

Artículo Original

La Producción Minera en el Norte de Potosí, Bolivia y su Efecto en la Contaminación Ambiental

Mining in Northern Potosí, Bolivia, and Its Impact on Environmental Pollution

Valentín Loredo Gareca¹, Eulogio Llanque Choque², José Valentín Loredo Teran³

*Autor de correspondencia: loredogarecav@gmail.com

¹Universidad Nacional "Siglo XX", Carrera de Ingeniería Agronómica, Potosí, Bolivia

²Gobierno Autónomo Municipal Chuquiuhuta, Producción y Medio Ambiente, Potosí, Bolivia

³ Empresa Gondwanaland, Catavi, Potosí, Bolivia

Recibido: 23/10/2024 Aceptado para publicación: 01/12/2024

Resumen

La actividad minera en Bolivia, especialmente en el departamento de Potosí, es clave para la economía de subsistencia, en los municipios de Colquechaca, Chuquiuhuta y Llallagua siendo agro-mineros. El objetivo de este estudio fue evaluar el grado de contaminación de suelo, agua y sedimentos en las subcuencas del Norte Potosí. Se utilizó una metodología descriptiva y un análisis de datos de campo respaldado por técnicas estadísticas. Las muestras de agua, sedimento y suelo fueron analizadas en laboratorios especializados con métodos físico-químicos. El pH de las aguas vertidas por los operadores mineros fue ácido, con valores entre 2.5 y 3.0 en Colquechaca, 6.58 a 7.10 en Chuquiuhuta, y 2.38 a 2.96 en Llallagua. Los metales pesados en agua, como Cd, Zn y Pb, fueron permisibles para la agricultura en la mayoría de los casos. Sin embargo, en Llallagua y Catavi, se encontraron concentraciones de metales como Ar, Cd, Cu, Fe y Zn por encima de los límites permisibles, especialmente en cuerpos de agua cercanos a los yacimientos mineros. La contaminación, originada por pasivos ambientales y lixiviados mineros, afecta gravemente los recursos naturales y el medio ambiente.

Palabras clave: contaminación ambiental, metales pesados, operadores mineros

Abstract

Mining activity in Bolivia, particularly in the Potosí department, is vital for the subsistence economy, with the municipalities of Colquechaca, Chuquiuhuta, and Llallagua classified as agro-mining areas. The objective of this study was to assess the degree of soil, water, and sediment contamination in the sub-basins of the Norte Potosi. A descriptive methodology was employed, supported by field data analysis and statistical techniques. Water, sediment, and soil samples were analyzed in specialized laboratories using physicochemical methods. The pH of waters discharged by mining operators was acidic, with values ranging from 2.5 to 3.0 in Colquechaca, 6.58 to 7.10 in Chuquiuhuta, and 2.38 to 2.96 in Llallagua. Heavy metals in water, such as Cd, Zn, and Pb, were mostly within permissible limits for agriculture. However, in Llallagua and Catavi, concentrations of metals like As, Cd, Cu, Fe, and Zn exceeded permissible thresholds, especially in water bodies near mining deposits. This contamination, caused by environmental liabilities and mining leachates, severely impacts natural resources and the environment.

Keywords: environmental pollution, heavy metals, mining operators

Introducción

La economía de Bolivia se basa sobre todo en la actividad minera, principalmente, en los departamentos de Potosí y Oruro. Esta se lleva a cabo de manera irracional, lo cual, ha ocasionado múltiples problemas de contaminación ambiental. Actualmente, se han alcanzado valores elevados de contaminantes en los alrededores de gran parte de las explotaciones mineras, convirtiendo a ésta en una de las actividades que mayor impacto ambiental negativo genera en los factores ecológicos como el agua, aire, suelo, flora y fauna, la salud humana y, en consecuencia, sobre la calidad de vida de los pobladores aledaños a las poblaciones mineras (Loredo *et al.*, 2013).

El drenaje ácido de mina (DAM) o aguas acidas de mina (AAM) representa uno de los mayores problemas ambientales en la región Occidental de Bolivia, principalmente en el departamento de Oruro y Potosí, donde se encuentra la mayor cantidad de operadores mineros, siendo ella la más representativa a nivel nacional (Araníbar *et al.*, 2023). Las emisiones provocadas por las extracciones mineras provocan la presencia de elevados contenidos en metales pesados en algunos suelos y sedimentos del altiplano y la cordillera central boliviana (Kossoff *et al.*, 2013). En los suelos cercanos a los centros mineros, es muy importante evaluar la presencia de metales pesados y otros, debido a su incidencia sobre la fertilidad de suelos y a su elevada toxicidad para las plantas, animales y el hombre. Las actividades mineras del departamento de Potosí han sido clasificadas como mas peligrosas del mundo para el medio ambiente (Alvizuri Tintaya, 2023).

El deterioro de los recursos naturales y la salud humana pueden tener un efecto negativo, en el potencial de crecimiento de una región en el largo plazo; aún si se obtienen beneficios económicos inmediatos para las empresas (Kossoff *et al.*, 2013). Por lo tanto, es importante que las actividades mineras sean llevadas a cabo de modo que sus impactos sean reducidos al mínimo posible. Sin embargo, algunos metales pesados son necesarias para las plantas en pequeñas cantidades llamadas oligoelementos o micronutrientes (cobre, zinc, cobalto), por lo que, requieren ser determinadas con mucha precisión, debido a que en cantidades un poco mayores ya son tóxicos y por consiguiente tienen efectos nocivos.

Los municipios del Norte de Potosí, como Colquechaca, Chuquihuta, Uncía y Llallagua, son considerados dentro su actividad económica como Agro mineros, mismos que basan su economía en la actividad agropecuaria y la minería pequeña a través del sistema cooperativizada (Arano Vargas, 2012), actividad de sobrevivencia como operadores mineros vierten sus desechos de activos ambientales a los ríos de la cuenca del Río Grande, contaminando de ésta manera a los recursos hídricos, edafológicos y al medio ambiente en particular.

Por tanto, el objetivo del presente estudio es determinar el grado de contaminación de los recursos suelo, agua y sedimentos por efecto del vertido de desechos de minería y aguas ácidas en la subcuencas del Norte Potosí, la misma que permitirá elaborar planes, programas y proyectos de remediación ambiental, además de implementar estrategias de cumplimiento de la normativa ambiental a los operadores mineros por parte de los gobiernos locales, regionales y del propio estado boliviano.

Materiales y métodos

Área geográfica

La cuenca del Río Grande abarca tres áreas geológicas principales: la cordillera oriental, la faja subandina y la llanura del Chaco-Beniano. En la cordillera oriental, caracterizada por un relieve invertido y montañas que oscilan entre 2,560 y 5,000 m, predominan formaciones geológicas con intrusiones terciarias. La faja subandina presenta secuencias de areniscas del sistema carbónico-cretácico, propensas a erosión. El cinturón andino de estaño, al que pertenecen las minas del norte de Potosí, contiene mineralización rica en casiterita, esfalerita, pirita y galena, explotadas desde la época colonial hasta la actualidad (MMAyA, 2015). Las minas del Norte de Potosí pertenecen al Cinturón Andino de estaño, que se extiende desde Perú hasta Argentina. El yacimiento, de edad miocena, está asociado a rocas subvolcánicas y plutónicas félsicas. Explotadas desde la época colonial, estas minas han sido una de las principales fuentes de plata del Alto Perú. Desde 1896, se extraen también estaño,

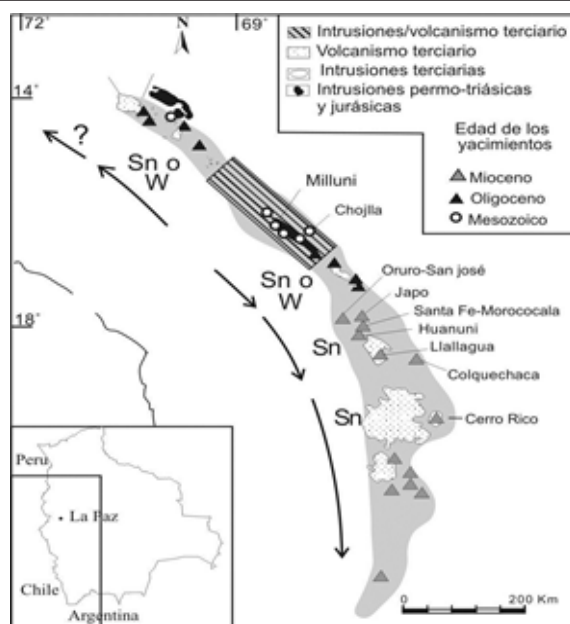


Figura 1. Localización de la Faja Estannífera boliviana y sus depósitos principales (Modificada de Mlynarczyk M. y Williams-Jones A.E., 2005)

plomo y zinc, con mineralización rica en casiterita, esfalerita, pirita, sulfosales y galena.

Hidrografía del área de intervención

La cuenca hidrográfica del Río Grande forma parte de la cuenca del Amazonas y cubre 103,449 km², abarcando el 10 % del territorio boliviano. Nace en las montañas de Potosí, Oruro, Cochabamba y Chuquisaca, extendiéndose hasta Santa Cruz y desembocando en el río Mamaré. Sus principales afluentes incluyen los ríos Chayanta, Colorado, Chuquiuhuta, Ventilla y San Pedro, entre otros (MMyA, 2015). La cuenca del Amazonas tiene sus orígenes en el río Maylanco departamento de Cochabamba, que posteriormente, toma el nombre de río Rocha, ella desemboca en el río Caine conjuntamente el río Arque; por su parte los afluentes de la cuenca del río Caine son las micro cuencas del río Chayanta, río Colorado municipio de Pocoata, río Chuquiuhuta, río ventilla, río Caripuyo, río Colcha y río San Pedro entre otros del Norte de Potosí.

Fases de estudio

La investigación se desarrollará en cuatro fases: revisión documental para recopilar estudios previos y normativas ambientales; muestreo en campo en puntos estratégicos de Colquechaca, Chuquiuhuta y Llallagua, priorizando zonas de impacto minero; análisis en laboratorio de parámetros fisicoquímicos y metales pesados mediante metodologías estandarizadas; y procesamiento estadístico con análisis descriptivo y correlacional para identificar patrones entre las variables.

Variables de estudio

Las variables dependientes incluyen pH, conductividad eléctrica y niveles de Cd, Pb, Zn, As, Cu y Fe, mientras que las independientes son la proximidad y tipo de actividad minera. Se emplearán equipos como medidores de pH, CE y fluorescencia de rayos X portátil (PXRF, modelo Niton XL3t) bajo el estándar EPA 6200, comparando los resultados con normas internacionales del Council of the European Communities (1986).

Muestreo y análisis

Se realizaron muestreos de agua, sedimentos y suelo en localidades clave. En Chuquiuhuta se evaluaron cinco sitios de agua (pH y conductividad eléctrica) y tres de sedimentos (metales pesados). En Llallagua se analizaron seis cooperativas mineras para agua y cuatro puntos de sedimentos. Para el suelo, se muestrearon 13 localidades en Colquechaca y varias comunidades agrícolas en Llallagua. El análisis de muestras de aguas, sedimento y suelo, se efectuaron en el laboratorio de suelos de la Universidad Nacional "Siglo XX" para pH y Conductividad Eléctrica; mientras que, para el análisis químico, de contenido de metales pesados se realizaron en el laboratorio de SPECTROLAB, de la carrera

de Metalurgia de la Universidad Técnica de Oruro, las muestras previa preparación metodológica, fueron analizadas mediante un portátil de fluorescencia de rayos X (PXRF" Niton XL3t ") para los elementos As, Ba, Cu, Fe, Pb y Zn, según la EPA 6200 el método (US-EPA, 2007). La calidad de estos análisis se ha verificado mediante la comparación de los resultados con valores obtenidos por técnicas convencionales. Para determinar el grado de contaminación en el área de estudio, se consideró los parámetros de pH, conductividad eléctrica, y metales pesados en agua, sedimento y suelo.

Resultados

Contaminación en la cuenca Colquechaca

El pH y la conductividad eléctrica en sedimento, las aguas vertidas desde los socavones mineros presentan un pH de 2,5 a 3,0, generando condiciones ácidas que impactan negativamente en los ecosistemas del río Grande de Colquechaca. El drenaje ácido de mina (DAM), con un caudal de 30 a 40 l/s, es la principal fuente de contaminación, afectando la biodiversidad acuática. La Tabla 1, muestra el pH y la conductividad eléctrica (CE) de los sedimentos en diferentes puntos de la cuenca. La correlación entre el pH y la CE evidencia que las comunidades alejadas presentan una salinidad baja y sedimentos menos ácidos. En contraste, las comunidades cercanas a las operaciones mineras tienen una CE alta y un pH ácido, indicando mayor contaminación.

Tabla 1. pH y Conductividad Eléctrica sedimento cuenca Colquechaca

Punto de muestreo	pH	C.E. (mmhos cm-1)	Salinidad
La Palca	2,95	580	Media
Churicala	5,85	720	Alta
Macha – Kcona Kcona	6,38	630	Media
Cruce Esquena	6,80	50	Baja
Huancarani 2	7,08	80	Baja
Ferrocruz	7,42	110	Baja

El contenido de metales pesados en suelos, durante la época húmeda analizó la concentración de As, Pb, Zn y Cd, cuyos resultados se presentan en la Tabla 2. El cadmio presenta concentraciones elevadas en Churicala y Kcona Kcona, superando los límites permisibles, indicando un grado de contaminación alto. En el caso del plomo, solo en La Palca se observa una concentración significativa (30,2 ppm), aunque dentro de los límites tolerables. Para el zinc, las concentraciones son intermedias en comunidades como Churicala y Kcona Kcona.

Tabla 2. Concentración de metales pesados en cuenca Colquechaca

N°	Comunidad	Altura (m)	As (ppm)	Cd (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)
N	Límite de detección		0,003	0,01	0,1	0,05
Sm1	La Palca	3623	<0,003	1,64	30,2	14,64
Sm2	Churicala	3567	<0,003	4,99	<0,1	146,1
Sm3	Macha-Viscachiri	3558	<0,003	1,70	<0,1	19,87
Sm4	Maha Kcona	3510	<0,003	5,74	<0,1	150,69
Sm5	Cruce Esquena	3434	<0,003	1,14	<0,1	17,83
Sm6	Lucascagua	3432	<0,003	3,00	<0,1	61,59
Sm7	Finca Esquena	3431	<0,003	2,69	<0,1	46,73
Sm8	Centro Esquena	3424	<0,003	1,45	<0,1	13,09
Sm9	Huancarani 2	3410	<0,003	1,70	<0,1	19,72
Sm10	Huancarani 2	3384	<0,003	2,07	<0,1	27,84
Sm11	Fesocruz	3372	<0,003	1,08	<0,1	12,89
Sm12	Hunacarani 1	3375	0,005	1,20	<0,1	10,69
Sm13	Pasto Pampa	3357	<0,003	0,52	<0,1	1,87

Contaminación en la microcuenca Chuquihuta

El pH y la conductividad eléctrica en agua, en la microcuenca Chuquihuta, varían según la proximidad a las operaciones mineras, como se detalla en la Tabla 3. El agua cercana a las bocaminas presenta pH neutro debido al tratamiento de los minerales, tornándose ácida en comunidades intermedias como Tacopalca y Morochata. La CE oscila entre alta y muy alta, reflejando la presencia de sales y contaminantes.

Tabla 3. pH y conductividad eléctrica municipio Chuquihuta en agua

Punto de muestreo	pH	C.E. (mmhos cm-1)	Salinidad
Bocamina	7,1	3320	Muy alta
Capacirca	6,58	950	Alta
Tacopalca	4,73	3400	Muy alta
Morochata	4,37	2720	Muy alta
Belén	6,37	2910	Muy alta

Contaminación por metales pesados en sedimento Tabla 4, el análisis para Hg, Sb y Pb indica que estos metales están por debajo del límite de detección (LD). Sin embargo, el zinc presenta concentraciones entre 0,6 y 1,2 ppm, dentro del rango normal, pero mayor cerca de las operaciones mineras.

Tabla 4. pH y Conductividad Eléctrica sedimento cuenca Colquechaca

Metal	Unidad	LD	Capacirca	Tacopalca	Colorado
Antimonio	ppm	0,010	LD	LD	LD
Mercurio	ppm	0,002	LD	LD	LD
Plomo	ppm	0,100	LD	LD	LD
Zinc	ppm	0,500	1,2	0,6	0,7

Contaminación en el municipio de Llallagua

El pH y la conductividad eléctrica en agua Tabla 5, en los sectores mineros, las aguas presentan un pH entre 2,38 y 3,12, altamente ácido, indicando drenaje ácido de mina. La CE varía entre 4223 y 5907 mmhos/cm, reflejando alta salinidad.

Tabla 5. pH y conductividad eléctrica en aguas sector operadores mineros (Juzgado agroambiental de la provincia Bustillo)

Cooperativa Minera	El Carmen	23 de marzo	Multiactiva	Siglo XX	20 de octubre	Dolores
pH	2,55 - 2,61	2,62-2,63	2,82-3,12	2,58-2,96	2,38-2,96	2,54-2,96
CE mmhos cm-1	4223	5907	4689	4657	5562	5562

Contaminación en suelos cultivables en Andavilque Tabla 6, los suelos tienen un pH de 3,8, considerado ácido, mientras que en comunidades como Lupi Lupi y Villa Arbolitos el pH se aproxima a neutro. La CE oscila entre 867 y 4420 mmhos/cm, indicando suelos salinos y necesidad de remediación.

Tabla 6 . El pH y conductividad eléctrica en suelos cultivables municipio Llallagua

Sitio de muestreo	C.E. (mmhos cm-1)	pH
Andavilque	3270	3,80
Sector Lupi lupi	867	6,20
Villa arbolitos	1440	6,93
Sector Caripiyo	4420	6,52

Contaminación por metales pesados en sedimentos y suelos en las cooperativas Tabla 7, el Cd y el Zn presentan concentraciones elevadas, particularmente en Siglo XX y El Carmen, vinculadas a la extracción y tratamiento de minerales sulfurados. En suelos cultivables, el Cd supera los límites permisibles en la salida de la planta Multiactiva, mientras que el Zn y el Pb están dentro del rango normal.

Tabla 7. Concentración de metales pesados en sedimento municipio Llallagua

Ubicación	Cd (ppm)	Fe (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)
Siglo XX	18,32	5363	37,3	1026,3
20 de Octubre	5,11	5190	7,5	314,7
El Carmen	13,53	4451	218	443,8
Multiactiva	3,09	50	0,1	41,6

En la Tabla 8, muestra que los suelos cultivables del municipio de Llallagua presentan contaminación significativa por cadmio, únicamente en la Salida Planta Multiactiva (4.53 ppm), superando el límite permisible de 3.0 ppm, lo que puede ser perjudicial para la agricultura. En otras comunidades, las concentraciones de Cd, Fe, Pb y Zn están dentro de los límites permisibles, indicando que, en general, los suelos son aptos para el cultivo. Sin embargo, el hierro presenta niveles moderados en localidades cercanas a actividades mineras (Andavilque y Lupi Lupi), mientras que el plomo y el zinc no representan riesgos de contaminación en las áreas estudiadas. Estos resultados evidencian una disminución de la contaminación a medida que se aleja de las fuentes mineras.

Tabla 8. Concentración de metales pesados en suelos cultivables del municipio Llallagua

Comunidad	Cd (ppm)	Fe (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)
Salida Planta Multiactiva	4.53	-	-	-
Andavilque	0.75	12.13	0.1	3.0
Lupi Lupi	0.21	22.48	0.1	1.0
Villa Arbolitos	0.01	8.68	0.1	0.6
Confluencia Río Caripuyo	0.01	1.78	0.1	0.5

Discusión

Los monitoreos realizados entre 2007 y 2023 por la Gobernación de Potosí y otras entidades han revelado niveles alarmantes de metales como arsénico, cadmio, cobre, hierro y zinc en los cuerpos de agua de la cuenca Llallagua-Catavi, superando los límites establecidos para su seguridad (Salinas, M. M., 2023). A medida que nos alejamos de las bocaminas, las concentraciones de estos metales disminuyen, lo que refleja el impacto directo de las actividades mineras en la región. Sin embargo, el antimonio, el estaño y el plomo están por debajo de los niveles de detección, lo que indica que no representan una amenaza inmediata en la zona. Estos hallazgos resaltan la urgente necesidad de implementar medidas de mitigación ambiental en el área.

Los resultados también muestran un claro impacto de la minería en la calidad de los suelos cultivables del municipio de Llallagua. Por ejemplo, la concentración de cadmio (Cd) en la Salida Planta Multiactiva (4.53 ppm) supera ampliamente el límite permitido para suelos agrícolas, que es de 3.0 ppm (Council of the European Communities, 1986). Este nivel de contaminación se debe a los residuos de las operaciones mineras y subraya la necesidad de intervenir de inmediato, ya que el cadmio es un metal tóxico para los cultivos, los animales y las personas, incluso en concentraciones bajas (Oporto et al., 2012). Estudios previos han señalado que el cadmio, que proviene de la lixiviación de los desechos mineros, tiene alta movilidad en el suelo y puede ser absorbido por cultivos como la papa, aumentando su toxicidad alimentaria.

En comunidades más alejadas, como Lupi Lupi, Villa Arbolitos y Confluencia Río Caripuyo, los niveles de metales como cadmio, hierro, plomo y zinc se encuentran dentro de los límites permitidos, lo que refleja una reducción de la contaminación a medida que se alejan de las minas. Este patrón coincide con lo observado por Kossoff *et al.* (2013), quienes encontraron que la concentración de metales pesados disminuye a medida que las partículas contaminantes se diluyen y sedimentan. A pesar de esto, es necesario seguir monitoreando estas áreas, ya que la exposición prolongada a bajas concentraciones de metales puede acumularse con el tiempo y afectar la fertilidad del suelo y los ecosistemas locales (Rojas & Vandecasteele, 2007).

En cuanto al hierro (Fe), se encontraron concentraciones moderadas en las comunidades cercanas a las minas, especialmente en Andavilque (12.13 ppm) y Lupi Lupi (22.48 ppm). Aunque estos niveles no superan los límites críticos, la acumulación gradual de hierro podría alterar las propiedades del suelo, afectando la disponibilidad de nutrientes esenciales para los cultivos (García & Dorronsoro, 2006). La variabilidad observada en los niveles de hierro resalta cómo la geología local y las actividades mineras influyen en la dispersión de este metal, un fenómeno que también ha sido señalado por Pura *et al.* (2018).

En cuanto al plomo (Pb) y zinc (Zn), los niveles encontrados en todas las comunidades fueron dentro de los límites permisibles, lo que indica que estos metales tienen un menor impacto en comparación con el cadmio. Sin embargo, aunque los niveles de plomo y zinc son bajos, no se deben descartar completamente, ya que su acumulación con el tiempo podría aumentar su toxicidad, especialmente si las prácticas mineras no se gestionan adecuadamente (Arango, 2012).

La distribución espacial de los metales pesados en este estudio refuerza la idea de que las comunidades más cercanas a las minas están más expuestas a la contaminación. Este patrón, ampliamente documentado en investigaciones previas (Kossoff *et al.*, 2013; Rojas & Vandecasteele, 2007), indica que las estrategias de mitigación deben centrarse en las áreas más afectadas, como la Salida Planta Multiactiva, donde los niveles de cadmio ya superan los estándares internacionales de seguridad.

Finalmente, estos resultados hacen hincapié en la necesidad de implementar planes de remediación específicos, como la restauración de suelos mediante técnicas de fitorremediación y el uso de enmiendas orgánicas para reducir la movilidad de los metales en el suelo (Oporto *et al.*, 2012). Con medidas como estas, junto con un monitoreo continuo de la contaminación, se podrán mitigar los efectos negativos de la minería sobre los recursos agrícolas y el medio ambiente en la región.

Conclusión

La investigación evidencia alta actividad minera en las subcuencas del Norte Potosí, reflejado en la acidez de los sedimentos y aguas, así como en las concentraciones de metales pesados que superan límites permisibles en áreas específicas. En Colquechaca, el drenaje ácido de mina (DAM) ha generado condiciones altamente ácidas (pH de 2.5 a 3.0) en aguas y sedimentos cercanos a las minas, con concentraciones elevadas de cadmio y zinc en comunidades como Churicala y Kcona Kcona. En Chuquihuta, los sedimentos presentan zinc dentro de rangos normales, pero el pH y la conductividad eléctrica en agua reflejan un nivel de contaminación creciente cerca de los operadores mineros.

En Llallagua, el cadmio (4.53 ppm) excede ampliamente los límites permisibles en la Salida Planta Multiactiva, mientras que los niveles de hierro son moderados en comunidades cercanas. En contraste, el plomo y el zinc están dentro de rangos permisibles en todas las áreas. La contaminación disminuye a medida que se incrementa la distancia de las fuentes mineras, destacando la necesidad de estrategias de remediación en las zonas más impactadas. La implementación de medidas como la fitorremediación y la estabilización química de suelos, junto con un monitoreo continuo, son esenciales para mitigar los impactos y garantizar la sostenibilidad de los recursos agrícolas y ecológicos.

Declaración de conflictos

Los autores no tienen conflicto de interés

Referencia

Arano Vargas, W. M. (2012). Problemática de la reactivación de la minería en el Norte de Potosí (2000-2009) (Tesis doctoral).

- Alvizuri Tintaya, P. A. (2023). Estudio de la ósmosis inversa operada a baja presión como tratamiento de una fuente natural contaminada por actividad minera, en la micro cuenca Milluni en Bolivia, para el abastecimiento de agua segura a poblaciones (Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València).
- Aranibar, A. M., Lafuente, D., & Pabón, E. (2023). Remediación y activación de pasivos ambientales mineros en el Estado Plurinacional de Bolivia.
- Arango, W. (2012). Informe técnico, inspección a pasivos ambientales y río Catavi, distrito minero de Siglo XX.
- Council of the European Communities. (1986). On the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture. Recuperado de <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1986:181:0006:0012>.
- García, I., & Dorronsoro, C. (2006). Contaminación del medio ambiente con elementos tóxicos. Recuperado de <http://www.contaminacióndelmedioambiente.net>.
- Juzgado Agroambiental de la Provincia Bustillo. (2023). Informe técnico, inspección a operadores mineros del municipio Llallagua: Potosí, Bolivia.
- Kossoff, D., Hudson-Edwards, K. A., Dubbin, W. E., Alfredsson, M., & Geraki, T. (2013). Cycling of As, P, Pb and Sb during weathering of mine tailings: Implications for fluvial environments. *Mineralogical Magazine*, 76(5), 1209–1228. <https://doi.org/10.1180/minmag.2012.076.5.1209>
- Loredo, V., Alfons, P., & Casas, J. M. (2013). Contaminación de la minería en Bolivia: El caso de la cuenca Macha Pocoata. En III Congreso Internacional de Geología y Minería Ambiental para el Ordenamiento Territorial y el Desarrollo (pp. 249-256). Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/20951>.
- Loredo, V. (2023). Contaminación ambiental en suelos agrícolas de las comunidades de la microcuenca Macha-Pocoata del departamento de Potosí como efecto del cambio climático. En Simposio Cambio Climático, La Paz, Bolivia.
- Ministerio de Medio Ambiente y Agua (MMAyA). (2014). Atlas de la cuenca del Río Grande. La Paz, Bolivia.
- Mlynarczyk, M. S. J., & Williams-Jones, A. E. (2005). The role of collisional tectonics in the metallogeny of the Central Andean tin belt. *Earth and Planetary Science Letters*, 240(3–4), 656–667. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.09.034>
- Oporto, C., Smolders, E., & Vandecasteele, C. (2012). Identifying the cause of soil cadmium contamination with Monte Carlo mass balance modelling: A case study from Potosí, Bolivia. *Environmental Technology*, 33, 555–561. <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.669635>
- Pura, A., Zambrana, R., & Loredo, V. (2018). Relevancia mundial de la minería de estaño de Llallagua, Bolivia. En Primer congrés de patrimoni miner i història de la mineria i de la geologia a Catalunya (pp. 229–240). Recuperado de <http://hdl.handle.net/2117/171829>.
- Rojas, J. C., & Vandecasteele, C. (2007). Influence of mining activities in the north of Potosí, Bolivia, on the water quality of the Chayanta River, and its consequences. *Environmental Monitoring and Assessment*, 132(1), 321–330. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9659-6>
- Salinas, M. M. (2023). Informe de monitoreo de aguas de mina de la cuenca formada por el Río Llallagua - Río Catavi – Río Chayanta en el norte de Potosí. Laboratorio Spectrolab.