

LA INCIDENCIA DE LA VARIABILIDAD PLUVIOMÉTRICA SOBRE LA HIDROQUÍMICA Y EL RIESGO SANITARIO POTENCIAL DE LOS CONTAMINANTES NATURALES EN UNA CUENCA ENDORREICA DEL SUR DE LA LLANURA PAMPEANA

*INCIDENCE OF RAINFALL VARIABILITY ON HYDROCHEMISTRY AND THE POTENTIAL
HEALTH RISK OF NATURAL POLLUTANTS IN AN ENDORHEIC BASIN OF THE SOUTHERN
PAMPEAN PLAIN*

**Martín Eduardo ESPÓSITO^{1,2}, Sandra Noemi FERNÁNDEZ³, Laura Daniela
BRANDIZI⁴, Elisa R. PARODI⁵**

¹Universidad Nacional del Sur - Departamento de Agronomía. San Andrés 800, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina.
E-mail: mesposito@uns.edu.ar

²Centro de Geología Aplicada, Agua y Medio Ambiente (CGAMA) – Comisión de Investigaciones Científica (CIC).

³Universidad Nacional del Sur. Departamento de Ingeniería - Avenida Alem 1253. Bahía Blanca. Buenos Aires. Argentina.
E-mail: sfernand@uns.edu.ar

⁴Universidad Nacional de la Patagonia. Facultad de Ingeniería - 9 de Julio 25. Trelew. Chubut. Argentina.
E-mail: laurabrandizi@gmail.com

⁵Instituto Argentino de Oceanografía (CCT BB- IADO) - UNS-CONICET. Florida 8000 (Camino La Carrindanga km 7,5) Complejo
CCT CONICET. Bahía Blanca - Edificio E1 - B8000FWB. Bahía Blanca. Buenos Aires. Argentina.
E-mail: eparodi@criba.edu.ar

Introducción
Materiales y métodos
Área de estudio
Hidrodinámica
Hidroquímica
Análisis del riesgo sanitario
Resultados y discusión
Hipsometría
Precipitaciones
Hidrodinámica
Hidroquímica
Riesgo sanitario
Conclusiones
Referencias

RESUMO - A variabilidade das precipitações modifica a presença dos contaminantes naturais (As – F) dos recursos hídricos, deixando importante porcentagem de habitantes da zona rural e da periferia urbana exposta ao desenvolvimento de enfermidades. O objetivo é analisar a variação hidroquímica produzida pelas variações das precipitações e determinar o risco sanitário potencial causado pela ingestão e contato dérmico com a água. Na bacia da Laguna de Puan se extraíram dez amostras de água em diferentes períodos pluviométricos durante três anos, para fins de determinação de valores As-F e realização de análises de risco à saúde. A profundidade do lençol freático foi determinada para estudar a hidrodinâmica. Todas as variáveis foram analisadas estatisticamente. Em um período de baixa pluviosidade, as concentrações do par As-F aumentam nas águas subterrâneas utilizadas para consumo humano, estabelecendo que a presença de As representa um alto risco à saúde das pessoas, ao contrário de F. A água da lagoa não é adequada para consumo humano e não representa risco devido ao contato com a pele para a saúde da população que pratica esportes aquáticos.

Palavras-chave: Qualidade da água. Toxicidade. Risco sanitário. Precipitação.

ABSTRACT - The rainfall variability modifies the presence of natural pollutants (As-F) in this water resource, leaving a significant percentage of rural and peri-urban inhabitants exposed to the development of diseases. The objective is to analyze the hydrochemical variation produced by rainfalls and determine the potential health risk caused by ingestion and dermal contact of water. In order to determine the As-F values and perform health risk analyses, ten water samples were extracted from the Puán lagoon basin in different rainfall periods for 3 years. The water table depth was determined in order to study the hydrodynamics. All variables were analyzed statistically. In a period of low rainfall, the As-F concentrations in groundwater for human consumption increase, showing that the presence of As represents a high health risk for people, unlike F. The water in the lagoon is unfit for human consumption, and does not represent a risk due to dermal contact for the health of those who play water sports.

Keywords: Water quality. Toxicity. Health risk. Rainfall.

INTRODUCCIÓN

La variabilidad de los registros pluviométricos en el sur de la llanura pampeana es elevada, que inciden sobre el desarrollo socioeconómico de las regiones del Sudoeste bonaerense. Durante originando períodos húmedos y de mucha sequía los ciclos húmedos se producen inundaciones por

desbordes de los ríos y arroyos o anegamientos por el crecimiento del sistema lagunar. En períodos de sequía se producen pérdidas de rendimientos de los cultivos en las cosechas, activación de los procesos de desertificación y dificultades del abastecimiento del agua potable (Scian, 2010; Gentili & Gil, 2013; Gil et al., 2016).

Las lagunas de la llanura pampeana argentina poseen una dinámica espacio-temporal vinculada a la variabilidad climática. Son cuerpos de agua someros y altamente fluctuantes en salinidad y tiempo de renovación de agua en función de los ciclos de sequía-inundación característicos de la región. Su hidrología se ve afectada por el relieve llano, altamente dependiente de las precipitaciones in situ. En ciertos casos poseen elevada salinidad, conformando salinas y salitrales de carácter temporal durante períodos de sequía severos (Aliaga et al., 2016).

La ocurrencia de las sequías prolongadas en la zona y el aumento de la producción alimenticia impulsada por la tecnología, han incrementado la presión sobre el uso del agua con destino a la agricultura bajo riego, bienes y servicios. Por ello, la creciente demanda de agua subterránea se ha multiplicado exponencialmente, al igual que los problemas de disponibilidad y calidad de las fuentes de provisión, así como los riesgos sobre la salud humana (Espósito, 2014).

Los recursos hídricos superficiales asociados a los subterráneos presentan una hidroquímica sumamente variable, en virtud de la presencia de contaminantes de origen natural como arsénico (As) y flúor (F) que contribuyen al deterioro de la calidad del recurso. Estos oligoelementos, han sido detectados con una distribución geográfica irregular y en contenidos más elevados en algunos sectores puntuales. Estos sectores pertenecen generalmente a los tramos inferiores de las cuencas, cerca de la desembocadura de los cursos superficiales y de descarga de los acuíferos freático (Blanco et al., 2019).

En el Sudoeste Bonaerense, el As se encuentra presente en aproximadamente el 80 % de las aguas subterráneas, en concentraciones superiores a los valores de referencia propuestos por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2011 - As: > 0,01 mg/L). Está asociado a otros elementos trazas de origen natural, entre ellos el F, que originan una contaminación multielemental potenciando la severidad del grado de afectación en el agua e incrementa los efectos negativos

sobre la salud humana (Nicolli et al., 2012; Díaz et al., 2016; Espósito et al., 2016).

Las concentraciones de As encontradas en esta región son comparables a las ocurrientes en Bangladesh, no obstante, el problema en estas áreas es menos visible en el contexto internacional (Díaz et al., 2016). Existe un importante porcentaje de habitantes rurales y en los sectores periurbanos expuestos al desarrollo del Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico. Esta enfermedad se desarrolla con la ocurrencia de patologías carcinogénicas en varios órganos blandos (Ng, 2003), así como afecciones en el sistema nervioso central y periférico (Yoshida, 2004).

En el caso del F, el consumo de agua con magnitudes superiores a 1,5 mg/L causa problemas de fluorosis dental y esquelética, desarrollando una mayor susceptibilidad a enfermedades renales y cáncer (OMS, 2011), así como afectación al desarrollo del cerebro humano, reduciendo el coeficiente intelectual de niños en edad escolar, entre otros efectos mencionados en distintas bibliografías (Wang et al., 2007).

Los partidos más comprometidos del Sudoeste Bonaerense son Coronel Dorrego, Puan, Bahía Blanca y Tornquist, con magnitudes superiores a 0,1 mg/L de As y mayores a 6 mg/L de F, en muchos de los sectores mencionados (Paoloni, 2010; Espósito et al., 2016). Dentro de este contexto general se desarrollan las cuencas que nacen en el Sistema de Ventania y entre ellas se encuentra ubicada la cuenca endorreica de la laguna de Puán. Tiene una superficie de aproximadamente 10000 ha y está alimentada principalmente por el aporte de las precipitaciones de carácter torrencial, que se encauzan en dos pequeños arroyos semipermanentes de escasos caudales (Sequeira et al., 2008).

En el Partido de Puan, no se conocen estudios respecto del análisis de riesgo sanitario (ARS) derivados de la ingesta de agua y/o contacto dérmico con altas concentraciones de iones tóxicos. Este es un indicador temprano (etapa pre-clínica) del riesgo potencial de desarrollar patologías ligadas al consumo de los recursos hídricos. Aún a bajas dosis, el consumo prolongado de agua con As y F tendrían consecuencias en la salud individual y puede afectar a comunidades enteras, convirtiéndose en un problema social y de salud pública (Ministerio de Salud, 2011).

La productividad principal agrícola-ganadera, la transcendencia turística y recreativa de la

laguna, la ausencia de cursos fluviales y la variabilidad de las precipitaciones, hacen que el recurso agua sea primordial para el desarrollo socio-económico de la zona, dependiendo exclusivamente del acuífero freático que cuenta con la presencia de As y F. Todas estas variables tienen consecuencias directas en el consumo humano y en el volumen de la recarga hídrica de la laguna.

Por tal motivo, este estudio propone analizar,

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El ámbito físico de la cuenca endorreica de la laguna Puan, ubicada al oeste de la ciudad del mismo nombre (Provincia de Buenos Aires), comprende el geoambiente denominado llanura pedemontana (VLLp), que incluye las tierras por sobre la cota de 250 msnm, conformando el piedemonte distal y proximal del Sistema serrano. El territorio se sitúa en la transición de los paisajes pampeano y patagónico, teniendo por tipo morfológico dominante a la llanura. En la orla de piedemonte, es notable la desaparición superficial de los cursos emergentes de las sierras, indicando un predominio de la infiltración que aporta al escurrimiento hipodérmico y freático. Ya en la super-

durante el período de muestreo, la variación espacio-temporal de la calidad hidroquímica del recurso hídrico y su relación con las precipitaciones; el riesgo potencial en la población por efectos tóxicos debido a la ingesta de agua subterránea con altas concentraciones de As-F y el riesgo por el contacto directo del agua de la laguna de Puan, en las personas que practican deportes náuticos.

ficie, en cambio se implanta un drenaje lacunar que encadena escurrimientos difusos de patrón cuasi radial (González Uriarte et al., 2002).

Emplazada en su orilla, la localidad de Puan reviste especial importancia porque constituye la ciudad cabecera de la unidad del Partido, unidad de gestión político-administrativa provincial ubicada entre los 37°22' y 38°49' de latitud sur y 62°30' y 63°23' de longitud oeste (Figura 1). Dicha ciudad capital posee una población aproximada a los 5.000 habitantes, y en el partido totaliza alrededor de 15.000 habitantes distribuyéndose en algunos centros urbanos y en un importante asentamiento rural de pequeños abastecimientos (Sequeira et al., 2008; INDEC, 2010).



Figura 1 - Ubicación geográfica de la laguna de Puan y los sitios de muestreo. Fuente: Google Earth

Hidrodinámica

Para el análisis de las precipitaciones del área de estudio se utilizaron los datos pluviométricos

diarios, mensuales y anuales (serie 1894-2016) cedidos por la Cooperativa de Productores de la localidad de Puan.

La curva hipsométrica representa las superficies dominadas por encima de cada cota de terreno y por lo tanto caracteriza el relieve de la cuenca. Su construcción junto a los relevamientos de campo permitirá dividir la cuenca en tres sectores (alto, medio y bajo), a los efectos de facilitar el desarrollo del estudio hidroquímico (Silva, 1999).

Hidroquímica

La evaluación hidroquímica del recurso se realizó durante tres campañas de muestreos en tres períodos estacionales: invierno de 2007, otoño de 2008 y primavera de 2015. La toma de muestras de agua procedente del acuífero freático se llevó a cabo en nueve estaciones (pozos) distribuidas de la siguiente manera: una muestra obtenida en la cuenca superior, cuatro de ellas en la media y cuatro en el sector inferior. Una muestra de agua superficial fue recolectada directamente de la laguna (Figura 1).

Se colectaron muestras de agua con tres réplicas en botellas de plástico de 500 cm³ de capacidad cerradas herméticamente y rotuladas, las que se trasladaron en conservadora al laboratorio a una temperatura de 4 °C. También en cada sitio se determinó la profundidad del nivel freático (sonda Spohr) y la temperatura del agua. La altitud sobre el nivel del mar de los puntos muestreados y su ubicación geográfica se establecieron empleando el sistema de posicionamiento global (GPS) mediante un localizador Garmin Etrex Vista HCx.

Las muestras destinadas a la cuantificación de As fueron preservadas con ácido nítrico (HNO₃) (Merck ultrapur al 0,5%) y determinadas con un espectrómetro de emisión atómica por plasma de acoplamiento inductivo (ICP-AES) (Shimadzu 9000 simultáneo de alta resolución), bajo la norma EPA 200.7 (LANAQUI, CERZOS-CONICET/UNS). La cuantificación de los fluoruros se efectuó mediante un medidor Hanna (HI 98401) empleando un electrodo específico y uno de referencia.

Análisis del riesgo sanitario

Con los resultados obtenidos en la fase acuosa se realizaron los análisis de riesgo sanitario (ARS) de acuerdo a los modelos de la USEPA. Estas herramientas, utilizadas en la toma de decisiones, estiman el nivel potencial de peligro para un receptor humano o ecológico, por la ingesta o contacto dérmico de una sustancia química presente en el ambiente (NRC, 1983). El riesgo es función de la toxicidad de la sustancia

peligrosa y de la magnitud de la exposición del individuo al contaminante, lo que depende de la concentración, de la dosis y de la frecuencia de la ingesta USEPA (1989, 1992).

Los elementos contaminantes de interés para esta investigación (As y F) son aquellos que tienen probabilidad de llegar a estar en contacto con los seres humanos generando una dosis de exposición. Dentro de este apartado, se analizan las vías de contacto de los tóxicos con el organismo (rutas de exposición: ingesta y por el contacto dérmico), los tiempos y las condiciones bajo las cuales se produce la exposición (escenarios de exposición: residencial o recreativo) para los individuos expuestos de la población rural y urbana que habita la cuenca endorreica de la laguna de Puan.

Las exposiciones al As y F calcularon utilizando las siguientes ecuaciones (1) y (2):

$$ADDI = \frac{[C * Ir * EF * ED]}{[Bw * AT]} \quad [1]$$

$$ADDC = \frac{[C * SA * Kp * ET * EF * ED * FC]}{[Bw * AT]} \quad [2]$$

Donde:

ADDI: Dosis Diaria Promedio por Ingesta (mg/kg/día);

ADDC: Dosis Diaria Promedio por Contacto Dérmico (mg/kg/día);

C: Concentración de la sustancia peligrosa en el agua (mg/L);

IR: Tasa de ingesta diaria del agua (L/día);

ET: Duración diaria del evento de exposición (h/día);

EF: Frecuencia de la exposición (día/año);

ED: Duración de la exposición (año);

Bw: Peso corporal de la persona expuesta (kg);

AT: Factores de corrección por tiempo promedio. Duración estadística de la vida humana medida en días (70 años * 365 días);

SA: Extensión de la superficie de contacto entre la piel y el agua (cm²);

Kp: Coeficiente de permeabilidad dérmica de la sustancia (cm/h);

FC: Factor de corrección de unidades de superficie y volumen (10000 cm²/m² * 0.001 L. cm⁻³).

En primer lugar, se analizó el escenario residencial de exposición a las sustancias en el agua, que considera al contacto con el agua vía la ingesta demandada por las actividades vitales del individuo y por el contacto dérmico que ocurre durante un baño con fines higiénico. El escenario

residencial se basa en las concentraciones de las dos sustancias (As y F) medidas en los pozos someros, que representan 9 casos testigo de los escenarios distribuidos en diferentes puntos de la cuenca, en un ambiente periurbano-rural rodeado de campos agrícola-ganaderos.

Para el análisis del riesgo potencial sanitario del agua subterránea residencial se consideró, como representativo de la parte de la población más sensible, un individuo adulto expuesto que ha consumido agua subterránea durante toda su vida. Se estima una tasa de ingesta diaria de referencia (IR) de 2L por día, una frecuencia de exposición (EF) para ingesta y contacto dérmico de 365 días por año y la duración de la exposición (ED) para ingesta y contacto dérmico de un lapso promedio de 70 años para una persona de 70 kg de peso corporal (Bw) (USEPA, 1989).

La duración del evento (ET) corresponde a la duración del proceso de contacto con el agua para el escenario dérmico residencial. Esta variable representa la duración del baño higiénico y se la consideró igual a 15 minutos. El coeficiente de permeabilidad dérmica (Kp) es el provisto por USEPA para elementos inorgánicos, $1 \cdot 10^{-3}$ cm/h (USEPA, 2004, 2007). La extensión de la superficie corporal SC (cm²), de contacto entre la piel y el agua, se estimó en base al peso corporal (Bw = 70 kg) y la altura corporal (H = 175 cm), aplicando la ecuación 3, de DuBois & DuBois (1916). Dado que se asume que el bañista tuvo un contacto completo con el agua, el valor de SC es el que se utiliza en reemplazo de SA de la ecuación 2.

$$SC = H^{0,725} * Bw^{0,425} * 0,0071843 \quad [3]$$

En segundo lugar, se calculó el riesgo potencial sanitario por sustancias de efectos tóxicos no carcinogénicos, cuyas concentraciones fueron muestreadas en la Laguna de Puan. En el sitio de muestreo se realizan actividades recreativas y deportes náuticos, es un zona intermedia urbana-periurbana, netamente residencial y con un extenso espacio verde parqueado. Se consideró como individuo expuesto por contacto dérmico, a una persona adulta que practica deportes náuticos y que puede caer accidentalmente a sus aguas. Se estima una frecuencia de exposición (EF) para contacto dérmico de 96 días/año resultado de considerar que las actividades, basado en juicio propio, se realizan 4 días a la semana durante 6 meses; la duración de la

exposición (ED) por el contacto dérmico de un lapso promedio de 70 años para una persona de 70 kg de peso corporal (Bw).

La duración del evento (ET) corresponde al tiempo de contacto con el agua para el escenario dérmico que se estima en 3 horas/día. La extensión de la superficie de contacto entre la piel y el agua (SA) y el coeficiente de permeabilidad dérmica (Kp) se calcularon de forma semejante a aquellos obtenidos para la ADDC en muestras de agua subterránea de los 9 pozos. En el contexto del contacto dérmico, se hace referencia a una persona que realiza deportes náuticos en la laguna sin tener en cuenta la ingesta accidental del recurso durante la actividad física.

Finalmente, el cálculo del riesgo potencial sanitario para las sustancias de efectos tóxicos no carcinogénicos se realiza comparando las dosis diarias promedio de cada sustancia con las dosis umbrales por debajo de las cuales no existen efectos toxicológicos sobre el individuo expuesto para el período de exposición considerado. Esta proporción que se denomina cociente de riesgo (R) (USEPA, 1989), se aprecia en las ecuaciones 4a y 4b para cada vía de exposición, y estima el riesgo según la posibilidad de generar efectos no carcinogénicos por las sustancias evaluadas. Si su valor iguala o excede la unidad se considera que el nivel de riesgo es significativo, es decir, alertaría sobre una situación potencialmente problemática (USEPA, 1989). La dosis umbral toxicológica para efectos crónicos utilizada es la dosis de referencia oral y dérmica, RfD y RfDD, respectivamente.

Las RfD para As y F son $3.00 \cdot 10^{-04}$ y $6.00 \cdot 10^{-02}$ mg/L/d, respectivamente (USEPA, 2011). Las RfDD para As y F son $1.24 \cdot 10^{-04}$ y $5.82 \cdot 10^{-02}$ mg/L/d, respectivamente (Tolson et al., 2000; RAIS, 2011).

$$R = \frac{ADDI}{RfD} ; R = \frac{ADDC}{RfDD} \quad [4a \text{ y } 4b]$$

El tratamiento estadístico de la información se efectuó mediante el software InfoStat (Di Rienzo et al., 2013) siguiendo el diseño de medidas repetidas debido a que los muestreos durante las diferentes campañas se realizaron siempre en los mismos pozos. A fin de efectuar la comparación de medias, a los resultados significativos detectados por este análisis se los sometió al test de Fisher ó de Diferencia Mínima Significativa (DMS o LSD).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Hipsometría

Con la curva hipsométrica se diferenciaron los tres sectores, la cuenca superior, media e inferior (Figura 2). La cuenca superior se desarrolla desde las nacientes hasta los 310 msnm de altitud, cuyo pendiente promedio es de 2,3% y en esta porción del área de estudio se encuentra la muestra de agua N° 1. La

cuenca media corresponde a la superficie que se extiende desde los 310 a 260 msnm con un gradiente de 0,5% y se localizan los sitios de muestreos 2, 3, 7 y 9. Por último, la cuenca inferior representa el área que se encuentra por debajo de los 260 msnm, cuya pendiente es de 4,2%. En este sector se emplazan los sitios de muestreo 4, 5, 6 y 8.

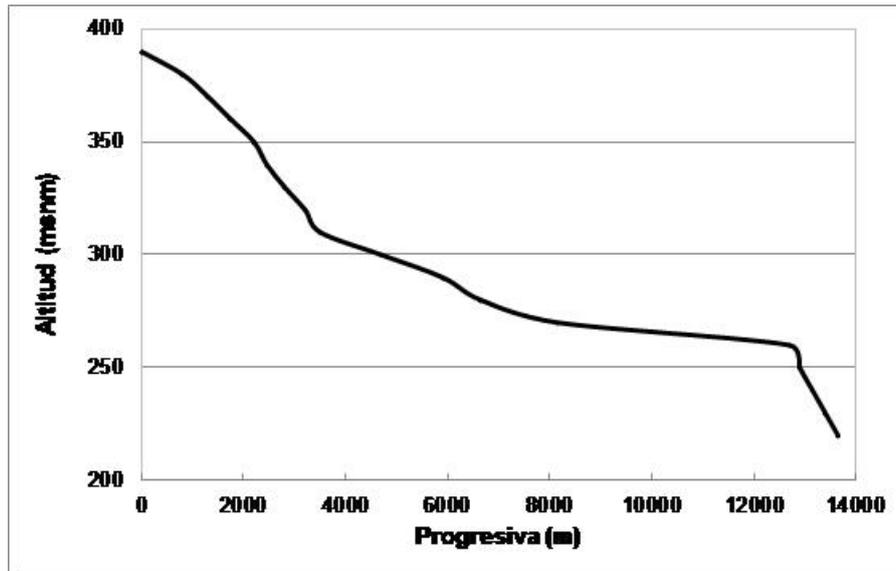


Figura 2 - Curva hipsométrica de la cuenca de la Laguna de Puan.

Precipitaciones

Los registros anuales totales de las precipitaciones (serie 1894-2016) evidencian una marcada variabilidad interanual, con magnitudes inferiores y muy superiores al valor medio anual (705 mm). Sin embargo, a partir de fines de la década del 60 puede apreciarse una tendencia de ascenso de los valores medios, respaldado con una curva de ajuste polinómica de sexto orden (Figura 3).

El comportamiento de las precipitaciones mensuales promedio para la misma serie de datos se muestra en el diagrama de barras de la figura 4. Las lluvias de menor registro se distribuyen en los meses invernales y las altas precipitaciones corresponden a la secuencia verano-otoño, mostrando una marcada variabilidad, entre los valores máximos y mínimos de la precipitación mensual media.

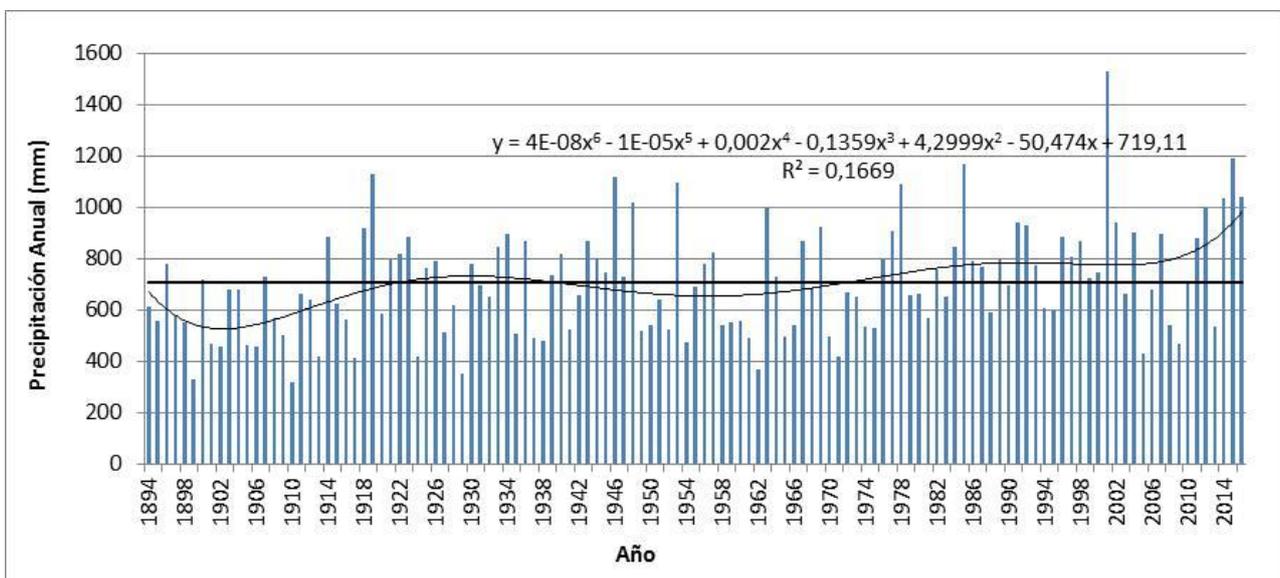


Figura 3 - Precipitaciones anuales medias.

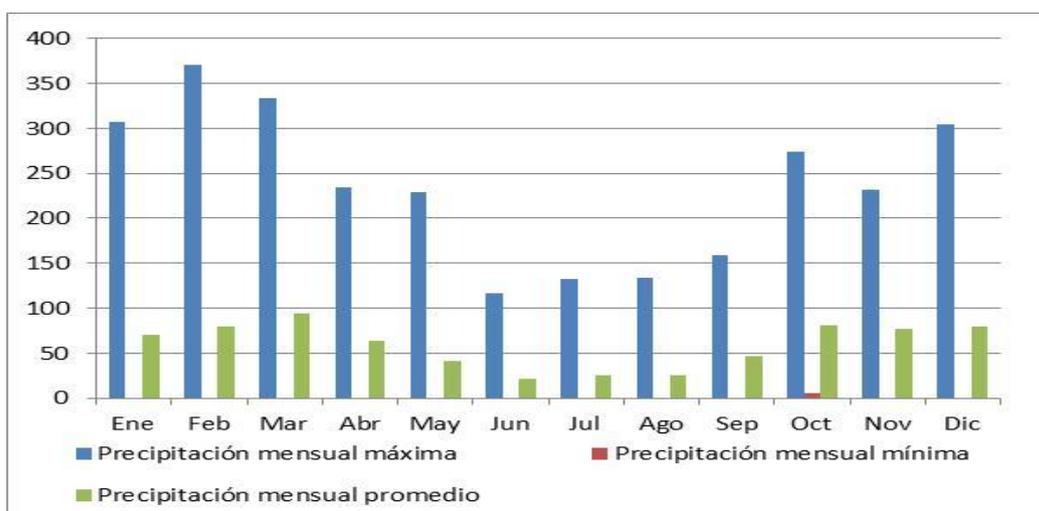


Figura 4 - Precipitaciones mensuales máximas y mínimas comparadas con el promedio.

En el registro de las precipitaciones anuales correspondiente al período del ensayo, se observa en la figura 5 una disminución en las lluvias ocurridas en los años 2008 y 2009, que fueron las causantes de una de las mayores sequías meteorológicas registradas en los últimos 50 años, provocando una situación de emergencia climática para la cuenca y la región (Sequeira et al., 2009).

Entre las consecuencias de la disminución de las precipitaciones y el déficit hídrico durante el período 2008-2009, se detectaron graves problemas en el abastecimiento de agua en núcleos urbanos del área de estudio. También impactó de manera negativa a las actividades agrícolas disminuyendo de forma notoria el rendimiento de algunos cultivos y afectando de manera directa a la economía regional (Marini et al., 2009).

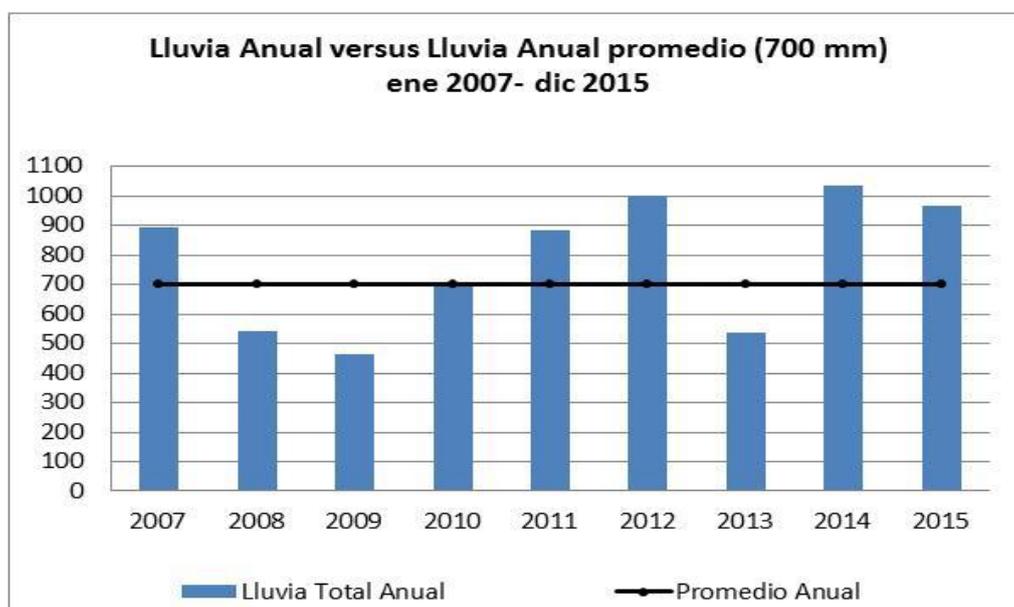


Figura 5 - Registro de las precipitaciones anuales durante el desarrollo del estudio.

Hidrodinámica

Los valores medios de las isohipsas resultaron muy diferentes entre los distintos sectores de la cuenca e indicaron una variación espacial, con diferencias de 27 m entre la cuenca media con respecto a la inferior y de 55 m entre el sector inferior y el superior, influenciada en ambos casos por los niveles topográficos.

Con respecto al análisis temporal, se hallaron diferencias altamente significativas ($p < 0,01$)

entre el muestreo realizado en primavera de 2015 respecto a los dos previos, observándose incrementos de los valores medios de las isohipsas de 1,5 m aproximadamente (Figura 6). Este comportamiento indica que el nivel de la freática experimentó un ascenso de igual magnitud, consecuencia del aporte de las precipitaciones ocurridas durante el período 2014-2015 que superaron los registros medios históricos (Figura 5).

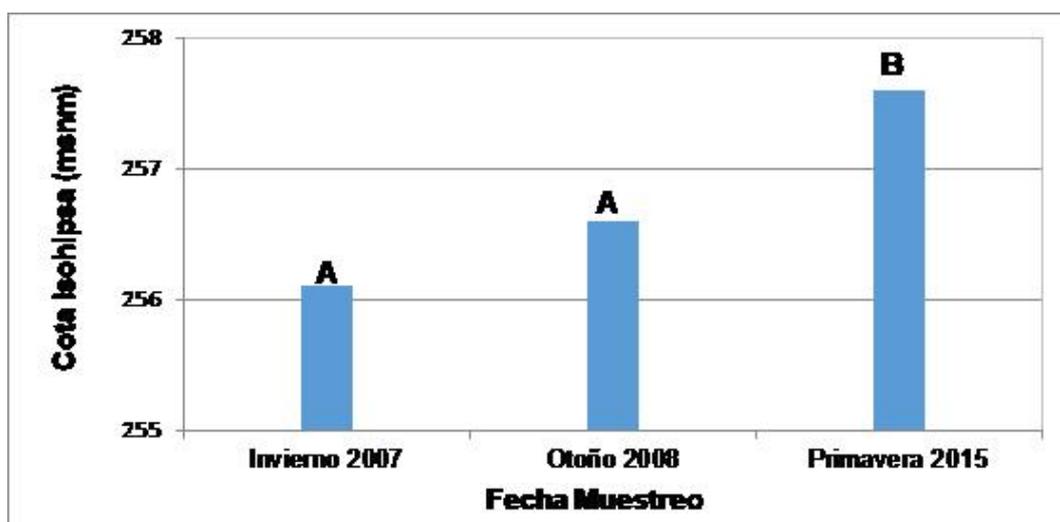


Figura 6 - Comparación temporal de las isohipsas en la cuenca de la laguna de Puan. Letras distintas indican diferencias altamente significativas ($p < 0,01$) entre muestreos.

Hidroquímica

En el sector de recarga de las principales cuencas desarrolladas en el sudoeste de la llanura pampeana, las concentraciones de As y F no comprometen el recurso hídrico utilizado para consumo humano, a raíz del efecto dilución a causa de la infiltración de las precipitaciones y de un tiempo de residencia del agua más reducido (Blanco et al., 2018). Sin embargo, en el muestreo del año 2008 de las aguas subterráneas de la cuenca superior de la laguna de Puan, los valores de As (0,03 mg/L) y F (3,90 mg/L) de la muestra 1 superaron los límites establecidos por la OMS (Tabla 1), en coincidencia con los resultados reportados por Sequeira et al. (2008),

condicionadas estas magnitudes por la escasez de precipitaciones en uno de los períodos más secos de los últimos 50 años para la región. En los otros muestreos las concentraciones de estos elementos se mantuvieron por debajo de los límites.

El rango de concentraciones de As para los pozos ubicados en la cuenca media-inferior para las tres fechas de muestreo oscilaron de 0,009-0,050 mg/L, superando 5 veces el valor límite establecido por la OMS en los puntos de mayor peligro para el consumo humano. Las magnitudes de F se encuentran en un rango de valores de 0,67 a 3,20 mg/L, donde el registro máximo supera dos veces el valor guía de referencia (Tabla 1).

Tabla 1 - Concentraciones de As-F en las aguas subterráneas y de la muestra superficial de la laguna para las distintas fechas muestreos.

Año de muestreo y N° Muestra	Concentración de As (mg/L) 2007	Concentración de F (mg/L) 2007	Concentración de As (mg/L) 2008	Concentración de F (mg/L) 2008	Concentración de As (mg/L) 2015	Concentración de F (mg/L) 2015
1	0,010	1,50	0,030	3,90	0,009	0,87
2	0,030	2,10	0,030	3,20	0,010	1,10
3	0,010	1,40	0,050	1,60	0,009	0,91
4	0,020	2,20	0,009	1,70	0,009	0,85
5	0,010	1,20	0,020	2,00	0,009	0,67
6	0,020	1,90	0,020	1,40	0,010	0,97
7	0,030	1,90	0,020	1,50	0,009	1,60
8	0,050	1,60	0,050	1,90	0,009	1,35
9	0,020	1,30	0,010	1,60	0,009	0,76
10 (laguna)	0,090	10,2	0,050	12,40	0,044	10,70

Para los sectores medio e inferior de la cuenca y las diferentes fechas de muestreos se realizaron los análisis estadísticos, cuyos resultados indican que las concentraciones medias de As y F fueron mayores en los dos primeros muestreos (2007-2008), presentando una diferencia altamente significativa ($p > 0,01$) con las magnitudes obtenidas en primavera de 2015 (Tabla 2). Esta

variación temporal de las magnitudes es resultado del aumento de las precipitaciones anuales precedentes a la última fecha del muestreo que recargan el sistema hídrico. Este comportamiento se refleja en el ascenso de los valores medios de las isohipsas de los pozos muestreados y cuya consecuencia es diluir el efecto nocivo de los elementos estudiados.

Tabla 2 - Concentraciones medias de As y F en las aguas subterráneas para las diferentes fechas de muestreo. Letras distintas indican diferencias altamente significativas ($p < 0,01$) entre los muestreos.

	Concentración media de As (mg/L)	Concentración media de F (mg/L)
Muestreo de 2007	0,024a	1,70a
Muestreo de 2008	0,026a	1,86a
Muestreo de 2015	0,009b	1,02b

Las concentraciones medias más elevadas de As registraron magnitudes de 0,026 mg/L, valores superiores a los reportados por Blanco et al., (2018) para las cuencas de Sauce Grande (0,01 mg/L), Sauce Chico (0,01 mg/L) y Napostá Grande (0,02 mg/L) en una estación seca, indicando un alto potencial de riesgo para los habitantes que utilizan el recurso para consumo humano en períodos de sequías. Sin embargo, los tenores medios de F (1,86 mg/L) resultaron inferiores a los encontrados en el recurso hídrico subterráneo de la cuenca endorreica El Divisorio y el Partido de Bahía Blanca, cuyo valor medio para ambos estudios fue de 3.9 mg/L (Espósito et al., 2013, 2016).

Estos elementos no presentaron una variación espacial, donde los valores medios no tienen diferencias significativas ($p < 0,01$) entre el sector medio con respecto al inferior. Este comportamiento se repite para las distintas cuencas que se desarrollan en la región, debido a que las condiciones puntuales en los acuíferos freáticos son las que definen las concentraciones de estos elementos, manifestando heterogeneidad espacial (Smedley & Kinniburgh, 2002; Blanco et al., 2006; Espósito et al., 2013). Este patrón de distribución responde a una amplia variabilidad intra e interunidades geológicas y están fuertemente controladas por las geoformas, por el relieve y las características de la pendiente, por la asociación mineral en cada geoforma, tipo de suelo, por el pH del agua, hidrólisis de silicatos, óxido-reducción, disolución y dinámica de los carbonatos (Espósito et al., 2016; Díaz et al., 2016).

En el caso particular de las muestras de aguas superficiales obtenidas directamente de la laguna (muestra 10) superaron los límites establecidos de As para consumo humano en los muestreos realizados en 2007 (0,090 mg/L), 2008 (0,050 mg/L) y 2015 (0,044 mg/L). Sin embargo, resultaron inferiores a los detectados por Volpedo et al. (2012) en las aguas superficiales del Lago Chasicó, cuyas magnitudes alcanzaron 0,410 mg/L. En términos generales, en la región pampeana sur, los niveles de As en las aguas de lagunas, depresiones y planos chatos mal drenados varían

en un rango de 0,05 a 0,40 mg/L (Blanco et al., 2018), en coincidencia con los valores hallados. Las concentraciones de F obtenidas en el cuerpo de agua de la laguna fueron alarmantes, en todas las fechas de muestreo con magnitudes que superan hasta 8 veces el valor de referencia establecido (Tabla 1).

Risco sanitario

Los resultados obtenidos de los índices de riesgo ocasionados por los elementos estudiados (As-F), a través de la ingesta y el contacto dérmico del agua, se pueden apreciar en la tabla 3. La muestra obtenida en la cuenca superior (Muestra 1), resulta de alto riesgo para la salud humana cuando es empleada para consumo, donde el índice de riesgo supera a la unidad para el As (2,86) y el F (1,86), únicamente en la fecha de muestreo correspondiente al año 2008. Dicha muestra no presenta ningún tipo de riesgo por contacto dérmico.

De acuerdo a los análisis estadísticos solo existen diferencias altamente significativas ($p < 0,01$) entre los muestreos realizados en un periodo de sequía (2007-2008) con respecto al año 2015, para los valores de los cocientes de riesgo obtenidos. Por tal motivo, el estudio de riesgo de las aguas subterráneas de la cuenca media-inferior se realizó comparando los años 2008 y 2015 (Tabla 3).

Según los valores medios correspondientes a los cocientes de riesgo, el As se presenta como un potencial de riesgo para la salud humana cuando es ingerido en el agua de bebida, únicamente para el período de mayor sequía (2008), donde el cociente supera dos veces el valor de la unidad (2,53). Este efecto de riesgo del As también fue producido en los recursos hídricos de Tres Arroyos, específicamente en el 70 % de las muestras analizadas (Othax et al., 2013) y estos resultados son coincidentes con varios trabajos de la bibliografía donde la ingesta de agua arsenical representa la principal vía de contribución al riesgo (Wang et al., 2007; Peluso et al., 2009). El peligro por toxicidad del As producido por contacto dérmico es bajo, independientemente de las fechas de muestreo.

Tabla 3 - Cociente de riesgo de As-F en las aguas subterráneas y de la muestra superficial obtenida en la laguna para las distintas fechas de muestreo.

N° de Muestra	Cociente de riesgo - Muestreo de 2008				Cociente de riesgo - Muestreo de 2015			
	Ingesta		Contacto		Ingesta		Contacto	
	As	F	As	F	As	F	As	F
1	2,86	1,86	0,016	0,004	0,86	0,41	0,005	0,001
2	2,86	1,52	0,016	0,004	0,95	0,52	0,005	0,001
3	4,76	0,76	0,027	0,002	0,86	0,43	0,005	0,001
4	0,86	0,81	0,005	0,002	0,86	0,40	0,005	0,001
5	1,90	0,95	0,011	0,002	0,86	0,32	0,005	0,001
6	1,90	0,67	0,011	0,002	0,95	0,46	0,005	0,001
7	1,90	0,71	0,011	0,002	0,86	0,76	0,005	0,002
8	4,76	0,90	0,027	0,002	0,86	0,64	0,005	0,002
9	0,95	0,76	0,005	0,002	0,86	0,36	0,005	0,001
10 (laguna)	4,76	5,90	0,027	0,014	4,19	5,10	0,023	0,012

A diferencia del As, el F no se presenta como un elemento de riesgo cuando el agua es utilizada para bebida o contacto dérmico, en los períodos de sequía o de mayor pluviometría (Tabla 3). Sin embargo, existe un pozo puntual (Muestra 2 – 1,52) que se presenta como un riesgo para los usuarios cuando utilizan el recurso para consumo humano, sin producir ningún tipo de efecto tóxico cuando el agua es empleada para el baño con fines higiénicos.

Las aguas de la laguna de Puan, no tienen un elevado riesgo de toxicidad por contacto dérmico mientras se practican deportes náuticos, independientemente de la fecha de muestreo. Estos resultados son similares a los encontrados por Volpedo et al., (2012) en estudios realizados en el Lago Chasicó, donde los efectos carcinogénicos por contacto dérmico al que están expuestos los pescadores que pudieran caer accidentalmente al agua resultaron muy bajos.

CONCLUSIONES

En el marco geomorfológico descrito, las variabilidades de las precipitaciones marcan las pautas de funcionamiento hidrodinámico e hidroquímico del sistema de la cuenca endorreica de la Laguna de Puan, dando origen a una variación temporal de la calidad del recurso hídrico.

Tanto para el período de mayor sequía (2008) como en los distintos sectores de la cuenca, se incrementan las concentraciones del par As-F en las aguas subterráneas, superando los valores de referencia establecidos por la OMS cuando el agua es empleada para el consumo humano.

Los análisis de riesgo sanitario resultaron una herramienta imprescindible para el diagnóstico de los elementos estudiados, estableciendo que los valores de As que se encuentran presentes en el medio acuoso en el periodo de déficit de humedad, representan una amenaza para la salud de las personas expuestas al consumo diario del

recurso hídrico subterráneo.

A pesar del incremento sustancial de las concentraciones de estos elementos (As-F) en los momentos de escasas precipitaciones, que ocurren frecuentemente en esta región, el recurso hídrico subterráneo no presenta un riesgo por contacto dérmico, cuando el agua es utilizada para el aseo personal. El agua de la laguna no es apta para consumo humano y no representa un riesgo por contacto dérmico para la salud de la población que practica deportes náuticos.

Debe ser prioritario el abastecimiento de agua potable a la población periurbana y rural, dado el riesgo a la salud que representaría el aporte de los elementos estudiados, principalmente el As. Es necesario realizar una planificación para la toma de decisiones acertadas, con el fin de analizar alternativas apropiadas en la remoción de As del agua y prevenir situaciones negativas para la población.

REFERENCIAS

- ALIAGA, V.; FERRELLI, F.; ALBERDI ALGARAÑAZ, E.D.; BOHN, V.Y.Y.; PICCOLO, M.C. "Distribución y variabilidad de la precipitación en la región pampeana argentina". *Cuadernos de Investigación Geográfica*, Universidad de La Rioja, España, v. 42, n. 1, p. 261-280, 2016.
- BLANCO, M DEL C.; ESPOSITO, M.; AMIOTTI, N.; DÍAZ, S., RIBET, D.; NICOLLI, H.B. Variabilidad de los niveles de As de los acuíferos freático y termal profundo en el espacio

- geográfico de la región Pampeana meridional (Argentina). **Rev. Cuadernos Geográficos (Granada, España)**, v. 58, n. 1, p. 27 – 46, 2019.
- BLANCO, M. DEL C.; AMIOTTI, N.M.Y.; ESPÓSITO, M.E. Arsénico en suelos y sedimentos del sudoeste pampeano: Origen, acumulación en el aguas y riesgo para consumo humano”. **Rev. Ciencia del Suelo (Argentina)**, vl. 36, n°. 1. P. 182-195, 2018.
- BLANCO, M. DEL C.; PAOLONI, J.D.; MORRÁS, H.; FIORENTINO, C.Y.; SEQUEIRA, M. Content and distribution of arsenic in soils, sediments and groundwater environments of the Southern Pampa region, Argentina. **Journal Environmental Toxicology**, v. 21, p. 561–574, 2006.
- DI RIENZO JULIO, CASANOVES FERNANDO, BALZARINI MÓNICA, GONZALEZ LAURA, TABLADA MARGOT Y ROBLEDO CARLOS. “**InfoStat versión 2013**”. Grupo InfoStat, FCA, Univ. Nac. de Córdoba, Argentina.
- DÍAZ, S.L.; ESPÓSITO, M.; BLANCO, M. DEL C.; AMIOTTI, N.M.; SCHMIDT, M.E.; SEQUEIRA, M.; PAOLONI, J.D.; NICOLLI, H.B. Control factors of the spatial distribution of arsenic and other associated elements in loess soils and waters of the southern Pampa (Argentina). **Catena** n. 140, p 205-216, 2016.
- DUBOIS, D. & DUBOIS, D.F. A formula to estimate the approximate surface area if height and weight be known. **Archives of Internal Medicine**, v. 17, p. 863-871, 1916.
- ESPÓSITO, M.; BLANCO, M. DEL C.; SEQUEIRA, M.E.; PAOLONI, J.D.; FERNÁNDEZ, S.N.; AMIOTTI, N.M.Y.; DÍAZ, S.L. Contaminación natural (As, F) y eutrofización (N, P) en la cuenca del arroyo El Divisorio, Argentina. **Phyton (International Journal of Experimental Botany)**, v. 85. p .51 – 62, 2016.
- ESPÓSITO, M.E. **Hidrología e hidroquímica de la cuenca del arroyo El Divisorio, provincia de Buenos Aires**. 2014. Tesis (Doctorado). UNS.
- ESPÓSITO, M.E.; SEQUEIRA, J.D.; PAOLONI, J.D.; BLANCO, M. DEL C.; AMIOTTI, N. High fluorine and other associated trace elements in waters from the south of the Pampean Plain. **Phyton (International Journal of Experimental Botany)**, v. 82, p. 35 – 44, 2013.
- GENTILI, J. & GIL, V. Variabilidad temporal de las precipitaciones en vertientes opuestas del Sistema de Ventania, Buenos Aires, Argentina. **Revista Universitaria de Geografía**, v. 22, n. (1-2), p. 147-166, 2013.
- GIL, V.; GENTILI, J.O.; CAMPO, A.M.; JELINSKI, G.Y.; CRISAFULLI, M. **Evaluación del peligro potencial de crecidas en cuencas serranas. Sistema de Ventania, provincia de Buenos Aires**. In Tercer Encuentro de Investigaciones en Formación de Recursos Hídricos. Ezeiza, Buenos Aires: Instituto Nacional del Agua. 2016. https://www.ina.gov.ar/ifrh-2016/trabajos/IFRH_2016_paper_133.pdf.
- GONZÁLEZ URIARTE, M.; PAOLONI, J.D.; NAVARRO, E.L.; FIORENTINO, C.E.; SEQUEIRA, M.E. Land-scape surface runoff and groundwater quality in the district of Puan, Province of Buenos Aires, Argentine. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 57, N3, p. 192–195, 2002.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS Y CENSOS (INDEC). Población en viviendas particulares según área urbano-rural. Provincia de Buenos Aires. 2010. <https://www.indec.gov.ar/indec/web/Nivel4-CensoProvincia-3-999-06-651-2010>
- MARINI, M.F; S.; CHILLIZZI, R.; PICCOLO, M.C. Carta hidrogeomorfológica de la cuenca superior de los arroyos Pillahuincó Grande y Pillahuincó Chico, Buenos Aires, Argentina. **Revista de Geografía, Norte Grande**; Lugar: Santiago de Chile; p 71 – 80, 2009.
- MINISTERIO DE SALUD DE LA NACIÓN. **Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico HACRE: Módulo de Capacitación**. García, Susana Isabel – 1ra ed. Ministerio de Salud de la Nación. Programa Nacional de Prevención y Control de las Intoxicaciones, Buenos Aires, 68 p. 2011.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC-1983). **Risk Assessment in the Federal Government: Managing the Process**. National Academic Press. Washington DC., 1983, 191 p.
- NG, J.; WANG, J.; SHRAIM, A. A global health problem caused by arsenic from natural sources. **Chemosphere**, v. 52, p. 1353-1359, 2003.
- NICOLLI, H.B.; BUNDSCHUH, J.; BLANCO, M. DEL C.; TUJCHNEIDER, O.; PANARELLO, H.; DAPEÑA, C.; RUSANSKY, J. Arsenic and associated trace elements in groundwater from the Chaco-Pampean plain, Argentina: Results from 100 years of research. **Sc. Total ENVIRONMENT**, V. 429, P 36-56, 2012.
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS-2011). “**Guías para la calidad del agua potable**”, 4ta edición, año 2011, 564 p.
- OTHAX, N.; PELUSO, F.; GONZÁLEZ CASTELAIN, J., RODRÍGUEZ, M.L, DUBNY, S. Riesgo sanitario integrado por sustancias presentes en recursos hídricos de Tres Arroyos, Argentina. **Ecotoxicología. Acta Bioquím Clín Latinoam**, v. 47, n. 4, p. 681-692, 2013.
- PAOLONI, J.D., M.E. SEQUEIRA, Y M.E. ESPÓSITO, 2010. **Los recursos hídricos - evaluación de la calidad. En: Ambientes y Recursos Naturales del Partido de Bahía Blanca: Clima, Geomorfología, Suelos y Aguas (Sudoeste de la provincia de Buenos Aires)**. Capítulo IV, 177-219. PAOLONI J.D. Compilador. 1ª Edición Bahía Blanca, EdiUNS. (ISBN 978-987-1648-22-1).
- PELUSO, F., OTHAX, N., GONZÁLEZ, Y. CASTELAIN, J. **Riesgo sanitario por arsénico y fluoruro en Azul, prov. de Buenos Aires. Comparación de escenarios de exposición**. En: Galindo G, Fernández-Turiel JL, Storniolo A, editores. Presencia de Fluor y Arsénico en aguas subterráneas. III Taller sobre arsénico en agua. In: CONGRESO ARGENTINO DE HIDROGEOLOGÍA; VI, 2009. Santa Rosa, La Pampa. **Actas Del...**Argentina; 2009. p. 91-9.
- RAIS. **The Risk Assessment Information System**. 2011. Recuperado de: <http://www.rais.ornl.gov>.
- SCIAN, B. Clima - Bahía Blanca y Sudoeste Bonaerense. En: PAOLONI, J.D. (comp.) 2009. **Ambiente y recursos naturales del partido de Bahía Blanca. Bahía Blanca**, EdiUNS, p. 240, 2010.
- SEQUEIRA, M.E.; FERNÁNDEZ, S.N.; PAOLONI, J. D.; FIORENTINO, C.E.; ESPÓSITO, M.E.; ANTONELLI, P.J. Calidad hidroquímica del recurso hídrico en una cuenca endorreica del sudoeste de la Provincia de Buenos Aires. **Cuadernos del CURIHAM**, v. 14, p 1-11, 2008.
- SEQUEIRA, M.E.; FERNÁNDEZ, S.N.; PAOLONI, J.D.; FIORENTINO, C.E.; ESPÓSITO, M.E.; ANTONELLI, P.J. Cuenca endorreica de la laguna de Púan, Provincia de Buenos Aires. Características hidrológicas y calidad hidroquímica del recurso hídrico. **Ambientes y Recursos Naturales del Sudoeste Bonaerense: Producción, contaminación y conservación**. CAZZANIGA N. J. Y ARELOVICH, H. M (Eds.). Edi-UNS. p 31-47, 2009.
- SILVA, G. Análisis hidrográfico e hipsométrico de la cuenca alta y media del río Chama, estado Mérida, Venezuela. **Revista Geográfica Venezolana**, v 40, n. 1, p. 9 – 42, 1999.
- SMEDLEY, P.L. & KINNIBURGH, D.G. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. **Applied Geochemistry**, v. 17, p 517-568, 2002.
- TOLSON, J.K.; JORDAN, K.E.; OCHOA, H.G.Y.; ROBERT, S.M. Development of Cleanup Target Level (CTLs) for Chapter 24, Code of Miami-Dade County, Florida. **Center of Environmental and Human Toxicology**, University of Florida. Reporte técnico, 2000. Florida.
- USEPA (2007). **Dermal exposure assessment: A summary of EPA approaches**. Environmental Protection. Agency, 2007, 56pp. EPA/600/R-07/040F, Washington (DC).
- USEPA. **Guidelines for exposure assessment**. United States Environmental Protection Agency. Washington, D.C. 1992,

- 126 pp. EPA/600/Z-92/001.
- USEPA. **IRIS (Integrated Risk Information System) Database**. United States Environmental Protection Agency. 2011 <http://www.epa.gov/iris>
- USEPA. Risk assessment guidance for superfund. **Human health evaluation manual (part A)**. United States Environmental Protection Agency. Washington, Vol. 1, 1989, D.C. 291 pp. EPA/540/1-89/002.
- USEPA. Risk assessment guidance for superfund. **Human Health Evaluation Manual. Part E: Supplemental guidance for dermal risk assessment**. Environmental Protection Agency, Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, Vol. 1, 2004, 156pp. EPA/540/R/99/00, OSWER 9285.7-02EP. PB99-963312, Washington (DC).
- VOLPEDO, M.; PUNTORIERO, L.Y; FERNÁNDEZ CIRELLI, A. Riesgo potencial de las altas concentraciones de arsénico en el Lago Chasicó (Buenos Aires, Argentina). In: CONGRESO DE MEDIO AMBIENTE (AUGM), 7, 2012; La Plata. **Actas Del...**Argentina. 2012, p. 11.
- WANG, G., DENG, Y., LIN, T. Cancer risk assessment from trihalomethanes in drinking water. **Sci Total Environ**, v. 387, p. p 86-9, 2007.
- YOSHIDA, T.; YAMAUCHI, H.; SUN, G.F. Chronic health effects in people exposed to arsenic via the drinking water: dose-response relationships in review. **Toxicol. Appl. Pharmacol**, v. 198, n. 3, p. 243-252, 2004.

*Submetido em 15 de setembro de 2021
Aceito para publicação em 21 de fevereiro de 2022*