

# CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y AGRONÓMICA DE LAS AGUAS RESIDUALES DEL YACIMIENTO CASTELLANO, PINAR DEL RÍO

## Chemical and agronomic characterization of sewage water from the Castellano deposit, Pinar del Río

Yenisei Hernández Baranda<sup>1✉</sup>, Pedro Rodríguez Hernández<sup>2</sup>, Mirella Peña Icart<sup>3</sup>, Patricia González Hernández<sup>4</sup> y Francisco Tomás San Nicolás López<sup>5</sup>

**ABSTRACT.** The reuse of sewage water in agriculture results in a future need in many countries, since this sector employs almost 70 % of available freshwater, and there have been reports on critical levels of water deficit in many regions around the world. Cuba is not exempt from these problems, and its national politics towards water promotes the implementation of this practice. Therefore, in the current paper, an attempt has been carried out to characterize and to assess the quality of mining sewage water and its use in agriculture. To achieve successfully this aim, five punctual samples were collected from the creek "Biajaca", where sewage waters coming from Minas Castellano, in Minas de Matahambre, Pinar del Río are discharged. These five punctual samples to form one composed sample were combined and so the pH and electrical conductivity were measured. After filtering and keeping the proper conservation, the following elements Na, K, Ca, Mg, B, Al, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Ni, Pb, Sr, Tl, Zn, As, Be, Sb, Se, Mo, V, Ti, S, P, Rb were determined through digestion in microwave and analysis by ICP-OES. On the other hand, the ions F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> were determined by ion-exchange liquid chromatography. The results showed that it is a type of water characteristic of the study area, with an acid pH and salinity, permeability and toxicity indicators suitable for its usage in agriculture, as long as its acidity is pre-neutralized.

*Key words:* water quality, permeability, water reuse, salinity, toxicity

**RESUMEN.** La reutilización de las aguas residuales en la agricultura es una necesidad futura en muchos países, ya que este sector emplea casi el 70 % del agua dulce disponible y se han reportado niveles de déficit hídrico críticos en muchas regiones del mundo. Cuba no está exenta de estos problemas y su política nacional del agua promueve la aplicación de esta práctica. Por esta razón, en el presente trabajo se caracterizó y evaluó la calidad de las aguas residuales mineras para su uso en la agricultura. Se colectaron cinco muestras puntuales en el arroyo "Biajaca" donde descargan aguas residuales provenientes de las Minas Castellano, en Minas de Matahambre, Pinar del Río. Las cinco muestras puntuales se combinaron formando una muestra compuesta y se midió el pH y conductividad eléctrica. Tras el filtrado y la adecuada conservación, se determinaron los elementos Na, K, Ca, Mg, B, Al, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Ni, Pb, Sr, Tl, Zn, As, Be, Sb, Se, Mo, V, Ti, S, P, Rb, mediante digestión con microondas y análisis por ICP-OES. Además, los iones F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> se determinaron por Cromatografía Líquida de Intercambio Iónico. Los resultados mostraron que es un tipo de agua característica de la zona de estudio, con un pH ácido, con indicadores de salinidad, permeabilidad y toxicidad adecuados para su uso en la agricultura, siempre que se pre-neutralice su acidez.

*Palabras clave:* calidad del agua, permeabilidad, reutilización de aguas, salinidad, toxicidad

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), carretera San José-Tapaste, km 3½, Gaveta Postal 1, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. CP 32700

<sup>2</sup> Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), Centro De Investigación Obonuco. Kilómetro 5, Vía Pasto-Obonuco, San Juan de Pasto, Nariño, Colombia

<sup>3</sup> Instituto de Ciencia y Tecnología de Materiales, Universidad de La Habana

<sup>4</sup> Facultad de Química, Universidad de La Habana

<sup>5</sup> Laboratorio de Ionómica. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura, Murcia, España

✉ yenisei@inca.edu.cu

## INTRODUCCIÓN

La humanidad crece a un ritmo acelerado y para su desarrollo requiere de aguas superficiales y subterráneas, que son cada vez más escasas y de peor calidad (1). Se han alcanzado niveles críticos de déficit hídrico permanentes o estacionales y se acepta como un hecho que en una gran parte del planeta

existe crisis de agua (2,3). Se espera que hacia el 2025, el 80 % de la población de la Tierra viva bajo condiciones de alta escasez de recursos hídricos (4).

La agricultura es en realidad el principal usuario de agua dulce en el mundo (5) y representa aproximadamente el 70 % del agua de consumo (6). Debido a ello, diferentes administraciones competentes han considerado la reutilización de las aguas residuales regeneradas como un componente más del ciclo del agua y se ha publicado el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas (Real Decreto 1620/2007, BOE 294 de 7 de Diciembre) y el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017 (7).

El agua residual depurada, aplicada con sistemas de riego adecuados, debe ser el agua del futuro para las tierras con infradotación de riego, optimizando los recursos en aquellas condiciones que así lo permitan (8). En algunos casos el agua residual depurada es de mejor calidad que el agua de la zona, presentando una total adecuación para su uso en riego (9).

Las plantas necesitan de al menos 14 elementos para una nutrición adecuada y los obtienen, generalmente, del suelo, la fertilización y el agua de riego. Pero la creciente actividad antropogénica y el consecuente aumento en la concentración de metales pesados han modificado la composición química de las aguas y en muchas ocasiones limitan su utilidad para riego (10). De ahí que la reutilización de aguas residuales exige la adopción de medidas de protección de la salud pública. Para ello se dispone de normas internacionales que permiten el uso seguro de aguas residuales tratadas (11,12).

En Cuba la pérdida de calidad del agua también es un problema creciente. Algunas investigaciones han observado eutrofización de los lagos e incremento del contenido de metales en zonas de acuíferos, como consecuencia de una alta explotación y, en aguas superficiales, debido al vertimiento de residuales industriales y pecuarios insuficientemente tratados (13).

También se han presentado graves problemas de sequía en periodos recientes que pueden afectar considerablemente las cosechas en los próximos años (14). Por tanto, debido a la conveniencia de darle un uso productivo a las aguas residuales, la Política Nacional del Agua en Cuba adopta dentro de sus 22 principios promover la reutilización de estas aguas e introducir técnicas eficientes en el riego agrícola (15).

La actividad fundamental en "Minas de Matahambre", Pinar del Río, es la minería, pero una pequeña parte no despreciable del suelo es destinada para uso agrícola (16), de ahí que es objetivo del presente trabajo caracterizar y evaluar la calidad de las aguas residuales provenientes de actividades mineras de esta zona, para su uso en la agricultura.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### MUESTREO Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS DE AGUAS RESIDUALES MINERAS

Se colectaron cinco muestras puntuales en diferentes sitios del arroyo "Biajaca", donde descargan aguas residuales provenientes de las Minas Castellano, Pinar del Río, ubicado a los 22°37'27.50" de Latitud Norte y 83°59'34.96" Longitud Oeste, a una altura de 22 m s.n.m. El muestreo se realizó en abril de 2016, período seco con caudal relativamente bajo. Las muestras se colectaron cada 30 m en cinco sitios del cauce del arroyo (Figura 1), siguiendo los procedimientos de muestreo y preservación establecidos en la norma ISO para el diseño de programas de muestreo (17).



**Figura 1. Sitios de muestreo en el arroyo Biajaca, Minas de Matahambre, Pinar del Río**

Se tomaron 50 L en los cinco sitios muestreados y se combinaron para formar una muestra compuesta de 250 L. Se colectó este volumen de muestra con la finalidad de evaluar, en estudios posteriores, los efectos del agua residual en el cultivo hidropónico del tomate. Seguidamente, se midió el pH y la conductividad eléctrica por triplicado y se conservó 1 L de la muestra para su posterior análisis de alcalinidad, de acuerdo con la norma NMX-AA-036-SCFI-2001 (18). Luego de homogenizar la muestra compuesta, se filtró utilizando un sistema de filtración con rampas de cinco puestos y bomba de vacío y filtros de nitrato de celulosa de 0,45  $\mu\text{m}$ . Se separaron de la muestra filtrada tres sub-muestras con un volumen de 10 mL cada una, las mismas se conservaron en recipientes de plástico con  $\text{HNO}_3$  (pH= 2) y en refrigeración hasta su posterior análisis químico.

## CARACTERIZACIÓN DE AGUAS RESIDUALES MINERAS

Se pesaron 0,7 g de cada muestra líquida en un tubo de digestión de 25 mL y se añadieron 4 mL de ácido nítrico concentrado y 1 mL de agua oxigenada al 33 %. Se realizaron las digestiones en un microondas Ultraclave Milestone calentando hasta 220 °C durante 20 minutos y luego se enrazaron en 10 mL.

Los elementos totales Na, K, Ca, Mg, B, Al, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Li, Mn, Ni, Pb, Sr, Tl, Zn, As, Be, Sb, Se, Mo, V, Ti, S, P y Rb se determinaron mediante análisis por espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado por inducción (ICP-OES). Las determinaciones se realizaron en un espectrómetro de emisión atómica modelo THERMO ICAP 6 500DUO con capacidad de realizar medidas en axial y radial, las condiciones instrumentales fueron similares en ambos modos: velocidad de flujo (nebulizador-gas auxiliar)=0,55-0,5 L min<sup>-1</sup>, potencia RF (W)=1 150 W, velocidad de introducción de la muestra=30 rpm, Número de repeticiones=2.

Las disoluciones para la calibración se prepararon por dilución con agua ultrapura, a partir del patrón madre multielemental certificado Plasma CAL suministrado por la empresa SCP Science. Los iones F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, Br<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> se determinaron por Cromatografía Líquida de intercambio Iónico (Metrohm) (19). Se evaluó la calidad del análisis químico a través del cálculo en la diferencia entre aniones y cationes:

$$e = \frac{\sum_{i=1}^n \text{cationes} - \sum_{i=1}^n \text{aniones}}{\sum_{i=1}^n \text{cationes} + \sum_{i=1}^n \text{aniones}} * 100 = 4,58 \%$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El sitio de muestreo arroyo "Biajaca" se encuentra ubicado en el miembro superior de la formación San Cayetano, cercano a la zona de drenaje del depósito Castellano. Está formado por esquistos pelíticos, carbonosos, frecuentemente calcáreos, con intercalaciones y lentes de calizas dolomitizadas, areniscas y limolitas. Los parámetros que caracterizan la composición general de la muestra de agua compuesta representativa del arroyo en estudio se observan en la tabla.

En la Figura 2 se muestra el patrón hidrogeoquímico del agua en estudio de acuerdo a Fagundo *et al.* (2012) (1). Según la composición química de la misma y considerando que se ha neutralizado su acidez, se clasifica como del tipo sulfatada bicarbonatada clorurada sódica cálcica magnesiana (SO<sub>4</sub>=HCO<sub>3</sub>>Cl-Na=Ca>Mg) (20), con una mineralización de 0,21 g L<sup>-1</sup> y una dureza total de 83,54 mg L<sup>-1</sup> CaCO<sub>3</sub>.

Los resultados se corresponden con los estudios realizados en esta zona por Ponce *et al.* (1997), los cuales identificaron tres horizontes que se alimentan fundamentalmente de acuíferos más profundos. Entre

ellos se encuentra el *Horizonte acuífero del Jurásico Superior*, localizado hacia el sur-este de Castellano. La composición química de estas aguas, en su mayoría, son sulfatadas sódicas y sus valores de mineralización y dureza total están próximos a los obtenidos en el presente estudio (20).

La composición química del agua en estudio se adquiere, para el caso de los sulfatos, por la llegada de las aguas superficiales próximas a la zona minera que tienen altas concentraciones de ácido sulfúrico producto de los procesos de oxidación e hidrólisis de los minerales sulfurosos (FeS<sub>2</sub>). Otros iones mayoritarios, como el sodio y el cloruro, mostraron una relación en meq L<sup>-1</sup> de Na/Cl igual a 1,38; superior al umbral (0,862) establecido por Schlesinger *et al.* (2000) (21). Este resultado indica que el agua en estudio conserva la proporción iónica (Na/Cl) característica del agua marina.

Por otra parte, se atribuye que los elementos mayoritarios Ca, Mg y la alcalinidad deben sus contenidos en el agua estudiada a la interacción de la misma con las rocas de la formación San Cayetano.

En la mayoría de los elementos prevalecen los estados de oxidación más comunes e iones simples (Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Fe<sup>2+</sup>, Al<sup>3+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Sr<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Tl<sup>+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>, Rb<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>). Mientras que para N, S y B predominan los iones y especies complejas, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, respectivamente. En el pH de 4,36, el H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> presente en un 98 %, es la especie predominante en el equilibrio de los carbonatos; sin embargo, a pH neutro predominan los iones bicarbonatos (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). En la Figura 3 se muestran las distribuciones de las especies de los elementos: S, Mg, Ca, Al. El resto de los elementos se encuentran casi totalmente en una única especie, obtenida por modelación hidrogeoquímica haciendo uso del programa PHREEQC con la base de datos MINTEQ (22).

La evaluación de la calidad del agua colectada para uso agrícola se realizó según las normas establecidas por la FAO 1985 sobre la base de las siguientes categorías: salinidad, alcalinidad, toxicidad y misceláneos (11).

La muestra de agua combinada presenta un alto contenido de iones hidronio, con un pH de 4,36; por lo que no es adecuada para uso agrícola según la FAO. La disminución del pH se debe, entre otros factores, a los procesos de oxidación-disolución que experimentan los sulfuros al interactuar con el aire y el agua lo cual da lugar a la formación de ácido sulfúrico. Estos procesos también provocan un enriquecimiento notable en sulfatos (23).

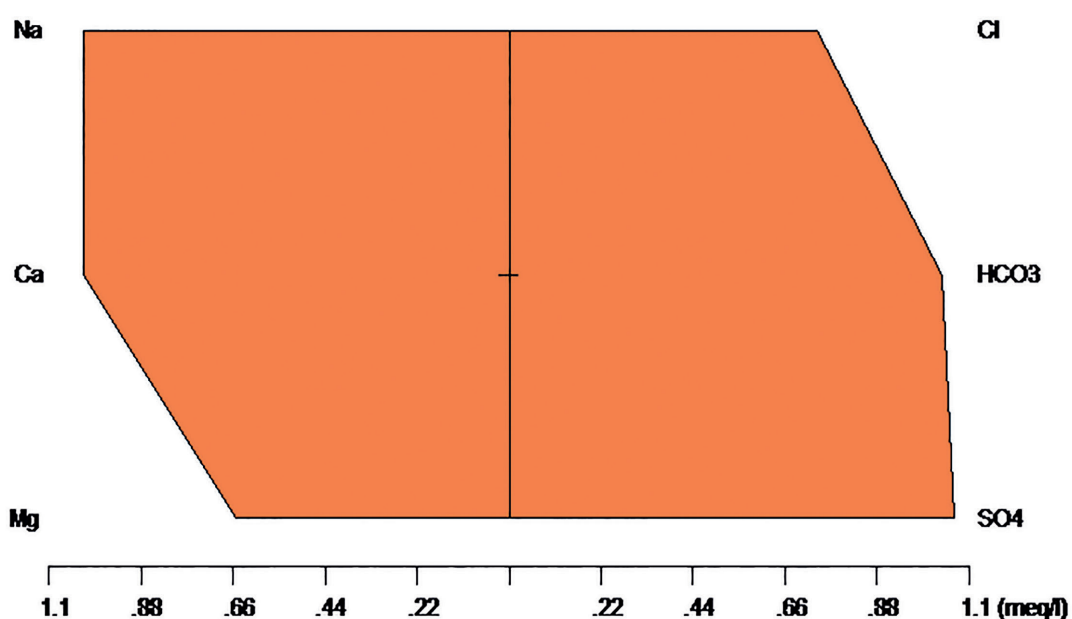
Valores similares de pH fueron obtenidos en estudios ambientales de las áreas afectadas por la actividad minera del depósito Santa Lucía (16,24,25).

Estos pH ponen de manifiesto el impacto negativo que ocasiona el drenaje ácido de las minas sobre las aguas superficiales cercanas al área de explotación.

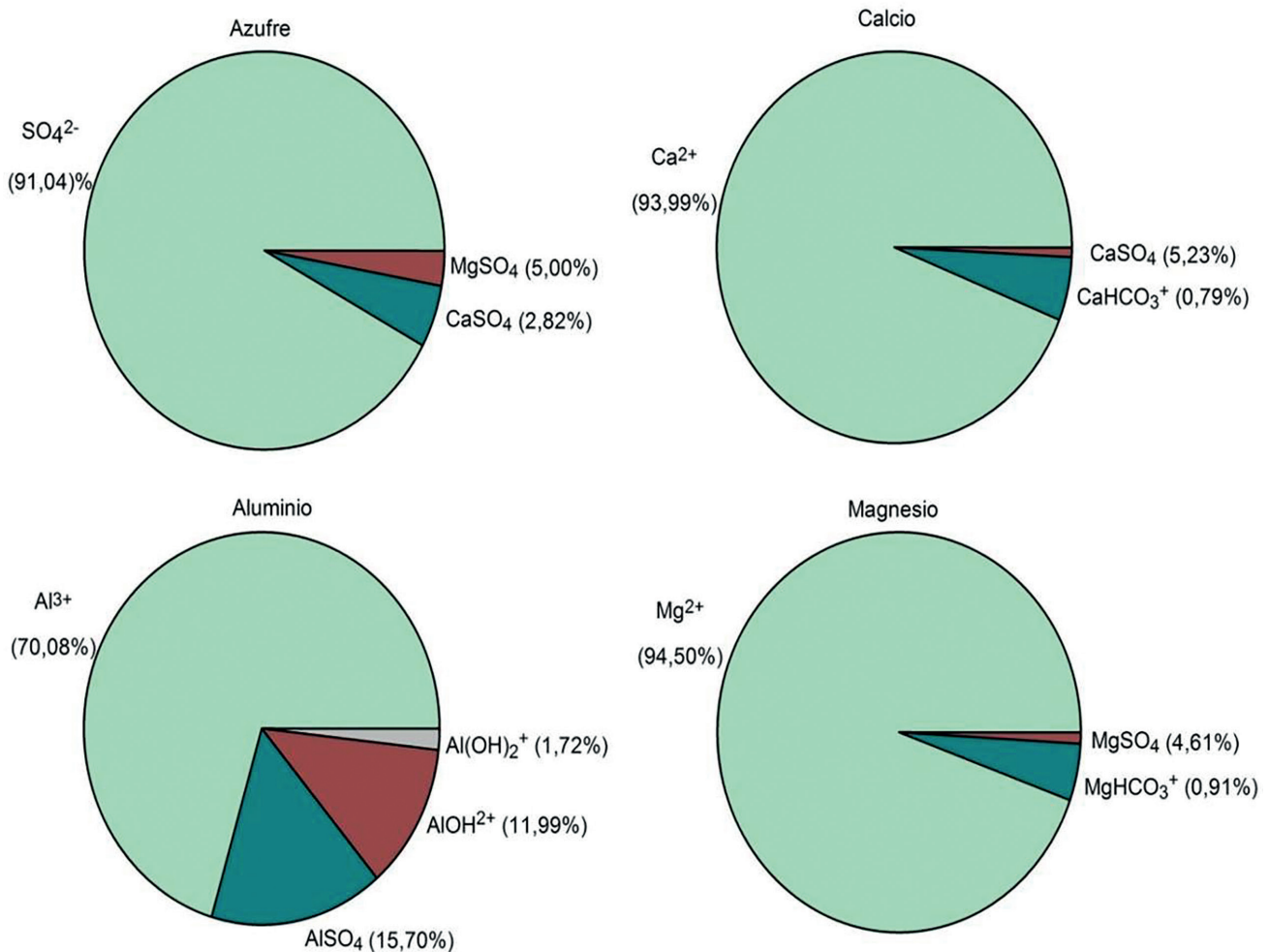
**Tabla. Parámetros que caracterizan la composición química del agua proveniente del Arroyo “Biajaca”, Pinar del Río y valores de referencia establecidos por la FAO y otras normas ambientales**

Parámetros	Valor medido	Error estándar	Referencia (FAO, 1976)	Resolución 0631. Colombia	Norma Ecuador
pH	4,4	0,2	6,5-8,4	6-9	6,5-9
CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	270	15	200-750	-	-
Na (meq L <sup>-1</sup> )	1,02	0,02	0-40	-	-
Ca (meq L <sup>-1</sup> )	1,02	0,02	0-20	-	-
Mg (meq L <sup>-1</sup> )	0,65	0,08	0-5	-	-
K (meq L <sup>-1</sup> )	0,10	0,02	0-2	-	-
Fe (mg L <sup>-1</sup> )	0,41	0,07	5	2	0,3
Al (mg L <sup>-1</sup> )	0,28	0,00	5	-	0,1
Mn (mg L <sup>-1</sup> )	0,17	0,01	0,2	-	0,1
Sr (mg L <sup>-1</sup> )	0,07	0,02	-	-	-
Zn (mg L <sup>-1</sup> )	0,05	0,01	2	3	0,18
B (mg L <sup>-1</sup> )	0,03	0,01	0,75	-	-
Tl (mg L <sup>-1</sup> )	0,03	0,00	-	-	-
Cu (mg L <sup>-1</sup> )	0,01	0,00	0,2	1	0,02
Ni (mg L <sup>-1</sup> )	0,01	0,00	0,2	0,5	0,025
Rb (mg L <sup>-1</sup> )	0,01	0,00	-	-	-
Alcalinidad (meq L <sup>-1</sup> )	1,03	0,03	1,5	-	-
Cl <sup>-</sup> (meq L <sup>-1</sup> )	0,73	0,06	4	7,1	-
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	14	2	<30 para cultivos no sensibles al N	-	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg L <sup>-1</sup> )	51	3	-	250	-
Br (mg L <sup>-1</sup> )	0,10	0,00	-	-	-
R.A.Sadj	1,46	-	6	-	-

Conductividad Eléctrica (CE), Relación de Adsorción de Sodio ajustada (R.A.S adj.)



**Figura 2. Patrón hidrogeoquímico del agua colectada en el arroyo Biajaca, Minas de Matahambre, Pinar del Río**



**Figura 3. Distribuciones de las especies Azufre, Calcio, Aluminio y Magnesio en el agua colectada en el Arroyo Biajaca**

La conductividad eléctrica (C.E) en la muestra de agua fue  $269,7 \mu\text{S cm}^{-1}$ , valor inferior al límite superior establecido por la FAO ( $750 \mu\text{S cm}^{-1}$ ), por lo que no constituye un problema de salinización del suelo. No obstante, la salinización inferior a  $200 \mu\text{S cm}^{-1}$  representa un problema de permeabilidad del agua en el suelo. La conductividad eléctrica medida en la muestra está muy próxima a este valor, por tanto, se trata de un agua con posible dificultad de infiltración hasta la zona radicular.

La Relación de Adsorción de Sodio ajustada (R.A.S adj) fue de 1,46, valor menor que el establecido por la FAO. Este indicador está relacionado con la permeabilidad del agua en el suelo y muestra que el contenido de sodio medido no representa un riesgo de sodificación. Por tanto, el agua residual estudiada no presenta limitaciones para su uso agrícola.

Los problemas de infiltración del agua en el suelo se deben, entre otros factores, a la combinación de los efectos asociados con la sodicidad y la salinidad del agua. La evaluación simultánea de los indicadores R.A.S y CE en el diagrama de la FAO (1985), evidenció que la muestra colectada presenta reducción leve o moderada en la velocidad de infiltración en el suelo. Por tales motivos se recomienda su uso sin descuidar los posibles efectos corrosivos.

La concentración de todos los elementos analizados (Tabla) es inferior a los límites permisibles establecidos por la FAO para su empleo en la agricultura. Su absorción no causa daños en los cultivos y muchos de ellos (N, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn, B, Cu y S) favorecen la nutrición de las plantas. Los elementos no informados en la tabla presentaron concentraciones por debajo del límite de detección en cada caso.

Resultados diferentes obtuvieron Milián *et al.* (2012) (16) y Cañete *et al.* (2011) (23), los cuales encontraron elevadas concentraciones de Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe Mn, Pb, Zn y  $\text{SO}_4^{2-}$  en corrientes superficiales procedentes de la Mina Santa Lucía (16,23). Las concentraciones de los elementos tóxicos en el agua de estudio son todas menores que las encontradas por diferentes autores (16). Estas diferencias se atribuyen a que los sitios de muestreo no son los mismos, el arroyo Biajaca está más próximo al depósito Castellano que al depósito Santa Lucía.

No obstante, la distancia entre ambos depósitos es solo de 2 km (26) con ríos conectados que dan la posibilidad de extender la contaminación entre los depósitos mineros. De ser así, otra hipótesis respecto a estas diferencias encontradas desde 2012 hasta el 2016, podrían estar dadas por la posible dilución con aguas no contaminadas, lo cual constituye un importante logro ambiental. Sin embargo, estos criterios no son concluyentes ya que los autores no informan los datos relacionados con el caudal y época del año del muestreo.

Al comparar los resultados con otras normas internacionales, se observó que la concentración de todos los elementos es inferior a los valores máximos permisibles en los vertimientos de residuales mineros a cuerpos de aguas superficiales (27). No obstante, los niveles de Al y Fe, a pesar de ser inferiores a los establecidos en la Resolución 0631, superan los límites máximos permitidos (0,1 y 0,3  $\text{mg L}^{-1}$  respectivamente) para la preservación de la flora y fauna en aguas dulces cálidas establecidos en la Norma Ecuatoriana de calidad ambiental y de descarga de efluentes (28).

La concentración total de sales fue 5,91  $\text{meq L}^{-1}$  y la relación del porcentaje de sodio respecto al contenido total de cationes presentes en el agua fue 35,7 %. La disposición de este tipo de agua en el diagrama de Greene (FAO) permitió concluir que se dispone de un agua de buena calidad para el riego, siempre que se neutralice su acidez antes del uso.

## CONCLUSIONES

- ◆ La composición química del agua del arroyo Biajaca en Minas de Matahambre, Pinar del Río, refleja las características de la formación a la que pertenece y también el impacto negativo que recibe de las actividades mineras cercanas. Su elevada acidez es producto de los drenajes ácidos de las minas y representa la limitante principal para el uso directo en la agricultura.
- ◆ Los indicadores de salinidad, sodicidad y toxicidad cumplen con los requisitos establecidos por la FAO. La combinación de la C.E y la R.A.S da como resultado que el agua colectada presenta ligeros problemas de infiltración en el suelo. Tales

problemas pueden reducirse añadiendo yeso al agua o al suelo, o mezclando dos fuentes de agua. Aunque, generalmente estos problemas no son necesarios corregirlos, a menos que el cultivo demande gran cantidad de agua, por tanto, la previa neutralización del pH, convierte el agua colectada en un recurso inocuo de buena calidad para su uso como agua de riego.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Fagundo JR, Gonzalez P. Hidrogeoquímica [Internet]. España: Eae Editorial Academia Espanola; 2012 [cited 2018 Jul 2]. 364 p. Available from: <https://www.libreriauniversitaria.it/hidrogeoquimica-fagundo-castillo-juan-reynerio/buch/9783847356127>
2. Restrepo E, Zárate CA. El mínimo vital de agua potable en la jurisprudencia de la Corte Constitucional colombiana. *Revista Opinión Jurídica*. 2016;15(29):123–40.
3. Zhou X, Lei K, Khu S-T, Meng W. Spatial flow analysis of water pollution in eco-natural systems. *Ecological Indicators*. 2016;69:310–7. doi:10.1016/j.ecolind.2016.04.041
4. Arrojo P. Tipología y raíces de los conflictos por el agua en el mundo. In: Agua, un derecho y no una mercancía: propuestas de la sociedad civil para un modelo público de agua [Internet]. Barcelona, España: Icaria editorial, s.a; 2009 [cited 2018 Jul 2]. p. 9–34. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=362524>
5. Rodriguez CI, Ruiz de Galarreta VA, Kruse EE. Analysis of water footprint of potato production in the pampean region of Argentina. *Journal of Cleaner Production*. 2015;90:91–6. doi:10.1016/j.jclepro.2014.11.075
6. Chen Z-M, Chen GQ. Virtual water accounting for the globalized world economy: National water footprint and international virtual water trade. *Ecological Indicators*. 2013;28:142–9. doi:10.1016/j.ecolind.2012.07.024
7. UNESCO. Aguas residuales, el recurso desaprovechado [Internet]. París; 2017 [cited 2018 Jul 2] p. 202. (Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). Available from: <http://www.unesco.org/new/es/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/2017-wastewater-the-untapped-resource/>
8. Cartone A, Casolani N, Liberatore L, Postiglione P. Spatial analysis of grey water in Italian cereal crops production. *Land Use Policy*. 2017;68:97–106. doi:10.1016/j.landusepol.2017.06.024
9. Hartog N, Stuyfzand P. Water Quality Considerations on the Rise as the Use of Managed Aquifer Recharge Systems Widens. *Water*. 2017;9(10):808. doi:10.3390/w9100808
10. Schreiber C, Rechenburg A, Rind E, Kistemann T. The impact of land use on microbial surface water pollution. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 2015;218(2):181–7. doi:10.1016/j.ijheh.2014.09.006
11. Ayers RS, Westcot DW. Water quality for agriculture [Internet]. Rome: FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations; 1985 [cited 2018 Jul 2]. 97 p. Available from: <http://www.fao.org/docrep/003/t0234e/t0234e00.HTM>

12. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality [Internet]. 4th edition, incorporating the 1st addendum. Geneva, Switzerland: WHO; 2011 [cited 2018 Jul 2]. 564 p. Available from: [http://www.who.int/water\\_sanitation\\_health/publications/drinking-water-quality-guidelines-4-including-1st-addendum/en/](http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/drinking-water-quality-guidelines-4-including-1st-addendum/en/)
13. Alfonso C, Ramón J, Ponce de León Lima D, Cervantes Beyra R, Vargas Rodríguez H, Domínguez Palacio D. Distribución espacial de la calidad de las aguas subterráneas utilizadas para el riego. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 2015;24(3):13–21.
14. Ponvert DR. Algunas consideraciones sobre el comportamiento de la sequía agrícola en la agricultura de Cuba y el uso de imágenes por satélites en su evaluación. *Cultivos Tropicales*. 2016;37(3):22–41. doi:10.13140/RG.2.1.4591.3843
15. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. Política Nacional del Agua en Cuba [Internet]. Ecured. 2012 [cited 2018 Jul 2]. Available from: [https://www.ecured.cu/Pol%C3%ADtica\\_Nacional\\_del\\_Agua\\_en\\_Cuba](https://www.ecured.cu/Pol%C3%ADtica_Nacional_del_Agua_en_Cuba)
16. Milián E, Ulloa M, Jornada AS. Evaluación minero ambiental del yacimiento polimetálico Santa Lucía, Pinar del Río, Cuba. *Minería & Geología*. 2012;28(3):18–49.
17. Norma Técnica Colombiana, NTC-ISO 5667-3. Calidad del agua. Muestreo. Parte 3: Directrices para la preservación y manejo de las muestras [Internet]. Bogotá, Colombia: ICONTEC; 2004 [cited 2018 Jul 2] p. 52. Available from: <https://www.libreriadelau.com/ntciso-56673-calidad-del-agua-muestreo-parte-3-directrices-para-la-preservacion-y-manejo-de-las-muestras-icontec-null-ingenieria-industrial/p>
18. NMX-AA-036-SCFI-2001. Análisis de agua - Determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas - Método de prueba [Internet]. México DF; 2001 [cited 2018 Jul 2] p. 22. Available from: <https://agua.org.mx/biblioteca/nmx-aa-036-scfi-2001-analisis-de-agua-determinacion-de-acidez-y-alcalinidad-en-aguas-naturales-residuales-y-residuales-tratadas-metodo-de-prueba/>
19. Vivaldi GA, Stellacci AM, Vitti C, Rubino P, Pedrero F, Camposeo S. Nutrient uptake and fruit quality in a nectarine orchard irrigated with treated municipal wastewaters. *Desalination and Water Treatment*. 2017;71:312–320. doi:10.5004/dwt.2017.20564
20. Ponce N, Alfonso E, Cañete C. Evaluación y predicción de impactos ambientales en la minería. *Ministerio de la Industria Básica*; 1997 p. 35–40. (Archivo Técnico Empresa Geominera de Pinar del Río).
21. Schlesinger WH. Biogeoquímica: un análisis del cambio global [Internet]. 1st ed. Barcelona, España: Ariel; 2000 [cited 2018 Jul 2]. Available from: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=106667>
22. Parkhurst D., Appelo CA. Description of input and examples for PHREEQC version 3—A computer program for speciation, batch reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations: U.S. Geological Survey Techniques and Methods [Internet]. Vol. book 6. USGS; 2013 [cited 2018 Jul 3]. 497 p. Available from: <https://pubs.usgs.gov/tm/06/a43/>
23. Cañete C, Jornada A, Marmoz J, Ponce N, Milián-Milián E, Barrios E. Riesgos ambientales provocados por el pasivo ambiental minero Santa Lucía, Pinar del Río. In: *IV Congreso Cubano de Minería (MINERIA 2011)*. In Cierre de Minas y Pasivos Mineros Ambientales; 2011. p. 11.
24. Gallardo D, Cabrera I, Bruguera N, Madrazo F. Evaluación de impactos ambientales provocados por la actividad minera en la localidad de Santa Lucía, Pinar del Río. *Avances*. 2013;15(1):98–116.
25. Klimchuk O. Caracterización evolutiva preliminar de la contaminación ambiental en las áreas aledañas al yacimiento Santa Lucía. [Pinar del Río]: Universidad de Pinar del Río “Hermanos Saíz Montes de Oca”-Facultad de Geología y Mecánica; 2014.
26. Fis Y. Evaluación minero-ambiental del yacimiento polimetálico Castellano en la provincia de Pinar del Río. *Ciencia & Futuro*. 2017;7(2):23–44.
27. Resolución 631 de 2015 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Colombia. Diario Oficial No. 49.486 [Internet]. 2015 [cited 2018 Jul 3]; Available from: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=70346>
28. Norma de Calidad Ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua (Anexo I, Libro VI: De la Calidad Ambiental, del Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente). Decreto N° 3.516 [Internet]. [cited 2018 Jul 3]; Available from: <https://www.ecolex.org/details/legislation/decreto-no-3516-norma-de-calidad-ambiental-y-de-descarga-de-efluentes-recurso-agua-anexo-i-libro-vi-de-la-calidad-ambiental-del-texto-unificado-de-la-legislacion-secundaria-del-ministerio-del-ambiente-lex-faac112180/>

Recibido: 4 de diciembre de 2017

Aceptado: 8 de mayo de 2018