

Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas en la ciudad de Minas, departamento de Lavalleja, Uruguay

Laura Camila Ríos-Vásquez^{1*} ; Juan Diego Colegial-Gutiérrez¹ ; María Paula Collazo-Caraballo² 

¹Escuela de Geología, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia. (*) lauracrios98@gmail.com; colegial@uis.edu.co

²Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. paulacollazo@gmail.com

Resumen

La evaluación fisicoquímica del agua extraída de fuentes subterráneas se convierte en una herramienta fundamental para la interpretación de la interacción existente entre agua-roca, teniendo como precedente el conocimiento del carácter geológico del territorio, y confiere una estimación inicial de posibles anomalías composicionales a causa de agentes externos que pueden alterar la calidad del recurso, condición que sugeriría estudios detallados sobre el origen, extensión y grado de afectación de estas fuentes contaminantes. El estudio hidrogeoquímico en la ciudad de Minas, Uruguay, se desarrolla en aras de contribuir al conocimiento hidrogeológico local, así como para definir si las aguas captadas actualmente por los habitantes son químicamente adecuadas para los usos a los que se destinan, tales como consumo humano y riego, o si requieren algún tratamiento de potabilización. La clasificación de aguas demostró que en la zona dominan las facies bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, con un tiempo de residencia corto en el acuífero. Así mismo, se define que ciertos iones exceden los límites permitidos por la norma de potabilidad uruguaya. De acuerdo con el mapa de vulnerabilidad hidrogeológica de la ciudad de Minas, los pozos muestreados se encuentran principalmente sobre zonas catalogadas con vulnerabilidad alta a muy alta a la contaminación, ya que las características intrínsecas de los acuíferos favorecen la exposición de estos sistemas a escenarios puntuales de contaminación, como el enriquecimiento en nitratos por actividades antrópicas no controladas.

Palabras clave: Agua subterránea; Calidad; Fisicoquímica; Iones mayoritarios.

Hydrogeochemical characterization of groundwater in the city of Minas, department of Lavalleja, Uruguay

Abstract

The physicochemical evaluation of the water extracted from groundwater sources becomes a fundamental tool for the interpretation of the existing interaction between water-rock. This has as a precedent the knowledge of the geological character of the territory and confers an initial estimate of possible compositional anomalies to cause external agents that can alter the quality of the resource. Hence, a condition that would suggest detailed studies on the origin, extension, and degree of affectation of these polluting sources. The hydrogeochemical study in the city of Minas, Uruguay, is developed to contribute to local hydrogeological knowledge, as well as to define if the waters currently collected by the inhabitants are chemically adequate for the uses to which they are destined, such as human consumption and irrigation or require some purification treatment. The water classification showed that calcium and/or magnesium bicarbonate facies dominate the area, with a

Forma de citar: Ríos-Vásquez, L.C.; Colegial-Gutiérrez, J.D.; Collazo-Caraballo, M.P. (2023). Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas en la ciudad de Minas, departamento de Lavalleja, Uruguay. *Boletín de Geología*, 45(1), 103-117. <https://doi.org/10.18273/revbol.v45n1-2023005>

short residence time in the aquifer. Likewise, certain ions exceed the limits allowed by the Uruguayan potability standard. According to the hydrogeological vulnerability map of the city of Minas, the sampled wells are mainly located in areas cataloged with high to very high vulnerability to contamination, so the intrinsic characteristics of the aquifers promoting the exposure of these systems to specific pollution scenarios, such as nitrate enrichment due to uncontrolled anthropogenic activities.

Keywords: Groundwater; Quality; Physicochemical; Majority ions.

Introducción

La hidrogeoquímica contribuye al conocimiento e interpretación del origen, distribución y calidad del agua; aporta información sobre la evolución espacio-temporal del acuífero, y permite detectar afectaciones, evaluar la vulnerabilidad del recurso frente a un agente contaminante y establecer medidas de mitigación y gestión del recurso (Lillo-Ramos, 2007).

El agua subterránea se ha convertido en un recurso estratégico para grandes sectores económicos del Uruguay, principalmente en la agricultura, ganadería y el abastecimiento humano, y en menor proporción es usada en la industria. Una de las causas de esta transición a la explotación del recurso subterráneo en el país está relacionada con el impacto en la calidad

del agua superficial de varios ríos y arroyos por el uso excesivo de fertilizantes nitrogenados y fosfatados que contribuyen al desarrollo agrícola en diferentes regiones (Collazo, 2020).

La norma interna de calidad de agua potable, dictaminada por Obras Sanitarias del Estado (OSE) en el año 2006, establece parámetros y valores máximos admitidos en el control del consumo directo o indirecto del agua que permitan prevenir riesgos en la salud de la población por la adquisición del recurso (Tabla 1). Se apoya en el reglamento bromatológico nacional aprobado en el Decreto n.º 315/994, que a su vez tiene como base los parámetros establecidos en el Decreto n.º 253/979, para determinar la aptitud del agua destinada al consumo humano y al riego en el territorio.

Tabla 1. Resumen de los principales parámetros fisicoquímicos establecidos para el agua potable en Uruguay. Modificado del Decreto n.º 315/994 y Decreto n.º 253/979.

Parámetros fisicoquímicos	Límites establecidos
pH	6-9
Temperatura	Máx. 25°C
Residuo seco a 180°C	Máx. 1 g/L
Dureza total en CaCO ₃	Máx. 500 mg/L
Cloruros	Máx. 300 mg/L
Sulfatos	Máx. 400 mg/L
Cobre	Máx. 1 mg/L
Manganeso	Máx. 0,1 mg/L
Aluminio	Máx. 0,5 mg/L
Hierro	Máx. 0,3 mg/L
Zinc	Máx. 5 mg/L
Sodio	Máx. 200 mg/L
Fósforo como P ₂ O ₅	Máx. 0,4 mg/L
Nitratos	Máx. 10 mg/L
Nitritos como NO ₂	Máx. 1,5 mg/L
Sólidos totales disueltos	700 mg/L
Turbidez	Máx. 5 NTU

Minas, capital del departamento de Lavalleja, es una ciudad ubicada hacia el sureste de Uruguay, con una población aproximada de 38.446 habitantes (Fornaro *et al.*, 2014). Presenta una precipitación anual promedio de 1227,13 mm, con lluvias ocasionales durante todo el año; su valor medio anual de la temperatura es de 16,65°C; los meses más fríos del año son junio, julio y agosto; y los meses más cálidos, diciembre, enero y febrero (Ríos-Vásquez, 2021). De acuerdo con las observaciones en campo, la región de Minas se caracteriza por presentar un relieve ondulado, principalmente cerros de morfología montañosa a colinada, con alturas promedio de 300 metros. Los tipos de suelo con mayor desarrollo en la región corresponden a suelos francos y de textura areno-franco gravillosa (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay, 2020).

El área de estudio se encuentra delimitada por las rutas nacionales n.º 8 y n.º 12 hacia el sector SW del casco urbano de Minas (Figura 1). Dicha extensión abarca diferentes puntos urbanos estratégicos como los barrios Lavalleja, Venecia, Escriu, España, Las Palmas, Garolini y La Plata; sectorización de divisiones del ejército nacional; propiedades agropecuarias privadas; y campos ocupados por actividades mineras como es el caso de la cantera privada Verdún, de cementos Artigas S. A., con más de 100 años de operación en la región. El uso del suelo en la zona se asigna principalmente al cultivo de soja, plantaciones de eucaliptos, tierras de pastoreo para actividades de ganadería extensiva, zonas de explotación minera y asentamientos urbanos informales de poblaciones que no cuentan con una cobertura total de servicios de saneamiento.

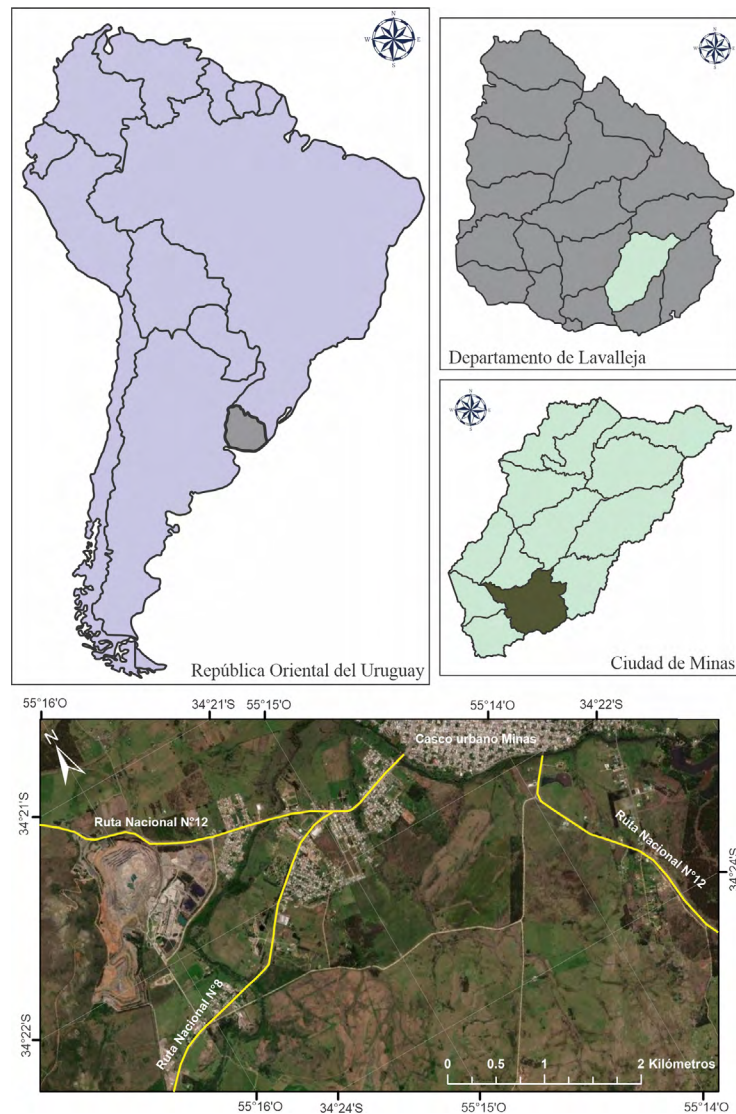


Figura 1. Localización del área de estudio, sistema de referencia WGS84. Adaptado de World Imagery: Mapa de Minas, Uruguay en Esri ArcGIS versión 10.5.

Para el año 2014, solo el 45% de la población se encontraba conectada a la red de saneamiento, lo que aumenta el riesgo de contaminación por lixiviados de los suelos y aguas superficiales y subterráneas (Fornaro *et al.*, 2014). Pese a que la principal fuente de agua potable que abastece a Minas es captada en un drenaje superficial, el arroyo San Francisco, la ciudad cuenta con la explotación de agua subterránea a través de diversas perforaciones estatales construidas y monitoreadas por OSE (Sienra, M., comunicación verbal).

Por otro lado, la construcción de pozos en predios privados se convierte en una alternativa para los habitantes que desarrollan labores agrícolas y ganaderas, quienes utilizan el recurso para actividades domésticas y de consumo. De acuerdo con los datos tomados en campo, el 53% de los pozos inventariados extraen agua subterránea para consumirla directamente. Bajo estas consideraciones, el análisis hidroquímico consignado en este artículo emplea un esquema metodológico sencillo, y señala un primer acercamiento a la calidad actual del recurso en Minas, dado que se identifica si este es adecuado para los usos a los que se destina; por tanto, se convierte en un precedente para la generación de estudios de vulnerabilidad específica y de fondo químico natural en los acuíferos explotados en el área que presenten afectaciones y que requieran ser vinculados a zonas de conservación dentro de un plan de ordenamiento territorial sustentable de la región.

Marco geológico

El zócalo Precámbrico uruguayo es explicado por medio de la evolución de 4 bloques alóctonos, con una geocronología, estratigrafía y asociaciones litológicas radicalmente diferentes, desplazados y amalgamados a través de grandes fallas transcurrentes (Bossi, 2010). La ciudad de Minas se encuentra ubicada dentro del terreno Nico Pérez y abarca una compleja historia geológica con la presencia de 15 formaciones reunidas en diversos grupos, que datan edades desde el Mesoproterozoico hasta el Cuaternario, con naturaleza sedimentaria, volcanosedimentaria e ígnea; algunas de ellas se encuentran afectadas por fenómenos de metamorfismo.

En orden geocronológico, se reconocen las siguientes unidades:

- Complejo Zanja del Tigre, de edad Mesoproterozoica, donde los metacarbonatos son el tipo litológico dominante con mantos de caliza, calizas dolomíticas y dolomías de grano fino a

medio (Spoturno y Oyhantçabal, 2012).

- El Grupo Mina Verdún, GMV, sucesión volcanosedimentaria, siliciclástica y carbonática de edad Mesoproterozoica, constituida mayoritariamente por pelitas negras, margas, calizas y dolomías (Poiré, 2014). Así pues, este grupo incluye de base a techo a la Formación Cerro de las Víboras (metaignimbritas), la Formación Don Mario (metapelitas), la Formación La Toma (metamargas), la Formación Calabozo (carbonatos) y la Formación Gibraltar (carbonatos); litologías reconocidas, y cartografiadas en la zona.
- La Formación Las Ventanas, constituida principalmente por rocas psefitas, las cuales se apoyan en discordancia angular y erosiva sobre el Grupo Mina Verdún en su área tipo y al oeste de Minas (Blanco y Gaucher, 2005).
- El Grupo Arroyo del Soldado, GAS, una potente secuencia sedimentaria de edad Neoproterozoica, constituida por rocas siliciclásticas, niveles carbonáticos y depósitos químicos, con un registro que supera los 5000 metros de espesor (Gaucher, 2000). El GAS se extiende ampliamente en el área a través de las rocas incluidas en la Formación Yermal, donde se diferencia un miembro pelítico y un miembro arenoso; la Formación Polanco, rocas carbonáticas de un gran interés hidrogeológico en la zona, como se expone en González-Carreira (2016); y la Formación Cerro Espuelitas, compuesta de pelitas y margas (Álvarez, 2020).
- Granito de Minas, composicionalmente denotado como un sienogranito, al cual se le atribuye una edad Cámbrica de alrededor de 530 Ma (Gaucher *et al.*, 2004).
- Formación Puerto Gómez, de edad Cretácica inferior, cartografiada como basaltos masivos, afaníticos y muy alterados sobre el sector oeste de la ciudad de Minas (Álvarez, 2020).
- Álvarez (2020) indica la existencia de un coluvión, de edad Cuaternaria, al oeste de Minas, producto de los fenómenos de erosión que afectaron la litología aflorante en el cerro Verdún (Formación Yermal-miembro arenoso).
- La Formación Libertad (lodolitas) y la Formación Dolores (depósitos limo-arcillosos) culminan el registro estratigráfico de la localidad de Minas, y su ambiente de depositación se encuentra vinculado a un régimen continental de transporte eólico y flujos de barro (Preciozzi *et al.*, 1985).

La Figura 2 expone el mapa geológico local de la ciudad de Minas, propuesto por Ríos-Vásquez (2021).

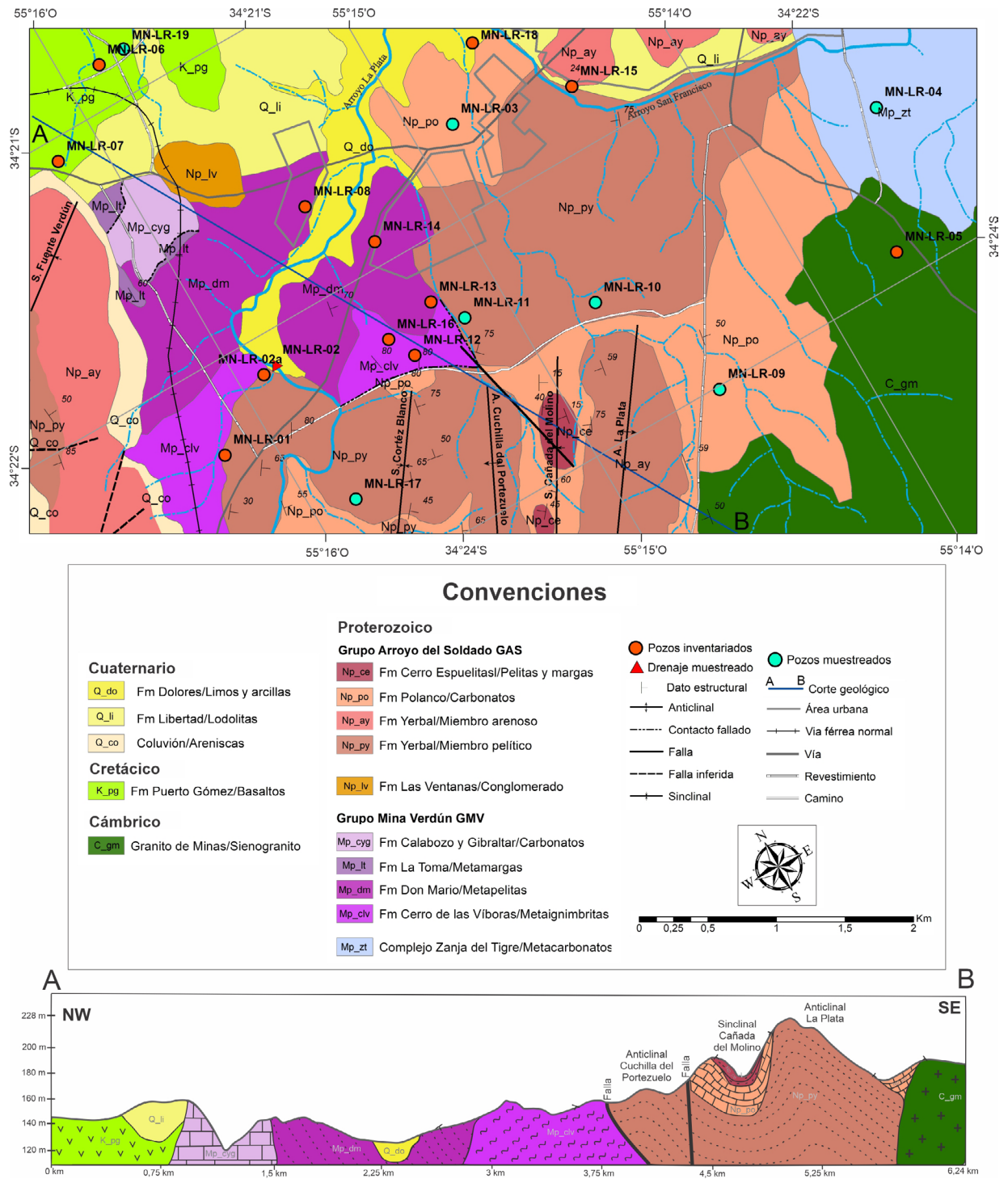


Figura 2. Mapa geológico local de la ciudad de Minas. Adaptado de Ríos-Vásquez (2021).

Álvarez (2020) indica que el evento de deformación con mayor influencia en la zona, y que generó el plegamiento del GAS y de la Formación Las Ventanas, fue coetáneo a la intrusión del Granito de Minas, fenómeno que desarrolla un juego de pliegues anticlinales y sinclinales orientados de manera cuasi paralela en dirección NE-SW, lo que sugiere el dominio de esfuerzos compresivos que afectaron las litologías aflorantes.

Los acuíferos kársticos de la Formación Polanco en la región de Minas-Pan de Azúcar son explotados actualmente por la compañía SALUS S. A. En esta zona se reporta agua subterránea que surge a través de manantiales con caudales iguales o superiores a 20.000 L/h, caracterizados hidrogeoquímicamente como aguas bicarbonatadas-cálcicas (Bossi y Navarro, 2000 en González-Carreira, 2016). Estudios hidrogeológicos efectuados en el año 2014 en la región Minas-Pan de Azúcar, que analizan los acuíferos del Grupo Arroyo del Soldado, clasifican las aguas como bicarbonatadas cálcicas, con algunas variaciones entre sodio y magnesio; así mismo, estas investigaciones concluyen, de acuerdo con los análisis efectuados sobre el índice de saturación de Langelier, que no existe saturación de carbonatos en las aguas muestreadas, las cuales circulan por bancos de calizas puras de la

Formación Polanco (Collazo, M.P., comunicación verbal).

Metodología

Como primer acercamiento al estado del arte, se efectuó una recopilación bibliográfica que incluyó la búsqueda de antecedentes geológicos e hidrogeológicos de la región, como las investigaciones de Gaucher *et al.* (2004), González-Carreira (2016), Spoturno *et al.* (2019) y Álvarez (2020). Adicionalmente, se realizó la visita a entidades estatales ubicadas en Montevideo, tales como Obras Sanitarias del Estado (OSE), que cuenta con testigos de perforaciones de agua subterránea en Minas; y el Servicio Geográfico Militar, donde se adquirieron fotografías aéreas de la zona de estudio.

Posteriormente, se realizaron las jornadas de campo en la ciudad de Minas y sus alrededores, por un periodo de 8 días. Los trabajos incluyeron la cartografía de las litologías aflorantes para la consolidación del mapa geológico a escala detallada del área, la localización e inventario de pozos de agua subterránea, el reconocimiento de fuentes de agua superficiales, la delimitación de usos del suelo junto con el reconocimiento de actividades potencialmente contaminantes, etc. (Figura 3).

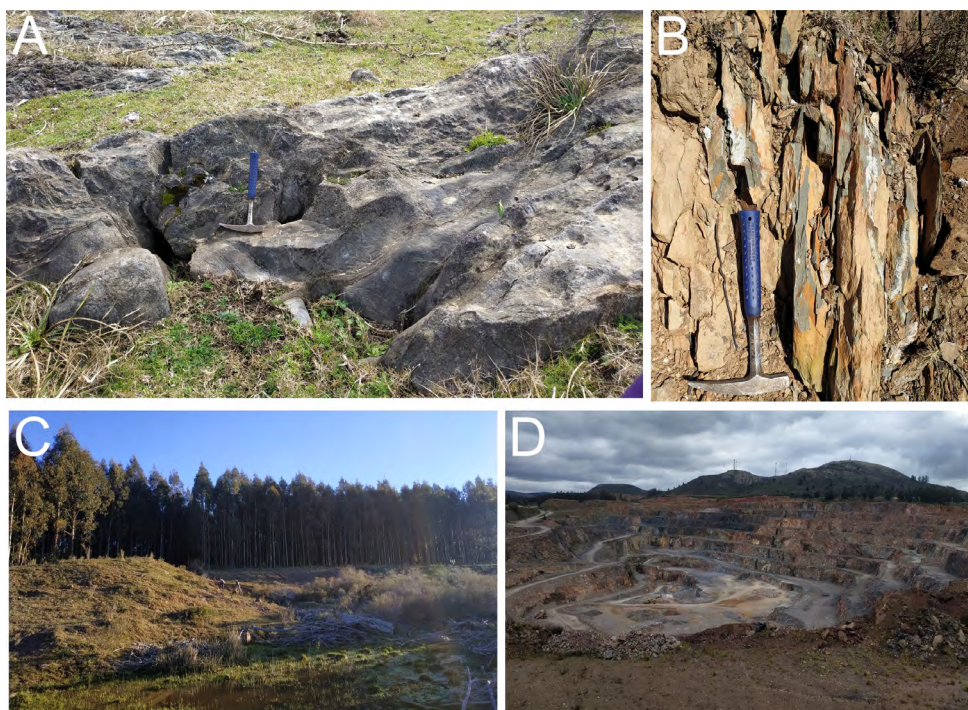


Figura 3. Trabajo de campo efectuado en la ciudad de Minas **A.** Cartografía de afloramientos de rocas carbonatadas incluidas en la Formación Polanco. **B.** Evidencia de fuerte diaclasamiento en las rocas de la Formación Cerro de las Víboras. **C.** Delimitación de zonas dedicadas a la plantación de eucaliptos con fines industriales. **D.** Reconocimiento de zonas dedicadas a la explotación minera en el área de estudio.

El inventario final contó con un registro de 19 pozos y con la toma de información de un curso de agua superficial usado para riego, conocido como el arroyo La Plata, denotado con la nomenclatura MN-LR-02, el cual fue incluido en el presente análisis debido a que su trayectoria atraviesa asentamientos urbanos informales y zonas destinadas a actividades de explotación minera. Del total de pozos, 10 presentan un sistema constructivo manual con brocal de protección, y los 9 restantes contienen tubos de revestimiento en PVC y bomba de extracción (Figura 4).

En el levantamiento en campo se realizó la medición de parámetros fisicoquímicos *in situ* mediante un sensor multiparámetro HI 9829 marca HANNA, y la medición del nivel estático de los pozos a través de una sonda piezométrica. Adicionalmente, con la información suministrada por cada uno de los propietarios, se incluyeron características como la profundidad de construcción de los pozos y los usos a los que se destina el agua explotada. La Tabla 2 presenta el resumen del inventario de pozos en la ciudad de Minas.



Figura 4. Tipos de captaciones de agua subterránea en la ciudad de Minas. A. Pozo con brocal. B. Pozo en tubería PVC.

Tabla 2. Resumen del inventario de pozos en la ciudad de Minas.

Código	Coordenadas WGS84	Sistema const.	NE (m)	Prof. (m)	Parámetros fisicoquímicos				
					T (°C)	pH	CE (µs/cm)	STD (mg/L)	Turb. (NTU)
Pozos									
MN-LR-01	34°23'20,8"S/55°17'6,5"O	Brocal	0	5,8	14,3	7,1	760	380	-
MN-LR-02a	34°23'8,5"S/55°16'45,4"O	Brocal	5,7	7,3	17	7,25	601	300	-
MN-LR-03	34°22'38,1"S/55°15'23,3"O	PVC	3,27	20	18,8	7,15	834	417	0,9
MN-LR-04	34°23'23,4"S/55°13'34,9"O	PVC	9,44	39	17,6	7,55	1108	554	0,7
MN-LR-05	34°23'55,7"S/55°13'49,8"O	PVC	6,07	60	18,4	7,68	192	93	-
MN-LR-06	34°21'45,2"S/55°16'43,5"O	PVC	0	40	14,6	7,67	534	266	-
MN-LR-07	34°22'0,4"S/55°17'7,2"O	Brocal	2,17	5,4	15,9	7,10	652	328	-
MN-LR-08	34°22'38,3"S/55°16'11,7"O	Brocal	4,64	9	13,6	7,9	805	398	-
MN-LR-09	34°24'3,9"S/55°14'53,2"O	PVC	0,8	30	17,04	7,1	598	298	0,1
MN-LR-10	34°23'31,6"S/55°15'12,3"O	Brocal	0,3	5	15,2	6,9	210	105	0,8
MN-LR-11	34°23'19,7"S/55°15'47,0"O	Brocal	0	-	14,6	7	523	261	1,2
MN-LR-12	34°23'21,9"S/55°16'4,9"O	PVC	15,5	-	19,5	6,7	73	36	-

Continuación Tabla 2.

Código	Coordenadas WGS84	Sistema const.	NE (m)	Prof. (m)	Parámetros fisicoquímicos				
					T (°C)	pH	CE (µs/cm)	STD (mg/L)	Turb. (NTU)
MN-LR-13	34°23'12,5"S/55°15'53,4"O	PVC	3,08	40	11,9	6,8	41	24	-
MN-LR-14	34°22'53,5"S/55°15'59,1"O	Brocal	0,46	12	16,6	7,73	876	438	-
MN-LR-15	34°22'44,1"S/55°14'48,1"O	Brocal	1,36	-	18	7,8	416	207	-
MN-LR-16	34°23'15,3"S/55°16'9,1"O	PVC	26	55	-	6,7	239	119	-
MN-LR-17	34°23'44,8"S/55°16'39,5"O	Brocal	0	-	17,7	7,19	474	237	0,7
MN-LR-18	34°22'23,5"S/55°15'7,1"O	Brocal	2,91	4,3	16,2	7,3	480	240	-
MN-LR-19	34°21'44,5"S/55°16'35,2"O	PVC	0,56	15	16,7	7,1	773	368	0,1
Arroyo La Plata									
MN-LR-02	34°23'7,6"S/55°16'41,2"O	-	-	-	13,6	7,9	299	149	3,2

Nota. Sistema const.: sistema de construcción del pozo, NE: nivel estático, Prof.: profundidad del pozo, T: temperatura, CE: conductividad eléctrica, STD: sólidos totales disueltos, Turb.: turbidez.

Al iniciar la consolidación del mapa geológico local con apoyo de los trabajos de campo, fotointerpretación y antecedentes del área, se realizó la selección de 8 puntos estratégicos para efectuar el análisis de iones mayoritarios; dicha selección se vio influenciada bajo las siguientes premisas:

1. Las captaciones se encuentran asociadas a diferentes sistemas acuíferos que son explotados en el área.
2. Se reporta el uso de herbicidas de amplio espectro para labores agrícolas extensivas en diversos puntos.

3. Se identifican problemas en la calidad actual del agua explotada (pozo MN-LR-03), que perturban las labores de riego en este predio.
4. Operación minera activa y crecimiento de barrios sin cobertura de saneamiento en cercanías a cuerpos de agua superficiales.

Así mismo, más de 50% de las captaciones seleccionadas emplean el agua en consumo y riego, en menor proporción lo hacen para bebedero de animales (Tabla 3).

Tabla 3. Usos del agua en los puntos muestreados.

Código	Usos actuales del agua explotada			
	Consumo	Riego	Bebedero de animales	Otros usos domésticos
Pozos				
MN-LR-03		x		
MN-LR-04	x	x		x
MN-LR-09	x		x	x
MN-LR-10	x		x	x
MN-LR-11	x		x	x
MN-LR-17		x		
MN-LR-19	x	x		x
Arroyo La Plata				
MN-LR-02		x		

El muestreo se realizó en el mes de septiembre del año 2019, cuando finalizaba la estación de invierno en el país. Se dio cumplimiento a todas las especificaciones de manipulación suministradas por el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU). El agua fue recolectada en recipientes de plástico previamente sanitizados con agua destilada e inmediatamente refrigerados mientras se completaba con el muestreo en la zona (Figura 5). Posteriormente, las muestras fueron transportadas a LATU en la ciudad de Montevideo, donde se emplearon los siguientes métodos para el cálculo de iones mayoritarios:

- Calcio, magnesio, potasio y sodio, según PEC. ESPEC.014 basado en ISO 11885:2007.
- Cloruros, nitratos y sulfatos, según PEC. PQAR.113 basado en ISO 10304-1:2007.
- Bicarbonatos, según cálculo analítico, de acuerdo a Standard Methods 4500-CO₂ (American Public Health Association, 2018).

Para el procesamiento y clasificación de las muestras de agua y el cálculo del índice de saturación de Langelier, se utilizó el programa de uso libre Diagrammes, versión 6.5 (Simler, 2015). Las diferentes salidas cartográficas se generaron por medio del programa ArcGIS, versión 10.5. Los parámetros fisicoquímicos fueron organizados a través de herramientas estadísticas básicas, lo cual permitió conocer el rango de valores

que engloban (máximos y mínimos) con el fin de contrastar dichos resultados con los límites normativos de potabilidad y determinar posibles datos atípicos.

Resultados

Los valores de iones mayoritarios resultantes para cada muestra se exponen en la [Tabla 4](#).

Según la geología de la ciudad de Minas, expuesta en la [Figura 2](#), las aguas explotadas en los pozos MN-LR-10, MN-LR-11 y MN-LR-17 se asocian con el miembro pelítico de la Formación Yermal, unidad hidrogeológica que conforma acuíferos fracturados en el área. Por otro lado, las perforaciones MN-LR-03 y MN-LR-09 explotan al acuífero kárstico de la Formación Polanco; la muestra de agua obtenida del pozo MN-LR-04 explota al acuífero kárstico del Complejo Zanja del Tigre, y la perforación MN-LR-19 explota a los basaltos de la Formación Puerto Gómez, que se comporta como un acuífero fracturado. Finalmente, se infiere que el arroyo muestreado (MN-LR-02) reposa sobre unidades cuaternarias y rocas pelitas fracturadas de la Formación Yermal y la Formación Don Mario.

La [Tabla 5](#) resume el índice de saturación de minerales carbonatados en las muestras de agua analizadas, con el fin de clasificar su potencial incrustante o corrosivo.



Figura 5. Proceso de recolección del muestreo hidroquímico. **A.** y **B.** Uso de muestreador en el curso de agua superficial. **C.** Recipientes de plástico para el almacenamiento de las muestras, previamente sanitizados con agua destilada y marcados con el indicativo del pozo.

Tabla 4. Resultados de iones mayoritarios en concentraciones mg/L.

Punto	MN-LR-02	MN-LR-03	MN-LR-04	MN-LR-09	MN-LR-10	MN-LR-11	MN-LR-17	MN-LR-19
Litología	Pelitas	Carbonatos	Carbonatos	Carbonatos	Pelitas	Pelitas	Pelitas	Basaltos
Aniones (mg/L)								
Cloruros (Cl ⁻)	1,22	1,22	1,39	0,42	2,02	2,67	1,32	24,4
Nitratos (NO ₃ ⁻)	0,023	8,53	1,3	0,75	0,14	0,035	0,76	20,4
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	12,3	71,4	103	15,6	8,1	7,02	9,15	123
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	152	413	523	288	101	281	266	379
Cationes (mg/L)								
Sodio (Na ⁺)	9,4	16	190	39	8,8	16	5,8	26
Potasio (K ⁺)	1	<1	3,1	7,1	<1	<1	<1	ND
Magnesio (Mg ²⁺)	12	17	27	18	8,2	18	29	34
Calcio (Ca ²⁺)	40	73	59	69	25	77	58	85
Balance iónico (%)	10,34	18,9	11,24	14,63	10,08	6,07	9,24	8,97

Nota: Los cálculos fueron reevaluados y aceptados por el laboratorio LATU luego de la entrega oficial de los resultados del estudio. ND: No detectado.

Tabla 5. Índice de saturación de carbonatos en las muestras analizadas.

Punto	Índice de saturación							
	MN-LR-02	MN-LR-03	MN-LR-04	MN-LR-09	MN-LR-10	MN-LR-11	MN-LR-17	MN-LR-19
Litología	Pelitas	Carbonatos	Carbonatos	Carbonatos	Pelitas	Pelitas	Pelitas	Basaltos
Aragonito CaCO ₃	-0,06	-0,11	0,23	-0,33	-1,37	-0,43	-0,33	-0,2
Calcita CaCO ₃	0,1	0,04	0,37	-0,18	-1,22	-0,28	-0,19	-0,05
Dolomita CaMg (CO ₃) ₂	-0,14	-0,87	0,66	-0,18	-2,72	-0,98	-0,42	-0,26

Debido a los limitados puntos muestreados, se descarta del análisis únicamente la muestra con el mayor error de balance iónico (MN-LR-03 con 18,9%); se sugiere que el desfase puede deberse al cálculo analítico del bicarbonato. Para corroborar la validez de este resultado se requiere un nuevo muestreo del agua del pozo y la verificación en laboratorio de los cálculos empleados para la determinación de los iones. La incertidumbre en los resultados de la muestra MN-LR-03, captada sobre rocas carbonáticas de la Formación Polanco del GAS, se refleja igualmente en el índice de saturación de Langelier. El agua presenta una saturación en calcita de 0,04, lo que traduce una ligera tendencia a comportarse como agua incrustante, índice que puede verse influenciado por el elevado valor obtenido del ion bicarbonato en la muestra (413 mg/L).

En contraste, el agua captada en el pozo MN-LR-09 sobre esta misma litología, con bicarbonato calculado de 288 mg/L, presenta subsaturación en calcita, aragonito y dolomita, concordante con la hidrogeoquímica de las aguas subterráneas que circulan por la Formación Polanco en la región de Minas-Pan de Azúcar, pues los valores obtenidos de bicarbonato en dichas muestras datan en promedio 288 mg/L y no presentan saturación en estas especies minerales (Collazo, M.P., comunicación verbal). Las aguas no saturadas en carbonato de calcio en contacto con medios ricos en calizas se explican por una rápida circulación con un tiempo de contacto breve y por una escasa posibilidad de interacción cuando el medio es permeable por fisuración (Jacobson y Langmuir, 1970 en Custodio y Llamas, 1983). Por su parte, las aguas

captadas en el miembro pelítico de la Formación Yermal del GAS se categorizan como corrosivas, subsaturadas en carbonatos.

La muestra MN-LR-04 presenta un índice de sobresaturación significativo en las tres especies minerales evaluadas (aragonito, calcita y dolomita), lo que se interpreta como un mayor tiempo de residencia e interacción del agua subterránea con el sistema acuífero que permite la precipitación de carbonatos y la formación de incrustaciones. Por último, la muestra recolectada en el arroyo La Plata (MN-LR-02) presenta una baja saturación en calcita y subsaturación en aragonito y dolomita, mineralización influenciada por parámetros geológicos y climatológicos que dominan la microcuenca.

La representación gráfica de la distribución de cationes y aniones mayoritarios en los puntos muestreados es expuesta en la [Figura 6](#).

El diagrama de Piper establece que 5 muestras de agua subterránea se encuentran en las facies bicarbonatada cálcica y/o magnésica, a excepción de la muestra MN-

LR-04 que indica una facie bicarbonatada sódica. En general, se trata de aguas jóvenes, geoquímicamente poco evolucionadas, con tiempos de residencia cortos en los flujos subterráneos.

El diagrama de Stiff indica que 5 muestras esquematizan aguas subterráneas naturales, en las facies bicarbonatada cálcica y/o magnésica. En contraste, la muestra MN-LR-04 presenta una tendencia a intercambio iónico, asociado con el valor del ion Na^+ . Por su parte, el drenaje evaluado por medio de la muestra MN-LR-02 se cataloga como agua bicarbonatada cálcica y/o magnésica.

Se realiza la comparación de los valores máximos de pH, temperatura y sólidos totales disueltos, medidos en los 19 pozos y en el drenaje estudiado, respecto al valor límite establecido por la norma interna de calidad de agua potable del Uruguay para consumo y riego. Así mismo, los iones sodio, nitratos, cloruros y bicarbonatos y el parámetro de turbidez, medidos en los puntos de mayor interés, se compararon con los límites permisibles, con el fin de identificar valores atípicos ([Tabla 6](#)).

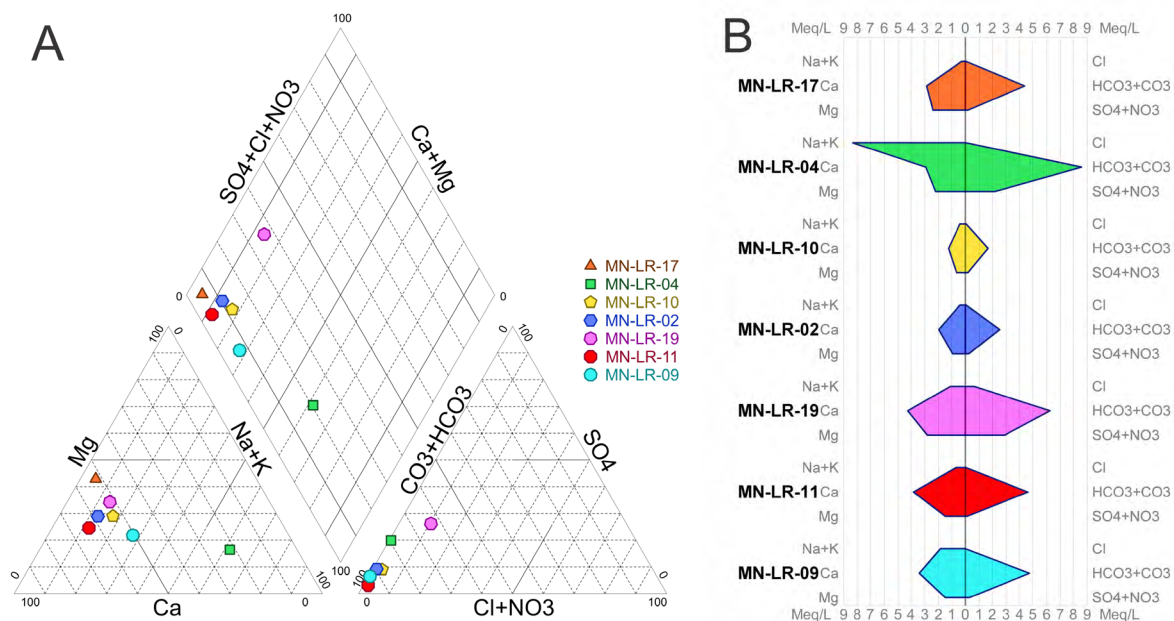


Figura 6. Resultados de clasificación de aguas por medio de los diagramas de A. Piper y B. Stiff.

Tabla 6. Comparación de los parámetros fisicoquímicos con los límites normativos establecidos.

Parámetro	Límite máximo establecido	Valores obtenidos		Cumple
		Mín.	Máx.	
pH	6-9	6,7	7,9	Sí
Temperatura (°C)	25	11,9	19,5	Sí
Bicarbonatos (mg/L)	500	101	532	No
Cloruros (mg/L)	300	0,42	24,4	Sí
Sulfatos (mg/L)	400	7,02	123	Sí
Sodio (mg/L)	200	5,8	190	Sí
Nitratos (mg/L)	10	0,023	20,4	No
Sólidos totales disueltos (mg/L)	700	24	554	Sí
Turbidez (NTU)	5	0,1	3,2	Sí

El ion nitrato se encuentra en un rango entre 0,023 y 20,4 mg/L de un máximo permitido de 10 mg/L. El dato atípico de 20,4 mg/L corresponde a la muestra MN-LR-19, la cual en la clasificación de aguas por el diagrama de Piper se mantiene como agua bicarbonatada, pero presenta una tendencia a comportarse como agua sulfatada y/o clorurada cálcica y/o magnésica. El ion bicarbonato presenta concentraciones de 101 a 523 mg/L, con un resultado que excede el límite máximo de 500 mg/L. El dato atípico corresponde a la muestra MN-LR-04, clasificada como agua bicarbonatada sódica.

Discusión

La zonificación de vulnerabilidad intrínseca por el método SINTACS, expuesta en [Ríos-Vásquez \(2021\)](#), demuestra que aproximadamente un 67% del área de estudio se encuentra en categoría alta, muy alta y extremadamente alta. Estos resultados se ven favorecidos por las altas puntuaciones fijadas en el modelo asociado a la tipología de suelos, los altos valores de recarga en el sistema, los niveles freáticos subsuperficiales, las condiciones de karstificación y de intenso fracturamiento de las litologías aflorantes, entre otras consideraciones.

La perforación MN-LR-19, que presenta un aumento atípico en su concentración de nitratos y posee la mayor concentración de sulfatos respecto al total de muestras analizadas, reposa sobre las rocas de la Formación Puerto Gómez. Esta unidad se comporta como un acuífero fracturado, de naturaleza ígnea extrusiva, con caudales de extracción en el orden de 4000 L/h y niveles freáticos poco profundos. En afloramiento, el macizo rocoso se encuentra moderadamente meteorizado y

fuertemente diaclasado, formando un perfil de suelo residual de hasta 1 metro de espesor.

La Formación Puerto Gómez es descrita por Muzio (2004), en [Álvarez \(2020\)](#), como una secuencia espesa de basaltos amigdaloides, ocasionalmente masivos, compuestos por augita, plagioclasa cálcica, olivino y minerales opacos; y con amígdalas rellenas de zeolita, calcita, yeso y cuarzo. Lo anterior sugiere que minerales ricos en SO_4^{2-} como el yeso contribuyen a la disolución de sulfatos en contacto con el agua subterránea, lo cual favorece la interacción agua-roca. Con referencia a la alta concentración de nitratos, esta porción del área se categoriza como una zona de muy alta vulnerabilidad hidrogeológica, lo que traduce un aumento en el grado de sensibilidad del acuífero en una afectación por una carga contaminante; se sugiere que agentes externos, como el uso de herbicidas y fertilizantes y/o el mal manejo de las aguas residuales, pueden constituir una fuente de nitratos y estar alterando la calidad del recurso actualmente. Los anteriores planteamientos deben ser comprobados por medio de un análisis de fondo químico natural en el acuífero, con el fin de reconocer cuáles de estos procesos son intrínsecos y derivan de condiciones geológicas y atmosféricas naturales y en qué escenarios se presentan modificaciones de los procesos naturales, determinando sus causas.

De acuerdo con la sectorización hidrogeológica, la perforación MN-LR-04 reposa sobre los metacarbonatos del Complejo Zanja del Tigre, con caudales de explotación promedio de 8000 L/h. A partir de la medición de conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos *in situ*, se demuestra que esta captación presenta los mayores valores para ambos

parámetros en el inventario total del estudio (1108 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 554 mg/L respectivamente), lo cual sugiere que el agua subterránea en este punto presenta alta concentración de iones. Por su parte, el incremento del ion sodio en esta muestra, en el orden de 190 mg/L, presenta un contraste importante con el conjunto restante de muestras, que presentan valores máximos de 39 mg/L de Na^+ .

Según la secuencia de Chebotarev, las aguas bicarbonatadas, las cuales presentan el menor tiempo de residencia en el acuífero, evolucionan geoquímicamente, en un principio, con el predominio de los cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} y sufriendo fenómenos de intercambio catiónico que las enriquecen del catión Na^+ (Árcega-Santillán, 2010). Padilla-Cámbara y García-Álvarez (2012) apoyan esta teoría, pues indican que las aguas subterráneas de reciente infiltración interactúan y evolucionan por el medio geológico que les aporta una variación en su composición iónica, hasta su recorrido final y disposición como aguas de descarga. Bajo estas premisas, tanto las evidencias de saturación en carbonatos como el enriquecimiento en sales que presenta las aguas captadas sobre el Complejo Zanja del Tigre se relacionan directamente con la complejidad litológica y estructural que presenta esta unidad hidrogeológica, lo que permite una mayor interacción del agua subterránea con el sustrato rocoso y un aumento en su mineralización por fenómenos de precipitación e intercambio catiónico.

En función de la geomorfología de la localidad de Minas, la presencia de niveles freáticos someros, el hecho de no presentarse saturación en carbonatos en el agua subterránea por el contacto con medios kársticos del GAS y la baja concentración de cloruros en las muestras obtenidas, se define que el área presenta una dinámica de recarga local, con flujos rápidos, exceptuando el acuífero formado por las rocas del Complejo Zanja del Tigre, que presenta niveles freáticos más profundos, y sugiere flujos regionales, aguas con mayor tiempo de residencia en el sistema y con un aumento en su salinidad, como lo indica la muestra MN-LR-04.

Teniendo en cuenta los resultados de la concentración de bicarbonatos en las muestras evaluadas, se indica que, si bien 6 de las 7 muestras utilizadas para el análisis aún se encuentran dentro del rango de valores aceptados por la norma de potabilidad del Uruguay, los pozos MN-LR-09, MN-LR-11 y MN-LR-19 captan aguas duras a muy duras, como lo define la clasificación

de dureza consignada en Bessonart y Ciarán (2009). Así mismo, y pese a que existe una incertidumbre en el cálculo de la concentración de bicarbonato en el laboratorio, el pozo MN-LR-03, cuya muestra fue descartada del análisis de iones mayoritarios por su error en el cálculo del balance, presentó en campo evidencias importantes sobre la deficiencia y alteración de la calidad del agua para riego por su condición de dureza y bajo contenido de sodio.

Finalmente, la caracterización del arroyo La Plata, a través de la muestra MN-LR-02, demuestra que fisicoquímicamente no presenta alteraciones; se cataloga como agua blanda poco mineralizada, con bajas concentraciones de sulfatos y nitratos, lo que demuestra que no existe una afectación actual a causa de actividades antrópicas que puedan estar variando sus condiciones naturales.

Conclusiones

La ciudad de Minas, en Uruguay, contempla una profunda historia geológica que involucra una secuencia de rocas datadas desde el Mesoproterozoico hasta el Cuaternario, afectadas por una serie de pliegues con orientación NE-SW, lo que sugiere el dominio de esfuerzos compresivos que afectaron las litologías aflorantes.

Estudios previos realizados en los acuíferos presentes en la localidad de Minas y los resultados consignados en esta investigación referentes a la cartografía geológica e hidrogeológica y la clasificación hidrogeoquímica de las aguas subterráneas establecen que el área se encuentra influenciada por un sistema de flujo local, con aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas captadas en pozos poco profundos. Se presentan ciertas variaciones en la composición, manifestadas en aguas bicarbonatadas sódicas, las cuales se encuentran afectadas por fenómenos de intercambio catiónico y enriquecimiento en sales, lo que sugiere un mayor tiempo de residencia en un sistema acuífero con influencia regional.

La muestra MN-LR-19 presenta una concentración de nitratos superior al límite establecido. En este sector, el índice de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación es muy alto, lo que favorece el transporte de cargas contaminantes externas como lixiviados generados por el uso desmedido de fertilizantes, herbicidas o por la infiltración de aguas residuales que pueden estar afectando con mayor celeridad el recurso subterráneo.

La concentración de bicarbonatos de la muestra MN-LR-04 supera el valor permitido por la normativa de agua potable para Uruguay. Así mismo, las muestras LR-09, MN-LR-11 y MN-LR-19 se catalogan como aguas duras a muy duras, situación que requiere una alternativa de tratamiento de dureza como los ablandadores de agua de intercambio iónico, el cual contribuye a prevenir los impactos latentes en el uso del agua destinada a consumo y riego, daños a la red de tuberías, entre otros.

Agradecimientos

Este artículo incluye parte de los resultados del trabajo de grado de [Ríos-Vásquez \(2021\)](#), realizado en simultaneidad con la Universidad de la República, en Montevideo, Uruguay, y la Universidad Industrial de Santander, en Bucaramanga, Colombia. Un especial agradecimiento al Centro Regional para la Gestión de Aguas Subterráneas en América Latina y el Caribe, CeReGAS, por el patrocinio de los análisis de iones mayoritarios, y al Laboratorio Tecnológico del Uruguay, LATU, por la realización de estos. Así mismo, nos encontramos muy agradecidos con la población de la ciudad de Minas, por el interés y hospitalidad que demostraron en el transcurso de las jornadas de campo.

Referencias

Álvarez, P. (2020). Geología e hidrogeología de acuíferos kársticos en el Abra de la Coronilla, Departamento de Lavalleja, Uruguay. Tesis de pregrado, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

American Public Health Association (2018). 4500-CO₂ carbon dioxide. In: W.C. Lipps, T.E. Baxter, E. Braun-Howland (Eds.). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 23rd*. Washington DC: APHA Press.

Árcega-Santillán, I. (2010). Caracterización hidrogeoquímica del acuífero del Valle de Villa Hidalgo, San Luis Potosí, México. Tesis de Maestría, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C, San Luis Potosí, México.

Bessonart, S.; Ciarán, E. (2009). Evaluación del riesgo sanitario en el manejo del agua en establecimientos lecheros de Ecilda Paullier departamento de San José. Tesis de Doctorado, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

Blanco, G.; Gaucher, C. (2005). Estratigrafía, paleontología y edad de la Formación Las Ventanas (Neoproterozoico, Uruguay). *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 12(2), 109-124.

Bossi, J. (2010). Evolución de la litosfera durante el Predevónico de Uruguay: Un predominio de transurrencias. *Revista de la Sociedad Uruguaya de Geología*, 17, 3-14.

Collazo, M.P. (2020). Índice de factibilidad de desarrollo humano en función del agua subterránea (IDHAS). Caso de aplicación Uruguay. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología, N° especial*, 56-67.

Custodio, E.; Llamas M. (1983). *Hidrología subterránea*. Tomo I, 2da edición corregida. Omega, S.A.

Decreto n.º 253/979. Por medio del cual se aprueban normas para prevenir la contaminación ambiental, mediante el control de las aguas. Ministerio de Transporte y Obras Públicas de Uruguay, 1979.

Decreto n.º 315/994. Por medio del cual se aprueba el Reglamento Bromatológico Nacional. Ministerio de Salud Pública del Uruguay, 1994.

Fornaro, J.; Pio, I.; Moreira, M.; Avero, R.; Araujo, G.; Escudero, L.; Oggero, L. (2014). Plan local de ordenamiento territorial y desarrollo sostenible de la ciudad de Minas. Dirección Nacional de Ordenamiento Territorial DINOT e Intendencia de Lavalleja.

Gaucher, C. (2000). Sedimentology, palaeontology, and stratigraphy of the Arroyo del Soldado Group (Vendian to Cambrian, Uruguay). *Beringeria*, 26, 3-120.

Gaucher, C.; Chiglino, L.; Peçoits, E. (2004). Southernmost exposures of the Arroyo del Soldado group (Vendian to Cambrian, Uruguay): Palaeogeographic implications for the amalgamation of W-Gondwana. *Gondwana Research*, 7(3), 701-714. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)71057-1](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)71057-1)

González-Carreira, L.I. (2016). Caracterización geológica e hidrogeológica de acuíferos kársticos de la Formación Polanco-Ediacárico, Uruguay.

- Tesis de Maestría, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- ISO 11885:2007. Water quality. Determination of selected elements by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). Internacional.
- ISO 10304-1:2007. Water quality. Determination of dissolved anions by liquid chromatography of ions - Part 1: Determination of bromide, chloride, fluoride, nitrate, nitrite, phosphate and sulfate. Internacional.
- Lillo-Ramos, F.J. (2007). Técnicas Hidrogeoquímicas. Tesis de Maestría, Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España.
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay (2020). Cartografía de grupo de suelos CONEAT. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/coneat>
- OSE. (2006). Norma interna de calidad de agua potable. Nacional. Obras Sanitarias del Estado.
- Padilla-Cámbara, T.A.; García-Álvarez, N. (2012). Hidroquímica del agua superficial de la subcuenca del río Quiscab, Guatemala. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 21(Nº especial), 17-20.
- Poiré, D.G. (2014). Grupo Mina Verdún. En: J. Bossi.; C. Gaucher (eds.). *Geología del Uruguay. Tomo 1: Predevónico* (pp. 233-251). Polo.
- Preciozzi, F.; Spoturno, J.; Heinzen, W.; Rossi, P. (1985). Memoria explicativa de la Carta Geológica del Uruguay a la escala 1:500.000. Dirección Nacional de Minería y Geología MIEM-DINAMIGE, Uruguay, 97 p.
- Ríos-Vásquez, L.C. (2021). Estimación de la vulnerabilidad hidrogeológica en la ciudad de Minas sobre las rutas nacionales N°8 y N°12, departamento de Lavalleja, Uruguay. Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Simler, R (2015). Diagrammes (Versión 6.5). Université D'Avignon.
- Spoturno, J.J.; Oyhantçabal, P.B. (2012). Mapa Geológico del departamento de Maldonado a Escala 1:100.000, Memoria explicativa. Ministerio de Industria, Energía y Minería MIEM y Facultad de Ciencias UDELAR, Uruguay.
- Spoturno, J.; Oyhantçabal, P.; Faraone, M. (2019). Mapa geológico del Departamento de Lavalleja a escala 1:100.000. Ministerio de Industria, Energía y Minería MIEM y Facultad de Ciencias UDELAR, Uruguay.

Fecha de recibido: 24 de enero de 2022
Fecha de aprobado: 14 de octubre de 2022
