

PRIMERA APROXIMACIÓN A LA EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL RECURSO HÍDRICO SUBTERRÁNEO EN DOS CUENCAS DE LA LLANURA PAMPEANA: UNA PERSPECTIVA AMBIENTAL

^{1,4}Barranquero, Rosario Soledad ; ²Varni, Marcelo Raúl ; ³Pardo, Rafael ; ³Vega, Marisol ; ^{2,4}Zabala, María Emilia y ¹Ruiz de Galarreta Víctor Alejandro

¹ Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales, UNCPBA. Gral. Pinto 399, 7000 Tandil, Argentina. Tel. 0249 4385772. e-mail: rosariobarranquero@yahoo.com.ar.

² Instituto de Hidrología de Llanuras 'Dr. Eduardo J. Usunoff', UNCPBA. República de Italia 780, B7300 Azul, Argentina.

³ Departamento de Química Analítica, UVA. Campus Miguel Delibes, E- 47011 Valladolid, España.

⁴ Becarias del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina.

Resumen

Dada la complejidad de la evaluación integral de los recursos hídricos, es necesario que los estudios hidrogeológicos a nivel de cuenca se enriquezcan con el análisis regional, por ejemplo a través de la comparación. El objetivo de este estudio fue realizar una primera aproximación a la evaluación comparativa del recurso hídrico subterráneo de dos cuencas ubicadas en la Llanura Pampeana (de los arroyos Languyú y Del Azul), según sus características naturales y la gestión humana. Los aspectos definidos para la comparación fueron: litología, hidrodinámica, hidroquímica e influencia antrópica. Se consideraron mediciones de niveles freáticos y análisis fisicoquímicos en redes de monitoreo del agua subterránea; se analizaron los impactos potenciales al sistema según las características del medio físico y las actividades antrópicas. De acuerdo a los resultados, en ambas cuencas la disponibilidad de agua subterránea está dada por dos ambientes hidrogeológicos (fisurado y poroso); el modelo conceptual hidrodinámico e hidroquímico es similar. En tanto, existen diferencias respecto a las dimensiones de los servicios sanitarios (consumo y efluentes domiciliarios) y las principales cargas contaminantes potenciales. Se concluye que a nivel regional es importante profundizar el estudio en el uso y la gestión del recurso, ya que las diferencias relevantes se presentan en este aspecto, no en sus características naturales.

Palabras claves: cuenca, Llanura Pampeana, análisis regional, evaluación comparativa, gestión de los recursos hídricos.

Abstract

The integral water resources evaluation requires that the hydrogeological studies at the basin level will join regional analysis, for example through comparison analysis. The study aim was to make a first approach to groundwater comparative evaluation of two basins located in the Pampean plain (Languyú and Del Azul), according to its natural features and human management. The aspects defined for comparison were: lithology, hydrodynamics, hydrochemistry and anthropogenic influence. Groundwater levels and physicochemical analysis at monitoring networks was considered; the potential impacts to the system were analyzed according to the physical characteristics and human activities. According to the results, in both basins groundwater availability is given by two hydrogeological environments (fissured and porous); the hydrodynamic and hydrochemical conceptual model is similar. Meanwhile, there are differences in the dimensions of sanitation services (sewer and potable water network) and the main potential pollutant loads. It is concluded that at the regional level is important to deepen the study on the resource use and management, since the differences are relevant in this respect, not their natural characteristics.

Keywords: basin, Pampean plain, regional analysis, comparative evaluation, water resources management.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Los avances de las últimas décadas en el conocimiento de los recursos hídricos, así como en el reconocimiento de su importancia, no se han correspondido con avances notables en el uso y gestión sustentable (Millennium Ecosystem Assessment, 2005), entendiéndose como uno de los factores causantes de ello la falta de líneas de gestión regionales. En este contexto, se considera que una propuesta ambiental debe basarse en el conocimiento integral a nivel de cuenca, pero con un alcance regional.

La Llanura Pampeana (Figura 1) es la principal área de producción agrícola de secano y una de las regiones de Argentina con mayores fortalezas desde el punto de vista económico. El sistema de Tandilia, ubicado en la parte central de la provincia de Buenos Aires, pertenece a esta región de alta productividad agrícola. Tiene una longitud mayor a 300 km, un ancho máximo de 60 km y se extiende en dirección NO-SE. Se caracteriza por serranías de entre 50 y 250 m que emergen en el relieve plano de la Llanura Pampeana (Cingolani, 2010). Dicho sistema se ha dividido en grupos designados con el nombre de la ciudad o distrito más cercano, sin correspondencia con las características hidrogeológicas. Existen sin embargo estudios, con diferentes escalas espaciales, que han identificado características comunes entre las cuencas con cabecera en su faldeo Norte (Hernández et al., 2002; Ruiz de Galarreta, 2006; Barranquero, 2009; Varni, 2013).

Las cuencas de los arroyos Languyú y Del Azul (Figura 1) son dos casos de sistemas hidrológicos con nacientes en el faldeo Norte del sistema de Tandilia. Se posee de ellas un grado de conocimiento similar sobre el comportamiento de las aguas subterráneas, dado que se estudian a nivel de cuenca en el Centro de Investigaciones y Estudios Ambientales (CINEA) en el primer caso, y en el Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) en el segundo. Las cuencas se encuentran separadas entre ellas por aproximadamente 80 km, en los cuales se desarrollan otras cuencas de similar tamaño que no han sido estudiadas de manera sistemática, razón por la cual se tiene menor grado de conocimiento.

Aunque la comparación como enfoque metodológico tuvo un importante desarrollo en las ciencias sociales (Merino Escobar, 1993; Sartori y Morlino, 1994; Duverger, 1996; entre otros), los estudios comparativos utilizando enfoques hidrogeológicos y ambientales son muy escasos. En trabajos antecedentes la comparación se centra en uno o algunos aspectos específicos como: variables geohidrológicas (Kruse, 1986), niveles de nitrato y herbicidas (Panno y Kelly, 2004), o evolución hidroquímica (Galego Fernandes et al., 2005).

Considerando los antecedentes limitados en el campo de la comparación en términos del estudio integral de recursos hídricos, se planteó como objetivo del trabajo realizar una primera aproximación a la evaluación comparativa del recurso hídrico subterráneo en las cuencas de los arroyos Languyú y Del Azul, según sus características naturales y la gestión humana. La proyección regional va más allá del objetivo específico de este trabajo, ya que pretende ser un aporte metodológico para incorporar posteriormente otras cuencas del faldeo y proponer estrategias de gestión conjuntas.

Las cuencas de los arroyos Languyú y Del Azul están situadas en los distritos de Tandil y Azul, con 123.871 y 65.280 habitantes respectivamente (INDEC, 2010). Las ciudades cabeceras de dichos partidos se asientan dentro del área de cada cuenca y generan una fuerte demanda de aguas subterráneas para abastecimiento humano y para diferentes actividades socioeconómicas, principalmente la agricultura.

Languyú y Del Azul se extienden sobre un área de aproximadamente 600 km² y 6000 km², respectivamente, excluyendo el área de descarga regional de agua subterránea que ocurre en el río Salado, es decir al NE de las cuencas estudiadas. La diferencia en la extensión no está dada por elementos geomórficos o fisiográficos, sino por límites arbitrarios que se han impuesto en el extremo aguas abajo de cada una por cuestiones operativas del muestreo de campo. Esto hace que las trayectorias de flujo en la cuenca Del Azul sean más largas, es decir que el agua subterránea tenga mayor tiempo de recorrido. Otra diferencia importante es que la ciudad de Tandil se encuentra en el sector de piedemonte, mientras que la ciudad de Azul que se asienta en el sector de transición entre el piedemonte y la

llanura. Incluso teniendo en cuenta estas diferencias, ambas áreas tienen muchas características comunes que las hacen comparables, como la ubicación de sus cabeceras en el faldeo N del sistema de Tandilia, y la dirección de la escorrentía superficial y el flujo de agua subterránea hacia el NE con descarga en el río Salado.

Desde el punto de vista geomorfológico las cuencas tienen tres sectores (Ruiz de Galarreta y Banda Noriega, 2005, Zárate et al., 2010; Varni, 2013):

- Serranías: con un fuerte control estructural de la dinámica hidrológica que determina una red de drenaje integrado y con diseño dendrítico. Las pendientes tienen valores promedio de 6% en la cuenca del arroyo Langueyú y de 5% en la cuenca del arroyo Del Azul.

- Piedemonte: con una red de drenaje de diseño bien definido y distributivo. El flujo es divergente en concordancia con la morfología. Las pendientes son más suaves que en el sector anterior con valores de 0,2% para ambas cuencas.

- Llanuras: el drenaje es poco definido y pobremente integrado, muestra cauces estrechos y cursos temporarios, los cuales a menudo se pierden en suaves depresiones. Las pendientes tienen valores promedio de 0,1% en la cuenca del arroyo Langueyú y entre 0,05 y 0,1% en la cuenca del arroyo Del Azul. El movimiento del agua tiene un predominio de la componente vertical frente a la horizontal debido a estas escasas pendientes.

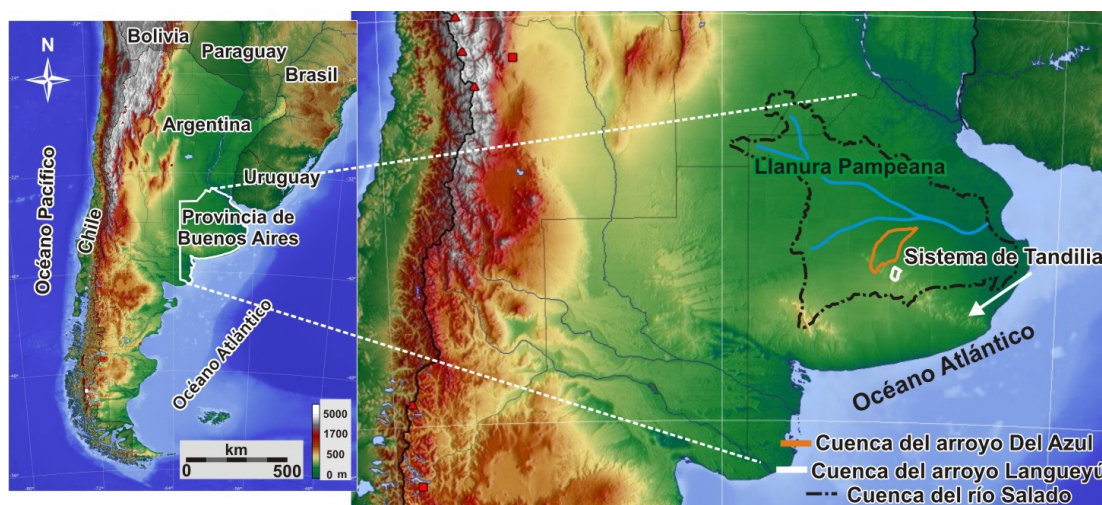


Figura 1. Localización de la Pampa Húmeda, el Sistema de Tandilia y representación de las cuencas Langueyú y Del Azul en Argentina (Barranquero et al., 2016, pp. 2).

METODOLOGÍA

El marco conceptual del método comparativo define dos formas de realizar la comparación. Una posibilidad es el enfoque centrado en los casos, que se apoya en el reconocimiento de la diversidad y complejidad y por lo tanto recurre al análisis cualitativo. La alternativa es centrarse en las variables, bajo la conceptualización de la búsqueda de generalidades, haciendo uso en este caso del análisis cuantitativo (Ragin, 1987). El análisis comparativo desarrollado en este trabajo se podría definir como un enfoque centrado en los casos ya que se estudian sólo dos cuencas. Sin embargo, es necesario aplicar el análisis cuantitativo para algunas variables y el cualitativo para otras, siendo esto parte de la complejidad que involucra el estudio integral de los recursos hídricos. Duverger (1996) indica que la comparación se trata de evaluar la analogía estructural y la complejidad de los elementos a cotejar. Con este fin, se analizó cuáles serían las variables que mejor definen el estudio integral de los recursos hídricos con un alcance regional y se seleccionaron para la comparación los siguientes aspectos: litología, hidrodinámica, hidroquímica e influencia antrópica. El período de estudio se definió entre los años 2010 y 2013 porque la profundización de las investigaciones ocurrió en estos años.

Para comparar la litología se utilizaron estudios antecedentes a distintas escalas, tanto realizados en la totalidad del sistema de Tandilia como específicamente en las Sierras de Tandil y de Azul. Se consideraron además descripciones de perfiles litológicos de perforaciones realizadas por el ente prestador del servicio de agua de red en la cuenca del Langueyú (Obras Sanitarias Tandil -OST-) y por el Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) en la cuenca Del Azul. También fueron importantes los estudios geofísicos, realizados por grupos de trabajo que los autores integran en el CINEA y el IHLLA, a través de los cuales ha sido posible conocer la profundidad y configuración del basamento cristalino en ambas cuencas.

Para analizar la hidrodinámica e hidroquímica se utilizaron redes de monitoreo, representativas de la sección superior del acuífero, en las que el CINEA y el IHLLA realizan mediciones de niveles freáticos y análisis fisicoquímicos hace muchos años. Si bien estas redes se definieron en momentos y centros de investigación distintos se consideran adecuadas para la comparación porque se planificaron con objetivos similares. En la cuenca del arroyo Langueyú la red consta de 21 perforaciones y en la Del Azul de 24, con una distribución de forma aproximadamente regular en la superficie de cada cuenca. En las perforaciones se determinó en campo conductividad, pH, temperatura y bicarbonatos, y los restantes iones mayoritarios y nitratos en laboratorios de la UNCPBA con métodos normalizados (APHA, 2005).

Para conocer la situación hidrológica en el período de estudio se calculó el balance hídrico según Thornthwaite y Mather (1957), utilizando los datos proporcionados por la estación Tandil Aero (175 msnm, 37° 23' S y 59° 25' W) y la estación meteorológica Azul (145 msnm, 36° 50' 5.08" S y 59° 53' 18.86" W) -Servicio Meteorológico Nacional-. Los balances de agua se compararon mediante el análisis de la magnitud y del tiempo ocurrencia de los excesos y déficits.

Respecto a la influencia antrópica se analizaron los impactos potenciales según las características del medio físico y las actividades antrópicas, considerando tanto estudios antecedentes sobre cargas contaminantes potenciales al recurso hídrico, como observación directa de campo y análisis puntuales de cargas realizados en el CINEA y el IHLLA.

RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Litología

El sistema de Tandilia presenta un núcleo constituido por el basamento cristalino de edad precámbrica denominado Complejo Buenos Aires (Marchese y Di Paola, 1975) sobre el cual se asientan en determinados sectores sedimentitas con cierto grado de metamorfismo del Grupo La Tinta: pelitas, calizas, ortocuarcitas, etc., del precámbrico superior-paleozoico inferior (Dalla Salda, 1999) y la cubierta areal de sedimentos cenozoicos Pampeanos y Postpampeanos (Teruggi y Kilmurray, 1975).

En la cuenca del arroyo Langueyú la composición del basamento cristalino metamórfico es tonalítica a granodiorítica (Teruggi y Kilmurray, 1975). Este basamento se encuentra en superficie en la cabecera de la cuenca y se profundiza de manera irregular, escalonada, alcanzando una profundidad de 200 m en el hacia Noreste.

La cubierta sedimentaria tiene edad Plio-Pleistoceno y es mayormente limosa. En las proximidades del frente serrano (cuenca superior) se compone principalmente por conglomerados de 30 a 50 cm, disminuyendo su tamaño hacia el Noreste donde se hallan diámetros de 3 o 4 cm. La matriz es generalmente limosa con fracciones subordinadas de arena y arcilla, pero también puede hallarse arenisca limo-arcillosa con proporciones variables de carbonato de calcio sobre todo cerca del frente serrano (Fidalgo et al., 1975).

En tanto, el basamento cristalino en la cuenca Del Azul presenta composición granítica a tonalítica con presencia de gneis, migmatitas, anfibolitas y plutones graníticos, con escasos esquistos y rocas ultramáficas (Dalla Salda et al., 2006). Las rocas cristalinas emergen en la cabecera y adquieren luego distintas profundidades: 30 a 50 m en la cuenca

alta, hasta 120 m en la cuenca media, y alrededor de 800 metros en la cuenca baja (Zabala, 2013); por lo tanto el espesor saturado es mayor en esta cuenca que en la del Langueyú.

La cubierta sedimentaria está compuesta por sedimentos Pampeanos de edad Pleistoceno-Holoceno y Postpampeanos del Pleistoceno tardío y Plioceno-temprano. Estas unidades consisten en limos, limos arenosos y arcillosos con lentes de carbonato de calcio a poca profundidad (Fidalgo et al., 1975). Por debajo de la Formación Pampeano, a partir de aproximadamente los 90 m, se desarrolla la Formación Paraná, compuesta por calizas y materiales arenosos a arcillosos con abundantes fósiles (Aceñolaza, 2000).

Hidrodinámica

Ambas cuencas tienen un régimen climático subhúmedo-húmedo mesotermal, con poca o nula deficiencia de agua, C2B'2r (clasificación Thornthwaite y Mather, 1957).

En Tandil (cuenca del arroyo Langueyú) Ruiz de Galarreta y Banda Noriega (2005) realizaron un balance de agua en el período 1900-2000, obteniendo que: la precipitación media anual es de 838 mm y la evapotranspiración real media de 712 mm, con un déficit de 18 mm correspondiente a enero, febrero y marzo. Los excesos son de 144 mm y se distribuyen en los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre.

A partir del balance hídrico en los años de muestreo hidrodinámico e hidroquímico (2010, 2011 y 2012) se visualiza una alternancia del año 2010, que se puede considerar húmedo, porque los excesos fueron mayores a los del balance modular (Figura 2 a), el 2011 seco, con excesos menores y mayores déficits, y 2012 que vuelve a ser húmedo con excesos 300% más altos que los ocurridos en el balance modular. En cuanto a los momentos de ocurrencia de excesos y déficits en el año, en los tres años de muestreo se producen de manera mucho más irregular que en el balance modular.

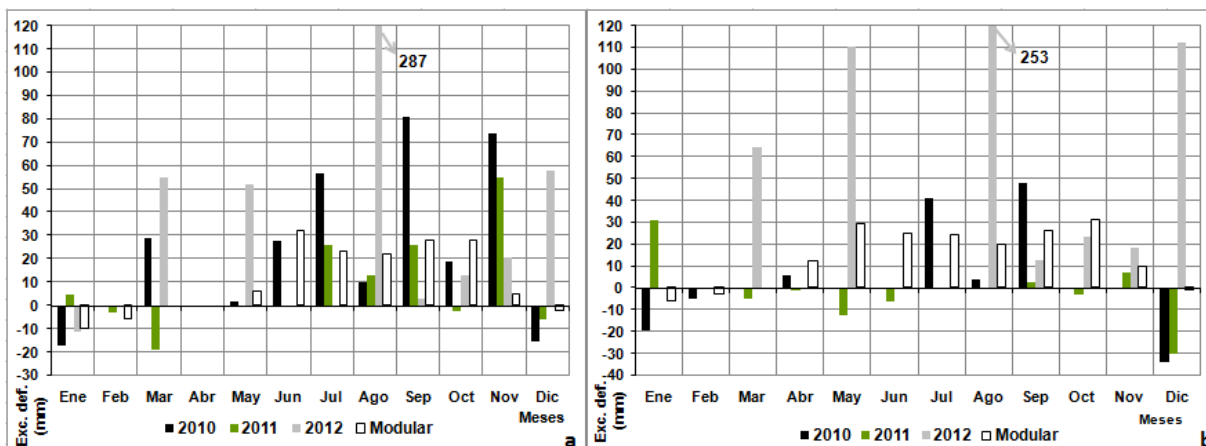


Figura 2. Comparación de excesos y déficits en el balance hídrico modular y de los años 2010, 2011 y 2012. Izquierda (a): Tandil. Derecha (b): Azul.

La recarga de aguas subterráneas calculada con el balance de masa de cloruro mostró valores entre el 18 y el 14% de la precipitación en el sector serranías, de 13% en el piedemonte, e inferior a 12% en llanuras (Barranquero, 2009).

En Azul, del balance modular realizado para el período 1901-2013, se obtuvo que la precipitación media anual es de 912 mm y la evapotranspiración real media es de 735 mm. Los excesos se producen la mayor parte del año con un total de 177 mm, lo que restringe los déficits a los meses de diciembre, enero y febrero, con un total de 10 mm.

La Figura 2 b muestra que en 2012 los excesos fueron mayores que en el balance modular y que no hubo déficit. Los años 2010 y 2011 mostraron excesos menores que los del balance modular y los déficits fueron mayores. Al igual que en Tandil, la ocurrencia de excesos y déficits en 2010, 2011 y 2012 fue mucho más irregular que en el balance modular.

En la cuenca del arroyo Del Azul el balance de masas de cloruro da como resultado una recarga mayor al 20% en el sector serranías, entre 20 y 10% en piedemonte, y por debajo de 10% en el sector llanuras (Varni, 2013).

Hidroquímica

Si bien se analizaron los resultados de la totalidad de las campañas para evaluar las variaciones de nitratos y otros indicadores vinculados a la actividad antrópica, para la caracterización hidroquímica se tuvieron en cuenta los resultados de octubre de 2010 en la cuenca del arroyo Langueyú (Tabla 1) y agosto de 2010 (Tabla 2) en la cuenca del arroyo Del Azul por ser el balance hídrico de ese momento más parecido al modular.

En la cuenca del arroyo Langueyú las aguas presentan un bajo contenido de sales totales disueltas (entre 370 y 720 mg/l) y son mayormente bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas en serranías y piedemonte, y bicarbonatadas sódicas hacia el NE. El contenido de sales totales disueltas aumenta, como es lógico, en el sentido del flujo, en tanto la concentración de calcio y magnesio disminuye por el intercambio con el sodio. Si bien el contenido de cloruros y sulfatos aumenta hacia el límite N de la cuenca, los bicarbonatos siguen estando en mayor proporción por no abarcar el área de estudio el sector de descarga regional, sino solo descargas locales y sectorizadas.

Tabla 1. Estadística descriptiva de las variables hidroquímicas en la cuenca del arroyo Langueyú. Parámetros expresados en mg/l excepto la conductividad (en $\mu\text{S/cm}$) y el pH (adimensional).

Parámetro	Mediana	Media	DE	Mínimo	Máximo
Conductividad	801	828	147	530	1035
pH	7,6	7,5	0,2	7,0	8,3
Bicarbonatos	476	489	107	268	830
Cloruros	34	34	15	3	106
Sulfatos	13	17	15	3	106
Nitratos	26	29	17	4	84
Calcio	41	44	21	12	116
Magnesio	21	23	8	8	43
Sodio	118	116	57	17	253
Potasio	11	15	14	1	67

En la cuenca del arroyo Del Azul las aguas tienen mayor contenido salino (entre 410 y 3.250 mg/l), lo cual resulta coherente con el aumento de recorrido dado que su estudio abarcó una extensión mayor del sector de llanura respecto a la del Langueyú. También en este caso los bicarbonatos son predominantes en todas las muestras, aunque hacia el NE el contenido de sulfatos y cloruros también es importante. En cuanto a los cationes, el sodio es predominante en 71% de las muestras, y el calcio en el 19% restante, correspondiéndose el último porcentaje a muestras del sector de cabecera de la cuenca. Esto es coherente con la tipificación de las aguas que son bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas en ese sector, y bicarbonatadas sódicas en el Centro y N, producto del intercambio iónico.

Tabla 2. Estadística descriptiva de las variables hidroquímicas en la cuenca del arroyo Del Azul. Parámetros expresados en mg/l excepto la conductividad (en $\mu\text{S/cm}$) y el pH (adimensional).

Parámetro	Mediana	Media	DE	Mínimo	Máximo
Conductividad	740	1017	813	586	4650
pH	7,5	7,5	0,2	7,1	8,2
Bicarbonatos	459	503	150	361	1211
Cloruros	15	53	130	4	620
Sulfatos	16	78	174	4	876
Nitratos	10	16	17	1	82
Calcio	49	53	24	9	111
Magnesio	24	28	17	4	114
Sodio	93	153	182	4	947
Potasio	16	17	7	5	51

Influencia antrópica

La ciudad de Tandil ocupa aproximadamente 50 km² y, como se mencionó antes, se encuentra principalmente en el sector de piedemonte, aunque en los últimos 10 años ha tenido un crecimiento significativo hacia las laderas de las sierras. En tanto, la ciudad de Azul, situada en la parte central de la cuenca, en el área de transición entre el piedemonte y la llanura, tiene una superficie de aproximadamente 34 km².

En ambas cuencas el agua que se utiliza para diferentes usos, entre ellos el consumo humano, provienen de la fuente de agua subterránea que constituye el acuífero Pampeano. Las perforaciones se encuentran principalmente en el medio poroso clástico que posee mucho mayor rendimiento y homogeneidad que el medio fisurado.

En Tandil la cobertura de la red de suministro de agua implica el 95,6% de la población. La cantidad de extracción anual es de 18 hm³ que representa el 25% de toda el agua que se recarga al acuífero en la cuenca del arroyo Languyú (Barranquero, 2015). La explotación se realiza a través de 49 pozos que se encuentran en su mayoría dentro de la zona urbana. En el período 2010-2012, se comprobó que esta explotación generó afectaciones puntuales a la hidrodinámica con descenso de niveles freáticos cerca de la mayor concentración de perforaciones para suministro de agua de red y una inversión de la relación acuífero-arroyo en por lo menos la cuarta parte de sector de piedemonte, pasando el arroyo a ser influente respecto al acuífero (Barranquero et al., 2015).

Hasta el año 2013 el servicio de red cloacal abastecía al 53% de la población, según los datos facilitados por la entidad encargada del servicio (OST). Los efluentes de esta red son procesados en plantas de tratamiento que presentan algunos problemas puntuales de funcionamiento y eficiencia, por los cuales se ve afectada la calidad del arroyo Languyú en los sitios de descarga final; en dichos sitios se ha comprobado que el arroyo es influente respecto al acuífero lo que representa un riesgo de contaminación a este último (Barranquero et al., 2015).

En los sectores donde no se cuenta con este servicio la eliminación de excretas se realiza in situ sin tratamiento previo (pozos negros). Estos pozos absorbentes por lo general no tienen un adecuado diseño y construcción, constituyendo una fuente de contaminación multi puntual. Su potencial de contaminación de las aguas subterráneas ha sido clasificada como moderada (Barranquero, 2015). Esta situación es especialmente preocupante en el sector de las serranías, donde el espesor de la zona no saturada es escaso debido a que el basamento cristalino es poco profundo, y por tanto la disposición de efluentes en pozos ciegos no sería una alternativa adecuada y/o eficiente; sumado a ello, la carga puede moverse rápidamente por el medio fracturado y afectar en forma directa al acuífero.

La alteración de la hidrodinámica como resultado del bombeo para suministro de agua de red también ha facilitado la contaminación del acuífero en el área en el que se concentran las perforaciones más antiguas de OST. La combinación de una cobertura de red cloacal mínima y la distorsión del flujo subterráneo dada por la superposición de los conos de depresión de esas perforaciones, ocasionó el aumento de nitratos en ellas muy por encima de los 50 mg/l recomendados por el Código Alimentario Argentino (Barranquero et al., 2006).

Además del abastecimiento de agua y el tratamiento de efluentes domiciliarios son relevantes en cuanto a fuentes potenciales de contaminación del acuífero las restantes actividades que se desarrollan en la cuenca del arroyo Languyú. En ella las actividades primarias son preponderantes, con un 79,3% de su superficie (55.079 ha) destinada a la producción agrícola; mientras que la ganadería cubre un total de 9985 hectáreas (14,4%). El 6,3% restante se dedica a otras actividades por la presencia del basamento cristalino aflorante o a escasa profundidad (INDEC, 2002). Los rubros industriales más importantes son alimentos y bebidas (38%) y las industrias metálicas básicas/fabricación de productos metálicos (35%). Entre estas actividades las que se han clasificado, utilizando la metodología de Zaporozec (2002) y algunos criterios de Foster e Hirata (1995), con un potencial de contaminación al acuífero de moderado a alto son: a) el tratamiento y/o la disposición final de aguas residuales domésticas, con conexiones causales con la alteración

hidrodinámica ocasionada por la explotación para suministro de agua de red; b) la disposición en suelo de efluentes industriales, principalmente agroindustrias y tambos con fábrica; y, c) la agricultura y ganadería intensiva (Barranquero, 2009; Ruiz de Galarreta et al., 2010). Uno de los indicadores fundamentales de casos de contaminación por este tipo de fuentes son los nitratos que se hallan en concentraciones elevadas en algunas perforaciones particulares con pozos ciegos o importantes cantidades de animales sueltos en sus inmediaciones e inadecuadas condiciones de construcción, protección y mantenimiento.

En tanto, la ciudad de Azul posee un abastecimiento de agua de red del 98,7% de su población, alimentada por el agua subterránea obtenida de 21 pozos, con una extracción anual de alrededor de 9 hm³ (Oficina de Desarrollo Económico de Azul, comunicación personal del 10 Junio de 2014).

La red cloacal tiene una cobertura de 90,2% de la población, de acuerdo a la información proporcionada también por la Oficina de Desarrollo Económico. Los efluentes son procesados en una planta de tratamiento y volcados luego al arroyo Del Azul, en el sector de llanuras, en el cual el arroyo es efluente respecto al acuífero. Al igual que en Tandil, en sectores sin abastecimiento de red cloacal se realiza la eliminación de efluentes domiciliarios en pozos absorbentes. Esta situación ocurre en el sector de llanura donde el acuífero es vulnerable por la poca profundidad del nivel freático.

Ambas redes, agua y cloacas, son gestionadas por CEAL, una empresa mixta con participación gubernamental significativa, a diferencia de Tandil donde la entidad es solo de responsabilidad gubernamental.

Los límites de la cuenca del arroyo Del Azul y del partido de Azul son prácticamente coincidentes con lo cual se puede considerar la clasificación de usos de suelo del partido para describir las principales actividades de la cuenca. A la ganadería se aboca el 57% de la superficie, a la agricultura el 38% y a minería el 5%. En cuanto a producción industrial los dos rubros principales son agroindustrias, con un total de 31% de los establecimientos, y la minería para construcción (17%); la fabricación de productos metálicos también es importante ya que el 12% de los establecimientos industriales corresponden a este rubro. A partir de los trabajos de Peluso et al. (2004), Zabala (2013) y Peluso et al. (2014) se puede concluir que en la cuenca del arroyo Del Azul las actividades con potencial de contaminación moderado a alto son: a) la disposición en suelo de efluentes industriales, principalmente agroindustrias y tambos con fábrica; y b) la agricultura y ganadería intensiva. Al igual que en la cuenca del Langueyú se han encontrado casos puntuales de contaminación con nitratos pero, teniendo en cuenta los estudios antecedentes y la observación en campo de los casos, se infiere que están asociados al uso de fertilizantes nitrogenados en parcelas con agricultura intensiva.

CONCLUSIONES

Como se mostró en los resultados las cuencas presentan más similitudes que diferencias en los cuatro aspectos definidos para su comparación (litología, hidrodinámica, hidroquímica e influencia antrópica). Entre las similitudes más importantes se destacan: los ambientes hidrogeológicos que definen la disponibilidad de agua subterránea (fisurado y poroso), a pesar de las diferencias en el límite inferior del acuífero (basamento cristalino) y los materiales que forman el acuífero en profundidad en el límite NE de la cuenca Del Azul; el régimen climático, en líneas generales, así como el total de los excesos y déficits y sus meses de ocurrencia en el balance hídrico. En tanto difieren, por el emplazamiento de cada ciudad principal en la cuenca y el aprovechamiento de los recursos hídricos, en la dimensión y particularidades del potencial de contaminación a los recursos hídricos producto del manejo antrópico.

Las cuencas poseen en líneas generales el mismo comportamiento hidroquímico, siendo comunes los procesos fundamentales que explican sus variaciones temporales: a) aumento de la salinidad hacia el NE, es decir en la dirección del flujo del agua subterránea; b) el intercambio iónico calcio-magnesio por sodio también en la dirección de flujo; y, c) la

contaminación con nitratos de tipo puntual y multipuntual, como se explicó a partir de distintas fuentes en cada cuenca.

Como principal conclusión de la comparación se extrae que una parte importante de las estrategias para la gestión integral de los recursos hídricos debería centrarse en su manejo antrópico. Esto se debe que el trabajo permitió comprender que la cantidad y calidad de agua estaría más fuertemente condicionada por las decisiones de manejo que por las características naturales intrínsecas de los recursos.

La aplicación de la comparación combinando el enfoque cualitativo, con el estudio en profundidad de dos casos, y cuantitativo, para la búsqueda de generalidades acerca de algunas variables como la hidroquímica, ha resultado una buena herramienta para corroborar el modelo conceptual del sistema de aguas subterráneas en ambas cuencas.

Este estudio mostró que dos o más cuencas hidrogeológicas pueden ser evaluadas con el método comparativo, propio de las ciencias sociales, utilizando herramientas complementarias propias de las ciencias exactas como el análisis estadístico. Se logró por tanto el propósito de un camino metodológico a través del cual trabajar posteriormente con otras cuencas del faldeo para proponer estrategias de gestión conjuntas.

REFERENCIAS

- Aceñolaza, F.G.**, 2000. La Formación Paraná (Mioceno Medio): estratigrafía, distribución regional y unidades equivalentes. In: F.G. Aceñolaza and R. Herbst, eds. *El Neógeno de Argentina. Serie correlación geológica*. Tucumán: 14: 9-27.
- APHA (American Public Health Association)**, 2005. *Standard Methods for the Examination of Water & Wastewater*. Washington, D.C.: APHA, 21st Edition.
- Barranquero, R.**, 2009. Análisis hidrogeológico y evaluación de cargas contaminantes en la cuenca del arroyo Langueyú. Tesis Master. Universidad Nacional de La Pampa.
- Barranquero, R.**, 2015. Análisis y evaluación del sistema hidrogeológico ambiental en la cuenca del arroyo Langueyú, Tandil, Buenos Aires. Tesis Doctorado. Universidad Nacional de Córdoba.
- Barranquero, R., Ruiz de Galarreta, A. y Banda Noriega, R.**, 2006. Análisis integral de la gestión del recurso hídrico en la ciudad de Tandil, Buenos Aires, Argentina. Cuadernos del CURIHAM - FCEIA (UNR), 12, 65-75.
- Barranquero, R. S., Varni, M. y Ruiz de Galarreta, A.**, 2015. Relación arroyo-acuífero en un sistema hídrico afectado por explotación antrópica. Revista digital Estudios Ambientales. Editada por el CINEA. Vol. 3 Nro. 2.
- Barranquero, R. S., Varni, M. R., Pardo, R., Vega, M., Zabala, M. A. y Ruiz de Galarreta, V. A.**, 2016. Joint interpretation of the hydrochemistry of two neighbouring basins by N-way multivariate methods. *Environmental Earth Sciences* (2016) 75 (4): 335 1-14.
- Cingolani, C.**, 2010. The Tandilia System of Argentina as a southern extension of the Río de la Plata craton: an overview. *International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)*, 100 (2), 221-242.
- Dalla Salda, L.**, 1999. Cratón del río de La Plata. 1. Basamento granítico-metamórfico de Tandilia y Martín García. *Anales*. 1999; 29 (4): 91-100.
- Dalla Salda, L., Spalletti, L., Poire, D., De Barrio, R., Echeveste, H. y Benialgo, A.**, 2006. Tandilia. In: H. Echeveste and A. Benialgo, eds. *Serie correlación geológica [online]*. INSUGEO, 21: 17-46.
- Duverger, M.**, 1996. *Métodos de las ciencias sociales*. Barcelona: Ariel Sociología. Faber, N., Bro, R. and Hopke, P.K., 2003. Recent developments in candecomp/parafac algorithms: a critical review. *Chemometric Intelligent Laboratory Systems*, 65, 119-137.
- Fidalgo, F., De Francesco, F. y Pascual, R.**, 1975. Geología superficial de la Llanura Bonaerense. In: *Relatorio Geología Provincia de Buenos Aires*. En: VI Congreso Geológico Argentino; 21-27 de septiembre de 1975, Bahía Blanca, Argentina. Buenos Aires: imp. CONI S.A.C.I.F.I. pp. 104-06.
- Foster, S. e Hirata, R.**, 1995. Groundwater pollution risk assessment. A methodology using available data. CEPIS (OPS-OMS). Lima. 2nd Edition.
- Galego Fernandes, P., Bahir, M., Mendonca, J., Carreira, P., Fakir, Y. y Silva, M. O.**, 2005. Anthropogenic features in the Sines (Portugal) and Essaquirea (Morocco) coastal aquifers: a comparative study of their hydrochemical evolution by a principal component analysis. *Estudios Geológicos*, 61, 207-219.

- Hernández, M., Giaconi, L.M. y González, N.,** 2002. Línea de base ambiental para las aguas subterráneas y superficiales en el área minera de Tandilia, Buenos Aires, Argentina. En: E. Bocanegra, D. Martínez and H. Massone, eds. *Groundwater and human development*. Mar del Plata: A A Balkema Publishers, 336-343.
- INDEC,** 2002. Censo Nacional Agropecuario 2002. Total del país y provincias por departamento: resultados provisionales. Buenos Aires: INDEC, Serie 1, resultados generales N° 1.1.
- INDEC,** 2010. <http://www.censo2010.indec.gov.ar/resultadosdefinitivos.asp> [Accessed 1 August 2014].
- Kruse, E.,** 1986. Aspectos geohidrológicos de la región sudoriental de Tandilia- Cuencas de los Aos. Vivorata, Las Brusquitas y El Durazno. *Asociación Geológica Argentina*, Tomo XLI (3-4), 367-374.
- Marchese, H.G. y Di Paola, E.,** 1975. Reinterpretación estratigráfica de la Perforación Punta Mogotes I, Provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 30 (1): 44-52.
- Merino Escobar, J.M.,** 1993. El debate cualitativo/cuantitativo en la investigación social comparativa. Concepción, Chile: PAIDEIA 18.
- Millenium Ecosystem Assesment,** 2005. *Ecosistemas y Bienestar Humano: Informe de Síntesis*. Washington, D.C.: World Resources Institute.
- Panno, S.V. y Kelly, W.R.,** 2004. Nitrate and herbicide loading in two groundwater basins of Illinois' sinkhole plain. *Journal of Hydrology*, 290, 229-242.
- Peluso, F., Cazenave, G., Vives, L. y Usunoff, E.,** 2004. Análisis areal y prospectivo de riesgo sanitario incorporando modelos de transporte de solutos en aguas subterráneas. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 4, 166-178.
- Peluso, F., Dubny, S., Othax, N. y Gonzalez Castelain, J.,** 2014. Environmental Risk of Pesticides: Applying Del Azul pestrisk to Freshwaters of an Agricultural Area of Argentina. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 20(5), 1177-1199.
- Ragin, C.C.,** 1987. *The Comparative Method: Moving Beyond Qualitative and Quantitative Strategies*. California: University of California Press.
- Ruiz de Galarreta, A.,** 2006. Geohidrología y balance hidrológico de la zona no saturada en la cuenca superior del arroyo Tandileofú, provincia de Buenos Aires. Tesis Doctorado. Universidad Nacional de La Plata.
- Ruiz de Galarreta, A. y Banda Noriega, R.,** 2005. Geohidrología y evaluación de nitratos del Partido de Tandil, Buenos Aires, Argentina. En: *Actas del IV Congreso Argentino de Hidrogeología y II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de la Hidrología Subterránea*. Octubre 2005. UNCR. Río Cuarto, Córdoba. pp. 99-108.
- Ruiz de Galarreta, V.A., Banda Noriega, R.B., Barranquero, R.S., Díaz, A.A., Rodríguez, C.I. y Miguel, E.R.,** 2010. Análisis integral del sistema hídrico, uso y gestión. Cuenca del arroyo Languyú, Tandil, Argentina. *Boletín Geológico y Minero de España*, 121 (4), 343-356.
- Sartori, G. y Morlino, L. (comps.),** 1994. *La comparación en las ciencias sociales*. Madrid: Alianza.
- Teruggi, M. y Kilmurray, J.,** 1975. Tandilia. En: *Relatorio Geología Provincia de Buenos Aires*. VI Congreso Geológico Argentino, Bs. As. 55-77.
- Thorntwaite, C.W. y Mather, J.R.,** 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Centertown, N. J.: Laboratory of Climatology, Publication 10.
- Varni, M.,** 2013. Application of several methodologies to estimate groundwater recharge in the Pampeano aquifer, Argentina. *Water Technologies and Sciences*, 4(3), 63-85.
- Zabala, M.E.,** 2013. El origen de la composición química del acuífero freático en la cuenca del arroyo del Azul. Tesis Doctorado. Universidad Nacional de Córdoba.
- Zapozec, A.,** 2002. *Groundwater Contamination Inventory. A methodological Guide*. IHP-VI, SERIES ON GROUNDWATER Number 2.
- Zárate, M., Mehl, A. y Castro, M.,** 2010. Geomorfología de la cuenca del arroyo del Azul. Instituto de Hidrología de Llanuras, Azul, Buenos Aires. Informe inédito. 66 pp.