ASOCIACIÓN LATINOAMERICANA DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA PARA EL DESARROLLO
ASSOCIAÇÃO LATINOAMERICANA DE HIDROLOGIA SUBTERRÂNEA PARA O DESENVOLVIMENTO

1984-2020

Revista Latino-Americana de Hidrogeología

EDICIÓN ESPECIAL.ISSN: 1676-0999.

CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN ARGENTINA

ACTUALIZACIÓN EN LA INVESTIGACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN NATURAL Y ANTROPOGÉNICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

POLUIÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NA ARGENTINA

PESQUISA ATUAL SOBRE POLUIÇÃO NATURAL E ANTROPOGÊNICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Hermosillo, Sonora, México

FEBRERO 2020

Número especial - Febrero / 2020

Revista Latino-Americana de Hidrogeología

Rev. Lat. Am. Hidrogeol.	Hermosillo, Mex.	Número especial	p.1-82	Febrero / 2020

1984-2019

Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo
Associação Latinoamericana de Hidrologia Subterrânea para o Desenvolvimento

JUNTA EJECUTIVA ALHSUD
2018-2022

PRESIDENTE
Titular: MIGUEL RANGEL MEDINA
Suplente: María Vicenta Esteller Alberich

SECRETARIO GENERAL
ROGER GONZALEZ HERRERA

SECRETARÍA ADJUNTA
Titular 1: Teresita Betancur (Colombia)
Suplente 1: Carlos Pineda Palomeque (México)

CAPÍTULOS ALHSUD
Chile: Pablo Rengifo (Presidente)
Perú: Fluquer Peña L. (Presidente)
Brasil: José Paulo G. M. Netto (Presidente)
México: Raúl Morales E. (Representante)
Ecuador: Oscar Larrea (Representante)
Bolivia: Mónica X. Guzmán (Representante)
Argentina: Eduardo Mariño (Representante)
Colombia: Nelson Omar Vargas (Representante)
Uruguay: Ximena Lacues (Representante)

Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo
http://www.alhsud.com
info@alhsud.com

COMITÉ CIENTÍFICO

Carlos Molano (Colombia), cmolano@uniandes.edu.co
Emilio Custodio (España), Emilio.custodio@upc.edu
Ernani Francisco da Rosa Filho (Brasil), ernani@ufpr.br
Ricardo Hirata(Brasil), rhirata@usp.br
Haydn Barros – (Venezuela) hbarros@usb.ve
Mario E. Arias S. (Costa Rica), marioa@geologia.ucr.ac.cr
Ofelia Tujchneider (Argentina), ofeliatujchneider@yahoo.com.ar
Vicenta Esteller (México), esteller@uaemex.mx
Miguel P. Auge (Argentina), miguelauge66@gmail.com
Nilda González (Argentina), nilda_h@sinectis.com.ar
Herve Jegat (Venezuela) hjegat@ula.ve
Jorge Montaño (Uruguay), montanox@movinet.com.uy
Crisanto Silva (Venezuela) crisantosilva@yahoo.com
Roger González H. (México), gherrera@uady.mx
Emilia Bocanegra (Argetina), ebocaneg@mdp.edu.ar

COMISIÓN FISCAL
Titulares
Eugenio Celedón Cariola (Chile)
Jose Paulo Netto (Brasil)
Leticia González (Uruguay)

Suplentes
Uriel Duarte (Brasil)
Margarita Sienra (Uruguay)
Antonio Chambel (Portugal)

GERENCIA ADMINISTRATIVA
Columba Montijo González
info@alhsud.com

COORDINADOR DE AUTORES
MIGUEL P. AUGE

EDITOR
MIGUEL RANGEL MEDINA

COEDITOR
ROGELIO MONREAL SAAVEDRA

Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo
Associação Latinoamericana de Hidrologia Subterrânea para o Desenvolvimento

1984-2019

Comisión Editorial

Editor
Miguel Rangel Medina

Co Editor
Rogelio Monreal Saavedra

Coordinador de Autores
Miguel P. Auge

Jefe de Producción Editorial
Marco Antonio Soto Román

Editorial ALHSUD
Miguel Rangel Medina
Roger Amilcar González Herrera
María Vicenta Esteller Alberich
Rogelio Monreal Saavedra

Cuidado de Edición
Marco Antonio Soto Román

Correctora de Estilo
Magdalena Frías Jaramillo

Diagramadora de formato electrónico e impreso
Guadalupe A. Montaño Fimbres

Diseño
Brenda Guerrero Z.

Corrección de Galeras
Guadalupe A. Montaño Fimbres

www.alhsud.com
info@alhsud.com
ISSN: 1676-0999
Vol. 10-2020, Edición ESPECIAL

IMPRESO EN MÉXICO
Printed in Mexico
Editorial El Auténtico, S.A. de C.V.
Ave. Revolución # 14 Col. Centro, C. P. 83000
Hermosillo, Sonora, México.

PRESENTACIÓN

ALHSUD inició en 2018 un proceso de publicación de artículos sobre importantes acuíferos en México, Centro y Sudamérica, ya que existe una una amplia y diversa gama de estudiosos dedicados a su análisis, pero no han publicado sus artículos. De entonces a la fecha, diferentes hidrogeólogos de países miembros de ALHSUD se han incorporado a esta tarea en México, Argentina, Venezuela, Uruguay y Colombia; secuencialmente, tenemos la certeza de que otros colegas del resto de nuestros países latinoamericanos se irán incorporando a esta tarea para enriquecer la serie de números especiales. Nuestro objetivo es publicar uno cada estación del año, es decir, realizaremos cuatro publicaciones al año.

Los resultados de las investigaciones recibidas muestran que gran cantidad de nuestros acuíferos es amenazada por la sobreexplotación y la contaminación. Y el agua subterránea muchas veces se consume directamente de las fuentes naturales sin saber que su uso debería ser condicionado y potabilizado, o bien, se desconoce si esta falta de calidad procede de un efecto antropogénico o natural. La contaminación y calidad del agua son las áreas de atención que han ganado un importante espacio en las investigaciones. En esta edición, se publican estudios que se enfocan en la presencia de nitratos, con amplia cobertura geográfica del territorio argentino; es interesante revisar estos artículos que dedican sus investigaciones a la presencia e incremento de nitratos en tan diversos medios acuíferos como son La Plata y la Provincia de La Pampa, donde los datos evidencian una contaminación por nitratos en el área de recarga, fundamentalmente por la actividad urbana sin saneamiento, la rural y la utilización de fertilizantes.

Cabe desatacar la investigación que se enfocó en nitratos en las zonas urbanas de Pergamino-Argentina y de especial interés resulta la dedicada en la Franja Medanosa Austral del Suroeste Bonaerense, donde se analizan los factores que condicionan el consumo del agua. Sus aportaciones son excelentes al identificar que la contaminación proviene del medio natural. De suma importancia resulta, asimismo, la investigación sobre la presencia de Boro en el acuífero Lerma en el valle del Lerma en la región de Salta al norte de Argentina, la cual es una fuente estratégica de suministro de agua potable para la población que vive en su área de ocurrencia.

Finalmente, nos permitimos insistir en hacer extensiva la invitación a todos nuestros hidrogeólogos miembros de ALHSUD para que continúen aportando información con sus investigaciones y, a su vez, damos la bienvenida a quienes hoy publican en nuestra Revista dedicada a la hidrogeología de la Argentina. Recordemos que la difusión de los aportes científicos en Latinoamérica es importante en la formación de nuevos científicos y fortalece el desarrollo que requiere un fondo activo de conocimiento.

ALHSUD mantiene y agradece el soporte del equipo editorial de la Universidad de Sonora (UNISON), el cual apoya en la labor de mejora y contribuye con la ciencia latinoamericana y su revista para compartir el conocimiento científico centrado en la interrelación entre el agua y el ambiente, además de aportar a nuestra sociedad la información científica acerca de los impactos de y sobre el medio natural y humano. Nuevamente, esperamos que resulte de gran interés para la comunidad técnica y científica, pero, en especial, que sea de utilidad para toda la sociedad.

PROF. DR. MIGUEL RANGEL MEDINA
PRESIDENTE DE ALHSUD
DIRECTIVA 2018-2022

NÚMERO ESPECIAL

CONTAMINACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN ARGENTINA

La contaminación del agua en general (superficial, atmosférica, marina) y de la subterránea en particular, se han acelerado notoriamente a nivel global en los últimos 50 años. A ello ha contribuido en gran medida el crecimiento de la población mundial, que de 3,700 millones de habitantes en 1970, pasó a 7,735 millones en la actualidad, o sea, se duplicó en 49 años. El incremento de las actividades necesarias para cubrir la demanda se dio a la par, pero en su mayoría, los casos no tuvieron el control adecuado para preservar la calidad ambiental y de esa forma, evitar o morigerar la contaminación de los recursos naturales (agua, suelo, aire y biota).

Entre las actividades vinculadas al crecimiento poblacional se destacan:

1. El aumento en la producción de alimentos, fundamentalmente mediante cultivos de cereales y, secundariamente, por la cría de ganado y de aves.
2. El incremento de la producción industrial.
3. El crecimiento de la explotación de aguas subterráneas para consumo humano, industrial y para riego.

Otras actividades que también incidieron negativamente en la calidad del agua fueron:

4. Las nuevas técnicas de explotaciones mineras y de hidrocarburos.

Respecto al aumento de la población, se produjo en general en forma descontrolada, sin el acompañamiento de las obras de infraestructura necesarias para brindar servicios adecuados de agua potable y desagües cloacales. La falta de alcantarillado y de plantas para el tratamiento de las aguas residuales, trajeron aparejado un marcado incremento en la contaminación bacteriológica de las aguas superficiales y subterráneas. Esta situación afecta a un número cada vez mayor de las poblaciones urbanas, particularmente en las grandes ciudades o megalópolis que caracterizan a varios países de Latinoamérica, como México (23 millones de habitantes), Sao Paulo (22), Buenos Aires (13), Lima (9.5), Bogotá (7.2), Río de Janeiro (6.3) o Santiago de Chile (5.6). Estos aglomerados urbanos, además, sufren la contaminación por las emisiones vehiculares e industriales.

Respecto al agua potable, la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), con 23 millones de habitantes, que incluye al Distrito Federal o Ciudad de México (9 millones), posee una cobertura del orden de 98% (22.5 millones), pero con 2.5 millones que suelen sufrir escasez temporal en el suministro. Con desagües cloacales, tiene una cobertura de 92% (21 millones) de la población, pero las aguas residuales no reciben tratamiento y se emplean para riego, mezcladas con las pluviales (información brindada por el Dr. Miguel Rangel Medina).

En Sao Paulo y su conurbano (22 millones de habitantes), 99% (21.8 millones) tiene agua de red y 84% (18.5 millones), desagües cloacales, de los cuales sólo recibe tratamiento 53%. Otro dato de interés es que las pérdidas en las redes de distribución de agua de Sao Paulo, promedian 37% del total circulante (información brindada por el Dr. Ricardo Hirata).

En Buenos Aires y su conurbano (13 millones de habitantes), 9.9 millones disponen de agua de red (76%) y 8.2 millones (63%) tienen desagües cloacales, pero el tratamiento de los mismos es de tipo primario; sólo se separa el grueso y el resto se vierte en el Río de la Plata. Los 4.8 millones de habitantes, carentes de saneamiento, vierten sus desechos domésticos y cloacales en pozos

absorbentes o ciegos, que constituyen fuentes directas para la contaminación biológica del agua subterránea.

Se mencionan a continuación las sustancias contaminantes más frecuentes que afectan a los ámbitos urbanos, los rurales, los acuíferos costeros, las explotaciones mineras e hidrocarburíferas y también a los contaminantes de origen natural.

Áreas urbanas. Los nitratos, son los contaminantes más difundidos y una de las causas principales de deterioro del agua subterránea, tanto en los países desarrollados como en los que están en vías de desarrollo. Se presentan en concentraciones elevadas, tanto en los ámbitos urbanos, provistos de servicios sanitarios, como en aquellos que no los tienen; en pequeñas ciudades o poblados y en las megalópolis mencionadas. Los nitratos constituyen la fracción más oxidada, soluble, móvil, estable y persistente de la materia nitrogenada.

En los centros urbanos carentes de servicios cloacales los NO_3 derivan de la degradación de la materia orgánica, mayormente de origen fecal. Los pozos ciegos o negros, en los que se vierten los desechos fecales, son las fuentes de emisión principales. En las ciudades con servicios cloacales, los NO_3 derivan de pérdidas en las redes, de aportes provenientes de los sectores suburbanos, que carecen o tienen poca cobertura cloacal, de viejos pozos ciegos que estaban situados en los cascos urbanos y fueron reemplazados posteriormente por las redes sanitarias y, en algunos casos, de antiguos repositorios de basura que estuvieron emplazados en la vecindad del ejido poblado y que, luego de ser desactivados, fueron empleados como terrenos para la construcción de viviendas.

En este número de la revista, hay un artículo que trata específicamente sobre la contaminación con nitratos del agua subterránea de la ciudad de La Plata, Argentina.

Las plantas industriales, ubicadas dentro de los centros urbanos o en sus cercanías, producen la gama más numerosa y variada de contaminantes, dañando a la atmósfera por la eliminación de humos y otros compuestos gaseosos, al suelo y al agua, por vertidos líquidos, sólidos y semisólidos y, además, por la infiltración de los contaminantes atmosféricos que caen solos o arrastrados por la lluvia. Entre los contaminantes inorgánicos se destacan cromo, plomo, cobre, arsénico, asbestos, antimonio, mercurio y cadmio; de éstos, el Sb, el Cd y el Hg resultan tóxicos para el ser humano, en concentraciones de µg/L. Entre los orgánicos: clorobenceno, tolueno, xileno, tetracloruro de carbono, benceno y dicloroetileno; los 3 últimos altamente tóxicos para el hombre en concentraciones de µg/L. La mayoría de las grandes ciudades latinoamericanas (más de 1 millón de habitantes), las intermedias (entre 1 millón y 100,000) y aún las pequeñas (menos de 100,000 habitantes), sufren contaminación de sus acuíferos, en mayor o menor medida, por la actividad industrial, particularmente cuando ésta se concentra en los parques industriales.

Áreas rurales. También son frecuentes los NO_3 en sus aguas subterráneas, que derivan de fertilizantes con base en abonos, sulfato de amonio o urea, en los sitios cultivados y de la bosta y orín existentes en corrales, tambos, criaderos de aves y en la vecindad de bebederos. También es común encontrar tenores altos de NO_3, derivados de los pozos ciegos que se utilizan para las descargas fecales de las viviendas. La práctica de cría de ganado mediante *feed lot*, que se está difundiendo rápidamente, consiste en la concentración de una gran cantidad de animales por unidad de superficie, lo que origina una alta carga de desechos orgánicos (bosta y orín) que inevitablemente deriva en una fuerte contaminación biológica y con materia nitrogenada del agua subyacente a los mismos. Algo similar sucede en los sitios de cría de aves, por la concentración de las heces generadas por las mismas. Ambos casos se dan con frecuencia en Argentina.

Cultivos. Para mejorar los rindes, se ha incrementado notoriamente y en muchos casos en forma innecesaria, tanto el empleo de fertilizantes como de pesticidas o plaguicidas, nombres con los que se agrupa a los herbicidas, insecticidas y fungicidas. Se trata de sustancias químicas de composición muy diversa, en general de carácter orgánico y de alta toxicidad aún en muy bajas concentraciones (µg/L). Los pesticidas se pueden clasificar en: organoclorados, altamente tóxicos, poco móviles, pero muy persistentes en el suelo y los vegetales; organofosforados, altamente tóxicos, con alta movilidad y baja persistencia; y los carbamatos, menos tóxicos que los anteriores.

El marcado incremento de la producción agrícola en los últimos años, especialmente mediante el cultivo de soja, en Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay, ha derivado en el aumento del empleo de plaguicidas, especialmente del glifosato, que es un herbicida, altamente tóxico para los humanos y que genera un grave deterioro en la calidad del suelo, de la biota y de las aguas superficiales y subterráneas.

Además de los cultivos de cereales, que son de tipo extensivo, la producción hortícola, florícola y frutícola, de tipo intensivo, también emplea cantidades importantes de plaguicidas, con el agravante de que la mayoría de las explotaciones se ubica en las vecindades de los centros urbanos. En Argentina, se destacan por la producción de verduras los ámbitos vecinos a las ciudades de La Plata, Mar del Plata y Buenos Aires; por la producción de flores los cercanos a La Plata y Escobar y por la producción de frutas, los vecinos a San Pedro, y los existentes en las provincias de Río Negro, Entre Ríos y Tucumán.

Áreas costeras. La salinización por sobreexplotación de acuíferos costeros es una de las consecuencias conocidas desde la antigüedad, como generadora de deterioro de la calidad del agua subterránea. Es mucho lo que se ha investigado y avanzado en el conocimiento del tema, que en definitiva deriva de la ruptura por explotación, del equilibrio natural que por diferencias de densidades guardan el agua dulce continental con la salada marina. La salinización de acuíferos costeros está ampliamente extendida en Centroamérica y el Caribe, pero también en Sudamérica, donde existen extensas costas limitadas por el Océano Atlántico al este, en Brasil, Argentina y Uruguay y por el Pacífico al oeste, en Colombia, Ecuador, Perú y Chile.

En Argentina, la ciudad más afectada, fue y sigue siendo Mar del Plata, que es el centro turístico veraniego más importante del país, con 750,000 habitantes estables y con más de 1.5 millones en temporada, que se abastecen exclusivamente de agua subterránea. La salinización del acuífero por la explotación en la vecindad de la costa, obligó a desplazar la nueva batería de pozos de explotación entre 7 y 13 km tierra adentro. El deterioro por salinización y aún por contaminación bacteriológica, también se da en otras ciudades turísticas costeras argentinas, caracterizadas por la existencia de cordones medanosos, de elevada permeabilidad, que contienen acuíferos con agua dulce.

Explotaciones mineras. Las clásicas explotaciones de minerales metalíferos, que se realizaban mediante galerías y piques subterráneos, no requerían el movimiento de volúmenes importantes de las rocas portadoras y, por ende, sólo afectaban a la calidad del agua subterránea en la vecindad de las obras o de las plantas de tratamiento. Esta minería fue reemplazada en los últimos tiempos por otra megaminería a cielo abierto, o de open pit, más rentable, porque permite aprovechar yacimientos de baja ley, pero produce grandes excavaciones, tanto en profundidad como en la superficie que abarcan, y para ello es necesario el movimiento de grandes volúmenes de roca mediante explosivos. Tal situación deriva en la formación de grandes nubes de polvo, que puede ser transportadas por el viento a distancias considerables. También requiere, para la obtención de los concentrados de los minerales a aprovechar, el empleo de grandes volúmenes de agua, generalmente de origen subterráneo, como sucede en Argentina, donde los 3 emprendimientos mineros más importantes a cielo abierto utilizan agua subterránea, pese a ubicarse en regiones áridas, con un marcado déficit en el balance hídrico.

Para la separación de metales pesados como el oro, que es el más importante por su precio, la megaminería generalmente emplea cianuro, que es una sustancia altamente tóxica y soluble, por consiguiente deben tomarse estrictas medidas de seguridad para evitar la contaminación de las aguas. Sin embargo, las pérdidas de los lixiviados en las plantas de separación, en los ductos hacia los diques de colas y en estos últimos, han generado serios daños ambientales y graves deterioros en la calidad de las aguas superficiales y subterráneas. Esto ha sucedido en varias oportunidades en los yacimientos argentinos de Veladero en la provincia de San Juan y Bajo La Alumbrera en la de Catamarca.

Explotaciones de hidrocarburos. La exploración y explotación tradicional de hidrocarburos (HC), realizadas mediante perforaciones verticales, derivan con frecuencia en la salinización de acuíferos someros portadores de agua dulce, por comunicación con otros

salados más profundos, debido a la deficiente aislación entre ellos. Otro tipo de contaminación es la que se produce cuando la aislación no es efectiva entre los niveles productivos de petróleo y/o gas y los acuíferos sobrepuestos. También es común la salinización de los acuíferos someros en las cercanías de las plantas de separación del petróleo con el agua salada de formación, que inevitablemente lo acompaña en la extracción, y en las piletas de limpieza vecinas a las perforaciones de explotación. Otras construcciones que suelen generar contaminación son los ductos para el transporte de petróleo o gas, que generalmente son subterráneos y, por ende, sus pérdidas resultan muy difíciles de identificar. En las refinerías, las fugas en las cisternas de almacenamiento de hidrocarburos constituyen otra fuente de contaminación importante para el agua subterránea.

La nueva técnica de explotación de petróleo y gas en rocas de muy baja permeabilidad del tipo lutita o esquisto (*shale*), mediante fracturación hidráulica (*fracking*), no sólo mantiene los riesgos de contaminación mencionados para las captaciones tradicionales, sino que además incorpora la que resulta del empleo de una cantidad importante de sustancias dispersantes y defloculantes, altamente contaminantes, que son inyectadas disueltas en un gran volumen de agua en las formaciones productivas de HC, pero que en una proporción superior a 70% retornan a la superficie junto con el agua inyectada a la que se le agrega la salada de formación, visto así, éstas deben ser convenientemente tratadas y vertidas para evitar la contaminación de los acuíferos con agua potable. En Argentina, la explotación por *fracking* se está realizando en el yacimiento Vaca Muerta en la Provincia del Neuquén, pero hasta la fecha no se tienen resultados veraces sobre contaminación del agua, del suelo, del aire y de la biota, debido al escaso tiempo de iniciada la explotación. En Wyoming (EUA), EPA encontró metano, benceno, xileno, gasolina y diésel en pozos someros de agua para consumo humano, cuyo origen lo atribuyó a sustancias utilizadas para el *fracking* en pozos gasíferos cercanos a los de agua. Los riesgos de daño ambiental generados por el *fracking*, derivó en la prohibición total de su empleo en Alemania, Francia, Italia, Suiza, Bulgaria, Holanda e Irlanda y la prohibición parcial en España. En EUA, está prohibido en los estados de Vermont, Nueva Jersey y Nueva York. En Sudamérica, la prohibición rige en todo Uruguay, en Brasil (estado de Paraná) y en Argentina (provincia de Entre Ríos).

Contaminantes naturales. Son los que existen naturalmente como componentes de las formaciones geológicas y que pueden incorporarse al agua subterránea en forma natural, fundamentalmente por dilución, o ser inducidos artificialmente por actividades como la sobreexplotación de acuíferos costeros, las explotaciones mineras y las hidrocarburíferas mal realizadas. Dado que los procesos generadores de contaminaciones inducidas ya fueron descriptos, se hará a continuación una breve relación de los contaminantes naturales, que también se incorporan en forma natural a las aguas subterráneas.

Dos de los más frecuentes, particularmente en regiones áridas, son el flúor y el arsénico, cuyo origen se vincula directamente a la actividad volcánica. Por ello, se presentan en concentraciones elevadas en las vecindades de las regiones volcánicas, pero también aparecen en zonas alejadas de las mismas, en algunos casos a miles de kilómetros como sucede en la Llanura Chacopampeana Argentina, donde domina una cubierta loéssica, con abundante ceniza volcánica, generada por las erupciones de la Cordillera de los Andes y transportada por el viento hacia el este.

El flúor tiene un comportamiento cambiante porque hasta cierta concentración (alrededor de 1 mg/L) favorece la formación dental de los niños, pero en exceso origina fluorosis, que se manifiesta por un manchado, disminución de la resistencia e incluso hasta la pérdida de las piezas dentales. Otra enfermedad derivada del consumo de agua con exceso de flúor es la osteoporosis, caracterizada por una marcada fragilidad de los huesos.

El consumo de agua con exceso de arsénico, genera diferentes tipos de cáncer, entre los que se destaca el de piel. Otras regiones áridas en las que el agua subterránea presenta elevados tenores de F y As de origen natural se dan en Chile, Paraguay, Bolivia, Perú, y México.

En Brasil es común la presencia de valores altos de flúor, pero no de arsénico (información brindada por el Dr. Ricardo Hirata).

Para concluir, resulta claro que la contaminación afecta a un volumen cada vez mayor de agua subterránea en Latinoamérica y que son pocas las medidas adoptadas por los gobiernos para preservar la calidad de un recurso con el que se abastece aproximadamente la mitad de su población. En las megalópolis, la carencia más notoria se da por la falta de desagües cloacales y de plantas para el tratamiento de las aguas residuales, lo cual favorece la contaminación de los acuíferos y, por ende, la pérdida de su aptitud para la alimentación de la población. Otras fuentes de generación de contaminantes que han crecido notoriamente en los últimos tiempos son los basurales a cielo abierto, las fumigaciones en las zonas rurales, los *feed lots*, la megaminería, la explotación de hidrocarburos por *fracking*, la actividad industrial y, en forma inducida, la salinización por sobreexplotación de acuíferos costeros.

Otra problemática es el escaso conocimiento que se tiene en los ámbitos contaminados respecto al origen, a la evolución espacial y temporal de la contaminación, así como al volumen de agua afectada, dado que son muy escasas las redes de monitoreo para aguas subterráneas que operan adecuadamente y brindan información representativa. En este sentido la mayoría, después de instaladas, funcionan durante un tiempo limitado, por lo común menor al previsto, y luego son abandonadas. Con ello, se trunca la posibilidad de registrar en tiempo y espacio los procesos de contaminación, que están regidos principalmente por la dinámica del agua subterránea, que resulta sumamente lenta, especialmente en medios porosos de baja permeabilidad. En definitiva, la falta de un conocimiento preciso sobre los procesos de contaminación también inhibe la aplicación de métodos efectivos para la remediación.

En virtud de lo expuesto y, dado el escaso conocimiento que se tiene en algunos casos y la falta de actualización en otros, se considera necesario que ALHSUD desarrolle un proyecto destinado a cubrir ambas falencias, enfocado en estudiar las características, el comportamiento y el estado de los acuíferos más importantes de América Latina, esto último, fundamentalmente, respecto a la contaminación y la sobreexplotación. Las tareas pueden encararse por país, o por cuenca hidrogeológica, incluyendo en el último caso, a los acuíferos transfronterizos, como el Guaraní.

Las tareas, cuya realización se estima en al menos 3 años, estarían a cargo de un coordinador, que prepararía el plan de trabajo y supervisaría su ejecución, y por aquellos asociados de ALHSUD que acepten realizarlas en cada país o cuenca hidrogeológica.

Dr. Geól. Miguel P. Auge
Coordinador editorial
Argentina 2020

SUMARIO

12 **AGUA SUBTERRÁNEA EN LA FRANJA MEDANOSA AUSTRAL DEL SUROESTE BONAERENSE, ARGENTINA. FACTORES QUE CONDICIONAN SU APTITUD PARA CONSUMO HUMANO**

E. R. Albouy , A. G. Ruffo, J. M. Giorgi, N. V. Bastianelli

24 **CONTAMINACIÓN CON NITRATOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA PLATA, ARGENTINA**

Miguel Auge

44 **PROBLEMÁTICA DE NITRATOS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE ZONAS URBANAS: CASO DE ESTUDIO PERGAMINO-ARGENTINA**

S. Perdomo, M. S. Ruiz, A. Walhmann, J. E. Ainchil, E. E. Kruse

53 **CONTAMINACIÓN POR BORO EN EL SECTOR SUR DEL SISTEMA ACUÍFERO ARENALES, VALLE DE LERMA (SALTA-ARGENTINA)**

M. Romero Orué, C. Abraham, G. Baudino, L. Gutiérrez

66 **FONDO GEOQUÍMICO DE LA CONCENTRACIÓN DE NITRATOS EN EL AGUA SUBTERRÁNEA EN EL VALLE ARGENTINO, LA PAMPA, ARGENTINA**

C. Schulz, N. Loyola, C. Arroyo

Fondo geoquímico de la concentración de nitratos en el agua subterránea en el Valle Argentino, La Pampa, Argentina

C. Schulz
N. Loyola
C. Arroyo

***R*esumen:** El Valle Argentino, La Pampa, Argentina, se encuentra en una zona con características de subhúmedas a semiáridas y el agua subterránea constituye la única fuente de suministro posible. En consecuencia, destaca la enorme importancia que los recursos tienen para la vida y el desarrollo de la región. Con base en la metodología de Lepeltier (1969), en este trabajo se determinó el fondo geoquímico con un valor de 17.3 mg/l y un umbral (t) de 45.9 mg/l, valores que indican factores de intervención antrópica en la concentración de nitrato en el agua subterránea del área estudiada. Los datos observados evidencian una contaminación embrionaria por nitratos en el área de recarga, fundamentalmente por la actividad urbana –sin saneamiento– y la rural –a causa de la actividad ganadera y, en menor medida, por fertilizantes, lo cual pondría en serio riesgo la calidad del agua debido a las características hidrogeológicas del acuífero.

Palabras clave: agua subterránea, contaminación, nitratos, VArgentino, La Pampa, Argentina.

Abstract: The Argentine Valley, La Pampa, Argentina, is located in an area with sub-humid to semi-arid characteristics and groundwater is the only possible source of supply. Consequently, the enormous importance that resources have for the life and development of the region is highlighted. In this work, the geochemical background with a value of 17.3 mg/l and a threshold (t) of 45.9 mg/l was determined (using the methodology of Lepeltier, 1969), which indicates anthropic intervention in nitrate concentration in the groundwater of the studied area. According to the data observed, an embryonic contamination by nitrates is evidenced in the recharge area, mainly by urban activity without sanitation and rural by livestock activity, and incipient by fertilizers, which would seriously jeopardize the water quality of the aquifer, due to its hydrogeological characteristics.

Keywords: groundwater, pollution, nitrates, Argentine Valley, La Pampa, Argentina.

Recibido: Octubre, 2019 /Aceptado: Noviembre, 2019
Publicado en línea: Febrero, 2020
© 2020

C. Schulz
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad Nacional de La Pampa (UNLPam).
E-mail de correspondencia: carlosjuanschulz@gmail.com

INTRODUCCIÓN

En Argentina, una gran parte de su extenso territorio, aproximadamente 75%, es de carácter árido o semiárido, de ahí el marcado déficit en el balance hídrico. Por ello, el recurso subterráneo adquiere gran importancia para el abastecimiento destinado a distintos usos en zonas donde se carece de otras fuentes de agua. La provincia de La Pampa presenta una fuerte dependencia del recurso hídrico subterráneo debido a la carencia, en la mayor parte de su territorio, de cursos de agua superficiales. Esta escasez de recursos superficiales ha llevado a dicha provincia a la explotación subterránea desde la década de los setenta.

El agua subterránea es el resultado de la infiltración de, generalmente, agua meteórica, a través de una formación geológica con características físicas favorables para el transporte y acumulación, tales como la porosidad y permeabilidad. La composición química del agua subterránea manifiesta las características de la dinámica temporal y espacial de los fenómenos físicos, químicos y biológicos del líquido con el medio por el cual circula. Tales características, a su vez, dependen del tiempo de residencia y de contacto (Manzano et al., 2003), y hacen de éste un recurso vulnerable y propenso a ser afectado por actividades humanas que puedan modificar su condición fisicoquímica original.

En general, dicha contaminación carece de un diagnóstico precoz, debido a las heterogeneidades inherentes al sistema subsuperficial, por consiguiente, es difícil detectar preventivamente, a saber, recién se la conoce cuando el agua es alumbrada para distintos usos, es decir, demasiado tarde. A menudo no se tiene en cuenta que estos procesos, que conducen a la degradación de la calidad de las aguas y a la contaminación de los sistemas acuíferos, están retardados y enmascarados, además, por lo general, son procesos a largo plazo.

Una de las causas contaminantes más importantes de los acuíferos y que ha comenzado a ser una problemática a nivel mundial, es la contaminación por nitratos u otras sustancias nitrogenadas, cuyos compuestos en aguas naturales están ligados al ciclo del nitrógeno. El nitrógeno puede aparecer en forma reducida como NH_3, NH_4 y, por procesos de oxidación, puede transformarse en NO_2 y finalmente en NO_3, que es la forma más estable y por ende, la más usual de encontrar (De Miguel, 1999). La presencia del ion nitrito puede ser un indicio de una contaminación reciente; en concentraciones elevadas tiene una toxicidad alta para la salud humana. El ion nitrato, al ser relativamente estable, es un importante indicador de contaminación y puede alcanzar concentraciones elevadas mientras persista la fuente contaminante en el medio (De Miguel, y Vazquez-Taset, 2006). El exceso de nitratos en la salud humana puede favorecer la transformación de la hemoglobina de la sangre en metahemoglobina, cuyo compuesto no logra cumplir la función de transporte de oxígeno, por lo tanto, resulta una falta de oxigenación en los tejidos (Fernández-Carrilo, y Alfonso, 2011).

Si bien los acuíferos no se encuentran expuestos directamente a las actividades humanas desarrolladas en superficie, las sustancias contaminantes pueden alcanzarlos a través de los procesos de infiltración y percolación. Una de las principales actividades humanas que generan contaminación por nitratos se encuentra relacionada con los depósitos de residuos sólidos urbanos y aguas residuales. Estas últimas presentan un problema cuando los asentamientos urbanos no cuentan con un sistema cloacal eficiente y un posterior tratamiento del residuo, al verterlo en fosas sépticas o pozos ciegos. Por otro lado, las actividades agrícolas y ganaderas también generan compuestos nitrogenados que se infiltran en los acuíferos, provenientes del exceso de fertilización de cultivos –contaminación difusa–, o generados por

los residuos procedentes de explotaciones ganaderas a grandes escalas como podría ser un feed lot, o a menor escala como un abrevadero con una carga excesiva de animales (Sánchez-San Román, 2019).

Existe una porción de los nitratos en los acuíferos que pertenece al balance natural del ciclo del nitrógeno, ajeno a la actividad antrópica, proveniente, por una parte, del agua de lluvia que introduce naturalmente nitrógeno atmosférico en el suelo y, por otra parte, de la materia orgánica que contiene dicho suelo; de esta manera se contribuye también, al aporte de paleosuelos nitrogenados, aunque este último no sea relevante en lo que respecta a las concentraciones. En general, el aporte de nitrato derivado del agua de lluvia en condiciones naturales, frente a las demás entradas de nitratos antrópicas en el balance, no es significativo en términos de concentraciones, pero es importante por la correspondencia que pueda existir entre los ciclos de lluvia y los contenidos de cloruros y nitratos en las aguas subterráneas. Este contenido natural de nitrato en las aguas subterráneas, denominado fondo geoquímico, adquiere su importancia a la hora de detectar contaminación antrópica en un área determinada.

La provincia de La Pampa contiene una reserva de agua subterránea de grandes dimensiones denominada acuífero Valle Argentino, ésta se extiende por la región centro este de la provincia y su característica geomorfológica principal es la presencia de un cordón medanoso central que actúa como área de recarga, por lo cual sus características hidroquímicas son adecuadas para diversos usos en el área, ya sea para abastecimiento de localidades como también para actividades productivas, principalmente ganaderas y agrícolas. Las reservas de aguas abarcan, geográficamente, desde la localidad de Chacharramendi hasta el límite interprovincial con la provincia de Buenos Aires, abarcan localidades de pequeñas y medianas dimensiones, entre ellas la más poblada es General Acha, que cuenta con un aproximado de 12,500 habitantes.

En esta región, las actividades agrícolas-ganaderas se han expandido de manera significativa; predominan la actividad ganadera, hacia el oeste, y la agrícola o agrícola-ganadera, hacia el este. A su vez, existe un crecimiento territorial de los asentamientos poblacionales, los cuales, en su gran mayoría, no presentan sistemas cloacales o el que tienen es insuficiente para abarcar las dimensiones de la zona urbanizada. La demanda de agua ha crecido progresivamente en los últimos años, por consiguiente, se restringe su uso diverso, principalmente el humano.

El seguimiento en la calidad del agua subterránea ha sido objeto de numerosos estudios por diferentes autores, quienes han puesto un énfasis fundamental en la contaminación derivada de las actividades antes mencionadas. Tanto las actividades productivas como el crecimiento poblacional en la región pueden generar un problema de contaminación, principalmente por nitratos, en el acuífero Valle Argentino si no se implementan medidas de regulación y protección.

Este trabajo tiene como objetivo realizar una evaluación cualitativa y cuantitativa de la variación temporal y espacial de nitratos en la región del Valle Argentino, con hincapié en las localidades. El fin es determinar el fondo geoquímico de dicho anión para detectar contaminación, dado que las características hidrogeológicas del mismo lo hacen potencialmente vulnerable a la actividad humana.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La creciente y continua contaminación de las aguas subterráneas en áreas agrícolas y ganaderas, p. ej., en la zona donde se desarrolla el presente estudio, es un fenómeno mundial que genera preocupación. En muchos países, los recursos económicos destinados a la mitigación de los

inconvenientes son superiores aun a las rentas obtenidas de dichas tareas. De allí la relevancia del tema.

Dado que se reconoce que una alta concentración de nitratos en el agua para la bebida tiene efectos nocivos para la salud (Druffus, 1983), la detección de un fenómeno de degradación en el agua permite modificar o corregir las causas del impacto.

Las fuentes de procedencia natural del nitrato en el suelo se deben al aporte de agua de lluvia, causadas por fenómenos de nitrificación y/o nitratación, tales como el paso de formas amoniacales a nítricas y el paso de formas nítricas a nitrosas, respectivamente, cuyos procesos son estrictamente bacterianos. En general, el aporte de nitrato derivado del agua de lluvia en condiciones naturales, frente a los demás términos de entrada del balance, no es significativo, pero no obstante ello, es importante conocer el fondo geoquímico para la zona que comprende el estudio, para lograr detectar problemas de contaminación proveniente de las actividades mencionadas o por problemas de saneamiento dentro de las localidades.

A la luz de lo anterior, en este trabajo se utilizaron, en mayor medida, las perforaciones que proveen de agua potable a las distintas localidades del área de estudio, en virtud de que la información disponible es seria y coherente. No se puede precisar la cantidad de perforaciones que existen en el área destinadas principalmente a actividades productivas, porque las perforaciones no están declaradas y carecen del permiso de concesión para su uso.

MARCO GEOGRÁFICO

El Valle Argentino es una unidad geomorfológica que se extiende en la provincia de La Pampa, desde aproximadamente Chacharramendi en el occidente, internándose en la Provincia de Buenos Aires, hacia el este (figura 1). Abarca las localidades de General Acha, Doblas, Rolón, T. M. Anchorena, Macachín y Miguel Riglos dentro del cordón medanoso central.

Se trata de una artesa de un ancho inicial que varía entre tres y cinco kilómetros a la altura del paraje El Carancho. Llega a tener de 8 a 11 km en cercanías al Paraje Padre Buodo, y alcanza un ancho máximo en las proximidades de la localidad de Doblas de aproximadamente de 18 km. Su extensión longitudinal, con una dirección aproximada ENE-WSW, alcanza unos 210 km; presenta un desnivel topográfico, con respecto a la planicie que lo limita hacia el sur y norte, la cual supera los 50 m desde el Carancho, hacia el este.

El valle se encuentra dentro de la subregión de mesetas y valles, según se informa en el Inventario Integrado de Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa (Cano et al., 1980). Abarca una superficie de gran extensión, por ende, se registran diferencias climáticas dentro de la misma. De oeste a este, se caracteriza por tener un clima semiárido a subhúmedo del tipo templado. Las temperaturas medias mensuales oscilan entre los 22.3ºC en verano y los 7.6ºC en invierno. El régimen de vientos más frecuentes acusa un marcado predominio del sector N-NE, seguidos por vientos con dirección S-SO. Las velocidades medias son del orden de los 11 km/h, con un máximo medio que llega a 18 km/h y un mínimo de 6 km/h. La precipitación media anual para las localidades dentro del Valle va de los 429.4 y 725 mm/año; en general, marzo es el mes más lluvioso y los meses invernales, los más secos. La evapotranspiración potencial anual se ha estimado entre los 786 y 792 mm, con máximas de 142 mm/mes durante el mes de enero, y mínimas entre los meses de junio y julio de 13 y 14 mm/mes, mientras que la real varía entre 351 y 635 mm/año de oeste a este. Por otro lado, la humedad relativa es baja, no supera 72% durante todas las estaciones del año (julio).

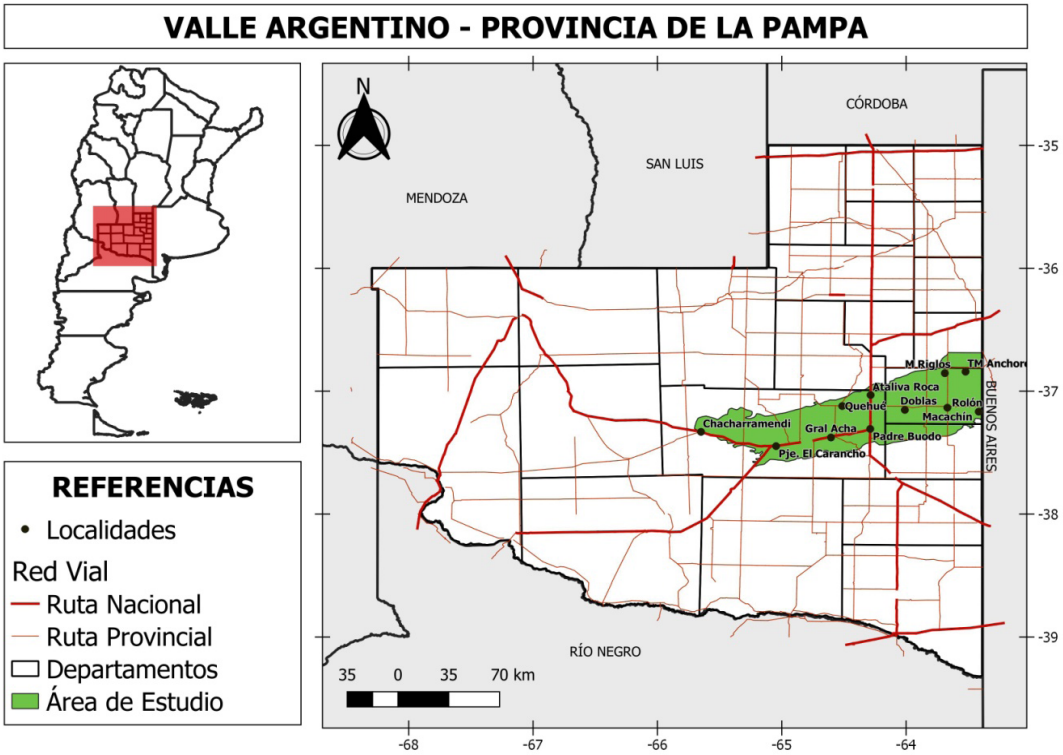


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

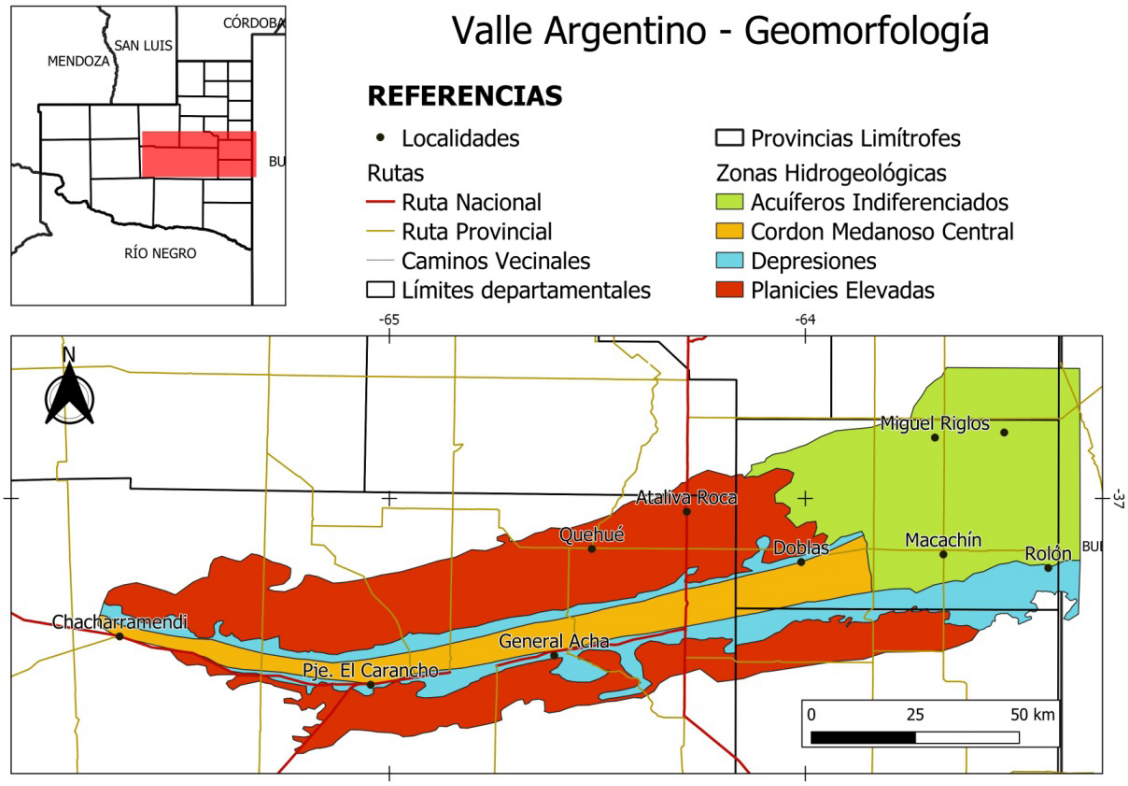


Figura 2. Unidades geomorfológicas e hidrogeológicas del Valle Argentino.

Las características hidrogeológicas responden a las condiciones morfológicas o de relieve local (Salazar-Lea Plaza, 1975; Cavalié, 1985) donde se pueden diferenciar cuatro subsistemas hidrogeológicos con particularidades propias (figura 2):

Planicies elevadas: son terrazas controladas por potentes mantos de tosca. Las capas acuíferas se encuentran entre los 70 y 100 m de profundidad. La topografía es muy suave, con pocas ondulaciones, por consiguiente, se genera una retención mayor del agua en superficie que se infiltra hacia los niveles inferiores. Las aguas sirven, en general, para consumo ganadero, y en algunas áreas, para consumo humano.

Cordón medanoso central: involucra a toda la superficie medanosa central con un ancho promedio de unos 10 km a lo largo del Valle. Este cordón, más elevado que los cordones laterales, se apoya al comienzo del Valle sobre el basamento cristalino para luego hacerlo directamente sobre la formación loéssica llamada Formación Cerro Azul (Linares et al., 1980; Visconti, 2007). Los acuíferos en esta área son de muy buena calidad para todo uso, incluyendo el suministro a distintas localidades. La alta permeabilidad de la cubierta arenosa hace que el agua de lluvia tenga poco tiempo de exposición en superficie y se infiltre rápidamente, así disminuyen considerablemente los procesos de evaporación a la atmósfera.

Depresiones o sectores de descarga: hacia ambos laterales del cordón medanoso central se ubican las zonas de conducción que reciben los aportes de la descarga del cordón medanoso central. Ambas zonas descargan sus aguas hacia las partes más bajas del valle formando cuerpos de agua con mayor cantidad de sales. Estas amplias depresiones también representan áreas de recarga de menor magnitud.

Área con acuíferos indiferenciados: en el extremo oriental del sistema, el Valle comienza a ensancharse y pierde altitud, e incluso desaparecen las terrazas limitantes, principalmente en la parte norte, de esta forma se constituye en una llanura ondulada con médanos vivos. Esta unidad es una prolongación del cordón medanoso central. También presenta formación de lagunas con altos contenido salinos.

METODOLOGÍA DEL TRABAJO

Para esta investigación se consideraron muestras colectadas en campañas realizadas en los períodos 1980-1981, 1999-2000 y 2017 en diferentes establecimientos rurales a lo largo del área de estudio, a las cuales se les realizaron análisis fisicoquímicos completos. También se contó con los análisis fisicoquímicos de las perforaciones de abastecimiento poblacional realizadas por la Administración Provincial del Agua (APA). Los análisis corresponden a los pozos de General Acha, Doblas, Miguel Riglos, Macachín, Rolón y T. M. Anchorena del período 1996-2019.

Con las muestras realizadas a lo largo del área de estudio se realizó una clasificación hidroquímica del Valle Argentino a partir de la metodología de Piper. Mientras que con los análisis de las perforaciones de abastecimiento se realizó una evolución temporal y espacial del ion nitrato, teniendo en cuenta el límite admisible de 45 mg/l del Código Alimentario Argentino (CAA, 2012) y el valor del fondo geoquímico determinado en el siguiente estudio.

Se colectaron muestras de agua de lluvia también en el Paraje Padre Buodo, en el centro del área de estudio durante el período abril de 1998 y febrero de 1999, a las cuales se les analizaron parámetros fisicoquímicos.

En dicho contexto, el presente trabajo tiene como objetivo determinar el valor del fondo geoquímico del área de estudio. Tal fondo geoquímico o concentración natural (background) se define como la abundancia natural de nitrato en el agua subterránea (Cohenour, y Knox, 1990; Langmiur, 1998). Representa la concentración de nitrato en el agua subterránea como consecuencia de procesos naturales y no como resultado de la actividad antrópica.

El estudio básico se aborda mediante tratamiento estadístico independiente de cada conjunto anual de datos. Para cada uno de los años se han construido gráficos relativos a la distribución log normal de las concentraciones de nitratos, siguiendo el método de representar las frecuencias acumuladas de los intervalos correspondientes (Lepeltier, 1969). El propósito principal de la construcción de curvas de frecuencia acumulativa para una población dada es confirmar si se trata de una distribución log normal, y en caso afirmativo, estimar gráficamente sus parámetros básicos: background (b), que valorar la concentración promedio de los elementos y se deduce a partir del gráfico de frecuencia acumulada, además, corresponde a la concentración proporcional de 50% de dicha frecuencia; y (t) threshold (umbral), que se relaciona con los valores iguales o mayores, que son considerados anómalos, y se deduce en la gráfica como el valor correspondiente a 2.5% de la ordenada.

Asimismo, se calcularon algunos parámetros estadísticos descriptivos de la concentración del anión nitrato: valor medio, rango, desvío estándar, etc. Este análisis diferenció las tres zonas geomorfológicas mencionadas, con el objeto de comparar los resultados y establecer la existencia o ausencia de relación entre las características físicas del medio y la concentración de nitrógeno.

Finalmente, se realizó una caracterización química del agua de lluvia con el objeto de establecer su posible relación con el contenido de nitrato del agua subterránea.

RESULTADOS

Hidroquímica del acuífero

Con respecto a la hidroquímica del acuífero Valle Argentino, con base en el total de muestras tomadas en el siguiente estudio, se estableció la siguiente clasificación: 41.6% en sulfatadas o cloruradas sódicas; 45.8% en sulfatadas o cloruradas mixtas; y 16.6% en bicarbonatadas mixtas. El área relevada posee recursos hídricos subterráneos adecuados para distintos usos en el ámbito rural, especialmente en aquellos sectores donde la cobertura arenosa genera condiciones favorables para la infiltración. Esta condición de marcado predominio de agua de buena calidad, se ve modificada por el desmejoramiento verificado en las zonas de descarga local. En la tabla 1 se observan los valores mínimos, máximos, promedios y desvíos estándar de algunas de las variables hidroquímicas, donde se expone la gran variación que existe en el total del área.

Tabla 1. *Parámetros estadísticos de distintas variables hidroquímicas de muestras extraídas en el área de estudio*

	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estandar
Residuo seco	255.00	5930.00	1364.70	1279.85
Cond. eléctrica	340.00	8720.00	1948.61	1859.33
Alcalinidad	140.00	948.00	402.87	217.74
Dureza	92.00	2088.00	398.40	442.85
Cloruros	35.00	3452.00	509.78	713.10
Sulfatos	5.00	1440.00	292.00	356.90
Nitratos	2.00	59.00	18.78	18.32
Flúor	0.00	3.00	1.13	0.87
Arsénico	0.00	1.00	0.04	0.21

Si se considera la calidad del agua para la ingesta humana, se determina que 22.7% presenta valores de residuo seco y sulfatos que exceden los límites recomendados por el Código Alimentario Argentino (1500 y 400 mg/l, respectivamente) (CAA, 2012); en ambos casos se trata de las mismas muestras. La mitad de ellas supera también el límite para cloruros (350 mg/l). Los contenidos de flúor y arsénico no constituyen una limitante de importancia, ya que únicamente en tres muestras se registran valores excedidos. Otras tantas se exceden en sus tenores de nitratos.

Hidroquímica de la lluvia

El Valle argentino se encuentra ubicado en el límite de la región subhúmeda-semiárida. En consecuencia, las precipitaciones pluviales resultan de capital importancia y constituyen el único medio en la recarga del acuífero. Su consideración adquiere relevancia si se tienen en cuenta, además, los efectos de la dilución y lixiviación en el perfil no saturado, así como de una recarga directa debido a la existencia de una cubierta arenosa de significativa importancia.

A partir del muestreo de agua de lluvia se calcularon distintas relaciones iónicas entre los parámetros analizados (tabla 2). Los resultados muestran valores de r nitratos que oscilan entre 0.0032 y 0.0064l con una media aritmética de 40.0020 mg/l, aunque puede considerarse que es una serie relativamente corta. Se cree que este aspecto es de singular relevancia, puesto que si observamos los valores medios de aporte de nitratos por agua de la lluvia a la zona de estudio, teniendo en cuenta las tres características hidrogeológicas tratadas, observamos que aportan casi 23% del nitrato existente en las planicies elevadas, 33% para el área de recarga y 45% para la zona de descarga (figura 2).

La mayor influencia del contenido de nitrato en agua de lluvia se evidencia en el área de descarga, debido indudablemente, a la carencia de actividad orgánica y al inexistente desarrollo del suelo acompañado con un nivel freático casi en superficie. Es deci, las lluvias aportan más de 45% del nitrato existente.

Tabla 2. *Relaciones iónicas del agua de lluvia*

R.S. (ppm)	10	7	10	30	40	15	26
r Na	0.1462	0.1329	0.0189	0.2296	0.0206	0.0095	0.0460
r K	0.0075	0.0075	0.0050	0.0050	0.0100	0.0050	0.0075
r Ca	0.0235	0.0210	0.0860	0.1465	0.4385	0.0890	0.1280
r Mg	0.0213	0.0180	0.0853	0.1451	0.4362	0.0886	0.1271
r Cl	0.0168	0.0056	0.0196	0.0448	0.0504	0.0884	0.0392
r SO4	0.0210	0.0210	0.0210	0.0004	0.0210	0.0210	0.0420
r CO3H	0.0784	0.0944	0.0944	0.1984	0.2720	0.1088	0.1408
r NO3	0.0048	0.0032	0.0032	0.0032	0.0064	0.0032	0.0048
r Mg/Ca	0.9000	0.8570	0.9920	0.9905	0.9947	0.9955	0.9929
r K/Na	0.0513	0.0564	0.2645	0.0217	0.4854	0.5263	0.1630
r Cl/CO3H	0.2143	0.5932	0.2076	0.2258	0.1853	0.8125	0.2784
r SO4/Cl	1.2500	3.7500	1.0700	0.0090	0.4200	0.2300	1.7000
r Na/Mg	6.8639	7.3833	0.2216	1.5824	0.0472	0.1072	0.3619

En la hidrogeología, la composición química de la lluvia no suele tener un peso específico importante debido a su acidez, o por ser o poder ser una fuente de solutos relativamente importante en el balance del sistema. Para la zona de estudio, en cambio, creemos sí adquiere relevancia dadas las características geográficas donde está ubicada.

Las relaciones iónicas estudiadas reflejan un claro origen continental de las precipitaciones totales. De acuerdo con estos conceptos, los posibles equilibrios iónicos son los siguientes: todo el cloruro se equilibra con el sodio restante, y el potasio y el bicarbonato con el calcio y el magnesio. El valor de estos equilibrios es muy dependiente del área de muestreo y de las características meteorológicas y geológicas del entorno.

En cuanto a las relaciones iónicas estudiadas podemos decir que:

- r Mg/Ca: relativamente bajos y muy constantes.
- r K/Na: existe una variación entre 0.5263 y 0.0513
- r Cl/CO3H: relativamente bajos y muy variables, entre 0.1853 y 0.8125.
- r SO4/Cl: muy variables y en algunos casos significativamente más altos que el agua de mar.

Los contenidos del ion nitrato en las aguas de lluvia son excesivamente discrepantes y, aunque dada la corta serie muestreada, los valores promedio obtenidos no son tan dispares al contrastarlos con otros recolectados en áreas similares.

Respecto a la hidroquímica de la lluvia, la composición de la precipitación atmosférica global (Berner, y Berner, 1996), el contenido de nitratos para la lluvia continental es de 0.37 a 1.3 mg/l. En EE UU, la mayor parte del territorio registra valores de 0.5 a 1 mg/l de NO_3-. El nitrógeno aportado al acuífero por el agua de lluvia en la región de Vitoria-Gasteiz (País Vasco) es de 2.79 mg/l de NO_3-, promedio anual (Sanchez et al., 1994). Guimerá (1998) menciona aportes de entre 31 y 44 kg NO_3-/ha, para la zona del Maresme, al norte de Barcelona, España. La bibliografía consultada (Guimerá, 1992) menciona concentraciones de nitratos para agua de lluvia en Lituania entre 2 y 5 ppm, y para Irlanda valores similares entre 2 y 4 ppm. Ambas investigaciones son estudios de impacto de las actividades agrícolas en el agua subterránea. En Europa Central las concentraciones varían de entre 10 y 15 mg/l.

En nuestro país no se han encontrados series de valores estadísticos representativos. Para la zona de la cuenca del Napostá Grande (Bonorino et al., 1999) se mencionan concentraciones de entre 0.5 y 3 mg/l. En el área de estudio no se han registrado antecedentes de composición química del agua de lluvia.

No parece haber correlación alguna con el índice rSO_4/Cl, que podría ser un indicador de contaminación en casos extremos, ni tampoco parece ser que un almacenamiento deficiente de la muestra pueda cambiar la composición de las fases nitrogenadas inorgánicas, dada la presencia poco sistemática de los nitritos (Guimerá, 1992).

Por lo antes expuesto y, dado que el punto de muestreo se encuentra en una zona agrícola-ganadera, puede existir accidentalmente una contaminación en algunas de las muestras derivadas de las tareas antes mencionadas.

Fondo geoquímico

El análisis estadístico de las concentraciones de nitratos indica la existencia de una población log normal compleja, ya que la curva de frecuencias acumuladas (tabla 3, figura 3) está formada por dos trazos, a saber, indica la presencia de una población heterogénea. Este diseño de la curva es una expresión de un exceso de valores bajos en la distribución.

El 50% de la frecuencia acumulada determina un fondo geoquímico de 17.3 mg/l y el citado valor de threshold (t) de 45.9 mg/l (corresponde a 2.5% de la ordenada), por lo tanto, nos permite asegurar que concentraciones mayores a dicho valor podrían considerarse motivadas por causas no naturales.

Tabla 3. *Límites de las clases elegidas en escala logarítmica*

	Nitratos NO_3-(mg/l)		
Límite de intervalos	Frecuencia (n)	Frecuencia (%)	Frec. acumulada (%)
0.90-1.17	7	6.316	100
1.17-1.48	-	-	
1.48-1.86	-	-	
1.86-2.34	7	7.368	96.3
2.34-2.95	-	-	
2.95-3.70	14	14.737	90.1
3.70-4.60	2	2.105	77.8
4.60-5.80	2	2.105	74.1
5.80-7.40	6	6.316	71.6
7.40-9.30	7	7.368	65.4
9.30-11.7	7	6.316	58.0
11.7-14.7	6	6.316	50.6
14.7-18.6	16	15.789	40.7
18.6-23.4	2	2.105	30.8
23.4-29.5	7	7.368	25.9
29.5-37.1	13	13.684	14.1
37.1-46.7	3	2.105	2.5

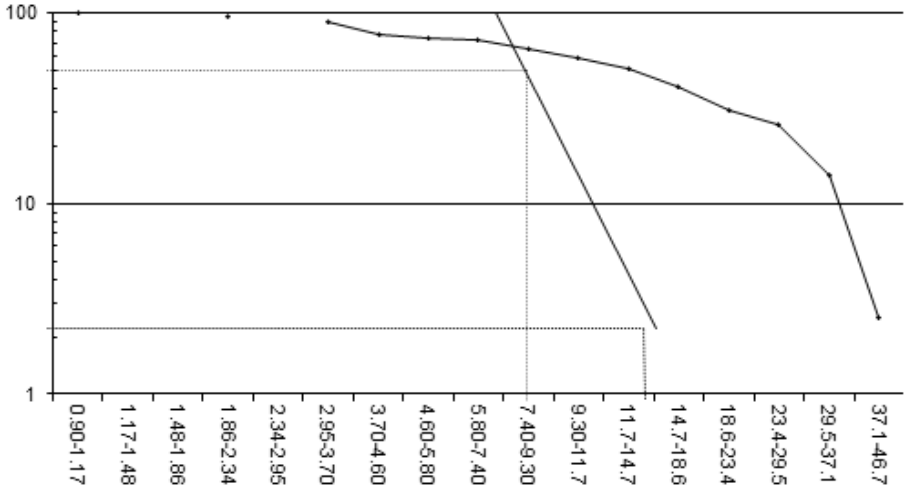
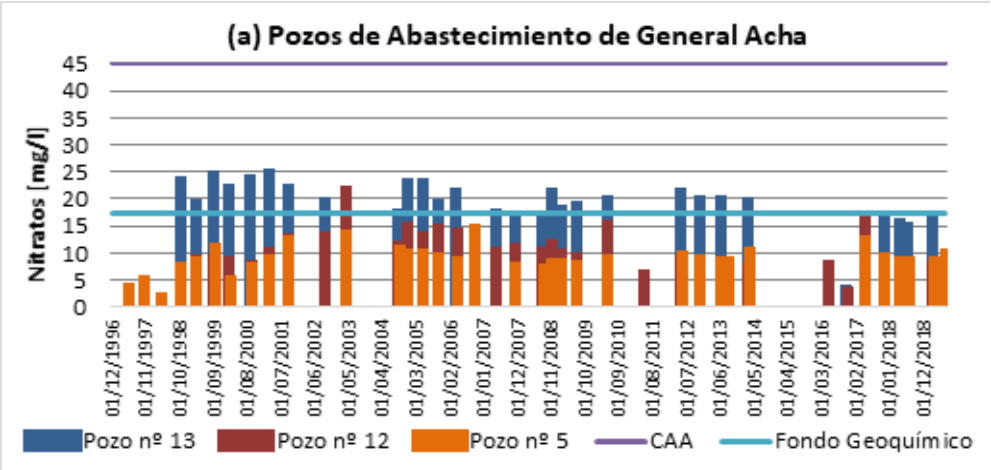


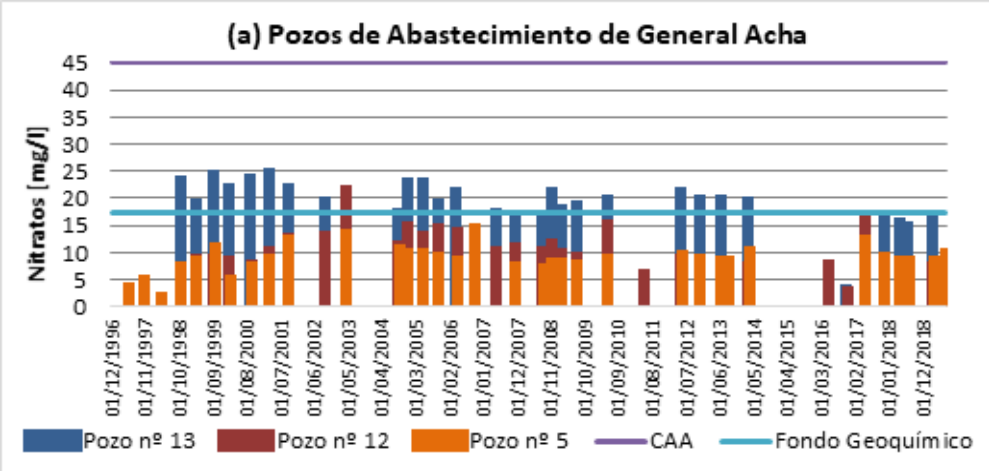
Figura 3. Curva de frecuencia acumulada.

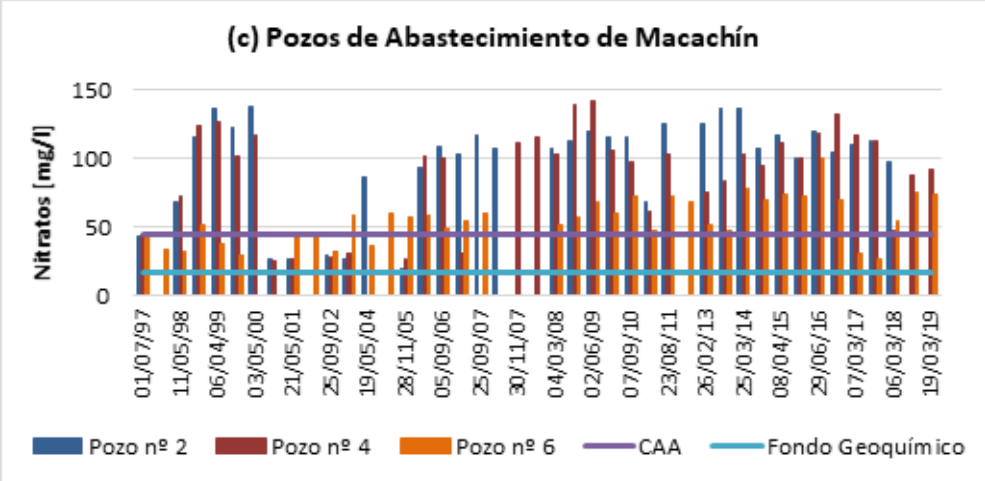
Variación temporal

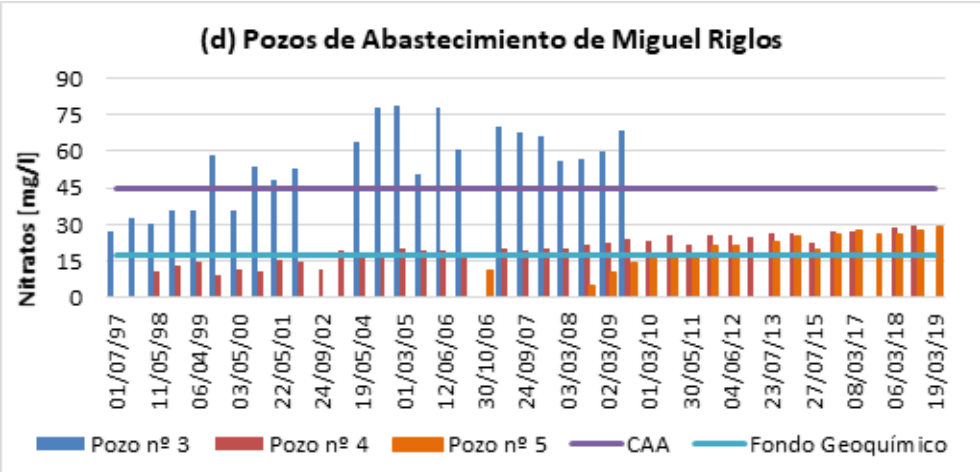
Con respecto a la variación de las concentraciones de nitratos en el tiempo, se puede observar un continuo aumento de los nitratos en la mayoría de las localidades (figura 4). En la localidad de General Acha, Rolón y T. M. Anchorena, los tenores de nitratos se mantienen por debajo del límite admisible para consumo humano determinado por el Código Alimentario Argentino (CAA, 2012), aunque la mayoría de los pozos, a excepción de unos pocos, supera el valor determinado de fondo geoquímico. En la localidad de Doblas, los pozos 2 y 3 se encuentran dentro de los valores admisibles para consumo humano, pero superan el fondo geoquímico, mientras que el pozo Nº 1 supera ampliamente ambos valores de referencia. Actualmente, dicho pozo se encuentra en desuso debido a los valores tan elevados de nitratos. En la localidad de Miguel Riglos se observa, al igual que Macachín, un aumento agravado de las concentraciones de nitratos en el pozo Nº 1, el cual también se encuentra fuera de uso. Con respecto a la localidad de Macachín, las concentraciones de nitratos en los tres pozos han ido en continuo aumento y superado notoriamente las referencias; se han encontrado valores que rondan los 140 mg/l.

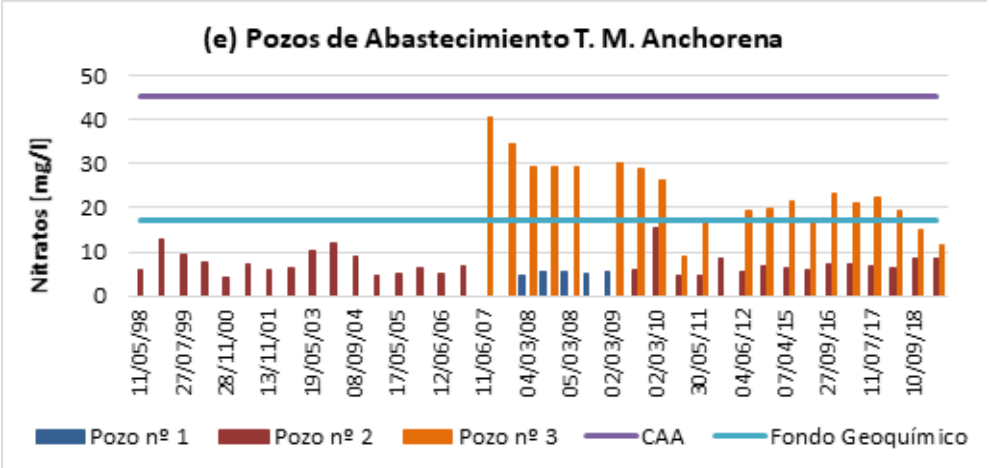
En la mayoría de los casos, las concentraciones de nitratos superan el fondo geoquímico, lo cual indicaría que el aumento de dicho ion en el agua es debido a causas antrópicas. Las localidades anteriormente mencionadas, a excepción de General Acha y Macachín, no cuentan con un sistema de desagüe cloacal, por ende, el incremento drástico en las concentraciones se le puede atribuir a la contaminación por residuos y líquidos cloacales depositados en pozos ciegos o fosas sépticas. La localidad de Macachín cuenta con sistema cloacal desde el año 2017, de modo que los elevados valores pueden ser aún atribuidos a dicha problemática.




(a) Pozos de Abastecimiento de General Acha
Nitratos [mg/l]
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
01/12/1996
01/11/1997
01/10/1998
01/09/1999
01/08/2000
01/07/2001
01/06/2002
01/05/2003
01/04/2004
01/03/2005
01/02/2006
01/01/2007
01/12/2007
01/11/2008
01/10/2009
01/09/2010
01/08/2011
01/07/2012
01/06/2013
01/05/2014
01/04/2015
01/03/2016
01/02/2017
01/01/2018
01/12/2018
Pozo nº 13
Pozo nº 12
Pozo nº 5
CAA
Fondo Geoquímico


(c) Pozos de Abastecimiento de Macachín
Nitratos [mg/l]
150
100
50
0
01/07/97
11/05/98
06/04/99
03/05/00
21/05/01
25/09/02
19/05/04
28/11/05
05/09/06
25/09/07
30/11/07
04/03/08
02/06/09
07/09/10
23/08/11
26/02/13
25/03/14
08/04/15
29/06/16
07/03/17
06/03/18
19/03/19
Pozo nº 2
Pozo nº 4
Pozo nº 6
CAA
Fondo Geoquímico


(d) Pozos de Abastecimiento de Miguel Riglos
Nitratos [mg/l]
90
75
60
45
30
15
0
01/07/97
11/05/98
06/04/99
03/05/00
22/05/01
24/09/02
19/05/04
01/03/05
12/06/06
30/10/06
24/09/07
03/03/08
02/03/09
01/03/10
30/05/11
04/06/12
23/07/13
27/07/15
08/03/17
06/03/18
19/03/19
Pozo nº 3
Pozo nº 4
Pozo nº 5
CAA
Fondo Geoquímico



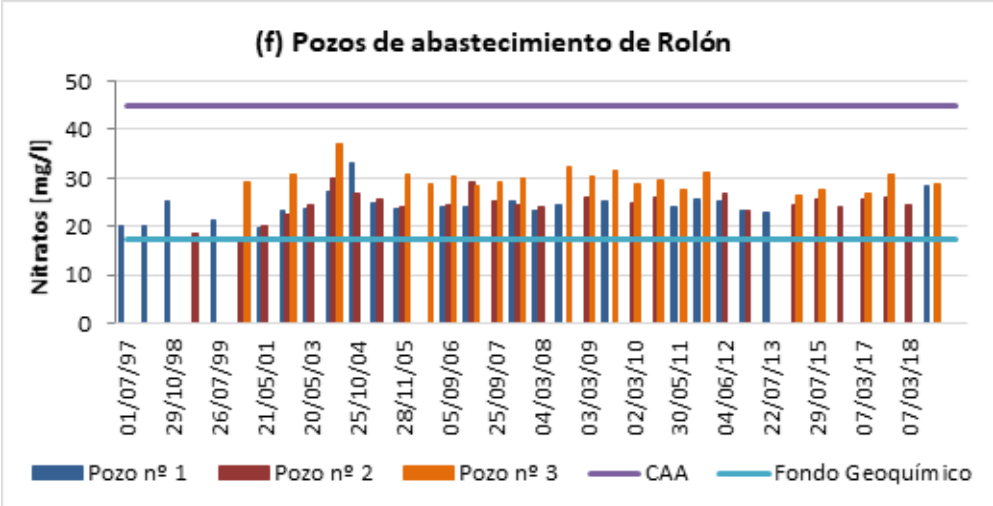


Figura 4. Variación temporal del ion nitrato en pozos de abastecimiento de las localidades de (a) General Acha, (b) Doblas, (c) Macachín, (d) Miguel Riglos, (e) T. M. Anchorena y (f) Rolón en el período 1996-2019.

Variación espacial

No se observa una gran variación en el espacio como para catalogar una anomalía natural; a pesar de ello, hay una diferenciación en las tres áreas hidrogeológicas consideradas con respecto a algunas variables estadísticas (tabla 4).

Con base en las variables estadísticas analizadas se puede concluir que los valores correspondientes a la media, mediana, desvío estándar y desvío promedio disminuyen desde las áreas de terraza hacia las zonas de descarga. Tal fenómeno, entonces, se debería a la carencia de actividad orgánica y al inexistente desarrollo del suelo, acompañados de un nivel freático subsuperficial, que caracteriza estas áreas de descarga.

En contraposición, en la zona de terraza, donde los cultivos y la vegetación adquieren mayor importancia, observamos que el aporte de nitratos por las lluvias es menos significativo y, en su mayoría, es aportado por la actividad orgánica presente debido a un mejor desarrollo de los suelos.

Por último, en la zona de recarga se observan valores intermedios, señal de que actúan los dos procesos anteriormente descriptos.

Tabla 4. *Variables estadísticas del ion nitrato en las tres áreas hidrogeológica (mg/l)*

Parámetro estadístico	Terraza	Área recarga	Área descarga
Media	17.64	12.44	8.78
Mediana	17	9	5
Moda	11	3	3
Desvío estándar	12.36	10.61	10.14
Rango	37	38	31
Mínimo	1	1	1
Máximo	38	39	32
Cantidad	39	29	14
Desvío promedio	10.48	8.56	7.55

Por otra parte, al comparar la distribución del contenido de nitrato y la morfología de la zona, surge una anárquica distribución de los picos máximos que se encuentran heterogéneamente distribuidos en la zona de estudio, sin respetar un patrón uniforme en las áreas geomorfológicas antes mencionadas.

Impacto del nitrato en las aguas subterráneas.

Teniendo en cuenta las características geomorfológicas e hidrogeológicas dentro del área de estudio, se definieron cuatro zonas con diferente vulnerabilidad (figura 5).

La zona central del Valle, donde se encuentra el cordón medanoso, posee una vulnerabilidad alta, la cual pasa a ser muy alta en períodos húmedos, ya que se aumenta la infiltración y asciende el nivel freático. Esta zona es vulnerable: el sedimento de la zona no saturada es arenoso y el nivel freático se encuentra a poca profundidad.

La zona de descarga y la planicie poseen vulnerabilidad media y baja, respectivamente, pues en estos sectores el nivel freático se encuentra a mayor profundidad y la zona no saturada se compone por sedimentos que retardan la infiltración. Hacia el este del Valle se encuentra una zona con vulnerabilidad variable por sus características geológicas.

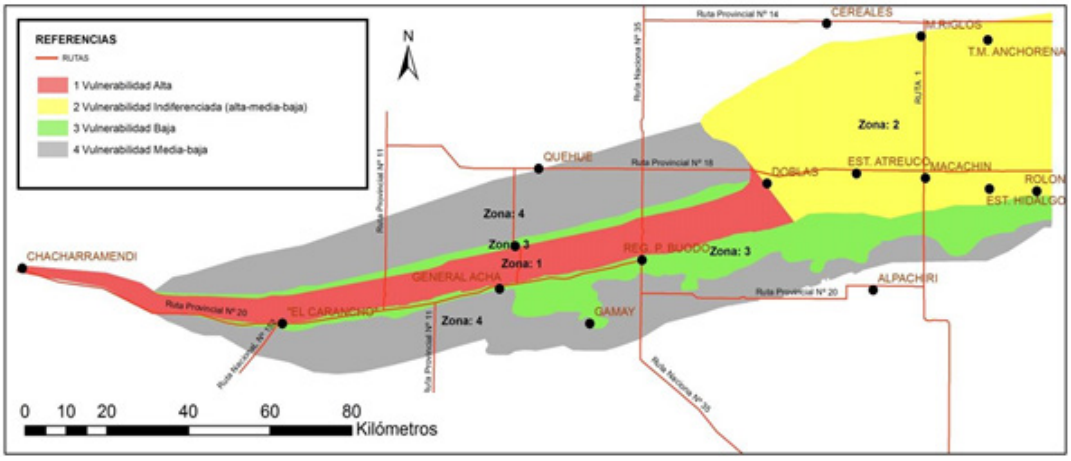


Figura 5. Esquema de vulnerabilidad de las aguas subterráneas en el Valle Argentino (extraído de Universidad Nacional de La Pampa, 2017).

En la localidad de General Acha, la zona más vulnerable se encuentra al norte del poblado, sobre el cordón medanoso central, mientras que al sur de la localidad, la vulnerabilidad disminuye, ya que nos encontramos en la zona de descarga y de planicie estructural. Por su parte, en la localidad de Macachín, la vulnerabilidad varía de moderada a alta, dado que el nivel freático se halla a muy poca profundidad y en algunos sectores varía en función de los sedimentos que se encuentran.

Con respecto al contenido de nitratos, en el período 1980 a 2017 se observa un aumento generalizado en todo el Valle Argentino, tanto en zonas rurales como urbanas (figura 6). En las zonas rurales, el aumento se da principalmente en las aguadas, donde se concentra la presencia de animales y, en consecuencia, hay gran cantidad de desechos que al infiltrarse desmejoran la calidad del agua subterránea. Por su parte, en las zonas urbanas el aumento se debe principalmente a la deposición de aguas domésticas en pozos ciegos. Esto ha producido niveles de nitratos muy por encima de los permitidos por el Código Alimentario Argentino (45 mg/l) en algunas localidades. En localidades como General Acha, Miguel Riglos, Doblas y T. M. Anchorena, se encuentran valores menores al admisible por el CAA pero mayores al fondo geoquímico (17.3 mg/l), lo cual evidencia que hay contaminación del acuífero por acciones antrópicas.

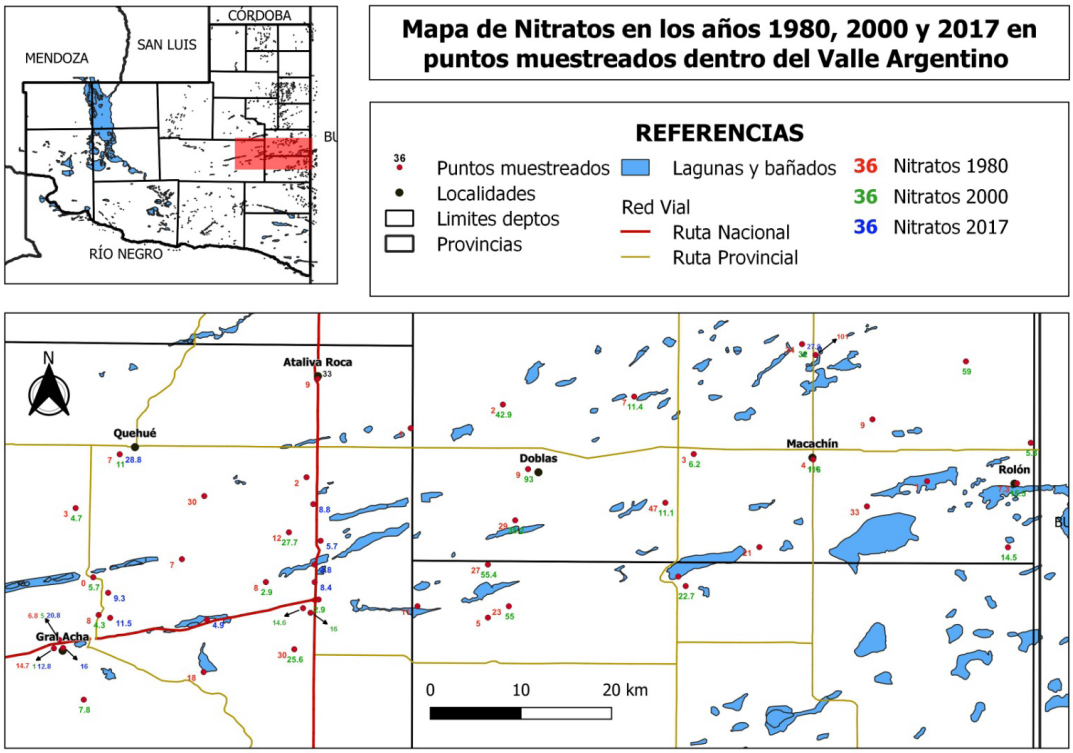


Figura 6. Mapa de las concentraciones de nitratos en los puntos muestreados en los años 1980, 2000 y 2017.

CONCLUSIONES

El fondo geoquímico o abundancia natural del nitrato hallado en el agua de la freática, en un ambiente que transita de subhúmedo-semiárido, indica un origen natural de dicho anión. La disolución del nitrógeno mineralizado proveniente de la oxidación de la materia orgánica del suelo constituye la fuente más importante de nitratos al acuífero freático. Se considera poco significativo el aporte de nitratos a partir del agua de lluvia. Este aporte de nitratos podría considerarse significativo para la zona de descarga, de mediana significación para las áreas de recarga y poco significativo para las terrazas.

En el caso de las localidades analizadas, se observa que la gran mayoría de las muestras superan notablemente el valor de dicho fondo geoquímico, por tanto se deduce un origen antrópico en áreas urbanas. La contaminación por nitratos, en estos casos, está ligada a la falta de un sistema cloacal apropiado en algunas de las localidades, e incluso, en localidades como Macachín, no se descarta la posibilidad de una contaminación difusa proveniente del aporte de fertilizantes en los suelos de la zona rural próxima a la zona urbana. En los establecimientos rurales donde también se supera el valor de fondo geoquímico, se considera una probable contaminación derivada de los residuos generados por ganadería, principalmente en aguadas o abrevaderos.

La ausencia de un patrón en la distribución del nitrato en el agua subterránea se interpreta como el resultado de: a) cambios espaciales en la formación de suelo y, en consecuencia, a diferentes contenidos de materia orgánica que pasan a nitrógeno mineralizado, posteriormente lixiviado y transportado en profundidad; b) cuando se presenta una carencia de nitrógeno proveniente de los sedimentos de la Formación Cerro Azul y la dilución de los nitratos provenientes de la recarga en tránsito por parte del flujo subterráneo. No se descarta la influencia de la heterogeneidad litológica en profundidad sobre los mecanismos de transporte de los nitratos en la zona saturada, por ejemplo, por dispersión-convección.

La difusión de los nitratos provenientes de la recarga en tránsito por parte del flujo subterráneo, tendría el mismo origen que el citado en el apartado a), anteriormente mencionado. Si bien en los datos observados no se evidencia una presencia masiva de nitratos, el riesgo potencial de contaminación, en el área de recarga, es sumamente alto ante cualquier actividad urbana, rural o industrial. Tal situación pondría en serio riesgo la calidad del agua del acuífero, debido a las sus características hidrogeológicas.

En función de lo manifestado y en vista de la importancia que revisten estos únicos abastecimientos de agua, debe justificarse la protección de acuíferos para prevenir su deterioro cualitativo. Es importante que todas las localidades ubicadas sobre tan importante acuífero, cuenten con un sistema de cloacas que funcione correctamente en lo inmediato, para evitar una contaminación agravada del recurso. A su vez, la zona de estudio necesita de la utilización racional del agua y un seguimiento de las actividades productivas para evitar problemas de contaminación, a través de una gestión eficiente, integral y sostenible del recurso.

REFERENCIAS

Berner, E. K., & Berner, R. A. (1996). Global Environment: Water, Air and Geochemical Cycles. Prentice Hall.

Bonorino, G. R., Albouy G, R., Lexow, C., & Carrica J. (1999). Nitratos en el acuífero de la zona periserrana de las Sierras Australes. Actas II Congreso Argentino de Hidrogeología.IV Seminario Hispano Argentino sobre temas actuales de hidrología Subterránea (pp. 231-240). Santa Fé, Argentina: Ed. A. Tineo. Serie de Correlación Geológica-Conicet. Cano, E. G., Casagrande, H. A., Conti, B., Fernández, R., Hevia, J. C., Lea-Plaza, D., Maldonado-Pinedo, H., Martínez, M.

A., Montes, & Peña Zubiate, C. A. (1980). Inventario Integrado de los Recursos Naturales de la Provincia de La Pampa. I. N. T. A, Provincia de La Pampa y UNLPam. Buenos Aires.

Cavalié, C. (1985). Estudio hidrogeológico hoja General Acha. Revista Pampa Geológica, publicación especial, 64-80.

Código Alimentario Argentino. República Argentina. 2012. Capítulo XII, Artículo 982. Recuperado de http://www.anmat.gov.ar/ alimentos/normativas_alimentos_caa.asp. Actualización 10/2012.

Cohenour, D. H., & Knox, R. C. (1990). Nitrate contamination in the central Oklahoma aquifer system. Ground Water Managment, 1, 33-49.

De Miguel, F. C. (1999). Hidrogeología Aplicada. La Habana: Editorial Félix Varela. De Miguel, C., & Vázquez-Taset, Y. M. (2006). Origen de los nitratos (NO_3) y nitritos (NO_2) y su influencia en la potabilidad de las aguas subterráneas. Minería y Geología, 22(3). ISSN 0258 5979.

Druffus, J. H. (1983). Toxicología Ambiental. Barcelona: Editorial Omega.Fernández-Carrillo, M. A., & Alfonso, A. S. (2011). La contaminación de las aguas por nitratos procedentes de fuentes de origen agrario. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. Consejería de Agricultura y Agua.

Guimerá, J. (1992). Análisis experimental de los procesos de flujo y comportamiento del Nitrato en la zona no saturada y su influencia en el agua subterránea (Tesis Doctoral). Barcelona, España: UPC. Guimerá, J. (1998). Anomalously high nitrate concentration in groundwater. Ground water, Journal A. G. W. S. E., 36(2), 495-512.

Langmuir, D. (1998). Aqueous environmental geochemistry. N. J.: Prentice Hall.

Lepeltier, C. (1969). A simplifield statistical treatment of geochemical data by graphical represetation. Economic geology, 64, 5358-550.

Linares, E., Llambías, E. J., & Latorre, C. O. (1980). Geología de la provincia de la Pampa, República Argentina y geocronología de sus rocas metamórficas y eruptivas. Asoc. Geológica Argentina, Revista, 35(1), 87-146.

Manzano M., Custodio, E., & Nieto, P. (2003). El fondo natural de la calidad del agua subterránea. Actas I Seminario Hispano-Latinoamericano de Hidrología Subterránea. Rosario, 607-617.

Universidad Nacional de La Pampa. (2017). Caracterización hidrogeológica de la zona central de los departamentos Utracán y Atreuco, Trabajo de Consultoría para Aguas del Colorado SA., p. 174.

Sánchez-Pérez, J., Antiguedad, I., Arrate, I., Ruiz, M., y Morell, I. (1994). La zona no saturada y la contaminación por nitratos de las aguas subterráneas en el acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz (País Vasco). Investigación en la zona no saturada. España: Universitat Jaume I, Castellón, pp. 53-66.

Sánchez-San Román, F. J. (2019). Contaminación de las aguas subterráneas. Departamento de Geología . Universidad de Salamanca (consultada el 10 de sep. de 2019). Recuperado de http://hidrologia.usal.es. Salazar-Lea Plaza, J. C. (1975). Geomorfología de la Provincia de La Pampa como base para los estudios de Suelo y Vegetación. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. La Pampa.

Visconti, G. (2007). Sedimentología de la Formación Cerro Azul (Mioceno superior) en la provincia de La Pampa (tesis doctoral 4084). Universidad de Buenos Aires, 203p.