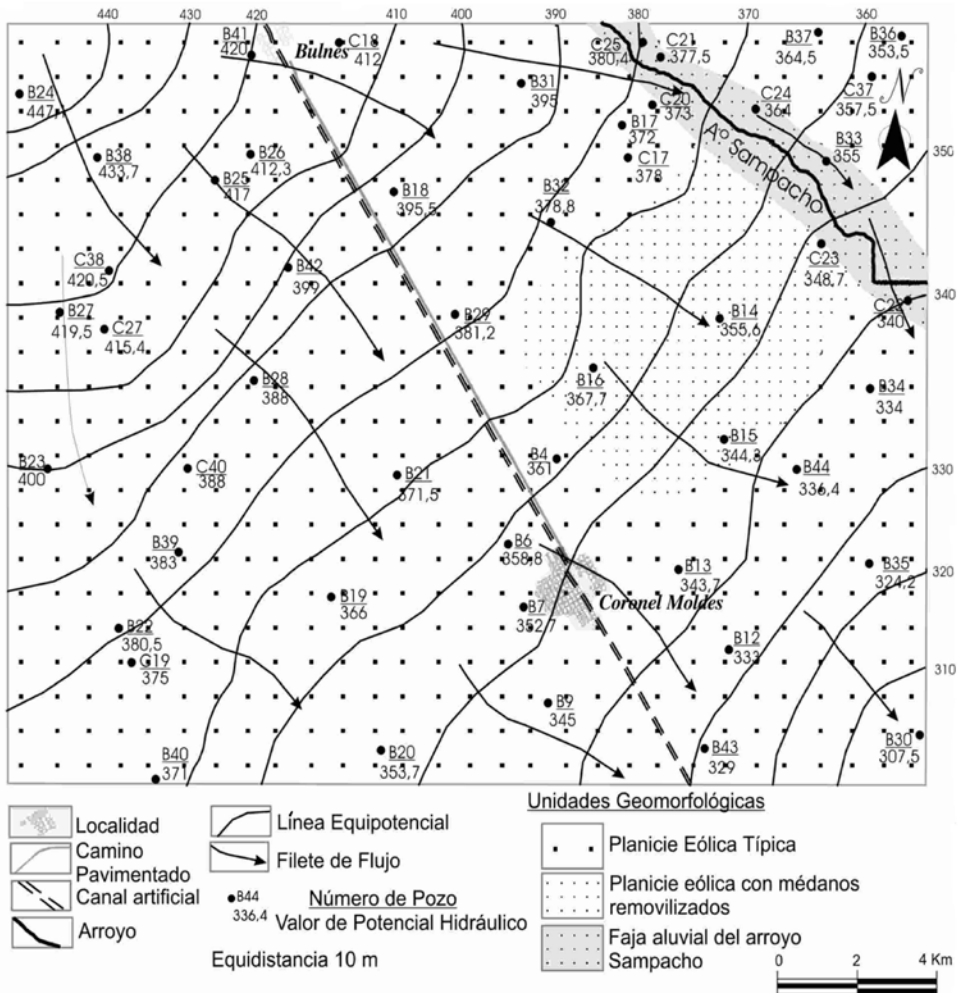


Figura 5. Mapa de Unidades Geomorfológicas y Mapa de Líneas Equipotenciales de acuífero libre. Localidad de Coronel Moldes y su entorno rural.

Figure 5. Geomorphological Units and Potentiometric contour map for the unconfined aquifer of Coronel Moldes and rural area.

Cambios del nivel freático en el área urbana

Investigaciones realizadas por Gomez *et al.* (12) determinaron que en la localidad de Coronel Moldes, los ascensos se debieron a causas naturales en el último ciclo húmedo (1998-2004) y artificiales (incorporación de agua procedente de sistemas de saneamiento *in situ*). En este caso se advierte que el agua que se introduce al acuífero freático es desde otro acuífero, dado que la red de distribución local tiene como fuente al acuífero confinado ya mencionado.

La profundidad del agua en la localidad es variable. En 2004 el nivel freático se ubicó entre 2,50 y 3,50 m.

En el mapa de equipotenciales del acuífero freático para la ciudad (figura 6), se observan las direcciones de escurrimiento del agua subterránea, cuya tendencia general es hacia el Este. Se observan algunas divisorias locales, que responden a recarga diferencial por aportes artificiales.

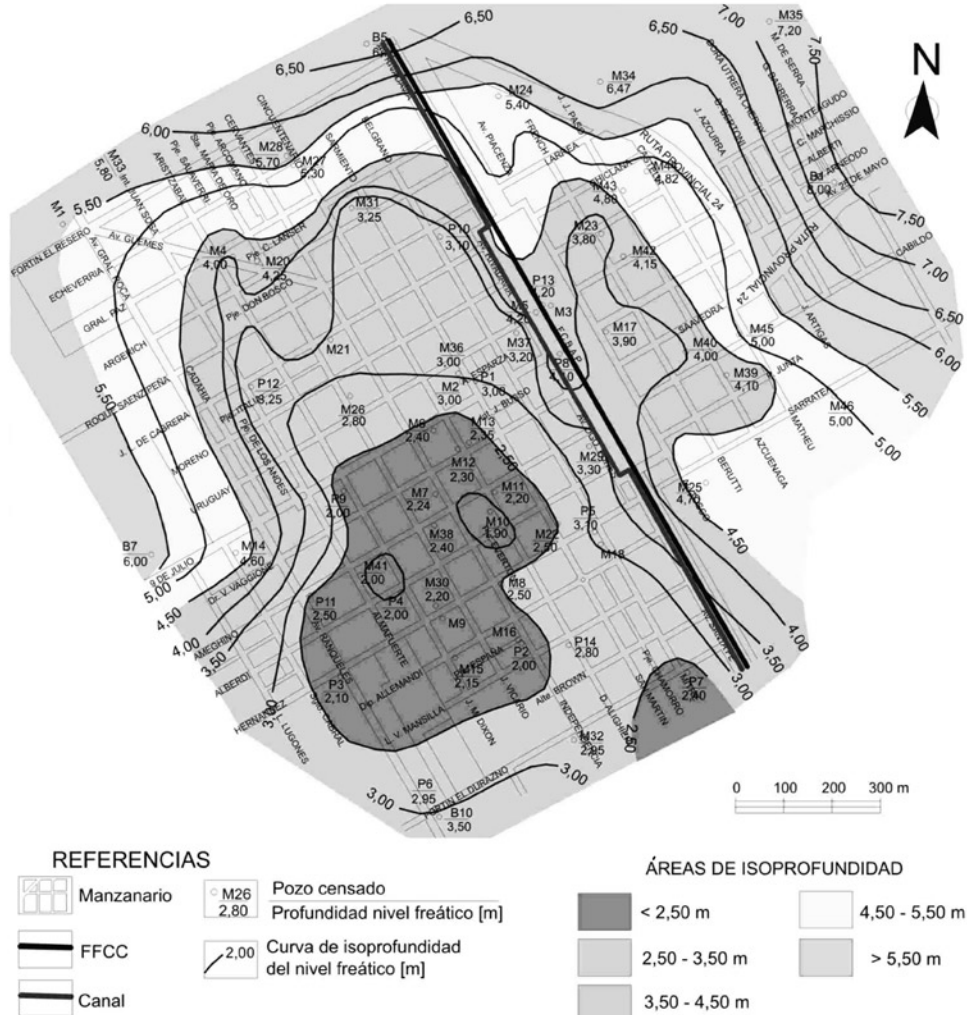


Figura 6. Mapa de isoprofundidad del nivel freático. Zona urbana Coronel Moldes.
Figure 6. Groundwater depth contours of the unconfined aquifer in the urban area of Coronel Moldes.

Hidrogeoquímica del acuífero en el sector rural

La conductividad eléctrica del agua subterránea en el sector rural varía entre 994 y 3130 $\mu\text{S}/\text{cm}$, resultando un 97% de las muestras aguas dulces ($< 2000 \text{ mg}/\text{l}$) y el 3% restante aguas salobres. Las aguas de tipo bicarbonatado sódico se corresponden, en general, con aguas más dulces. El diagrama triangular de Piper (figura 7) muestra al HCO_3^- como componente más abundante (el 75 % de las muestras presentan una concentración de HCO_3^- superior al 40%) y al Na^+ como catión dominante. Es de esperar que el dominio del Na^+ en el acuífero Coronel Moldes se vincule especialmente al proceso de intercambio catiónico con las arcillas. Este proceso es favorecido por las condiciones del acuífero, con predominio de sedimentos de granulometría muy fina, y donde debido a los altos pH la actividad del H^+ disminuye, creando continuos sitios de intercambio catiónico tanto en la materia orgánica como en los minerales de arcillas (9).

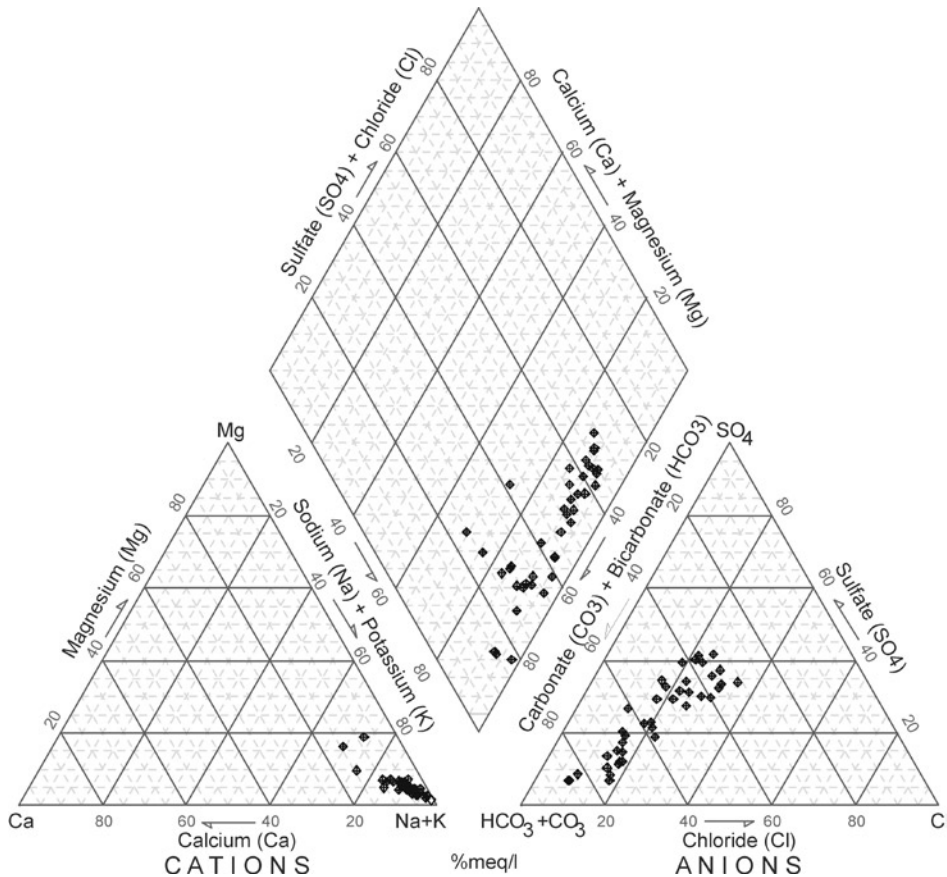


Figura 7. Diagrama de Piper para muestras extraídas del acuífero libre en el sector rural de Coronel Moldes.

Figure 7. Piper diagram form groundwater samples from unconfined aquifer in rural area of Coronel Moldes.

El pH varía entre 7,31-8,85 y los nitratos (NO_3^-) alcanzan concentraciones de hasta 200 mg/l, evidenciando condiciones alcalinas y oxidantes del medio. Altos valores de nitratos evidencian además contaminación antrópica, debido entre otras, a la actividad ganadera importante en la zona, a la proximidad de los molinos a los sistemas de saneamiento *in situ*, y a fuentes difusas como los fertilizantes.

Los valores de dureza medidos se ubican entre 24 ppm CaCO_3 y 370 ppm CaCO_3 (aguas blandas y muy duras) con un promedio de 121 ppm CaCO_3 , correspondiente a aguas de moderada dureza. El 60% de las muestras resultó dentro de la calificación de aguas muy duras y moderadamente duras.

Los tenores de arsénico varían desde concentraciones bajas hasta 250 $\mu\text{g/l}$. Se detectaron altos tenores de flúor (F^-) (hasta 12 mg/l). La presencia en altas concentraciones de ambos elementos se asocia al ambiente geoquímico de aguas bicarbonatadas sódicas y más altos pH, las que generan condiciones geoquímicas propicias para la movilización (disolución y desorción) de altos tenores de As y F^- a partir de los minerales (especialmente el vidrio volcánico) que componen el loess (13).

Hidrogeoquímica del acuífero en el sector urbano

La distribución de las sales disueltas totales del agua subterránea resultó muy variable, con núcleos de altos contenidos salinos (hasta 4000 mg/l) rodeados de valores que gradualmente disminuyen hasta tenores del orden de 800 mg/l a 1200 g/l. La composición geoquímica del agua subterránea debajo del área urbana varía de bicarbonatadas sódicas (el 70% de las muestras posee concentraciones de HCO_3^- superiores al 50%) hasta cloruradas magnésico-cálcicas.

Se encontraron altas concentraciones de NO_3^- (entre 30 y 900 mg/l) para todas las muestras extraídas en el área urbana. Cabe señalar que las muestras más contaminadas, aquellas cuya concentración de NO_3^- supera los 150 mg/l, corresponden a las muestras sin un catión y/o anión dominante (figura 8, pág. 11). Solo algunas pocas muestras presentaron valores por debajo de 45 mg/l -límite de aptitud para consumo humano en Argentina (6)- mientras que la mayoría presentaron concentraciones muy elevadas alcanzando incluso los 900 mg/l. El escenario diagnosticado para el entorno urbano es, desde el punto de vista geoquímico, claramente aeróbico, dado que no existen nitritos u otras especies reducidas del nitrógeno. Esto se debe a la presencia de oxígeno disponible en zona no saturada (cuyo espesor mínimo es 1,90 m) y en la zona saturada.

El análisis bacteriológico realizado en todas las muestras evaluadas indicó contaminación orgánica con la presencia de microorganismos mesófilos totales, coliformes totales o la presencia de específicos (coliformes fecales) como *Escherichia coli* y/o *Pseudomonas aeruginosa*. Estas características químicas y biológicas del agua subterránea reflejan un estado esperable en escenarios de contaminación urbana, donde la cantidad de pozos negros cercanos al sitio de muestreo y el volumen de efluente descargado integran algunas de las variables que controlan su concentración.

Impacto de la urbanización sobre las características hidroquímicas del acuífero libre



Figura 8. Distribución de nitratos en el agua subterránea del acuífero libre en la ciudad de Coronel Moldes.

Figure 8. Nitrates in groundwater from unconfined aquifer in urban area of Coronel Moldes.

El alto aporte de materia orgánica a partir de los pozos domiciliarios (sistemas de saneamiento *in situ*) genera alta presión de CO_2 debido a la oxidación de dicha materia, generando aumento en la producción de HCO_3^- que, en contacto con la matriz sólida, ataca a los minerales silicatados y a los carbonatos (CaCO_3 presente en las "toscas" o diseminado en el acuífero) que se encuentran en la zona no saturada y en el acuífero. Estas condiciones llevan a que aumenten los valores de dureza en el agua subterránea debajo de la zona urbana alcanzando valores de

hasta 1442 ppm CaCO_3 (tabla 1) resultando notoriamente superiores respecto de los encontrados en el área rural. El aumento de los HCO_3^- también queda reflejado por la relación $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$ respecto de la encontrada en el acuífero en la zona rural.

Tabla 1. Indicadores geoquímicos del agua subterránea en las zonas rural y urbana. Acuífero libre de Coronel Moldes.

Table 1. Geochemical indicators for groundwater in rural and urban areas. Unconfined aquifer of Coronel Moldes.

	Entorno rural			Ciudad de Coronel Moldes		
	Máxima	Mínima	Media	Máxima	Mínima	Media
Conductividad (us/cm)	3130	994	1914	5500	1139	3271
Cl^- (mg/l)	369	28	148	903	50	365
SO_4^{-2} (mg/l)	526	35	235	900	21	278
HCO_3^- (mg/l)	913	460	612	1450	77	852
NO_3^- (mg/l)	200	10	85	900	30	214
NO_2^- (mg/l)	0	0	0	0	0	0
Dureza (ppm de CaCO_3)	370	24	121	1442	46	355
$\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$	0,96	0,10	0,44	2,65	0,12	0,83

El Cl es otro elemento que se presenta en altas concentraciones, valores que responden al origen de la contaminación, teniendo en cuenta que uno de sus principales constituyentes es la orina. Según ARGOSS (1), una persona pierde por este desecho aproximadamente 4 g de Cl^- /día. Vázquez Suñé *et al.* (17) sostienen además que es un buen indicador de aguas residuales ya que el NaCl es de uso doméstico común.

Del mismo modo que Cl^- , los SO_4^{-2} se encuentran en mayor concentración y constituyen otro indicador local del aporte de materia orgánica a partir de los pozos domiciliarios al acuífero en la zona urbana.

Comparación de indicadores entre la zona rural y urbana

En primer lugar, si se comparan los indicadores de contaminación elegidos entre zona rural (R) y urbana (U) de la ciudad de Coronel Moldes, puede observarse, a partir del diagrama de cajas (figura 9, pág. 13) y la tabla 1 que, en general, los valores la información sintética de las series químicas consideradas se presentan bien diferenciados en cada zona. Para verificar esta diferencia y seleccionar los indicadores más adecuados de contaminación se realizó la prueba *t* para muestras independientes. Como se desprende de los resultados presentados en la tabla 2 (pág 13) los p-valores correspondientes a todos los componentes resultan significativos y menores al 5% excepto para SO_4^{-2} tanto si se asumen varianzas iguales (0,559) como si no se asumen (0,609) y para Cl^- pero sólo si no se asumen varianzas iguales (0,151) y en un grado mucho menor. Esto se corrobora en los resultados obtenidos de aplicar la prueba no paramétrica de Mann-Whitney (tabla 3, pág. 14).

Impacto de la urbanización sobre las características hidroquímicas del acuífero libre

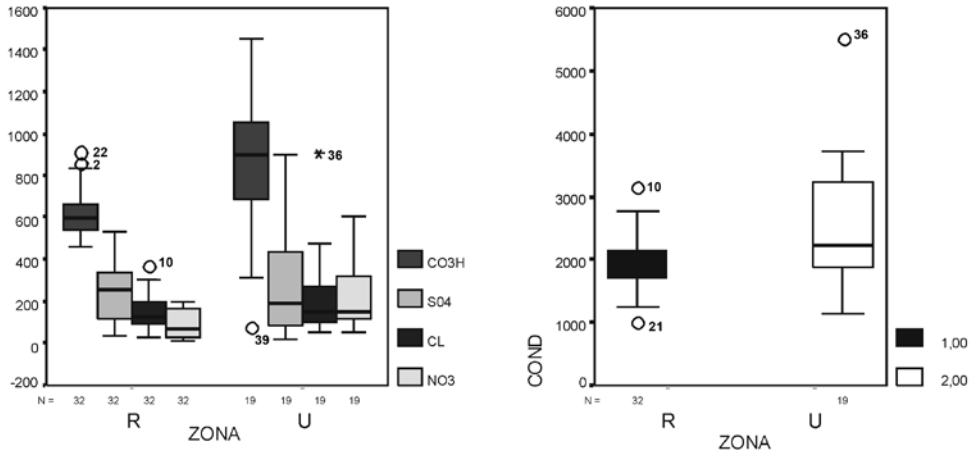


Figura 9. Box Plot de las concentraciones de los componentes químicos seleccionados en muestras tomadas del acuífero libre en el sector rural (R) y urbano (U) de Coronel Moldes.

Figure 9. Box Plot Diagram form groundwater samples for unconfined aquifer in rural and urban area of Coronel Moldes.

Tabla 2. Comparación de medias de los diferentes componentes químicos para muestras independientes (prueba t). Agua subterránea del acuífero libre de Coronel Moldes y sus alrededores.

Table 2. Comparing means for independent samples (prove t). Unconfined aquifer in Coronel Moldes and rural area.

	Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medidas						
	F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medidas	Error típico de la diferencia	95% Intervalo de confianza para la diferencia	
								Inferior	Superior
Cond.	16,03	0,00	-2,50 -2,07	49 21,7	0,016 0,050	-544,3964 -544,3964	218,028 262,869	-982,54 -1089,9	-106,251 1,18796
HCO ₃ ⁻	26,14	0,00	-3,41 -2,74	49 20,1	0,001 0,013	-232,2401 -232,2401	68,17494 84,7594	-369,24 -408,97	-95,23743 -55,50690
SO ₄ ⁻²	10,15	0,00	-0,59 -0,52	49 25,5	0,559 0,609	-32,4737 -32,4737	55,22864 62,71058	-143,46 -161,48	78,51242 96,53918
Cl ⁻	5,88	0,00	-1,78 -1,48	49 21,8	0,080 0,151	-71,7513 -71,7513	40,10683 48,21750	-152,34 -171,78	8,84639 28,28114
NO ₃ ⁻	16,14	0,00	-3,89 -3,27	49 22,5	0,000 0,003	-123,4421 -123,4421	31,72486 37,69730	-187,19 -201,51	-59,68861 -45,37124

Tabla 3. Prueba no paramétrica de Mann-Whitney. Agua subterránea del acuífero libre de Coronel Moldes y sus alrededores.

Table 3. Non parametric for Mann-Whitney test. Unconfined aquifer in Coronel Moldes and rural area.

Estadísticos de contraste ^a					
	Cond.	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻²	Cl ⁻	NO ₃ ⁻
U de Mann-Whitney	211,000	137,000	300,000	245,000	139,000
W de Wilcoxon	739,000	665,000	490,000	773,000	667,000
Z	-1,812	-3,254	-0,078	-1,150	-3,219
Sig. asintót. (bilateral)	0,070	0,001	0,938	0,250	0,001

a Variable de agrupación: ZONAN

En función de estos resultados se analizarán solamente las componentes CE (conductividad eléctrica), HCO₃⁻, NO₃⁻ y Cl⁻. Si bien para este último elemento los resultados de las pruebas anteriores no dan diferencias estadísticamente significativas, merece ser considerado por su reconocida asociación a contaminación, ya que se trata de un compuesto que forma parte de numerosas sustancias contaminantes y es un indicador evaluado mundialmente.

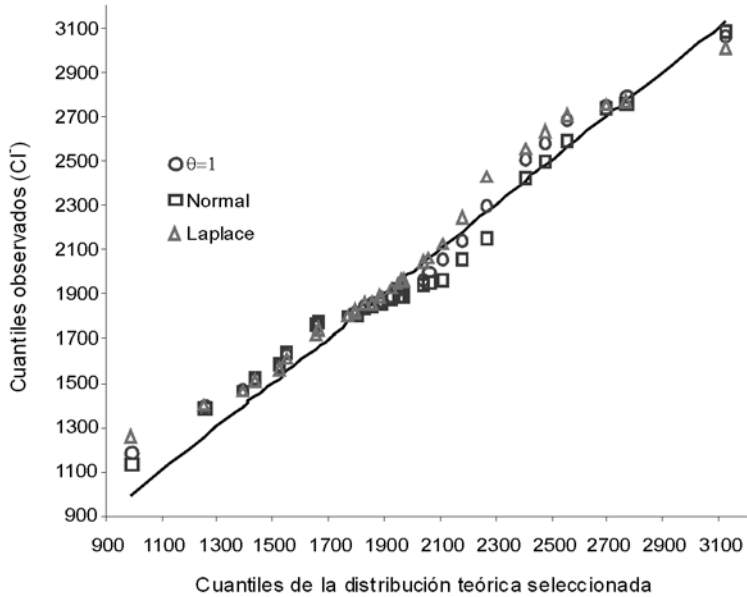
Fondo natural para la zona de Coronel Moldes y sus alrededores

Según Manzano *et al.* (14) "la calidad de las aguas naturales depende de unas concentraciones (medias o medianas) de las distintas componentes y de su distribución en torno a esos valores". Desde el análisis estadístico, determinar el fondo natural de las componentes se traduce en el estudio de cuáles son las distribuciones teóricas a las que mejor se ajustan las distintas componentes para, en función de ello, obtener la estimación óptima (puntual y por intervalos) del parámetro de localización μ que puede ser estimado usando los bien conocidos estimadores muestrales robustos como la media, mediana, rango medio, etc., o combinaciones lineales de éstos.

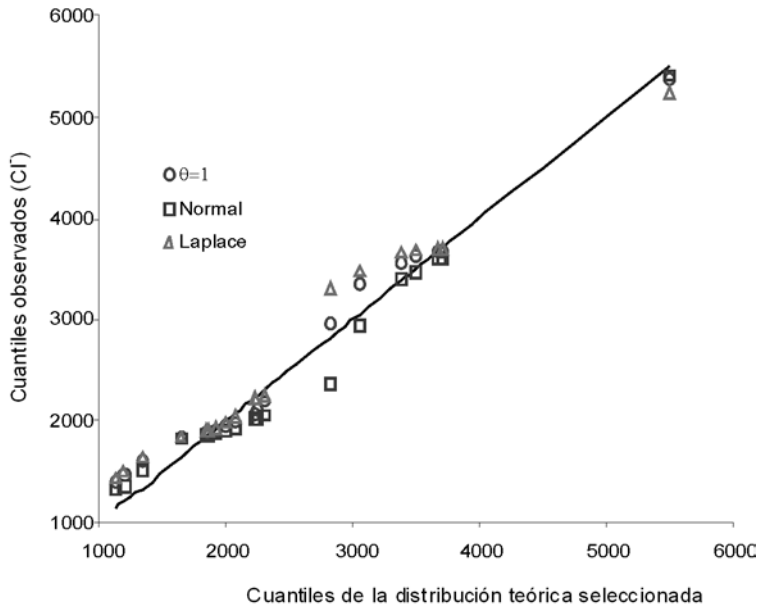
Damilano y Puig (8) caracterizaron todos los modelos de localización simétricos y concluyeron que una combinación lineal de la media y la mediana muestrales (m') resulta un estimador asintóticamente eficiente del parámetro de localización. Esta nueva familia de distribuciones f_{θ} incluye la distribución normal ($\theta = 0$) y de Laplace ($\theta = \infty$) caracterizándolas, respectivamente, como el único modelo de localización simétrico tal que la media (mediana) muestral es un estimador asintóticamente eficiente del parámetro de localización.

Consecuentemente, en este trabajo se analiza el ajuste de los datos de algunas componentes (indicadores de contaminación) a la distribuciones normal, de Laplace y la correspondiente a la nueva familia de localización simétrica f_{θ} , fijando en esta primera instancia $\theta = 1$ (f_1). En las figuras 10, 11, 12 y 13 (pág. 15-18) se presentan los q-q plots de dichos ajustes.

Impacto de la urbanización sobre las características hidroquímicas del acuífero libre



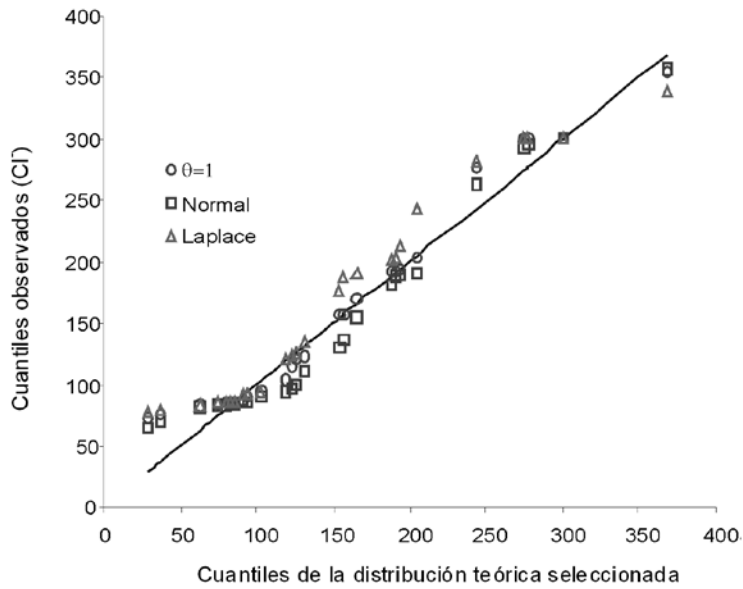
Rural



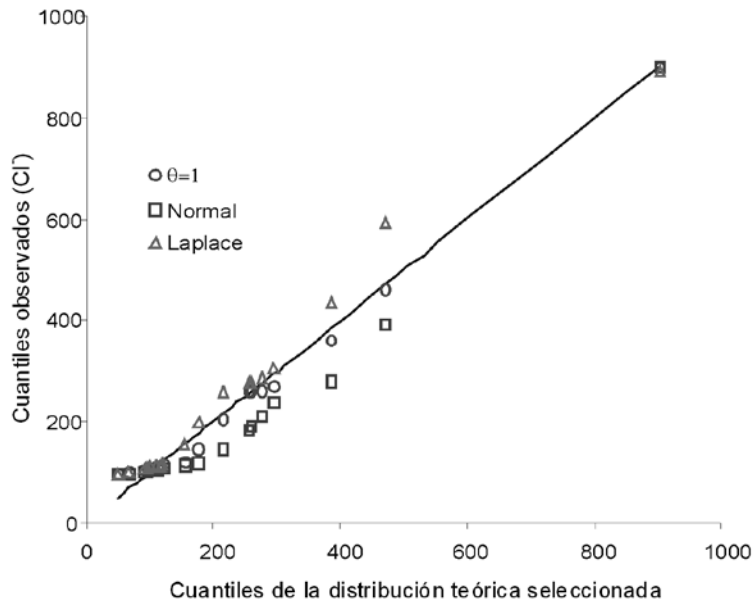
Urbano

Figura 10. Ajuste de CE (conductividad eléctrica) a las distribuciones estudiadas. Muestras de agua subterránea del acuífero libre en la zona de Coronel Moldes.

Figure 10. EC (electrical conductivity) adjust to study distributions. Unconfined aquifer in Coronel Moldes area.



Rural



Urbano

Figura 11. Ajuste de Cl a las distribuciones estudiadas. Muestras de agua subterránea del acuífero libre en la zona de Coronel Moldes.

Figure 11. Cl adjusts to study distributions. Unconfined aquifer in Coronel Moldes area.

Impacto de la urbanización sobre las características hidroquímicas del acuífero libre

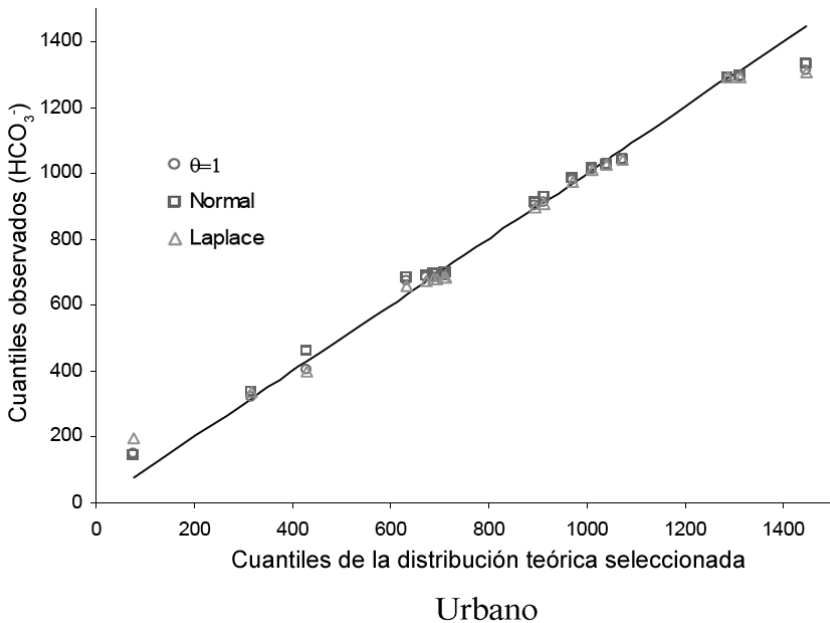
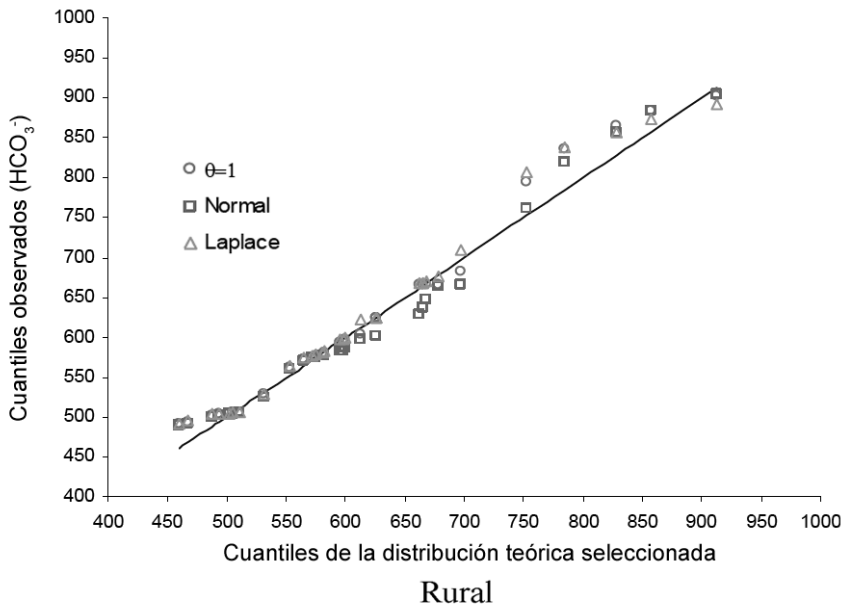


Figura 12. Ajuste de HCO_3^- a las distribuciones estudiadas. Muestras de agua subterránea del acuífero libre en la zona de Coronel Moldes.

Figure 12. HCO_3^- adjusts to study distributions. Unconfined aquifer in Coronel Moldes area.

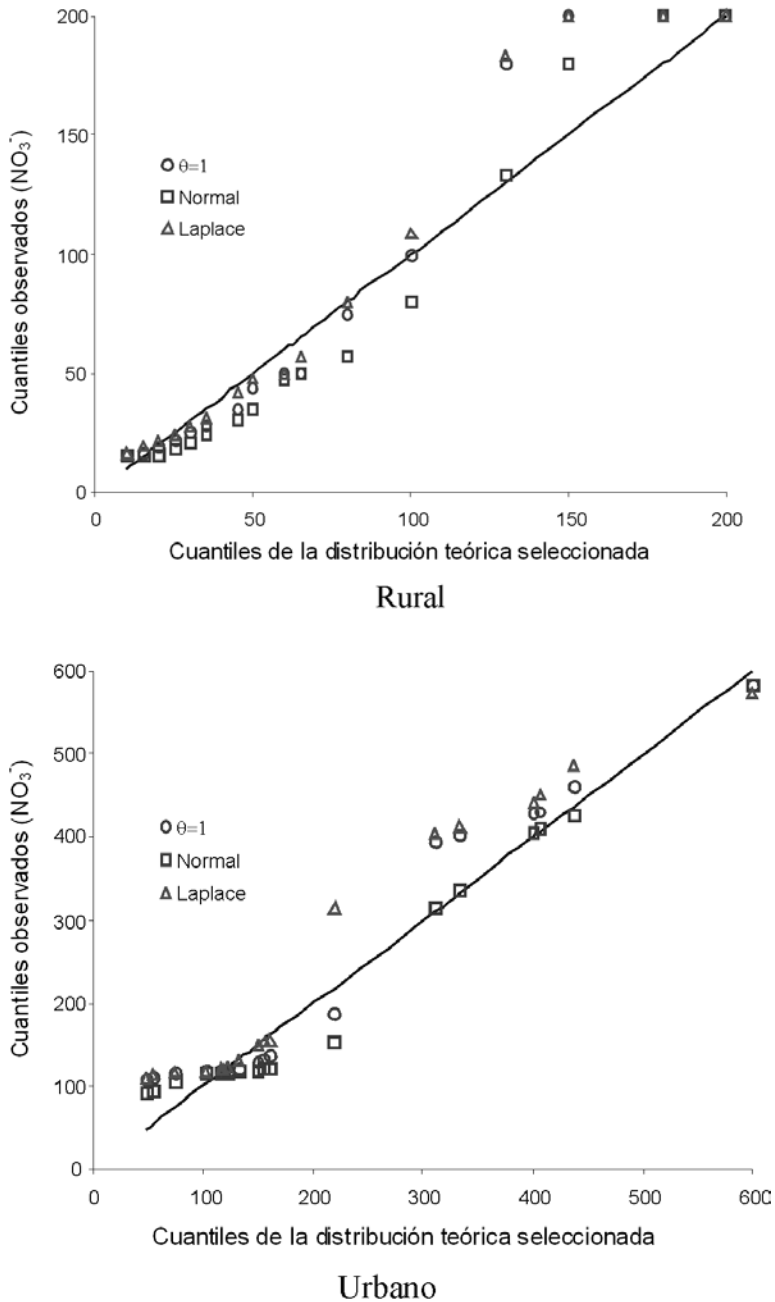


Figura 13. Ajuste de NO₃⁻ a las distribuciones estudiadas. Muestras de agua subterránea del acuífero libre en la zona de Coronel Moldes.

Figure 13. NO₃⁻ adjusts to study distributions. Unconfined aquifer in Coronel Moldes area.

A través de la simple observación de las mismas se destaca que, a pesar de no ser el ajuste ideal, la nueva distribución propuesta (f_1) en la mayoría de los casos supera, o al menos es equiparable al ajuste de las distribuciones límites.

Aunque no se consignan aquí las pruebas estadísticas de bondad de ajuste correspondientes, los resultados presentados en este trabajo ponen en evidencia que las distribuciones tradicionales no son las que necesariamente mejor ajustan los valores observados de estas variables y, por consiguiente, puede ocurrir que ni la media ni la mediana sean mejores estimadores del parámetro de localización, para determinar en base a ellos el fondo natural. En la tabla 4 se presentan las estimaciones puntuales del parámetro de localización correspondiente a las tres distribuciones consideradas.

Tabla 4. Estimaciones de los parámetros de localización y escala para CE, Cl⁻, HCO₃⁻ y NO₃⁻ a las distintas distribuciones en muestras extraídas del acuífero libre del sector rural y urbano.

Table 4. Estimations of the location parameter for some ionic components in groundwater samples form rural and urban area.

		CE (µS/cm)		Cl ⁻ (mg/l)		HCO ₃ ⁻ (mg/l)		NO ₃ ⁻ (mg/l)	
		Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano	Rural	Urbano
Normal	Media	1951,65	2496,05	152,14	223,89	619,80	852,30	90,00	213,44
	Desvío	451,26	1091,78	84,35	199,87	112,65	359,10	70,83	154,98
Laplace	Mediana	1886,50	2220,00	128,57	154,30	598,75	896,25	72,50	149,00
	s-lap	323,46	798,68	66,51	125,56	83,78	285,13	58,75	112,50
θ = 1	m*	1912,30	2329,31	137,90	181,85	607,08	878,84	79,43	174,51
	S*	636,99	1558,35	124,09	272,75	161,40	521,61	105,765	225,065

Además, debido a que el estadístico m* tiene una distribución asintótica normal (7) es posible obtener un intervalo de confianza aproximado de la forma habitual (S*, corresponde al desvío estándar para la nueva distribución). Por lo tanto, asumiendo la distribución f_1 se obtienen los intervalos aproximados al 95% de confianza para el fondo natural que se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Intervalos aproximados al 95% de confianza para el fondo natural del agua subterránea de la zona rural y urbana.

Table 5. Baseline intervals for groundwater in rural and urban area.

Componente	Zona rural	Zona urbana
CE	(1773,41; 2051,19)	(1888,36; 2770,27)
Cl ⁻	(110,85; 164,96)	(104,68; 259,04)
HCO ₃ ⁻	(571,90; 642,28)	(731,25; 1026,44)
NO ₃ ⁻	(56,37; 102,49)	(110,83; 238,19)

Los mismos resultaron en valores máximos y mínimos notoriamente más altos para la zona urbana, coincidiendo con los resultados y análisis realizados. Esto demuestra una vez más que los parámetros seleccionados constituyen los mejores indicadores químicos de cambios ambientales en acuíferos en zonas urbanas (10).

CONCLUSIONES

Si se comparan los indicadores de contaminación entre las distintas zonas rural y urbana (evaluados con la prueba t para muestras independientes y prueba no paramétrica de Mann-Whitney), puede observarse que, excepto para sulfatos, los valores típicos de las componentes se presentan bien diferenciados en uno y otro ambiente.

Pudo comprobarse en el área urbana un aumento generalizado de conductividad eléctrica, cloruros, nitratos, dureza, bicarbonatos y la relación Cl/HCO_3^- . Los indicadores mostraron valores medios superiores a aquellos hallados para el entorno rural que, salvo casos puntuales de contaminación, corresponden a los valores representativos del fondo regional o línea de base química del agua subterránea. El modo de contaminación hallado es el correspondiente a un ambiente geoquímico aeróbico dada la presencia de altas concentraciones de nitratos, como especie oxidada del nitrógeno, que se mantienen en solución en el acuífero.

En adición a esto, la contaminación microbiológica detectada, en especial *Escherichia coli*, es también indicadora de que los sistemas de evacuación de excretas son los responsables principales de la degradación de la calidad del agua en el ambiente urbano.

Se encontró que la distribución empírica presenta un mejor ajuste a la distribución teórica f_1 que a la Normal o Laplace, considerándose entonces como valor característico del fondo natural para cada ion el estimador m^* (combinación lineal entre la media y la mediana).

Es importante recalcar que el monitoreo de niveles freáticos por parte de comunas y municipios es tarea sencilla y de bajo costo, que debería ser un aspecto primordial en la gestión. Los cambios del nivel freático también se constituyen en un importante indicador de cambios ambientales (10). El monitoreo permite prever problemas y sus posibles soluciones, y se considera una labor fundamental a desarrollar cuando se desea realizar una adecuada gestión territorial.

REFERENCIAS

1. ARGOSS. 2002. Assessing Risk to Groundwater from On-site Sanitation: Scientific Review and Case Studies. British Geological Survey. Commissioned Report CR/02//079N. 122 p.
2. Blarasin, M. 2003. Geohidrología ambiental del Sur de Córdoba, con énfasis en la ciudad de Río Cuarto y su entorno rural. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Río Cuarto. Inédita.

Impacto de la urbanización sobre las características hidroquímicas del acuífero libre

3. —————; Cabrera, A.; Matteoda, E.; Gomez, M. L. 2004. Estudio hidrogeológico para el diagnóstico y propuesta de solución del problema ocasionado por el ascenso del nivel freático en la ciudad de Coronel Moldes, Córdoba. Informe técnico. Municipio de Coronel Moldes. 20 p.
4. Cantú, M. 1992. Provincia de Córdoba. In: M. Iriondo (Ed.). El Holoceno en la Argentina, Paraná, p. 1-16. CADINCUA (Comité Argentino para la Investigación del Cuaternario).
5. —————; Degiovanni, S. 1987. Génesis de los sistemas lagunares del Centro Sur de la Provincia de Córdoba. X Congreso Geológico Argentino. San Miguel de Tucumán. (II): 120-129.
6. Código Alimentario Argentino. 1994. Resolución 494/94. Boletín oficial N° 27.932 1ra Sección. Art. 982 modificado.
7. Damilano, G. 2005. Modelos de localización y escala. Algunas consideraciones teóricas y aplicaciones a pequeñas muestras. Tesis Doctoral. Servicio de Publicaciones de la Universidad Autónoma de Barcelona. TDX-0131106-195058.
8. —————; Puig, P. 2004. Efficiency of a linear combination of the median and the simple mean: The double truncated normal distribution. *Scandinavian Journal of Statistics* 31, 629-637.
9. Deutsch, W. 1997. *Groundwater Geochemistry. Fundamentals and Applications to Contamination*. Lewis Publishers. 221 p.
10. Edmunds, W. 1996. Indicators in the groundwater environment. In: *Geoindicators, Assessing rapid environmental changes in earth systems*. Editorial Balkema. p. 135-150.
11. Fili, M.; Tujchneider, O.; D'Elia, M.; Paris, M.; Perez, M. 2000. La influencia de las aguas subterráneas en el anegamiento de un sector en la llanura pampeana de la República Argentina. I Congreso Mundial Integrado de Aguas Subterráneas. Fortaleza, Brasil. CD-ROM.
12. Gomez, M. L.; Blarasín, M.; Cabrera, A.; Matteoda, E. 2005. Variaciones de nivel freático y contaminación del acuífero en la zona de Coronel Moldes, Córdoba, Argentina. I Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua. 26, 27 y 28 de abril de 2005, Córdoba, Argentina.
13. —————; Blarasín, M.; Martínez, D. 2009. Arsenic and fluoride in a loess aquifer in the central area of Argentina. *Environmental Geology*: 57(1): 143-155.
14. Manzano, M.; Custodio, E.; Nieto, P. 2003. El fondo natural de la calidad del agua subterránea. I Seminario Hispano-Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Rosario, Argentina. p. 607-617.
15. Paoli, C.; Giacosa, R. 2003. Características hidrológicas de la llanura pampeana central oeste (áreas de derrames del río Quinto y arroyos del sur de Córdoba). En: Maiola, O. C.; Gabellone, N. A.; Hernández, M. A. Eds. *Inundaciones en la región pampeana*. EDULP (Editorial de la Universidad de La Plata), La Plata, 274 p.
16. Ravelo, C. 1990. PDIMES. 1990. Balance hídrico seriado - Índices de sequía y humedad del cultivo. Manual teórico/operativo. Asociación Agronómica de Agrometeorología. 8 p.
17. Vázquez Suñé, E.; Alberich, C.; Soler, A.; Custodio, E.; Carrera, J. 2003. Uso de trazadores en hidrogeología urbana. I Seminario Hispano-Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Rosario, Argentina. p. 587-605.
18. Zaporozec, A. 2002. *Groundwater contamination inventory. A methodological guide*. (Eds.) IHP-VI, Series On Groundwater N° 2, UNESCO. 160 p.

Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Río Cuarto y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas por subsidiar la investigación.