

Distribución espacial de isótopos estables en el acuífero pampeano en el sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina)

Orlando Mauricio Quiroz Londoño^(1,2) y Daniel Emilio Martínez^(1,2)

(1) Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (CONICET-UNMdP)
demarti@mdp.edu.ar

(2) Instituto de Geología de Costas y del Cuaternario (UNMdP-CIC prov. Bs. As.).
Universidad Nacional de Mar del Plata. IGCyC-CIC. Funes 3350. Mar del Plata, Argentina
qlondono@mdp.edu.ar

RESUMEN

El concepto de mapa isotópico es relativamente reciente y se utiliza para representar la distribución espacio-temporal de las proporciones de isótopos estables presentes en diversas matrices o reservorios ambientales, tales como precipitación, océanos, rocas, plantas y/o animales. En este contexto, el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) ha financiado un proyecto de investigación en el que se han elaborado mapas de distribución de isótopos estables para el acuífero pampeano al sudeste de la provincia de Buenos Aires. Para ello se ha incluido información de 787 pozos domiciliarios y de riego para abastecimiento de agua subterránea, generada y/o recopilada por el grupo de Hidrogeología de la UNMdP. En la elaboración de estos mapas se han utilizado técnicas geoestadísticas, que permitieron establecer patrones de autocorrelación espacial. Los diferentes modelos utilizados fueron probados con el método de validación cruzada. Los resultados obtenidos están siendo integrados al modelo hidrogeológico conceptual de la región, generando herramientas que podrán contribuir a la gestión de los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos. Adicionalmente se espera que los resultados de este trabajo sirvan de insumo en diferentes áreas que utilicen la trazabilidad del agua en distintos procesos ambientales en la región.

Palabras clave: Acuífero, Acuífero Pampeano, Geoestadística, Isótopos Estables.

Distribution maps of stable isotopes in the Pampean aquifer in the Southeast of Buenos Aires province (Argentina)

ABSTRACT

The relatively recently developed isotopic maps (isoscaples) are used to visualize large-scale and spatiotemporal distributions of stable isotope ratios in various environmental matrices or reservoirs such as rainfall, tap water, oceans, rocks, plants and animals. In this context the International Atomic Energy Agency (IAEA) financed the project "Groundwater recharge processes inferred from isoscaples in the Buenos Aires Province, Argentina". In the development of this research project, groundwater isoscaples in the southeast of Buenos Aires province were carried out, considering 787 groundwater sampling sites. In the generation of these maps, geostatistical techniques have been used in order to establish patterns of spatial self-correlation. The models obtained were tested using leave-one-out cross-validation. The results obtained are being integrated into the conceptual hydrogeological model of the region, generating tools that contribute to the management of surface and ground water resources. Additionally, it is expected that the results of this study will serve as an input in different research areas that use water traceability to study different environmental processes in the region.

Keywords: aquifer, geostatistics, isoscaples, Pampean aquifer, stable Isotopes.

Introducción

El sector sudeste de la provincia de Buenos Aires ocupa un lugar relevante en la base de la economía nacional Argentina ya que en ella se desarrollan importantes actividades agrícolas, ganaderas y turísticas. Todas las ciudades que se encuentran en esta región se abastecen del recurso hídrico subterráneo, más exactamente del acuífero Pampeano. Esto ha llevado a que múltiples estudios se enfoquen en la caracterización de dicho acuífero, logrando importantes avances en la comprensión de la dinámica del mismo y su interacción con diferentes cuerpos de agua superficial (Martínez et al., 2007; Quiroz Londoño et al., 2008a; Kruse et al., 2010; Martínez et al., 2011; Carol et al., 2012; Bocanegra et al., 2013; Romanelli et al., 2014; Carol et al., 2015; Quiroz Londoño et al., 2015; Zabala et al., 2015; Martínez et al., 2016; Martínez et al., 2017). En ese sentido, los isótopos estables del agua como trazadores ambientales han sido ampliamente utilizados para comprender mejor el origen, la dinámica y las interconexiones entre los diferentes elementos del ciclo hidrológico (Kendall y McDonnell, 2012). Se ha utilizado la fuerte covarianza entre $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en la precipitación (Craig, 1961) para la construcción de "líneas de agua meteóricas" locales y regionales, que sirvieron de base, por ejemplo, para evaluar el origen de las aguas subterráneas modernas y antiguas (Rozanski, 1985; Clark y Fritz, 1997) y su interacción con los recursos hídricos superficiales. Todas las consideraciones anteriores han permitido que los isótopos estables sean usados como trazadores para estudiar procesos hidrológicos e hidrogeológicos, tales como patrones de flujo de agua subterránea, evaluación de la recarga e interacción de aguas subterráneas y superficiales en cuencas de extensiones variadas ((Gat, 1996; Gibson et al., 1998). El exceso de deuterio o d-exceso (d) definido por la ecuación $d = \delta^2\text{H} - 8\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ (Dansgaard, 1964), denota la abundancia relativa entre $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$. Está determinado por condiciones ambientales físicas, como son la humedad relativa, temperatura media de la superficie del mar y velocidad del viento (Froehlich et al., 2002) (Merlivat y Jouzel, 1979). Sus valores se adquieren durante la evaporación y no cambian significativamente en la evolución posterior de la masa nubosa, salvo por evaporación (Jiménez-Martínez y Custodio, 2010), pudiendo ser utilizado como un indicador de la génesis de ese vapor (Rindsberger et al., 1983).

La gestión de los recursos hídricos en una región requiere conocer la distribución tanto temporal como espacial de los diferentes procesos y fenómenos hidrológicos que tienen lugar. En ese sentido, los mapas isotópicos (isoscapes en inglés, como contracción de isotope landscapes) se ha orientado en la visualización y análisis de distribuciones espaciales y temporales a gran escala de isótopos estables en diversas matrices o reservorios ambientales, tales como lluvia, océanos, rocas, plantas y animales (Bowen y West,

2008). Estos mapas utilizan para su generación modelos lineales que incluyen covariables ambientales, tales como elevación, temperatura, precipitación, distancia del océano, estación, latitud, etc. (Wassenaar et al., 2009). Los mapas isotópicos más difundidos corresponden a los mapas isotópicos globales de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ presentes en la precipitación (Dansgaard, 1964; IAEA y WMO, 2006). Para generar estos mapas isotópicos se utiliza como base la Red Global de Isótopos en Precipitación (GNIP), logrando establecer la composición isotópica de la lluvia a nivel global con buenos resultados (Terzer et al., 2013). Los patrones mostrados por los mapas isotópicos pueden ser aprovechados en investigaciones hidrológicas, climatológicas, paleoecológicas, biológicas, arqueológicas y forenses (Wassenaar et al., 2009). Las aplicaciones de este tipo de mapas en agua subterránea a nivel local han sido menos implementadas, si bien es posible encontrar estudios antecedentes (Darling et al., 2003; Kortelainen y Karhu, 2004; Wassenaar et al., 2009; Quiroz Londoño et al., 2015; Sánchez-Murillo y Birkel, 2016). En dichos trabajos se han establecido áreas y periodos de recarga preferencial y relaciones entre los acuíferos y/o cuerpos de agua superficial, mejorando en todo los casos los modelos hidrogeológicos de las zonas estudiadas. El uso de este tipo de mapas puede ser potenciado con el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales cuentan con herramientas geoestadísticas para manejo y análisis espacial de datos. El objetivo principal de estas herramientas es derivar una superficie o "mapa" utilizando los valores de una determinada variable de los lugares medidos para predecir valores en localizaciones donde se desconoce el valor de la variable estudiada, dando como resultado un mapa de tipo predictivo desde el punto de vista espacial. En este trabajo se presentan tanto mapas de contenidos isotópicos como de exceso de deuterio del acuífero pampeano en el sudeste bonaerense, elaborados a partir de datos medidos en diferentes proyectos de investigación en los últimos 15 años. Estos mapas permiten efectuar predicciones acerca de valores esperables de estos parámetros en el agua subterránea, a la vez que pueden considerarse como una compilación de información isotópica del acuífero para esta sección de la provincia de Buenos Aires, Argentina, como fuente de información para futuros trabajos a escala local y regional.

Características del área de estudio

El área de este trabajo es una porción de la Región Pampa Argentina que incluye sitios naturales y áreas urbanizadas (Figura 1). Se extiende sobre un área aproximada de 83.000 km², incluyendo ciudades como Mar del Plata, Balcarce, Miramar, Necochea, Quequén, Pinamar, Villa Gesell, Olavarría, Azul, Tandil y Lobería. Las principales actividades económicas de esta zona son la agricultura, la ganadería, la minería, la industria y el turismo. La zona propuesta es una vas-

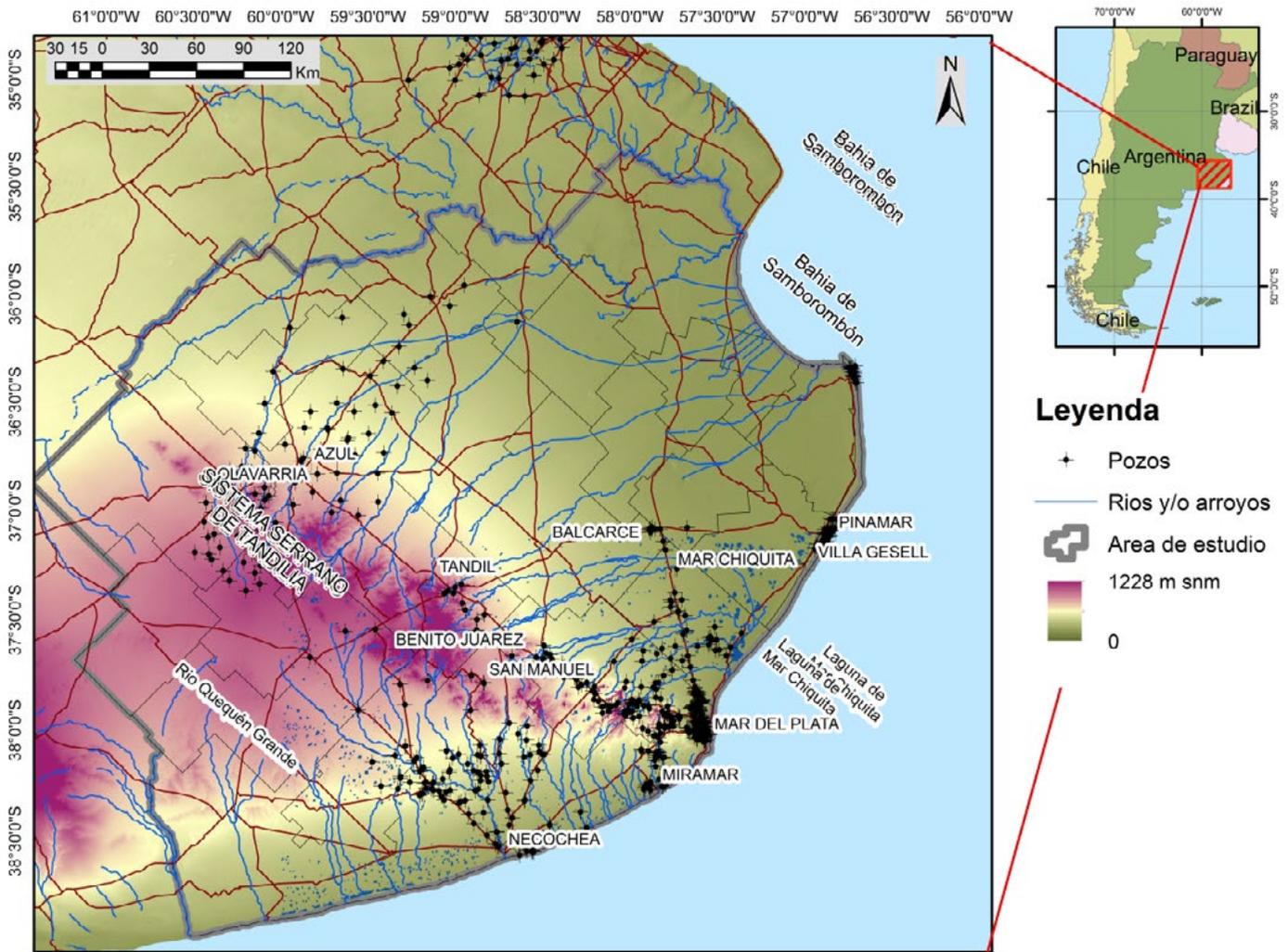


Figura 1. Mapa de Localización de la zona de estudio.
Figure 1. Study area location map.

ta área plana alrededor del sistema serrano de Tandilia. Dicho sistema cruza el área con dirección NE-SW, alcanzando una altura máxima de 510 metros sobre el nivel del mar (m snm). La estratigrafía de la región está definida en forma general por tres grandes unidades (Teruggi y Kilmurray, 1975): i) Basamento cristalino Precámbrico, ii) conjunto de rocas sedimentarias de edad precámbrica a paleozoica inferior denominada informalmente Cubierta Sedimentaria Precenozoica y iii) Cubierta de Sedimentos y Sedimentitas de Edad Cenozoica (Pleistoceno – Holoceno especialmente). Desde el punto de vista hidrogeológico, la primera unidad se ha considerado como impermeable y la segunda como un acuífero fracturado con baja permeabilidad. Por su parte, los sedimentos Cenozoicos conforman el acuífero de mayor importancia en la región, el acuífero Pampeano (Sala y Angelelli, 1975), que está conformado por sedimentos limo-arenosos y arenas finas con intercalaciones arcillosas. Corres-

ponde a un acuífero libre a semiconfinado, formado por sedimentos limo arenosos, en una secuencia de espesor variable de entre 20 y 100 metros, con un espesor de zona no saturada que fluctúa entre los 0.5 m en la zona de llanura y 0.25 m cerca de las zonas serranas. La recarga es autóctona directa, existiendo otra concurrente, por afluencia subterránea desde la región serrana. La descarga por su parte ocurre hacia los sistemas fluviales de comportamiento ganador y regionalmente hacia las regiones circundantes y/o hacia el mar, principalmente como caudal base de los cursos de agua. Se han determinado para esta región valores de caudales específicos que oscilan entre 2 y 4 m³/h/m y caudales de explotación variables entre 20 a 100 m³/h. Los valores de transmisividades observadas están ente 700 y 800 m²/día cerca de las sierras y entre 80 y 150 m²/día en la parte distal, mientras que los valores de coeficiente de almacenamiento encontrados oscilan entre 10⁻² y 10⁻³ (Santa Cruz y Silva Bus-

so, 1999). La salinidad del Acuífero Pampeano en la zona de estudio oscila entre 0,5 y 2 g/l (Auge 2004) y variando en forma general desde bicarbonatadas cálcicas en zonas de recarga a aguas bicarbonatadas sódicas en zonas de descarga (Martínez et al., 2007; Quiroz Londoño et al., 2008b; Bocanegra et al., 2013; Romanelli et al., 2014; Quiroz Londoño et al., 2015; Martínez et al., 2017).

Metodología

Los datos utilizados en este trabajo en la han sido generados en la zona por el Grupo de hidrogeología de la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP), en total se han generado 653 análisis de isótopos estables en entre marzo de 2003 y agosto de 2018 en 579 puntos diferentes. Se han repetido análisis para evaluar la variación de la composición isotópica en el tiempo en 115 estaciones de muestreo, los valores isotópicos obtenidos en estas estaciones en diferentes fechas fue promediado para este análisis. Para este trabajo se han adicionado además datos publicados en la bibliografía (Galindo et al., 2007; Carretero et al., 2013; Rodrigues Capítulo, 2015; Zabala et al., 2015). El número total de los datos obtenidos de manera bibliográfica es de 134, cubriendo un periodo de tiempo entre mayo de 2000 y noviembre de 2014. En la mayoría de los casos estos datos corresponden a toma de datos únicas. Algunos datos se encuentran fuera de la zona de interés de este documento, pero fueran considerados para darle continuidad espacial al procesamiento geoestadístico.

Cerca del 90% de las muestras muestreadas en este trabajo fueron analizadas en el laboratorio de hidrogeología e hidrología isotópica del Grupo de hidrogeología de la UNMDP, mediante la técnica de espectroscopia laser, utilizando hasta el año 2016 un instrumento Los Gatos Research DLT-100 y desde el año 2017 un equipo LIWA-45-EP desarrollado por la misma empresa. El resto de los análisis fueron realizados por espectrometría de masas en el Instituto de Geocronología y Geología Isotópica (INGEIS), siguiendo la metodología de Coleman et al. (1982) y Panarello and Parica (1984). Todos los resultados son expresados en δ , definido como: $\delta = 1000 (R_s - R_p) / R_p$, donde δ = desviación isotópica en ‰; s = muestra; p = referencia internacional; R = relación isotópica ($^2\text{H}/^1\text{H}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$). La referencia utilizada fue la Vienna Standar Mean Ocean Water (V-SMOW) (Gonfiantini, 1978) y las incertidumbres fueron de $\pm 0.2\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ y de $\pm 1\text{‰}$ para $\delta^2\text{H}$ para ambos laboratorios. Dado que las muestras analizadas en uno y otro laboratorio no son contemporáneas en sus momentos de toma, no se realizó una comparación de resultados, pero en un trabajo antecedente (Martínez et al., 2017) se utilizaron series temporales combinando datos de ambos laboratorios sin observarse cambios en la continuidad de las mismas. Por otra parte, a partir de los valores de la desviación isotópica $\delta^{18}\text{O}$ ‰ $\delta^2\text{H}$ ‰ se calculó para cada muestra individualmente el

valor del exceso de deuterio (d), según la ecuación: $d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}\text{‰}$. Inicialmente se realizó un análisis de correlación entre la composición de isótopos estables en el acuífero y las covariables ambientales más típicas para este tipo de mapas (elevación, distancia del océano, estación, latitud), encontrando en todos los casos valores muy bajos de correlación. Debido a esto se decidió realizar una análisis geoestadístico básico, el cual fue realizado utilizando la herramienta "Geoestadistical Analyst", incluida en el software ArcGis 9.2 (ESRI, 2006). Para la implementación adecuada de este procedimiento se requiere de un número mínimo de datos ($n=30$), con distribución normal y baja asimetría. El detalle del procedimiento realizado fue documentado por Quiroz Londoño *et al.* (2015) y se resume en la figura 2. Los diferentes modelos obtenidos se compararon utilizando el método de validación cruzada (Pollice y Jona Lasinio, 2008). Dicho método permite seleccionar el modelo que realiza las mejores predicciones basándose en el umbral parcial más similar a la varianza de los datos, menor error medio estándar (ASE), menor error cuadrático medio (RMS), error cuadrático medio estandarizado (RMSS) más cerca de uno y mayor confiabilidad.

Resultados y discusión

Para tener una visión preliminar de la composición isotópica del agua subterránea en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, en función de los valores isotópicos de la lluvia (principal fuente de recarga del acuífero), se realizó un análisis convencional de la información isotópica en la zona de estudio. La figura 3, muestra un gráfico convencional de $\delta^2\text{H}$ contra $\delta^{18}\text{O}$, en el cual fueron incluidos todos los datos de agua subterránea y precipitación. Adicionalmente se incluyeron la línea meteórica mundial (LMM) (Craig, 1961) y a la recta meteórica local (LML) obtenida mediante la metodología establecida por (IAEA, 1992) y la cual fue definida por (Quiroz Londoño et al., 2015).

Para el caso de la composición isotópica del agua subterránea, aparecen en su mayoría agrupadas alrededor de una sección entre la LMM y la LML (Figura 3). El valor medio isotópico de la precipitación -4.96 y -26.87 para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, respectivamente, se ubica en el sector medio de la distribución isotópica del agua subterránea. Este hecho indica que es un sistema bien mezclado. Sin embargo, se observaron algunas variaciones en los valores medidos, sugiriendo la acción de varios procesos locales combinados que pueden alterar la composición isotópica de la lluvia original: infiltración selectiva, evaporación previa a la infiltración, percolación directa a través de canales preferenciales, mezclas de aguas superficiales de diferentes orígenes y de variaciones causadas por acciones antrópicas (riego especialmente).

En el proceso geoestadístico fueron evaluados 10 modelos distintos para cada parámetro en aguas subterráneas (isótopos estables y exceso de deuterio),

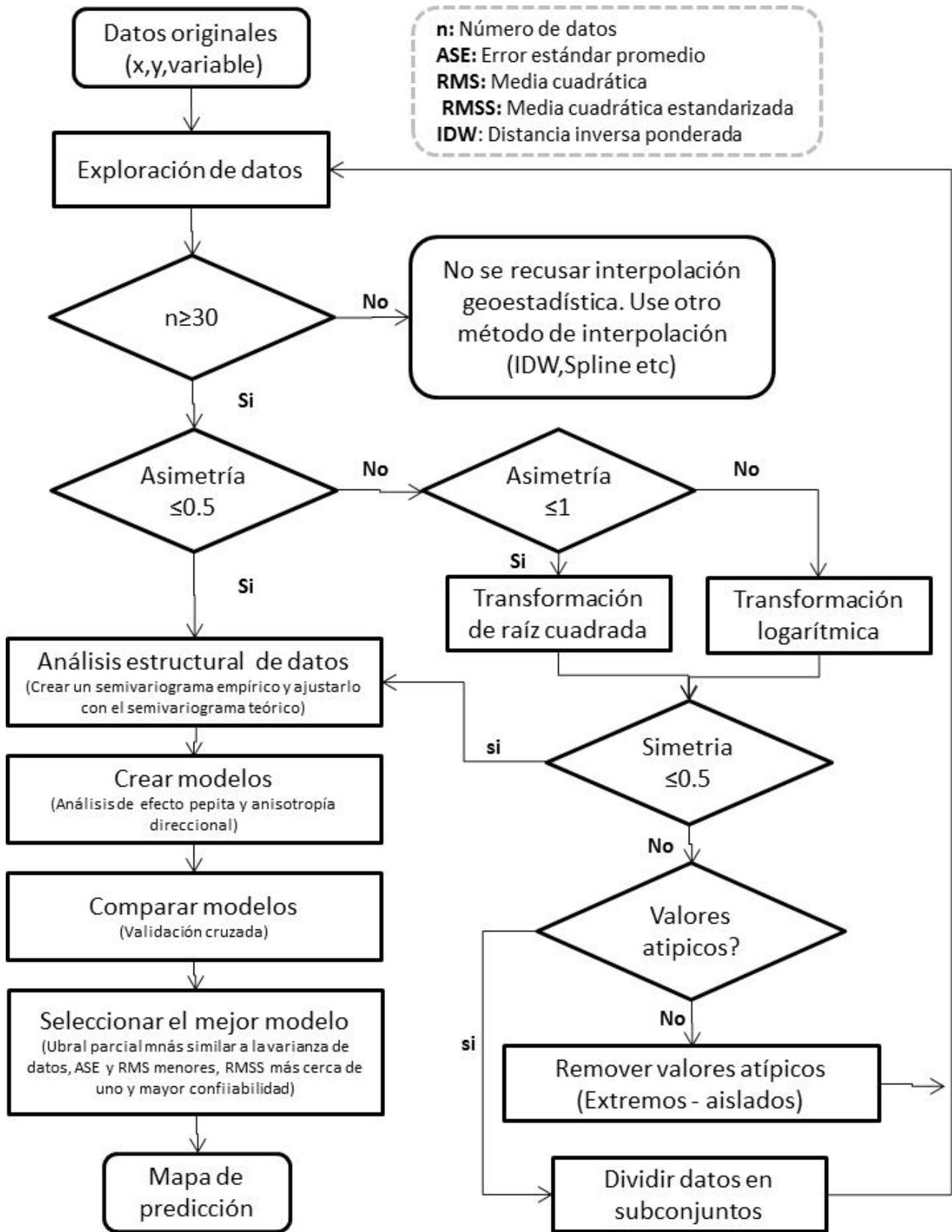


Figura 2. Modelo de flujo del proceso geoestadístico utilizado. Modificado de (Quiroz Londoño et al., 2015).
Figure 2. Flow model of the statistical process.

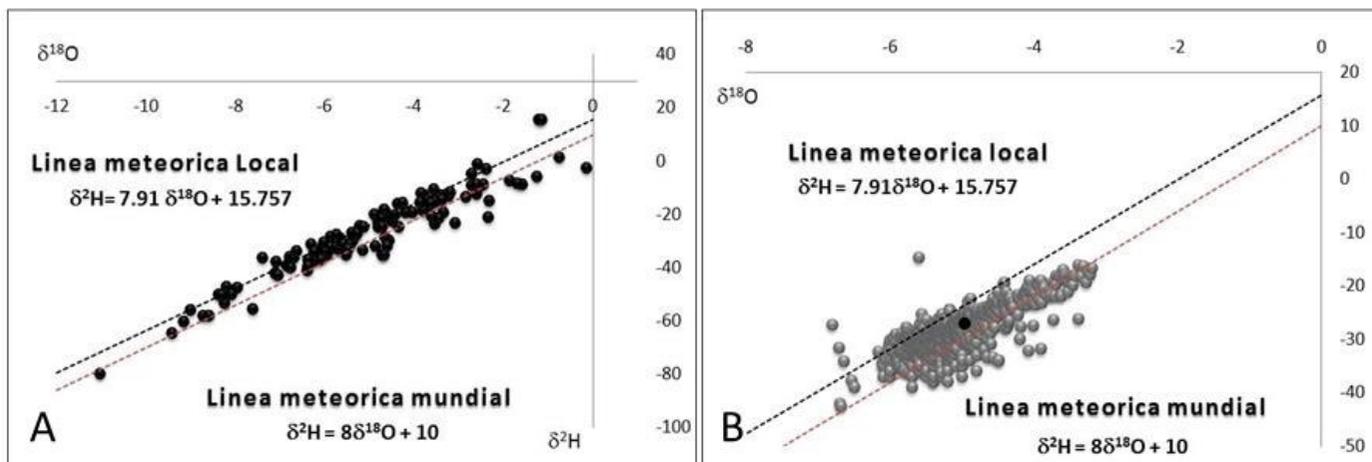


Figura 3. Gráfico de correlación entre $\delta^{18}O\text{‰}$ y $\delta^2H\text{‰}$ en muestras de precipitación (A) y en muestras obtenidas en el acuífero Pampeano (B), en ambos casos se incluyen la línea meteórica mundial y local. El punto en negro en el gráfico B indica el valor isotópico medio de la precipitación.

Figure 3. Correlation graph between $\delta^{18}O\text{‰}$ and $\delta^2H\text{‰}$ in precipitation samples (A) and in samples obtained in the Pampean aquifer (B), in both cases the global and local meteoric water line are included. The black dot on graph B indicates the average isotopic value of the precipitation.

que están incluidos en el programa SIG utilizado. El modelo que mejor se ajusta para la distribución espacial de los isótopos es el *rational quadratic* y para el exceso de deuterio es el *J-Besel* (Tabla 1). Los mapas resultantes del análisis geoestadístico para las aguas subterráneas pueden observarse en la figura 4. El ajuste de los modelos seleccionados es coherente con los datos medidos en las zonas con buena densidad de puntos y solo en pocas ocasiones supera el valor de incertidumbre utilizado en la determinación isotópica. En las zonas con datos espaciados o baja densidad de los mismos, se hace necesaria la inclusión de más datos para aumentar la confiabilidad de los resultados. En zonas con las características geomorfológicas y de extensión como la que se incluye en este trabajo las incertidumbres aumentan ante la falta de datos debido a la ausencia de correlación de los isótopos con las características del paisaje (altura, distancia desde la costa, continentalidad etc.)

La relación lineal entre δ^2H y $\delta^{18}O$ fue bien representada por los mapas isotópicos obtenidos, mostrando en cada mapa isotópico valores isotópicos más empobrecidos en el área cercana al sistema serrano de Tandilia, mientras que los valores menos empobrecidos se ubican en los límites del área de estudio al norreste, coincidentes con las áreas con menor pendiente y menor densidad de drenaje. Dichas características naturales pueden causar cierto grado de evaporación del agua previo en el proceso de recarga o el efecto de la infiltración local de lluvias costeras enriquecidas de origen marino con bajo fraccionamiento.

Un aspecto a analizar al establecer la distribución espacial de los isótopos estables en aguas subterráneas es la representatividad de las muestras utilizadas en el proceso geoestadístico. En este sentido,

Martínez et al. (2014) establecieron que para el acuífero Pampeano en esta región no existen diferencias significativas entre los valores de $\delta^{18}O$ y δ^2H para una misma muestra recolectada en diferentes fechas de muestreo, además de que en áreas donde el espesor del acuífero es 50 m, la distribución de la composición isotópica en profundidad es homogénea. Estas premisas darían validez a las predicciones obtenidas para este acuífero. Por su parte, el mapa de distribución de d-exceso (figura 4) muestra un predominio de valores entre 10‰ y 14‰, lo cual indica una recarga originada en el vapor de agua reciclado dentro del área analizada. Valores de d-exceso <10‰ se encuentran en la zona central del mapa (área cercana a la localidad de Benito Juárez), los cuales indican un proceso de recarga con agua evaporada. La evaporación previa a la infiltración en este sector puede tener una causa geológica, al existir la denominada "paleosuperficie Tandil" (Teruggi et al., 1973), que posee una menor permeabilidad que las rocas y sedimentos subyacentes, generando encharcamientos y una subsecuente evaporación. Este mapa, sumado a los mapas isotópicos obtenidos, circunscriben una recarga en esta zona con aguas evaporadas originadas en vapor reciclado, las muestras ubicadas en estas zonas, sugieren procesos de evaporación en los gráficos de correlación isotópica (Figura 3B). Todo lo anterior deja claro que si bien existe una zona de recarga regional en las zonas topográficamente más elevadas del área, existe una recarga distribuida en toda la zona, la cual modifica la marca isotópica del acuífero y genera una variación espacial significativa.

Es claro que el uso de mapas isotópicos en aguas subterráneas, así sea de modo indicativo y preliminar, deben obedecer y ser congruentes con modelos hidro-

Variable	Parametro	Models									
		Circular	Spherical	Exponential	Gaussian	Tetraspherical	Pentaspherical	Hole Effect	Rational Cuadratic	J-Bessel	K-Bessel
$\delta^{18}O$	Partial sill	0.294	0.258	0.268	0.708	0.239	0.227	0.202	0.000	0.188	0.839
	ASE	0.597	0.564	0.562	0.888	0.545	0.533	0.540	0.256	0.528	0.966
	RMS	0.462	0.461	0.461	0.462	0.461	0.461	0.461	0.461	0.461	0.462
	RMSS	0.778	0.820	0.823	0.543	0.848	0.866	0.854	1.802	0.874	0.503
	Confiability	99.538	99.539	99.539	99.538	99.539	99.539	99.539	99.539	99.539	99.539
δ^2H	Partial sill	11.963	12.077	11.377	10.898	12.205	12.291	8.983	11.622	10.401	11.358
	ASE	2.858	2.864	2.993	2.867	2.868	2.869	2.823	2.877	2.861	2.866
	RMS	2.855	2.850	2.786	2.884	2.841	2.835	2.949	2.799	2.909	2.867
	RMSS	1.053	1.050	0.959	1.060	1.045	1.043	1.079	1.041	1.066	1.056
	Confiability	97.145	97.150	97.214	97.116	97.159	97.165	97.051	97.201	97.091	97.133
d Excess	Partial sill	13.998	15.126	15.834	22.685	16.002	17.122	10.583	15.153	7.539	24.335
	ASE	3.921	4.075	4.169	5.060	4.190	4.334	3.542	4.137	3.041	5.236
	RMS	2.533	2.535	2.535	2.539	2.537	2.536	2.531	2.533	2.529	2.542
	RMSS	0.646	0.623	0.609	0.508	0.606	0.586	0.713	0.615	0.828	0.493
	Confiability	97.467	97.465	97.465	97.461	97.463	97.464	97.469	97.467	97.471	97.458

Tabla 1. Resultados de los modelos geoestadísticos aplicados.

Table 1. Results of the geostatistical models used.

geológicos conceptuales que expliquen el comportamiento y la dinámica del acuífero. La limitación más importante para la generación de este tipo de mapas está vinculada a la disponibilidad, resolución y distribución espaciotemporal de mediciones isotópicas. Los mapas de distribución obtenidos (Fig. 4 A, B y C) permite sectorizar las composición isotópica del agua subterránea según procesos y factores regionales que determinan la composición de la recarga: orígenes de masa de vapor, distancia al mar, efecto de altitud, pendiente regional, proximidad de la capa de tosca y ambientes medanosos de infiltración rápida, y por otra parte sectores de descarga de flujos ascendentes como ha sido determinado en algunos sectores por Quiroz Londoño et al. (2015). Puede entonces, a partir de estos, aproximarse la distribución observada a la dominancia de uno de estos factores y ponerse atención en pequeños sectores diferenciados que indicarían procesos locales. Por otra parte los sectores de aguas isotópicamente más enriquecidas, en color rojo en figuras 4A y 4B suelen tener aguas de mala calidad por exceso de sales o específicamente de As, y se importa en ellos agua de los otros sectores, por lo cual la composición isotópica podría utilizarse para evaluar el efecto de procesos antrópicos, fugas de sistemas de distribución de agua o alcantarillados, etc.

El uso combinado y análisis de mapas isotópicos de precipitación y aguas subterráneas permitiría entre otras cosas, continuar con la sectorización de áreas de recarga preferencial para la región (Wassenaar et al., 2009; Sánchez-Murillo et al., 2016). Es por esto que se hace necesario aumentar las estaciones de medición mensual de la precipitación en la zona. En la actualidad se cuenta con 6 estaciones de mediciones de muestras mensuales compuestas, lo cual limita la aplicación del análisis geoestadístico.

Conclusiones

Los primeros mapas isotópicos para el acuífero pampeano en el sudeste de la provincia de Buenos Aires se han elaborado utilizando un total de 787 sitios de muestreo. Sin embargo, la cobertura espacial de información no es homogénea, por lo cual se recomienda continuar con la adquisición de datos isotópicos. Los mapas isotópicos muestran una disposición de distribución en bandas de orientación NW-SE, con los valores más empobrecidos en el sector serrano y periserrano de Tandilia y enriquecimientos progresivos hacia las zonas de Mar Chiquita y San Borombón. Por su parte, el mapa de distribución de exceso de deuterio indica el predominio de recarga a partir de vapor reciclado dentro del área de estudio y sugiere controles geológicos que resultan en evaporación previa a la infiltración en la parte norte de la cuenca del río Quequén Grande. La evaporación previa a la infiltración podría relacionarse con la presencia de capas continuas de tosca a poca profundidad, provocando un retraso en la infiltración con posible evaporación en la franja capilar.

Esta contribución puede servir de información de base en estudios que involucren la trazabilidad del agua en diferentes procesos ambientales en el área. Adicionalmente, estos mapas pueden ser utilizados como punto de partida para el diseño y establecimiento de nuevas redes de monitoreo, las cuales podrán retroalimentar los modelos utilizados para su generación, mejorando la capacidad predictiva de los mismos.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico del OIEA a través de su Proyecto de Investigación Coordinado

F30059 titulado "Evaluación de los recursos de agua subterránea a escala local/nacional". Un agradeci-

miento especial a todos integrantes del grupo de hidrogeología de la Universidad Nacional de Mar del Plata quienes han tomado muestras en sus diferentes actividades de campo.

Referencias

Bocanegra, E., Londoño, O. Q., Martínez, D., & Romaneli, A. (2013). Quantification of the water balance and hydrogeological processes of groundwater-lake interactions in the Pampa Plain, Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 68(8), 2347-2357.

Bowen, G. J., & West, J. B. (2008). Isotope landscapes for terrestrial migration research. *Terrestrial ecology*, 2, 79-105.

Carol, E., Braga, F., Da Lio, C., Kruse, E., & Tosi, L. (2015). Environmental isotopes applied to the evaluation and quantification of evaporation processes in wetlands: a case study in the Ajó Coastal Plain wetland, Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 74(7), 5839-5847.

Carol, E. S., Kruse, E. E., Laurencena, P. C., Rojo, A., & Deluchi, M. H. (2012). Ionic exchange in groundwater hydrochemical evolution. Study case: the drainage basin of El Pescado creek (Buenos Aires province, Argentina). *Environmental Earth Sciences*, 65(2), 421-428.

Carretero, S. C., Dapeña, C., & Kruse, E. E. (2013). Hydrogeochemical and isotopic characterisation of groundwater in a sand-dune phreatic aquifer on the northeastern coast of the province of Buenos Aires, Argentina. *Isotopes in environmental and health studies*, 49(3), 399-419.

Clark, I. D., & Fritz, P. (1997). *Environmental isotopes in hydrogeology*: CRC press.

Coleman, M. L., Shepherd, T. J., Durham, J. J., Rouse, J. E., & Moore, G. R. (1982). Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis. *Analytical chemistry*, 54(6), 993-995.

Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133(3465), 1702-1703.

Dansgaard, W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16(4), 436-468.

Darling, W., Bath, A., & Talbot, J. (2003). The O and H stable isotope composition of freshwaters in the British Isles. 2. Surface waters and groundwater. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 7(2), 183-195.

ESRI. (2006). *ArcGIS 9.2: Environmental Systems Research Institute Inc Redlands, California*.

Froehlich, K., Gibson, J., & Aggarwal, P. (2002). Deuterium excess in precipitation and its climatological significance. *Viena, Austria: IAEA*.

Galindo, G., Sainato, C., Dapeña, C., Fernández-Turiel, J., Gimeno, D., Pomposiello, M., & Panarello, H. (2007). Surface and groundwater quality in the northeastern region of Buenos Aires Province, Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 23(4), 336-345.

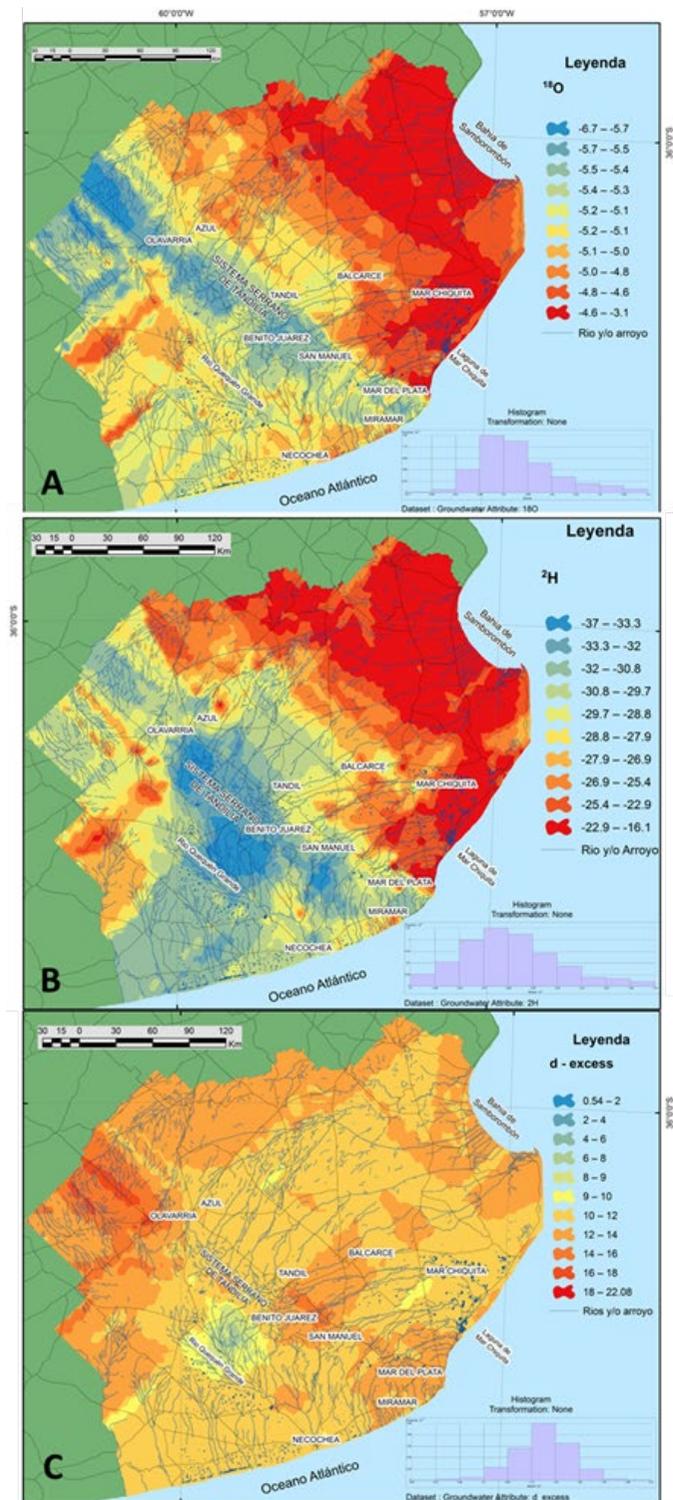


Figura 4. Mapas isotópicos de aguas subterráneas de $d^{18}O\text{‰}$ (A), $d^2H\text{‰}$ (B) y mapa de distribución de $d\text{-excess}$ de deuterio ‰ (C).
Figure 4. Isotopic groundwater maps of $d^{18}O\text{‰}$ (A), $d^2H\text{‰}$ (B) and distribution map of $d\text{-excess}$ deuterium ‰ (C).

- Gat, J. R. (1996). Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 24(1), 225-262.
- Gibson, J. J., Reid, R., & Spence, C. (1998). A six-year isotopic record of lake evaporation at a mine site in the Canadian subarctic: results and validation. *Hydrological processes*, 12(10-11), 1779-1792.
- Gonfiantini, R. (1978). Standards for stable isotope measurements in natural compounds. *Nature*, 271(5645), 534.
- IAEA. (1992). Statistical treatment of data on environmental isotopes in precipitation: Internat. Atomic Energy Agency.
- IAEA, W., & WMO, W. (2006). Global Network of Isotopes in Precipitation. The GNIP database.
- Jiménez-Martínez, J., & Custodio, E. (2010). El exceso de deuterio en la lluvia y en la recarga a los acuíferos en el área circum-mediterránea y en la costa mediterránea española. *Boletín geológico y minero*, 119(1), 21-32.
- Kendall, C., & McDonnell, J. J. (2012). *Isotope tracers in catchment hydrology*: Elsevier.
- Kortelainen, N. M., & Karhu, J. A. (2004). Regional and seasonal trends in the oxygen and hydrogen isotope ratios of Finnish groundwaters: a key for mean annual precipitation. *Journal of Hydrology*, 285(1), 143-157.
- Kruse, E., Carol, E., Deluchi, M., Laurencena, P., & Rojo, A. (2010). Hidroquímica subterránea en un sector de la zona deprimida del Salado, Prov. de Bs As. Artículo I Congreso de Internacional de Hidrología de Llanuras Azul, Buenos Aires.
- Martínez, D., Furré, E., Londoño, O. Q., Jean-Baptiste, P., Galli, M. G., Dapigny, A., & Grondona, S. (2016). Residence time distribution in a large unconfined-semiconfined aquifer in the Argentine Pampas using ³H. *Hydrogeology Journal*, 24(5), 1107-1120.
- Martínez, D., Quiroz Londoño, O., Dapeña, C., Massone, H., Ferrante, A., & Bocanegra, E. (2007). Aportes al modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca del río Quequén Grande, provincia de Buenos Aires. Artículo V Congreso Argentino de Hidrogeología. 16-19
- Martínez, D., Quiroz Londoño, O., & Grondona, S. (2014). Variabilidad temporal y en profundidad de isótopos estables en muestras someras de agua subterránea. Artículo presentado en III Reunión Argentina de Geoquímica de la Superficie, Mar del Plata.
- Martínez, D., Quiroz Londoño, O., Solomon, D., Dapeña, C., Massone, H., Benavente, M., & Panarello, H. (2017). Hydrogeochemistry, Isotopic Composition and Water Age in the Hydrologic System of a Large Catchment within a Plain Humid Environment (Argentine Pampas): Quequén Grande River, Argentina. *River Research and Applications*, 33(3), 438-449.
- Martínez, D., Quiroz, O., Dapeña, C., Glok-Galli, M., Massone, H., & Ferrante, A. (2011). Caracterización isotópica e hidroquímica de las precipitaciones en el sector sur de Tandilia. Artículo VII Congreso Argentino de Hidrogeología y V Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Calidad y Contaminación de Agua Subterránea Salta, Actas.369-376
- Merlivat, L., & Jouzel, J. (1979). Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 84(C8), 5029-5033.
- Panarello, H., & Parica, C. (1984). Isótopos del oxígeno en hidrogeología e hidrología. Primeros valores en aguas de lluvia de Buenos Aires. *Asociación Geológica Argentina, Revista*, 39(1-2), 3-11.
- Pollice, A., & Jona Lasinio, G. (2008). Two approaches to imputation and adjustment of air quality data from a composite monitoring network. *GRASPA WORKING PAPERS*, 30.
- Quiroz Londoño, O., Martínez, D., Dapeña, C., & Massone, H. (2008a). Hydrogeochemistry and isotope analyses used to determine groundwater recharge and flow in low-gradient catchments of the province of Buenos Aires, Argentina. *Hydrogeology Journal*, 16(6), 1113-1127.
- Quiroz Londoño, O. M., Martínez, D., Dapeña, C., & Massone, H. (2008b). Hydrogeochemistry and isotope analyses used to determine groundwater recharge and flow in low-gradient catchments of the province of Buenos Aires, Argentina. *Hydrogeology Journal*, 16(6), 1113-1127.
- Quiroz Londoño, O. M., Martínez, D. E., Massone, H. E., Londoño Ciro, L. A., & Dapeña, C. (2015). Spatial distribution of electrical conductivity and stable isotopes in groundwater in large catchments: a geostatistical approach in the Quequén Grande River catchment, Argentina. *Isotopes in environmental and health studies*, 51(3), 411-425.
- Rindsberger, M., Magaritz, M., Carmi, I., & Gilad, D. (1983). The relation between air mass trajectories and the water isotope composition of rain in the Mediterranean Sea area. *Geophysical Research Letters*, 10(1), 43-46.
- Rodriguez Capítulo, L. (2015). Evaluación geohidrológica en la región costera oriental de la provincia de Buenos Aires. Informe Inédito. Tesis doctoral, Facultad de Ciencias Exactas Naturales y Museo, La Plata, Argentina 239.
- Romanelli, A., Londoño, O. M. Q., Martínez, D. E., Massone, H. E., & Escalante, A. H. (2014). Hydrogeochemistry and isotope techniques to determine water interactions in groundwater-dependent shallow lakes, Wet Pampa Plain, Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 71(4), 1953-1966.
- Rozanski, K. (1985). Deuterium and oxygen-18 in European groundwaters—links to atmospheric circulation in the past. *Chemical Geology: Isotope Geoscience section*, 52(3-4), 349-363.
- Sala, J. M., & Angelelli, V. (1975). Recursos hídricos (especial mención de las aguas subterráneas). Arti-

- culo Relatorio Geología de la Provincia de Buenos Aires. IV Congreso Geológico Argentino. Buenos Aires, Argentina.169
- Sánchez-Murillo, R., & Birkel, C. (2016). Groundwater recharge mechanisms inferred from isoscapes in a complex tropical mountainous region. *Geophysical Research Letters*, 43(10), 5060-5069.
- Teruggi, M., & Kilmurray, J. (1975). Tandilia. Artículo Relatorio Geología de la provincia de Buenos Aires, 6 Congreso Geológico Argentino.55-77
- Terzer, S., Wassenaar, L., Araguás-Araguás, L., & Aggarwal, P. (2013). Global isoscapes for $d^{18}O$ and d^2H in precipitation: improved prediction using regionalized climatic regression models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(11), 4713.
- Wassenaar, L. I., Van Wilgenburg, S. L., Larson, K., & Hobson, K. A. (2009). A groundwater isoscape (δD , $\delta^{18}O$) for Mexico. *Journal of Geochemical Exploration*, 102(3), 123-136.
- Zabala, M., Manzano, M., & Vives, L. (2015). The origin of groundwater composition in the Pampeano Aquifer underlying the Del Azul Creek basin, Argentina. *Science of the Total Environment*, 518, 168-188.

Recibido: julio 2019
Revisado: noviembre 2019
Aceptado: enero 2020
Publicado: marzo 2021