ALFA
Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias

ALFA. Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias
Mayo-agosto 2025 / Volumen 9, Número 27
ISSN: 2664-0902 / ISSN-L: 2664-0902
https://revistaalfa.org
pp. 91 - 104

Impacto ambiental hídrico en las bocaminas del centro minero La Rinconada, Puno

Environmental impact on water in the mine mouths of La Rinconada mining center, Puno

Impacto ambiental da água na boca da mina do centro de mineração La Rinconada, Puno

Francisco Fuentes Ruiz[1,2]
fraingruiz@gmail.com

Javier Mamani Paredes[1,2]
javierparedes@unap.edu.pe

Holger Saul Ccari Apaza[1,2]
holgersaul7@gmail.com

Luz Marina Teves Ponce[1,2]
ltevesp@unap.edu.pe

Anibal Sucari León[1,3]
asucari@unap.edu.pe

[1]**Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú**
[2]**Escuela de Posgrado UNA. Doctorado en Ciencia Tecnología y Medio Ambiente. Puno, Perú**
[3]**Instituto de Investigación y Desarrollo Andino Amazónico, IIDEAA. Puno, Perú**

ARTÍCULO ORIGINAL

Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:
https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v9i27.398

Artículo recibido: 3 de julio 2025 / **Arbitrado:** 29 de agosto 2025 / **Publicado:** 10 de septiembre 2025

RESUMEN

La actividad minera a pequeña escala realiza vertimientos de agua de mina sin realizar tratamiento alguno los cuales contienen diferentes metales pesados y son causantes en problemas de la calidad del agua afectando a todo ser vivo generando problemas de conflicto social con las áreas de influencia de la mina. Se planteó como objetivo de la investigación determinar el impacto ambiental hídrico en las bocaminas del centro minero La Rinconada – Puno. La metodología que se aplicó fue un enfoque cuantitativo, tipo de investigación no experimental ya que no se manipuló ninguna variable, el diseño fue descriptivo transversal, se tomó como muestra 500 ml de agua por bocamina de las 03 bocaminas seleccionadas, mediante plasma de acoplamiento inductivo – espectrometría de emisión atómica EPA METHOD 200.7 con tres repeticiones para cada muestra. Los principales resultados fueron que el agua no es apta para ninguna categoría o subcategoría respecto a las ECAs. Concluye que se logró determinar el impacto ambiental hídrico en las 03 bocaminas del centro minero La Rinconada – Puno, siendo un impacto negativo debido a sus altas concentraciones de metales pesados respecto a las ECAs para aguas del Perú, no es apto para la producción de agua potable, recreación, riego de vegetales y bebida de animales.

Palabras clave: Agua de mina; Bocamina; Impacto ambiental; Metales pesados; Parámetros inorgánicos

ABSTRACT

Small-scale mining activity discharges mine water without any treatment, which contains different heavy metals and causes water quality problems affecting all living beings and generating social conflict problems with the areas of influence of the mine. The objective of the research was to determine the environmental water impact in the mine mouths of the mining center La Rinconada - Puno. The methodology applied was a quantitative approach, type of non-experimental research since no variable was manipulated, the design was descriptive transversal, 500 ml of water was sampled per mine mouth of the 03 selected mine mouths, using inductive coupling plasma - atomic emission spectrometry EPA METHOD 200.7 with three repetitions for each sample. The main results were that the water is not suitable for any category or subcategory with respect to the ECAs. It concludes that was able to determine the environmental water impact in the 03 mine mouths of the mining center La Rinconada - Puno, being a negative impact due to its high concentrations of heavy metals with respect to the ECAs for waters of Peru, it is not suitable for the production of drinking water, recreation, irrigation of vegetables and animal drinking.

Key words: Mine water, Mine mouth, Environmental impact, Heavy metals, Parameters inorganic

RESUMO

A atividade de mineração em pequena escala descarrega água da mina sem nenhum tratamento, que contém diferentes metais pesados e causa problemas de qualidade da água que afetam todos os seres vivos, gerando problemas de conflito social com as áreas de influência da mina. O objetivo da pesquisa foi determinar o impacto ambiental da água na boca da mina do centro de mineração La Rinconada - Puno. A metodologia aplicada foi uma abordagem quantitativa, tipo de pesquisa não-experimental, pois nenhuma variável foi manipulada, o desenho foi descritivo transversal, 500 ml de água foram amostrados por boca de mina das 03 bocas de mina selecionadas, usando plasma de acoplamento indutivo - espectrometria de emissão atômica EPA METHOD 200.7 com três repetições para cada amostra. Os principais resultados foram que a água não é adequada para nenhuma categoria ou subcategoria com relação aos ECAs. Conclui-se que o site foi capaz de determinar o impacto ambiental da água nas 03 bocas de mina do centro de mineração La Rinconada - Puno, sendo um impacto negativo devido às suas altas concentrações de metais pesados em relação às ECAs para as águas peruanas, não sendo adequada para a produção de água potável, recreação, irrigação de vegetais e consumo animal.

Palavras-chave: Água de mina; Boca de mina; Impacto ambiental; Metais pesados; Parâmetros inorgânicos

INTRODUCCIÓN

La explotación de un yacimiento minero contribuye a la economía de un país y debido al vertimiento de aguas industriales sin tratamiento genera una contaminación ambiental afectando a la agricultura y salud pública, se analizó muestras de agua de 15 lugares diferentes utilizando un espectrómetro de absorción atómica para cuantificar los niveles de metales pesados de níquel, zinc, fierro, plomo, cobre y cromo, llegando a la conclusión de que los niveles de contaminación por metales pesados son considerados como severos (1). Así mismo la responsabilidad ambiental de las empresas mineras es una preocupación nacional ya que contaminan las aguas subterráneas y superficiales debido a la generación de drenaje ácido de mina que contiene metales pesados afectando la salud de los seres vivos (2).

Por otra parte, la actividad minera está relacionada con el problema del agua, ya sea por la utilización en sus diferentes procesos y en la calidad del agua, los impactos directos en el agua son considerados como una causa principal del problema en los conflictos sociales con las población y organizaciones mineras (3)

Las aguas residuales provenientes de la actividad minera, genera un cambio en sus propiedades físicas y químicas del agua debido a la presencia de metales pesados ocasionando problemas ambientales severos ya que son considerados como tóxicos afectando a los seres vivos, encontrando una alternativa de tratamiento para las aguas residuales utilizando el marlo de maíz ya que logró remover el 97 % de concentración de Plomo II (4). Por otra parte, el drenaje ácido de mina contamina el agua dulce a nivel global ya sea subterráneo o superficialmente, por lo que, el drenaje ácido de mina y los metales pesados afectan significativamente a la biodiversidad y la biorremediación natural ocurre en el pasar de los años (5).

Los análisis de metales pesados en suelos de la cuenca del río Ica durante la estación seca revelaron concentraciones detectables de arsénico, bario, plomo y cromo, las cuales, en su mayoría, no superaron los límites del Estándar de Calidad Ambiental (ECA). Estos resultados indicaron una presencia controlada de los contaminantes, sin riesgos inmediatos. Aunque se identificaron residuos en el cauce fluvial, no se encontró una correlación con niveles críticos de contaminación edáfica, lo que sugirió mecanismos naturales de mitigación o un impacto limitado de los desechos (6).

Todas las actividades desarrolladas en la explotación de la cantera de San Luis de Alba que generan mayores impactos negativos sobre los componentes ambientales como la preparación de vías de acceso, la extracción y el transporte de rocas. Sin embargo, es importante destacar que también se generaron impactos beneficiosos que permitieron dinamizar el comercio local y generación de puestos de empleo los resultados obtenidos sugieren que se deben planificar

acciones preventivas y correctivas antes de la ejecución de estos proyectos de manera que se puedan mitigar los impactos negativos más considerables (7).

En las minas de carbón las empresas realizan un tratamiento del agua de mina mediante un estudio de las características del agua de mina y aplicación de la tecnología del vertido cero del agua de mina, incluyendo el pretratamiento, concentración, reducción, evaporación y cristalización (8).

La alternativa óptima para el tratamiento de los drenajes de la actividad minera considerando como base las características fisicoquímicas de los efluentes, la caracterización geoquímica de materiales mineros y los análisis en laboratorio de alternativas de tratamiento, el tratamiento de efluentes que tienen concentraciones altas respecto a metales pesados es favorable implementar la Neutralización Secuencial ya que permite minimizar el consumo de los reactivos en la planta y la posibilidad de estudiar y recuperar los lodos ricos en metales, se logró identificar que la calidad de los efluentes varía según la litología y zona mineralizada que haya contactado la Galería o el Nivel de la mina, por tanto, es posible agruparlas por similitud de pH y carga metálica para conducirlas y tratarlas por separado (9).

Con el fin de evidenciar la efectividad de esta técnica en la descontaminación de soluciones residuales que actualmente representan una fuente de impacto ambiental, se recurrió a métodos empíricos como el muestreo, la observación, el análisis estadístico y el diseño factorial, los resultados obtenidos indican que la flotación constituye una alternativa eficiente para el tratamiento del drenaje ácido de la Mina Grande del Cobre, logrando soluciones con niveles de iones metálicos inferiores a los límites máximos permitidos por la normativa cubana (10).

La superpoblación y la urbanización han provocado crisis hídricas, y el agua de minas abandonadas se ha convertido en una fuente de agua alternativa para algunos países. Este estudio optimiza el potencial del biocarbón derivado del compost de champiñones gastados, un recurso de biomasa rentable y localmente abundante, para eliminar metales pesados específicos (cobre - Cu, manganeso - Mn, hierro - Fe, y plomo - Pb) que se encuentran comúnmente en el agua de minas abandonadas, La mayor eliminación se produjo a 500 ◦C para Cu (2,573 mg/g), Mn (1,522 mg/g) y Pb (2,491 mg/g), concluyendo que el biocarbón derivado del compost de champiñones gastados es una alternativa para el tratamiento de efluente de la actividad minera (11).

Las explotaciones mineras deben tener en cuenta unos límites de vertido de aguas residuales cada vez más estrictos para diversos contaminantes, como los metales pesados y los sólidos en suspensión, en este trabajo se trató de resolver estos problemas evaluando la CE en

el tratamiento de aguas de mina mediante un sistema piloto acoplado a la microfiltración (MF) y la ultrafiltración (UF) con membranas cerámicas, la evaluación de la CE se realizó utilizando muestras de campo de agua de mina de un concentrador norteamericano. En condiciones óptimas, la CE eliminó más del 95% de Cr, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti y Zn del agua de mina (12).

Se llevó a cabo la caracterización del agua residual generada en los sanitarios portátiles de la mina Marlín, utilizando como referencia el promedio de los resultados obtenidos en el análisis de tres muestras. Se evaluaron 14 parámetros seleccionados por su relevancia en el proceso de caracterización. Los resultados mostraron concentraciones superiores a las típicas del agua residual doméstica, destacando valores promedio de DQO de 34,840 mg/l y DBO_5 de 10,920 mg/l. Asimismo, se registraron 54,320 mg/l de sólidos totales, 51,200 mg/l de sólidos suspendidos y 3,120 mg/l de sólidos disueltos. La relación DBO_5/DQO, conocida como índice de biodegradabilidad, fue de 0.31 (13).

La contaminación del agua procedente de las minas de carbón abandonadas es la segunda fuente de contaminación del agua dulce, después de las aguas residuales, y en las cuencas carboníferas el agua de las minas puede ser el contaminante dominante, ya que el hierro oxidado asfixia el lecho de los ríos receptores, El CO2 derivado de la piedra caliza se correlacionó positivamente con las altas concentraciones de sulfato, que dieron lugar a ácido sulfúrico y provocaron la disolución del carbonato de la piedra caliza. Las aguas de la mina experimentaron una importante amortiguación de carbonatos, volviéndose sólo ligeramente ácidas (pH 6-7), pero con una importante pérdida de carbono inorgánico. Las aguas de la mina tenían bajo oxígeno disuelto (6-25 %) y altas concentraciones de hierro disuelto (2 a 65 mg l-1) y manganeso (0,5 a 5 mg l-1) (14).

El estudio explora la viabilidad técnica de la utilización de aguas residuales de explotaciones mineras abandonadas, concretamente el drenaje ácido de minas (DAM), como solución de electrodo en una pila de electrodiálisis inversa (RED) para la producción de energía. Mediante experimentos en los que se utilizó una pila RED con soluciones de electrodos variables, se determinó que el sistema alcanzaba una densidad de potencia máxima de 0,327 W m-2 par de células (5,01 W m-2 electrodo) cuando se utilizaban mezclas simples de iones Cu2+ y Fe2+ , en consonancia con investigaciones anteriores sobre el par redox Fe2+/Fe3+, Una prueba de larga duración mostró un ligero aumento del pH en la solución del electrodo, pero lo más importante es que no se produjo deposición de metales en la superficie del electrodo, ya que el pH se mantuvo constantemente por debajo de 3,5 durante toda la prueba. Estos resultados indican el potencial

ALFA
Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias

del AMD como solución de electrodo viable, ofreciendo una vía prometedora para futuras investigaciones en el desarrollo de sistemas RED más sostenibles (15).

El objetivo de la investigación fue determinar impacto ambiental hídrico en las bocaminas del centro minero La Rinconada – Puno, por otra parte, se propuso objetivos específicos como: determinar los metales pesados que presentan mayor concentración en las aguas de las bocaminas del centro minero La Rinconada, comparar los Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) para aguas del Perú con los resultados de los parámetros inorgánicos de las aguas de las bocaminas del centro minero La Rinconada.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se desarrolló en la zona del altiplano región de Puno, siguiendo el enfoque cuantitativo, tipo de investigación no experimental con un diseño descriptivo transversal ya que se tomaron las muestras en un solo momento para poder analizar en el laboratorio, las muestras de agua fueron 500ml por bocamina tomadas del interior de 03 bocaminas del centro minero La Rinconada en botellas descartables y transportadas en un cooler para conservar la temperatura del ambiente, la determinación fue de metales y oligoelementos en agua y residuos mediante plasma de acoplamiento inductivo – espectrometría de emisión atómica EPA METHOD 200.7 con tres repeticiones para cada muestra de los parámetros inorgánicos en el laboratorio de ensayo y control de calidad de la UCSM, por otra parte se tuvo que recurrir al D.S. 004-2017-MINAM Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) para aguas del Perú.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para lograr este objetivo se tuvo que analizar los parámetros inorgánicos, se consideró como resultados el promedio de las tres repeticiones del análisis de las muestras, los cuales fueron tomados de 03 bocaminas con la finalidad de determinar los metales pesados que presentan mayor concentración en las aguas de las bocaminas del centro minero La Rinconada.

Tabla 1. Concentración de metales pesados en aguas por bocaminas.

N° de muestras	Parámetro inorgánico	Bocamina 1	Bocamina 2	Bocamina 3	Límite de detección	Límite de cuantificación
1	Plata	no detectable	no detectable	no detectable	0.3	0.0015
2	Aluminio	6.168	2.25	43.8	0.3765	1.8824
3	Arsénico	0.023	0.024	0.099	0.0048	0.024
4	Boro	0.019	0.024	0.023	0.0000	0.0000
5	Bario	0.038	0.041	0.029	0.0001	0.0005
6	Berilio	0.024	0.01	0.034	0.0000	0.0000

N° de muestras	Parámetro inorgánico	Bocamina 1	Bocamina 2	Bocamina 3	Límite de detección	Límite de cuantificación
7	Calcio	207.9	128.3	137.2	0.0002	0.0011
8	Cadmio	0.008	no detectable	0.016	0.0001	0.0005
9	Cobalto	0.257	0.135	0.901	0.0001	0.0005
10	Cromo	no detectable	no detectable	no detectable	0.0003	0.0015
11	Cobre	0.06	0.049	0.3	0.0009	0.0045
12	Hierro	42.82	8.619	57.87	0.001	0.0048
13	Potasio	5.322	5.389	3.416	0.0009	0.0046
14	Litio	0.182	0.146	0.317	0.0015	0.0075
15	Magnesio	33.83	46.58	50.49	0.0000	0.0000
16	Manganeso	5.707	8.918	9.289	0.0032	0.0159
17	Molibdeno	0.012	0.013	0.011	0.0009	0.0045
18	Sodio	20.36	14.51	13.92	0.0061	0.0304
19	Níquel	0.717	0.541	2.182	0.0007	0.0034
20	Fósforo	0.211	0.249	0.263	0.0126	0.063
21	Plomo	0.009	0.024	0.064	0.0004	0.0021
22	Antimonio	0.014	0.0011	0.013	0.0027	0.0135
23	Selenio	no detectable	no detectable	no detectable	0.0028	0.0141
24	Silicio	26.59	20.13	29.51	0.0072	0.036
25	Estaño	no detectable	no detectable	no detectable	0.0117	0.0585
26	Estroncio	1.74	1.663	1.138	0.0000	0.0000
27	Titanio	0.074	0.074	0.075	0.0000	0.0000
28	Talio	no detectable	no detectable	no detectable	0.0072	0.036
29	Vanadio	no detectable	no detectable	no detectable	0.0009	0.0044
30	Zinc	1.557	1.157	5.476	0.0003	0.0015

La Tabla 1, permite visualizar el promedio de las tres repeticiones que se realizó en el análisis de las aguas de las 03 bocaminas del centro minero La Rinconada, donde se consideró a 30 parámetros inorgánicos los cuales conforman los diferentes metales pesados.

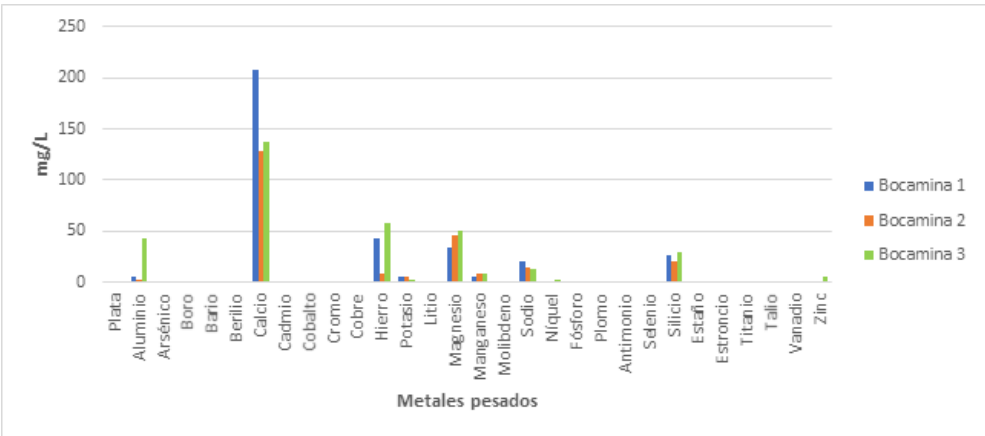

***Figura* 1**. Metales pesados con mayor concentración en aguas por bocaminas.

ALFA
Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias

La Figura 1, permite apreciar los metales pesados que tienen mayor concentración en las 03 bocaminas del centro minero La Rinconada, los metales pesados que se lograron determinar con mayor concentración son los siguientes: aluminio, calcio, hierro, potasio, magnesio, manganeso, sodio, silicio y zinc los cuales resaltan en las 03 bocaminas.

Respecto al segundo objetivo específico de comparar los Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) para aguas del Perú con los resultados de los parámetros inorgánicos de las aguas de las bocaminas del centro minero La Rinconada, se recurrió a la comparación con la Categoría 1: población y recreacional subcategoría A: aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable y subcategoría B: aguas superficiales destinados para recreación.

Tabla 2. Metales pesados en las bocaminas & ECAs Subcategoría A.

Muestras	Metales pesados	Bocaminas del centro minero La Rinconada			Aguas que pueden ser potabilizadas con desinfección	Aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional	Aguas que pueden se potabilizadas con tratamiento avanzado
		Bocamina 1	Bocamina 2	Bocamina 3	A1	A2	A3
1	Aluminio	6.168	2.25	43.8	0.9	5	5
2	Arsénico	0.023	0.024	0.099	0.01	0.01	0.15
3	Boro	0.019	0.024	0.023	2.4	2.4	2.4
4	Bario	0.038	0.041	0.029	0.7	1	**
5	Berilio	0.024	0.01	0.034	0.012	0.04	0.1
6	Cadmio	0.008	no detectable	0.016	0.003	0.005	0.01
7	Cromo	no detectable	no detectable	no detectable	0.05	0.05	0.05
8	Cobre	0.06	0.049	0.3	2	2	2
9	Hierro	42.82	8.619	57.87	0.3	1	5
10	Manganeso	5.707	8.918	9.289	0.4	0.4	0.5
11	Molibdeno	0.012	0.013	0.011	0.07	**	**
12	Níquel	0.717	0.541	2.182	0.07	**	**
13	Fósforo	0.211	0.249	0.263	0.1	0.15	0.15
14	Plomo	0.009	0.024	0.064	0.01	0.05	0.05
15	Antimonio	0.014	0.0011	0.013	0.02	0.02	**
16	Selenio	no detectable	no detectable	no detectable	0.04	0.04	0.05
17	Zinc	1.557	1.157	5.476	3	3	3

La Tabla 2, evidencia el resultado promedio de análisis de agua de las 03 bocaminas con los Estándares de Calidad Ambiental para agua, donde el Boro, Bario, Berilio, Cromo, Cobre, Molibdeno, Plomo, Antimonio, Selenio y Zinc se encuentran por debajo de los ECAs para agua, por otra parte, el Aluminio, Arsénico, Cadmio, Hierro, Manganeso, Níquel, y Fósforo son los que sobrepasan los ECAs para aguas esto quiere decir de que el efluente de las 03 bocaminas no es posible potabilizar para el consumo humano.

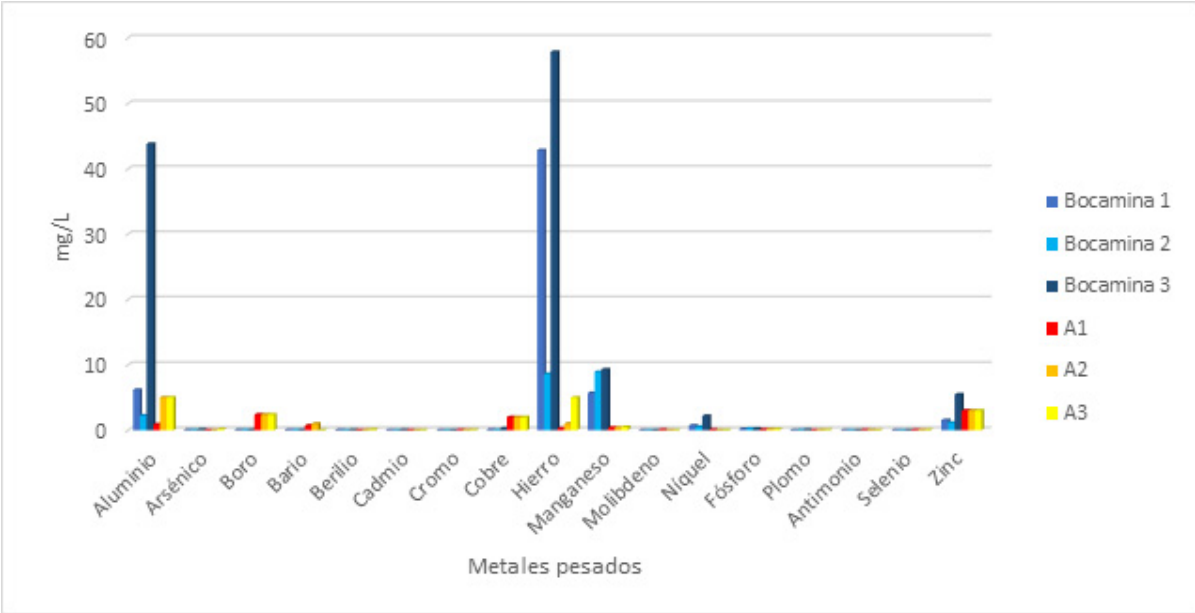

***Figura* 2**. Comparación de los resultados de metales pesados & ECAs Subcategoría A.

La Figura 2, muestra que en la bocamina 1 y bocamina 3 se tienen mayores concentraciones de metales pesados como el Aluminio, Hierro, Manganeso Níquel y Zinc los cuales superan los ECAs para aguas en el Perú esto imposibilita que estas aguas puedan recibir un tratamiento de potabilizar para el consumo humano.

ALFA
Revista de Investigación en Ciencias Agronómicas y Veterinarias

Tabla 3. Metales pesados en bocaminas & ECAs Subcategoría B.

Muestras	Metales pesados	Bocaminas del centro minero La Rinconada			Agua destinada para recreación - Contacto primario	Agua destinada para recreación - Contacto secundario
		Bocamina 1	Bocamina 2	Bocamina 3	B1	B2
1	Plata	no detectable	no detectable	no detectable	0.01	0.05
2	Aluminio	6.168	2.25	43.8	0.2	**
3	Arsénico	0.023	0.024	0.099	0.01	**
4	Boro	0.019	0.024	0.023	0.5	**
5	Bario	0.038	0.041	0.029	0.7	**
6	Berilio	0.024	0.01	0.034	0.04	**
7	Cadmio	0.008	no detectable	0.016	0.01	**
8	Cromo	no detectable	no detectable	no detectable	0.05	**
9	Cobre	0.06	0.049	0.3	2	**
10	Hierro	42.82	8.619	57.87	0.3	**
11	Manganeso	5.707	8.918	9.289	0.1	**
12	Níquel	0.717	0.541	2.182	0.02	**
13	Plomo	0.009	0.024	0.064	0.01	**
14	Antimonio	0.014	0.0011	0.013	0.006	**
15	Selenio	no detectable	no detectable	no detectable	0.01	**
16	Vanadio	no detectable	no detectable	no detectable	0.1	0.1
17	Zinc	1.557	1.157	5.476	3	**

La Tabla 3, muestra una comparación de los resultados promedios de las tres repeticiones de los análisis de muestras de agua de las bocaminas respecto a los ECAs para aguas Subcategoría B aguas superficiales destinadas para la recreación en el cual se evidencia que la Plata, Boro, Bario, Berilio, Cobre, Cadmio, Cromo, Selenio, Vanadio y Zinc durante el análisis no se logró detectar su presencia y/o están por debajo de los ECAs para agua sin embargo en el resto de los metales pesados.

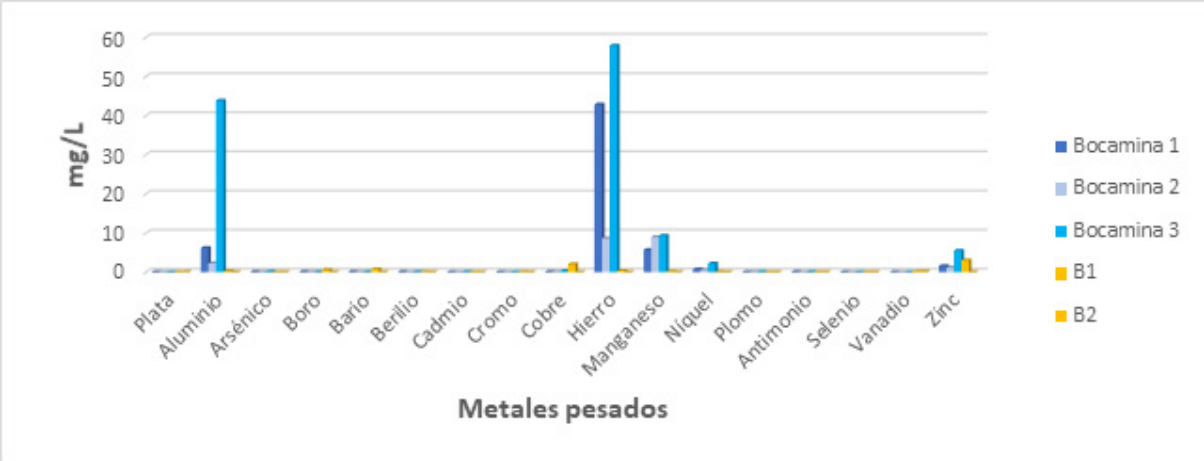

***Figura* 3**. Comparación de los resultados de metales pesados & ECAs Subcategoría B.

La Figura 3, evidencia que los resultados promedios de concentración de metales pesados en las aguas de las 03 bocaminas del centro minero tienen valores elevados que sobrepasan a los ECAs para aguas en el Perú, Aluminio, Hierro, Manganeso, Níquel y Zinc son los metales pesados con mayores concentraciones respecto al resto de metales pesados que fueron analizados, esto quiere decir que estas aguas no cumplen con la Subcategoría B aguas superficiales destinadas para la recreación.

Tabla 4. Metales pesados en las bocaminas & ECAs Categoría 3.

Muestras	Metales pesados	Bocaminas del centro minero La Rinconada			Agua para riego no restringido	Agua para riego restringido	Bebida de animales
		Bocamina 1	Bocamina 2	Bocamina 3	D1: riego de vegetales		D2: bebida de animales
1	Aluminio	6.168	2.25	43.8	5	5	5
2	Arsénico	0.023	0.024	0.099	0.1	0.1	0.2
3	Boro	0.019	0.024	0.023	1	1	5
4	Bario	0.038	0.041	0.029	0.7	0.7	**
5	Berilio	0.024	0.01	0.034	0.1	0.1	0.1
6	Cadmio	0.008	no detectable	0.016	0.01	0.01	0.05
7	Cobalto	0.257	0.135	0.901	0.05	0.05	1
8	Cromo	no detectable	no detectable	no detectable	0.1	0.1	1
9	Cobre	0.06	0.049	0.3	0.2	0.2	0.5
10	Hierro	42.82	8.619	57.87	5	5	**

Muestras	Metales pesados	Bocaminas del centro minero La Rinconada			Agua para riego no restringido	Agua para riego restringido	Bebida de animales
		Bocamina 1	Bocamina 2	Bocamina 3	D1: riego de vegetales		D2: bebida de animales
11	Litio	0.182	0.146	0.317	2.5	2.5	2.5
12	Magnesio	33.83	46.58	50.49	**	**	250
13	Manganeso	5.707	8.918	9.289	0.2	0.2	0.2
14	Níquel	0.717	0.541	2.182	0.2	0.2	1
15	Plomo	0.009	0.024	0.064	0.05	0.05	0.05
16	Selenio	no detectable	no detectable	no detectable	0.02	0.02	0.05
17	Zinc	1.557	1.157	5.476	2	2	24

La Tabla 4, evidencia la comparación de concentración de metales pesados en las 03 bocaminas del centro minero La Rinconada respecto a los ECAs para aguas del Perú Categoría 3: riego de vegetales y bebidas de animales. Donde se muestra que en la bocamina 1 y 3 existen metales pesados que sobrepasan los ECAs para aguas como el Aluminio, Cobalto, Hierro, Manganeso y Níquel. Por otra parte, en la bocamina 2 los metales que tiene concentraciones elevados en el Hierro y Manganeso, el resto de los metales pesados se encuentran dentro de los límites del ECAs para aguas.

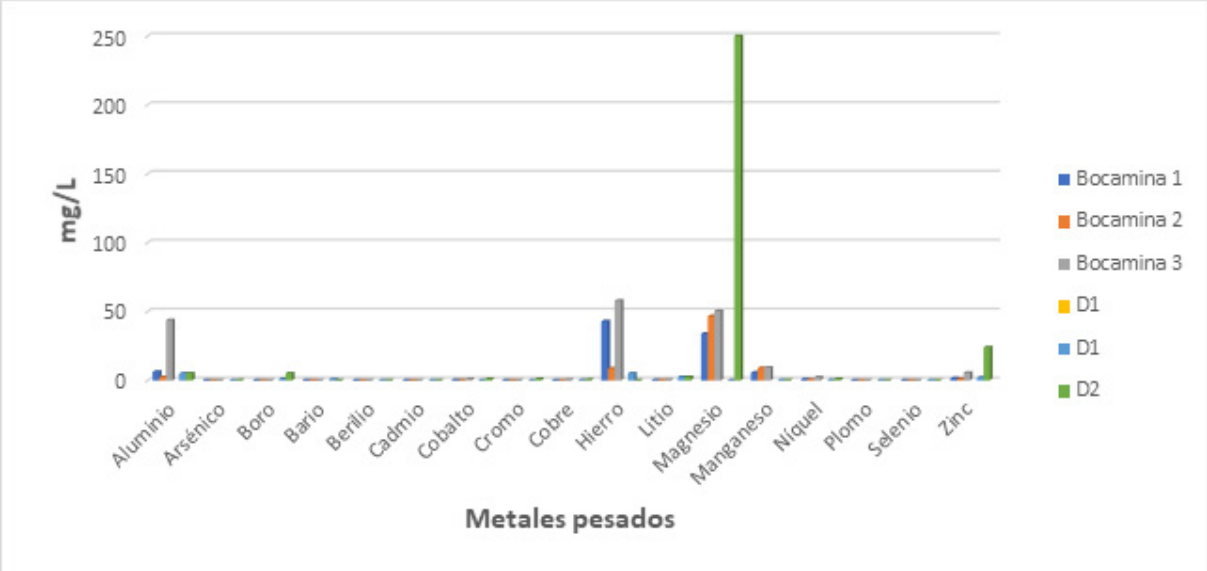

***Figura* 4**. Comparación de los resultados de metales pesados & ECAs Categoría 3.

La Figura 4, muestra una comparación de los metales pesados con los ECAs para aguas del Perú, se evidencia que el Aluminio, Hierro, Magnesio, manganeso, Selenio y Zinc tienen valores altos respecto a los demás metales pesados, esto significa que no se debe utilizar para actividades de regado de vegetales o bebida para animales ya que se considera como agua contaminada.

Una vez conocido los resultados de los objetivos específicos se logra conocer el objetivo general de la investigación mediante la determinación del impacto ambiental hídrico en las bocaminas del centro minero La Rinconada – Puno.

Tabla 5. Impacto ambiental hídrico en las bocaminas del centro minero La Rinconada.

Estándares de Calidad Ambiental para aguas - Perú		Bocamina 1	Bocamina 2	Bocamina 3
Subcategoría A: Aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable	A1	No apto	No apto	No apto
	A2	No apto	No apto	No apto
	A3	No apto	No apto	No apto
Subcategoría B: aguas superficiales destinadas para recreación	B1	No apto	No apto	No apto
	B2	No apto	No apto	No apto
Categoría 3: Riego de vegetales y bebida de animales	D1	No apto	No apto	No apto
	D1	No apto	No apto	No apto
	D2	No apto	No apto	No apto

La Tabla 5, muestra el impacto hídrico en las bocaminas del centro minero La Rinconada, según a los resultados se evidencia que debido a la concentración de valores altos de metales pesados en el efluente minero en referencia a los ECAs para aguas en el Perú, presentan un impacto negativo ya que no es apto para poder destinar a la producción de agua potable, por otra parte no es apto para poder destinar para la recreación y de forma similar no es apto para el riego de vegetales y bebida de animal.

Discusión

Los metales pesados que presentan mayor concentración en las aguas de las 03 bocaminas son el Aluminio, Calcio, Hierro, Potasio, Magnesio, Manganeso, Sodio, Silicio y Zinc, considerado como contaminación hídrica ya que cambió sus características físico – químicas del agua. Resultados que reafirman lo señalado por Zhang (8) ya que en su estudio menciona que es necesario conocer sus características del agua de mina para realizar un pretratamiento, concentración, reducción,

evaporación y cristalización. De forma similar Montesios (9), manifiesta que para un tratamiento de los efluentes de mina como base es conocer las características fisicoquímicas y de esta manera proponer una alternativa de tratamiento.

Al comparar con los Estándares de Calidad Ambiental para aguas del Perú con los resultados obtenidos de los parámetros inorgánicos de aguas de las 03 bocaminas el hallazgo fue que no es apto el agua para ser utilizado en la Subcategoría A, Subcategoría B y la Categoría 3, debido a su alto contenido de metales pesados. Estos resultados afirman lo mencionado por Oré (4) ya que en su investigación señala que la actividad minera realiza cambios significativos en las propiedades físico – químicas del agua ya que presentan diferentes metales pesados y son considerados como tóxicos ya que afecta a los seres vivos. De forma similar Dean (5), señala que el efluente de la actividad minera contamina el agua dulce y la presencia de metales pesados en el agua afecta a la biodiversidad.

Se determinó el impacto ambiental hídrico en las 03 bocaminas del centro minero siendo un impacto negativo debido a su alto contenido de metales pesados y valores elevados en comparación con las ECAs para aguas del Perú no es apto para la producción de agua potable, recreación, riego de vegetales y bebida de animales. Estos resultados tienen coherencia con Tanjil (1), ya que manifiesta que vertimiento de efluentes mineros sin tratamiento genera una contaminación ambiental causando problemas en la agricultura y salud pública. Por otro lado, Thomashausen (3), manifiesta que la actividad minera tiene relación con problemas en el agua y es una causa para los problemas de conflictos sociales con la sociedad.

CONCLUSIONES

Se logró determinar los metales pesados que presentan mayor concentración en las aguas de las 03 bocaminas del centro minero La Rinconada siendo el Aluminio, Calcio, Hierro, Potasio, Magnesio, Manganeso, Sodio, Silicio y Zinc en comparación con los otros metales pesados.

Por otra parte, se realizó la comparación de los Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) para aguas del Perú con los resultados obtenidos de los parámetros inorgánicos de las aguas de las 03 bocaminas se encontró que no es apto para ser utilizada el agua en la Subcategoría A, Subcategoría B y la Categoría 3.

Finalmente se concluye que se logró determinar el impacto ambiental hídrico en las 03 bocaminas del centro minero La Rinconada – Puno, siendo un impacto negativo debido a sus altas concentraciones de metales pesados respecto a las ECAs para aguas del Perú, no es apto para la producción de agua potable, recreación, riego de vegetales ni para bebida de animales.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran que no existe ningún conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

REFERENCIAS

1. Al Tanjil H, Alter H, Hossain M, Iba A. "Evaluation of physical and heavy metal contamination and their distribution in waters around Maddhapara Granite Mine, Bangladesh," Water Cycle. 2024; 5 (June): 286–296. doi: 10.1016/j.watcyc.2024.08.002.

2. Sucari A, Pastor W, Sucari R, Aroquipa Y, Chambi N, Ticona H. "Efecto del compostaje de desechos orgánicos municipales en la enmendación del drenaje ácido de mina," ALFA Rev. Investig. en Ciencias Agronómicas y Vet. 2023; 7 (19):103–116. doi: 10.33996/revistaalfa. v7i19.201.

3. Thomashausen S, Maennling N, Mebratu-Tsegaye T. "A comparative overview of legal frameworks governing water use and waste water discharge in the mining sector," Resour. Policy. 2018; 55 (July):143–151. doi: 10.1016/j.resourpol.2017.11.012.

4. Oré F, Lavado C, Bendezú S. "biosorción de pb (ii) de aguas residuales de mina usando el marlo de maíz (Zea mays) biosorption of lead pb (ii) from residual waters of mine by corncob (Zea mays)," Rev. la Soc. Química del Perú. 2015; 81 (2): 122–134. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2015000200005

5. Dean A et al. "Science of the Total Environment Metabolic adaptation of a Chlamydomonas acidophila strain isolated from acid mine drainage ponds with low eukaryotic diversity," Sci. Total Environ. 2019; 647:75–87. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.07.445.

6. Zender V, Córdova I, Pari J, Loyola E, Ambía D. "Presencia de metales pesados en suelos del cauce del río Ica en temporada seca Presence of heavy metals in soils of the Ica River bed during the dry season con acumulación de residuos sólidos (3). Este cadmio (Cd), plomo (Pb) y arsénico (As), vinc," ALFA Rev. Investig. en Ciencias Agronómicas y Vet. 2025; 9 (26):450–464. https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v9i26.358%0AValeria

7. Sucari-León A, Chambi-Condori N, Llanque-Maquera O. "Environmental impact assessment in the San Luis de Alba rock quarry, Puno, Perú," DYNA. 2022; 89 (220):195–202. doi: 10.15446/dyna.v89n220.92992.

8. Zhang S, Wu Q, Ji H. "Research on zero discharge treatment technology of mine wastewater," Energy Reports. 2022; 8: 275–280. doi: 10.1016/j.egyr.2022.01.014.

9. Montesios M. "Caracterización de efluentes de mina para elección de la alternativa óptima de tratamiento," Pontificia Universidad Católica del Perú, 2015. http://dx.doi.org/10.1016/j.bpj.2015.06.056%0Ahttps://academic.oup.com/bioinformatics/article-abstract/34/13/2201/4852827%0Ainternal-pdf://semisupervised-3254828305/semisupervised.ppt%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.str.2013.02.005%0Ahttp://dx.doi.org/10.10

10. Ramírez B, Coello A, Menéndez J. "Tratamiento por flotación del drenaje ácido de mina grande del cobre," Rev. Medio Ambient. y Min. 2017; 3:24–34. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522017000200003&lng=es&tlng=es

11. Madzin Z, Zahidi I, Talei A, Raghunandan M, Hermawan A, Karam D. "Optimising spent mushroom compost biochar for heavy metal removal: Mechanisms and kinetics in mine water treatment," J. Water Process Eng. 2024; 69. doi: 10.1016/j.jwpe.2024.106829.

12. Atallah C, Mosadeghsedghi S, Laleh S, Kenari D, Hudder M. "Desalination and Water Treatment," Desalin. Water Treat. 2018; 320 (June). doi: 10.5772/intechopen.72352.

13. Mejia J. "Análisis De Las Características Físicas Y Químicas, Del Agua Residual, Producida En Los Sanitarios Portátiles, Operados En La Mina Marlín," Agua, Saneam. Ambient. 2015; 10 (1):13–16 doi: 10.36829/08asa.v10i1.1440.

14. Brown A, Bass A, Garnett M, Skiba U, Macdonald J, Pickard A "Sources and controls of greenhouse gases and heavy metals in mine water: A continuing climate legacy," Sci. Total Environ. 2023; 906 (June). doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.167371.

15. Delgado-González Y, Muñoz-Morales M, López-Fernández E, Fernández-Morales F, Llanos J. "Valorization of abandoned mine wastewater for the production of energy in a reverse electrodialysis cell," Results Eng. 2023; 20 (October). doi: 10.1016/j.rineng.2023.101608.