



Religación
Press

Jhonatan Herminio Pérez Ramírez
Mario Vladimir Leyva Collas
Edwin Julio Palomino Cadenas
Edell Doriza Aliaga Zegarra
Francisco Claudio León Huerta

Movilidad tóxica

La amenaza fantasma de los pasivos
mineros en los bofedales andinos



Movilidad tóxica

*La amenaza fantasma de los pasivos mineros en los
bofedales andinos*

Jhonatan Herminio Pérez Ramírez, Mario Vladimir Leyva Collas,
Edwin Julio Palomino Cadenas, Edell Doriza Aliaga Zegarra,
Francisco Claudio León Huerta

Quito, Ecuador

| 2025 |

Toxic Mobility

*The Phantom Threat of Mining Liabilities in the Andean
Bofedales*

Mobilidade tóxica

*A ameaça fantasma dos passivos minerários nos bofedais
andinos*

Religación Press

[Ideas desde el Sur Global]

Equipo Editorial

Editorial team

Ana B. Benalcázar

Editora Jefe / Editor in Chief

Felipe Carrión

Director de Comunicación / Scientific Communication Director

Melissa Díaz

Coordinadora Editorial / Editorial Coordinator

Sarahi Licango Rojas

Asistente Editorial / Editorial Assistant

Consejo Editorial

Editorial Board

Jean-Arsène Yao

Dilrabo Keldiyorovna Bakhranova

Fabiana Parra

Mateus Gamba Torres

Siti Mistima Maat

Nikoleta Zampaki

Silvina Sosa

Religación Press, es parte del fondo editorial del Centro de Investigaciones CICSHAL-

RELIGACIÓN | Religación Press, is part of the editorial collection of the CICSHAL-

RELIGACIÓN Research Center |

Diseño, diagramación y portada | Design, layout and cover: Religación Press.

CP 170515, Quito, Ecuador. América del Sur.

Correo electrónico | E-mail: press@religion.com

www.religacion.com

Disponible para su descarga gratuita en | Available for free download at
<https://press.religacion.com>

Este título se publica bajo una licencia de Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)
This title is published under an Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license.



Derechos de autor | Copyright: Religación Press, Jhonatan Herminio Pérez Ramírez, Mario Vladimir Leyva Collas, Edwin Julio Palomino Cadenas, Edell Doriza Aliaga Zegarra, Francisco Claudio León Huerta

Primera Edición | First Edition: 2025

Editorial | Publisher: Religación Press

Materia Dewey | Dewey Subject: 363 - Otros problemas y servicios sociales

Clasificación Thema | Thema Subject Categories: RNK - Conservación del medioambiente | RNP - Contaminación y amenazas al medioambiente | TQ - Ciencia, ingeniería y tecnología medioambientales

BISAC: NAT038000

Público objetivo | Target audience: Profesional / Académico | Professional / Academic

Colección | Collection: Estudios Ambientales

Soporte| Format: PDF / Digital

Publicación | Publication date: 2025-10-28

ISBN: 978-9942-561-78-7

Título: Movilidad tóxica. La amenaza fantasma de los pasivos mineros en los bofedales andinos

Nota obra derivada: El libro retoma y amplía, mediante el trabajo colaborativo de un grupo de investigadores, los hallazgos y aportes presentados en la tesis original, enriqueciendo su contenido con nuevos enfoques, análisis y perspectivas que profundizan en los temas abordados en la tesis: "Movilidad del As, Pb, Cd y Cr en el bofedal del entorno del pasivo ambiental minero de Mesapata, Ancash-Perú, 2022-2023" presentada ante la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo por Jhonatan Herminio Pérez Ramírez, en 2022.

Note: The book takes up and expands, through the collaborative work of a group of researchers, the findings and contributions presented in the original dissertation, enriching its content with new approaches, analyses and perspectives that deepen the topics addressed at: "Movilidad del As, Pb, Cd y Cr en el bofedal del entorno del pasivo ambiental minero de Mesapata, Ancash-Perú, 2022-2023 " presented to the Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo by Jhonatan Herminio Pérez Ramírez, in 2022.

[APA 7]

Pérez Ramírez, J. H., Leyva Collas, M. V., Palomino Cadenas, E. J., Aliaga Zegarra, E. D., y León Huerta, F. C. (2025). *Movilidad Tóxica. La Amenaza Fantasma de los Pasivos Mineros en los Bofedales Andinos*. Religación Press. <https://doi.org/10.46652/ReligacionPress.333>

Revisión por pares

La presente obra fue sometida a un proceso de evaluación mediante el sistema de dictaminación por pares externos bajo la modalidad doble ciego. En virtud de este procedimiento, la investigación que se desarrolla en este libro ha sido avalada por expertos en la materia, quienes realizaron una valoración objetiva basada en criterios científicos, asegurando con ello la rigurosidad académica y la consistencia metodológica del estudio.

Peer Review

This work was subjected to an evaluation process by means of a double-blind peer review system. By virtue of this procedure, the research developed in this book has been endorsed by experts in the field, who made an objective evaluation based on scientific criteria, thus ensuring the academic rigor and methodological consistency of the study.

Sobre los autores

About the authors

Jhonatan Herminio Pérez Ramírez

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo | Lima | Perú

<https://orcid.org/0009-0005-3175-9823>

jperezr@unasam.edu.pe

Jhona.sdj.ir@gmail.com

Ingeniero Ambiental de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.

Mario Vladimir Leyva Collas

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo | Huaraz | Perú

<https://orcid.org/0000-0002-4623-1782>

mleyvac@unasam.edu.pe

Mariolc0205@hotmail.com

Químico de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Magister en Gestión Ambiental en la Universidad Santiago Antúnez de Mayolo, Doctor en Ingeniería Química Ambiental en la Universidad Nacional de Trujillo.

Edwin Julio Palomino Cadenas

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo | Huaraz | Perú

<https://orcid.org/0000-0002-4589-6774>

epalominoc@unasam.edu.pe

sebasadi@gmail.com

Bachiller en Ciencias Biológicas: Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga (UNSCH); Biólogo Microbiólogo: UNSCH; Maestro en Ciencias con mención en microbiología: Universidad Peruana Cayetano Heredia; Doctor en Ciencias Ambientales: Universidad Nacional de Trujillo.

Edell Doriza Aliaga Zegarra

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo | Huaraz | Perú

<https://orcid.org/0000-0002-8789-235X>

ealiagaz@unasam.edu.pe

Doriza57@hotmail.com

Ingeniera Química de la UNCP, Magister en Gestión Ambiental en la UNASAM y doctora en medio ambiente y desarrollo sostenible en la UNFV.

Francisco Claudio León Huerta

Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo | Huaraz | Perú

<https://orcid.org/0000-0003-4091-044X>

fleonh@unasam.edu.pe

Fleohn20@gmail.com

Ingeniero Ambiental de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayo-lo, Magister en Ciencias e Ingeniería con Mención en Gestión Ambiental de la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.

Resumen

Este libro aborda una crisis ambiental invisible en el corazón de los Andes. Investiga el impacto del Pasivo Ambiental Minero (PAM) de Mesapata, una fuente persistente de contaminación que libera drenaje ácido de mina (DAM) cargado con metales pesados —arsénico, plomo, cadmio y cromo— hacia un frágil bofedal. La obra se centra en descifrar un proceso crítico: la movilidad tóxica. A través de una investigación meticulosa, se evalúa cómo estos elementos se especian en el suelo, se trasladan hacia la vegetación que sustenta la ganadería local y se infiltran en las aguas subterráneas. Más allá del diagnóstico, este estudio no solo cuantifica el grado de degradación de los servicios ecosistémicos, sino que también propone estrategias concretas de manejo para contener esta amenaza y proteger estos vitales ecosistemas.

Palabras claves:

Movilidad de metales; Pasivo Ambiental Minero; Drenaje Ácido de Mina; Bofedal; Especiación química.

Abstract

This book addresses an invisible environmental crisis in the heart of the Andes. It investigates the impact of the Mesapata Mining Environmental Liability (PAM), a persistent source of pollution that releases Acid Mine Drainage (AMD) laden with heavy metals—arsenic, lead, cadmium, and chromium—into a fragile bofedal (high-altitude peatland). The work focuses on deciphering a critical process: toxic mobility. Through meticulous research, it evaluates how these elements are speciated in the soil, transferred to the vegetation that supports local livestock, and infiltrate groundwater. Beyond diagnosis, this study not only quantifies the degree of degradation of ecosystem services but also proposes concrete management strategies to contain this threat and protect these vital ecosystems.

Keywords:

Metal mobility; Mining Environmental Liability; Acid Mine Drainage; Bofedal; Chemical speciation.

Resumo

Este livro aborda uma crise ambiental invisível no coração dos Andes. Investiga o impacto do Passivo Ambiental Mineral (PAM) de Mesapata, uma fonte persistente de poluição que libera Drenagem Ácida de Mina (DAM) carregada com metais pesados — arsênio, chumbo, cádmio e cromo — em um frágil bofedal (turfeira de altitude). A obra centra-se em decifrar um processo crítico: a mobilidade tóxica. Através de uma investigação meticulosa, avalia-se como esses elementos são especificados no solo, transferem-se para a vegetação que sustenta a pecuária local e infiltram-se nas águas subterrâneas. Para além do diagnóstico, este estudo não apenas quantifica o grau de degradação dos serviços ecossistêmicos, mas também propõe estratégias concretas de gestão para conter esta ameaça e proteger esses ecossistemas vitais.

Palavras-chave:

Mobilidade de metais; Passivo Ambiental Mineral; Drenagem Ácida de Mina; Bofedal; Especiação química.

CONTENIDO

Revisión por pares	6
Peer Review	6
Sobre los autores	8
About the authors	8
Resumen	10
Abstract	10
Resumo	10
Introducción	16
 [1] Capítulo	 20
La silenciosa amenaza que avanza por los bofedales	20
Un legado tóxico al descubierto	21
Rastreando el Viaje Invisible del Legado Minero en los Bofedales	21
Operacionalización de variables	23
Justificación	25
Hipótesis de investigación	26
 [2] Capítulo	 28
Cómo los Metales Pesados se Mueven e Interactúan en Nuestros Suelos	28
La Danza Química de los Metales en el Suelo	29
Estrategias de Movilidad: Cómo los Metales Escapan y se Transforman	30
El Incesante Viaje de los Metales: Descifrando su Camino a Través de los Ecosistemas	31
El Baile de los Gigantes Ocultos: La Coreografía Secreta de los Metales en Nuestros Suelos	33
La Fuerza de la Atracción: Mecanismos de Retención Metálica	33
El Viaje Subterráneo: Movilización por Lixiviación y Escorrentía	34
Transformaciones y Elevaciones: Volatilización y Ascenso Trófico	34
Fuerzas de Transporte y Transformación Química	35
Factores edáficos que interactúan en la movilidad	36
a) Potencial de Hidrógeno (pH)	36
b) Materia orgánica	37
c) Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	37
d) Potencial redox (Eh)	38
Metales pesados en estudio	38
a) El arsénico (As)	38
b) Plomo (Pb)	40
c) Cadmio (Cd)	41

d) Cromo (Cr)	42
Definición de términos	43
[3] Capítulo	46
El Mapa del Riesgo Oculto: Descifrando los Caminos de la Contaminación Minera	46
El Diagrama de la Movilidad: Un Camino de Tres Vías	47
Los Métodos del Desciframiento: Cuatro Pasos hacia la Verdad Química	48
Del Suelo a la Vida: Rastreando la Transferencia Trófica	49
Las Aguas Subterráneas: El Río Oculto de la Contaminación	49
Estrategias de Contención: De la Diagnosis a la Solución	50
Muestra	50
Técnicas de acopio de información	51
Tratamiento estadístico de datos e información	52
Aspectos administrativos	52
Financiación	54
Matriz de consistencia	55
Referencias	59

TABLAS

Tabla 1. Suelo, vegetación, agua subterránea	24
Tabla 2. Presupuesto	53
Tabla 3. Cronograma de actividades	54

FIGURAS

Figura 1. Dinámica de los metales pesados en el suelo	36
Figura 2. El diagrama Eh – pH para el arsénico a 25 ° C y 101,3 kPa	39
Figura 3. Diagrama fuerza electromotriz-pH para el sistema plomo-aguacarbonato	41
Figura 4. Diagrama Eh-pH para parte del sistema Cd-C-S-O-H	42
Figura 5. Diagrama Eh-pH para parte del sistema Cr-O-H.	43
Figura 6. Diagrama para determinar la movilidad del As, Pb, Cd y Cr en el suelo del bofedal	48

Introducción

La cordillera de los Andes alberga ecosistemas de una belleza austera y una importancia ecológica crítica. Entre ellos, los bofedales o turberas altoandinas se erigen como oasis de biodiversidad y pilares fundamentales para las comunidades locales. Estos humedales, sostenidos por aguas subterráneas y precipitaciones, no son simplemente extensiones de verde en la puna; son sistemas complejos que proveen servicios ecosistémicos indispensables: actúan como esponjas naturales que regulan el ciclo hídrico, purifican el agua, constituyen el principal forraje para la ganadería camélida y ovina —base de la economía subsistencia de muchas familias— y sirven de refugio para una fauna y flora única adaptada a condiciones extremas. Sin embargo, esta fragilidad y su dependencia de dinámicas hídricas delicadas los hacen tremadamente vulnerables ante las alteraciones de su entorno, particularmente ante la contaminación de origen antrópico.

En las últimas décadas, el crecimiento de la actividad minera en regiones montañosas ha dejado una herencia envenenada: los Pasivos Ambientales Mineros (PAM). Estos son instalaciones, efluentes, depósitos de desmontes o relaves abandonados que continúan liberando sustancias contaminantes al ambiente, representando un riesgo permanente para la salud de los ecosistemas y las poblaciones cercanas. Son fantasmas industriales que siguen intoxicando el paisaje mucho después de que la actividad cesa. En la región Áncash, Perú, esta problemática adquiere una urgencia particular debido a la convivencia forzada entre una intensa actividad minera, pasada y presente, y ecosistemas glaciares y altoandinos de extrema sensibilidad.

El caso del Pasivo Ambiental Minero de Mesapata es un ejemplo paradigmático y alarmante de este conflicto. Operativa desde 1982, la planta concentradora de Mesapata procesaba minerales sulfurados para la producción de concentrados de plomo, plata, zinc y cobre. Tras su cierre, dejó atrás un legado de materiales expuestos a la intemperie. Estos residuos, ricos en sulfuros metálicos como la pirita (FeS_2) y la arsenopirita ($FeAsS$), se convierten en el detonante de un proceso destructivo conocido como Drenaje Ácido de Mina (DAM). Al entrar en contacto con el oxígeno y el agua de lluvia, estos minerales sufren una reacción de oxidación que ge-

nera soluciones ácidas cargadas con metales pesados y metaloides en concentraciones tóxicas.

Este fluido corrosivo, de pH extremadamente bajo, actúa como un vehículo de contaminación, lixiviando y mobilizando elementos como el arsénico (As), plomo (Pb), cadmio (Cd) y cromo (Cr) desde los relaves y desmontes abandonados. La ruta de intoxicación es dual: por un lado, el escurreimiento superficial y la infiltración del DAM contaminan directamente los suelos y las aguas subterráneas que sustentan al bofedal adyacente. Por otro, durante los períodos de sequía, los metales precipitan y se adsorben en las partículas del suelo, que, al secarse, se transforman en polvo susceptible de ser transportado por el viento hacia zonas aledañas, depositando su carga tóxica sobre la vegetación y los cursos de agua. Se establece así un flujo continuo e implacable de contaminantes desde la fuente abandonada hacia el corazón del ecosistema.

La presencia de estos metales en el ambiente no sería un problema crítico si permanecieran inertes y retenidos en formas minerales estables. El peligro real, y el núcleo de esta investigación, reside en su movilidad. La mera cuantificación de la concentración total de un metal en un suelo es insuficiente para evaluar el riesgo real que representa. Es necesario comprender su especiación química —las distintas formas químicas en las que se presenta— y su biodisponibilidad. Metales que se encuentran en fracciones intercambiables o asociados a óxidos amorfos de hierro y manganeso son altamente móviles, pudiendo ser absorbidos por las raíces de las plantas, incorporándose a la cadena trófica, o lixiviándose hacia los acuíferos subterráneos. Por el contrario, aquellos encapsulados en estructuras cristalinas residuales son estables y representan un riesgo menor.

Esta distinción es crucial. La movilidad determina el nivel de amenaza. En el bofedal de Mesapata, la toxicidad del As, Pb, Cd y Cr está degradando progresivamente sus servicios ecosistémicos. El forraje, al absorber estos elementos, se convierte en un vector de envenenamiento para el ganado, con graves repercusiones en la salud animal y potencialmente humana. La capacidad de purificación del agua del humedal se ve sobre-pasada, contaminando los escasos recursos hídricos. La biodiversidad se empobrece ante la presión tóxica, y el propio suelo, el sustento de todo el sistema, ve alteradas sus propiedades físico-químicas y microbiológicas.

Por lo tanto, surgen preguntas críticas que demandan respuestas científicas sólidas: ¿Hacia dónde se están dirigiendo exactamente estos metales? ¿Qué fracción de ellos es realmente móvil y bioaccesible? ¿Cuál es la ruta prioritaria de contaminación: la infiltración hacia el agua subterránea o la absorción por la vegetación? ¿En qué medida la especiación del suelo dicta el destino final de estos contaminantes? Responder a estos interrogantes es el primer paso indispensable para diseñar estrategias de remediación efectivas y planes de manejo ambiental que no se basen en supuestos, sino en un diagnóstico preciso de la dinámica contaminante.

Es en este contexto que la presente investigación se plantea con el objetivo central de evaluar la movilidad del arsénico, plomo, cadmio y cromo en el bofedal impactado por el PAM de Mesapata, Áncash. Este libro es el resultado de un esfuerzo meticuloso por develar la ruta y el destino de la contaminación. A través de la determinación de la especiación química de los metales en el suelo —empleando métodos secuenciales como el procedimiento BCR— se busca identificar las fracciones potencialmente móviles. Paralelamente, el análisis de los tejidos de la vegetación dominante en el bofedal permitirá cuantificar la bioacumulación y el riesgo de transferencia trófica. Finalmente, el muestreo de aguas subterráneas o superficiales cercanas revelará el grado de lixiviación y la amenaza para los recursos hídricos.

Los hallazgos aquí presentados trascienden el caso específico de Mesapata. Sirven como un modelo de estudio para entender la comportamiento de los metales pesados en ecosistemas de alta montaña impactados por la minería. Este trabajo no solo busca diagnosticar un problema; su última ambición es proponer estrategias de manejo basadas en evidencia científica para contener el DAM y mitigar su impacto, contribuyendo así a la preservación de los indispensables bofedales andinos y al bienestar de las comunidades que dependen de ellos. Esta es una contribución a la comprensión de un legado tóxico y un paso hacia la restauración de un equilibrio ecológico perdido.

[1] Capítulo

La silenciosa amenaza que avanza por los bofedales

Un legado tóxico al descubierto

En la región Ancash la existencia de Pasivos Ambientales Mineros (PAM) representa fuentes de contaminación para los ecosistemas frágiles como los bofedales. Este es el caso del PAM de Mesapata, que viene contaminando al bofedal que está en su entorno, mediante el Drenaje Acido de Mina (DAM) y lixiviados cargados con metales pesados. Estos son transportados por el agua o a través del polvo del suelo cuando se secan y pueden ser arrastrados por el viento a las zonas aledañas. Dentro del DAM se encuentran el arsénico (As), plomo (Pb), cadmio (Cd) y Cromo (Cr), que forman parte de la composición de minerales como arsenopirita (FeAsS), moscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$), pirita (FeS_2), beudantita ($\text{PbFe}^{+3}(\text{AsO}_4)_2(\text{SO}_4)(\text{OH})_6$), entre otros. Estos fueron procesados junto a otros minerales en la Planta Concentrador de Minerales de Mesapata para la producción de concentrados de plomo -plata; zinc y cobre.

La planta concentradora de Mesapata entró en operación el año 1982 y a partir de esa fecha existe el PAM de Mesapata, el cual degrada al bofedal ubicado en su entorno, donde se desarrolla la actividad ganadera. Esta degradación por la toxicidad del As, Pb, Cd y Cr, afecta los servicios ecosistémicos que provee el bofedal, principalmente, el forraje para el ganado, purificación del agua, refugio de fauna silvestre y de biodiversidad. Mediante la determinación de la movilidad del As, Pb, Cd y Cr del suelo hacia la planta o al agua subterránea se puede inferir la afectación a estos servicios ecosistémicos. Además, la fracción móvil de los metales pesados es la que representa riesgo para el bofedal. Por lo que es necesario comprender la movilidad de los metales pesados en los suelos contaminados y sus amenazas potenciales para la vegetación y las aguas subterráneas.

Rastreando el Viaje Invisible del Legado Minero en los Bofedales

En el corazón de los Andes, un legado tóxico fluye silenciosamente hacia uno de los ecosistemas más vulnerables. Este trabajo nace de la urgente necesidad de descifrar una crisis invisible: la migración oculta de metales pesados desde los restos abandonados de la minería hacia el frágil mundo de los bofedales altoandinos. El Pasivo Ambiental Minero de Mesapata se

erige como una herida abierta en el paisaje, un recordatorio de actividades extractivas pasadas que continúan envenenando el presente a través del drenaje ácido de mina. Este fluido corrosivo transporta un cocktail de metales pesados -arsénico, plomo, cadmio y cromo- que se filtra lentamente hacia el bofedal adyacente, amenazando con degradar irreversiblemente este oasis de biodiversidad. La verdadera pregunta que guía esta investigación no es solo cuánta contaminación existe, sino cómo se mueve esta carga tóxica a través del ecosistema y de qué manera está alterando el frágil equilibrio que sostiene la vida en las alturas.

El camino que emprende esta investigación busca revelar los secretos de esta contaminación itinerante, siguiendo el rastro molecular de los metales a través de los tres componentes vitales del bofedal. Nos proponemos cartografiar la ruta completa de estos elementos, desde su origen en los desmontes mineros hasta su incorporación en los tejidos de la vida andina. Este recorrido científico nos llevará a través de un laberinto de transformaciones químicas, donde descubriremos cómo estos metales cambian de forma y carácter según el ambiente que encuentran a su paso. La verdadera amenaza no yace tanto en la presencia de estos elementos, sino en su capacidad de transformación y movimiento, en su habilidad para camuflarse en diferentes formas químicas que les permiten infiltrarse en los poros del suelo, ascender por los tallos de las plantas y disolverse en las corrientes de agua subterránea que alimentan el ecosistema.

Nuestra primera parada en este viaje de descubrimiento nos lleva al mundo oculto bajo nuestros pies: el suelo del bofedal. Aquí buscaremos descifrar el lenguaje químico de los metales, determinando sus distintas formas moleculares y su potencial de movilización. Mediante avanzadas técnicas de extracción secuencial, distinguiremos entre las formas estables e inertes y aquellas formas químicas potencialmente móviles y biodisponibles. Este análisis nos permitirá entender qué fracción de la contaminación representa un peligro inminente y qué parte permanece encapsulada en formas menos peligrosas. La especiación química constituye así la piedra angular para predecir el comportamiento futuro de estos contaminantes y su posible ingreso a las cadenas de vida del bofedal.

El segundo tramo de nuestra investigación sigue el camino de los metales hacia el reino vegetal, explorando cómo estas sustancias abandonan

el suelo para incorporarse a los tejidos de las plantas que forman el tapiz verde del bofedal. Estudiaremos los mecanismos de absorción radical y traslocación que permiten a los metales pesados escalar desde las raíces hasta las partes aéreas de la vegetación. Este proceso de bioacumulación representa la puerta de entrada a las cadenas tróficas y potencialmente a los rebaños de camélidos que pastan en estas zonas. Comprender esta ruta de transferencia es esencial para evaluar el riesgo ecotoxicológico real que representa la contaminación para la fauna que depende de este ecosistema y para las comunidades humanas que consumen estos animales.

La tercera ruta que exploraremos conduce a las profundidades del sistema, siguiendo el descenso de los contaminantes hacia las reservas de agua subterránea que alimentan y sostienen el bofedal. Investigaremos los procesos de lixiviación y percolación que transportan los metales a través de las capas del suelo hasta alcanzar los acuíferos subterráneos. El análisis de la calidad de estas aguas nos revelará el grado de afectación de esta fuente hídrica vital y nos permitirá evaluar el riesgo de dispersión de la contaminación más allá de los límites inmediatos del bofedal, con posibles consecuencias para cuencas hidrográficas más amplias y para el consumo humano aguas abajo.

Finalmente, este conocimiento integrado nos permitirá formular estrategias concretas de manejo y remediación para cortar el flujo de contaminación en su fuente y restaurar el equilibrio perdido. Desarrollaremos propuestas específicas para el tratamiento del drenaje ácido de mina, la estabilización de los residuos mineros y la recuperación de las funciones ecológicas del bofedal. Estas estrategias buscarán no solo detener el avance de la contaminación, sino también devolver a este ecosistema su capacidad de resiliencia y asegurar la permanencia de los servicios ambientales que proporciona a las comunidades andinas y al equilibrio ecológico regional.

Operacionalización de variables

En la Tabla 1 se muestra la operacionalización de variables de la investigación, donde para el suelo la variable dependiente es la movilidad del As, Pb, Cd y Cr, la cual será determinada mediante la especiación química de los metales pesados antes mencionados por extracción secuencial en

tres etapas (Hu et al., 2017), donde la fracción intercambiable, reducible u oxidable son la fracción móvil y la fracción residual que es la fracción insoluble por ende no móvil. Además, se medirán los factores edáficos como variables independientes para determinar cuáles son los que más influyen en la movilidad en el suelo del bofedal en estudio. Para la vegetación la variable dependiente es la movilidad de los metales pesados en estudio, la cual se determinará mediante la concentración de metales totales en la parte aérea de la planta y metales totales en el suelo, esta última viene hacer la variable independiente, en este componente ambiental, el método a emplear es el Factor de Bioconcentración (Gemedá et al., 2021). En el agua subterránea la variable dependiente es la movilidad de los metales pesados en estudio y la variable independiente son los parámetros de campo (pH, Eh y CE).

Tabla 1. Suelo, vegetación, agua subterránea

Compo-nente am-biental	Variable	Indicador	Método
Depen-diente	Movilidad del As, Pb, Cd y Cr en el suelo	Especiación química del As, Pb, Cd y Cr: Fracción móvil: Intercambiable Oxidable Reducible Fracción no móvil–Residual	Extracción se-cuencial en tres etapas (Hu et al., 2017).
Suelo		Materia orgánica (MO) Ácidos húmicos Ácidos fúlvicos	Extracción alca-lina
Inde-pen-dientes	Factores edáficos del suelo	Capacidad de Intercam-bio Catiónico (CIC) % de arcilla Potencial de hidrogeno (pH)	Volumetría Bouyocus NOM21-AS-02
		Potencial redox (Eh)	APHA4500-H+ B

Compo-nente am-biental	Variable	Indicador	Método
Vegetación	Depen-dientes	Movilidad del As, Pb, Cd y Cr hacia la vegetación	As, Pb, Cd y Cr en la parte aérea de la planta
	Inde-pen-dientes	As, Pb, Cd y Cr en el suelo	Fracción móvil del As, Pb, Cd y Cr en el suelo
Agua subte-rránea	Depen-diente	Movilidad del As, Pb, Cd y Cr hacia el agua subte-rránea	Arsénico (As)
			DIN – 38405
	Inde-pen-dientes		Plomo (Pb)
			PAR
	Inde-pen-dientes		Cadmio (Cd)
			Derivé de cadion
	Inde-pen-dientes		Cromo (Cr)
			Oxidación alcali-na con hipobro-mito
	Inde-pen-dientes		Potencial de hidrogeno (pH)
			APHA4500-H+ B
		Parámetros de campo	Potencial redox (Eh)
	Inde-pen-dientes		APHA4500-H+ B
		Conductividad Eléctrica (CE)	APHA 2510 B

Fuente: Pérez Ramírez (2022).

Justificación

Según el inventario de Pasivos Ambientales Mineros (PAM) a agosto de 2020, del total de 7956 PAM, la región Ancash presenta el 15.5 por ciento de pasivos, al mismo tiempo es la segunda región (17.5%) con PAM de niveles de riesgo alto a muy alto (Castillo et al., 2021).

El arsénico (As) es un metaloide y se considera dañino debido a sus efectos tóxicos y cancerígenos (Banerjee et al., 2011), se encuentra en el ambiente debido a la minería formal e informal, al procesamiento de minerales que contienen As. La ingestión de Pb a través de la cadena alimentaria ha demostrado ser un peligro potencial para la salud de las plantas y los seres humanos (Kumar et al., 2020). El cadmio (Cd), clasificado como carcinógeno humano, es un contaminante de metal pesado extremadamente tóxico, y existe una creciente preocupación ambiental por la exposición al

cadmio a través de fuentes antropogénicas (Balmuri et al., 2017). La toxicidad por Cromo (Cr) está relacionado con varias patologías, incluida la carcinogenicidad (Pavesi & Moreira, 2020), la exposición a compuestos de cromo (VI) se ha asociado con una mayor incidencia de cáncer de pulmón (Dianyi Yu, 2008). Por lo que es necesario conocer la movilidad del As, Pb, Cd y Cr en el bofedal del entorno del pasivo ambiental minero de Mesapata, además de los controles edáficos del suelo que determinan esta movilidad.

La especiación química del As, Pb, Cd y Cr podría reflejar su movilidad y biodisponibilidad, el cual es importante conocer en el área de estudio (bofedal), debido a que en este ecosistema se realiza la actividad ganadera y si estos metales pesados y metaloide se está movilizando hacia las plantas, este podría ingresar a la cadena trófica iniciando el proceso de biomagnificación, además si se lixivia hacia el agua subterránea estaría contaminado el recurso hídrico aguas abajo (por ejemplo, el río Santa). Por lo que la presente investigación permitirá evaluar la movilidad hacia estos componentes ambientales.

Hipótesis de investigación

El bofedal del entorno del Pasivo Ambiental Minero (PAM) de Mesapata se encuentra a una altitud de 3525 m.s.n.m., a esta altitud la temperatura ambiental es baja y hay deficiencia de oxígeno por lo que la materia orgánica en el bofedal se degradada lentamente y existe acumulación de materia orgánica en forma de turba, lo cual favorece la adsorción del Plomo (Pb), Cadmio (Cd) y Cromo (Cr) a excepción del Arsénico (As), ya que este último existe en la naturaleza en forma de anión, además, el régimen de lluvia de octubre a abril favorece la erosión de metales pesados del relave minero al bofedal. El Drenaje Ácidos de Mina tiene pH ácidos lo que favorece la lixiviación, solubilidad del Pb, Cd y Cr a excepción del As que precipita a estos niveles de pH.

Por lo que la movilidad del As, Pb, Cd y Cr en el suelo está condicionada a su especiación química e interacción con los factores edáficos del suelo y su concentración en la parte aérea de la planta y la concentración en el agua subterránea. Siendo la movilidad del Pb, Cd y Cr baja y la del As Alta en el bofedal.

[2] Capítulo

Cómo los Metales Pesados se Mueven e
Interactúan en Nuestros Suelos

En el complejo mundo subterráneo donde la geología se encuentra con la vida, los metales pesados juegan un peligroso juego de escondidas que determina el destino de nuestros ecosistemas. Miranda y su equipo (2021) nos ofrecen una lente científica para observar este juego, proporcionando una comprensión cuantitativa de cómo los nutrientes y las propiedades del agua y los sedimentos influyen en el comportamiento de adsorción-desorción de estos elementos. Su investigación revela que los niveles de influencia de los factores ambientales, expresados como coeficientes de regresión condicional, nos permiten predecir el movimiento de los metales. Lo más fascinante de sus hallazgos es el papel protagonista que juega la composición mineralógica de los sedimentos, ya que esta característica fundamental influye directamente en otras propiedades críticas como la superficie específica y la capacidad de intercambio catiónico, determinando así la capacidad de los sedimentos para retener o liberar metales pesados en diferentes condiciones ambientales.

La Danza Química de los Metales en el Suelo

La movilidad de los metales pesados en los ambientes del suelo representa una compleja coreografía química donde múltiples factores determinan cada movimiento. Caporale y Violante (2016) describen con maestría los procesos químicos que gobiernan esta danza, concluyendo que la movilidad, biodisponibilidad y toxicidad de metales y metaloides están profundamente influenciadas por sus interacciones con diversos componentes del suelo como filosilicatos, materia orgánica, minerales de carga variable y microorganismos. Los procesos fisicoquímicos que modulan esta coreografía incluyen un repertorio de reacciones esenciales: sorción/desorción, complejación en solución, oxidación-reducción y precipitación-disolución. Particularmente, las reacciones de sorción/desorción aparecen como pasos fundamentales en esta danza, siendo influenciadas críticamente por el pH, la naturaleza de los componentes del suelo y la presencia y concentración de cationes y aniones inorgánicos que actúan como compañeros de baile inesperados.

Wei y colaboradores (2021) nos llevan a un escenario específico donde esta danza química se desarrolla con particular intensidad: los suelos con-

taminados de una área irrigada con aguas residuales en el norte de China. Su investigación examinó meticulosamente los impactos de la materia orgánica, el pH de la solución y el nivel del agua en las formas y la migración de metales pesados/metaloides (As, Cr, Cu, Pb y Cd). Seleccionando dos sitios con riego de aguas residuales y un sitio control, recolectaron muestras de suelo cada 10 cm en perfiles de hasta 1 metro de profundidad. La liberación y movilidad de estos elementos se investigó mediante ingeniosos experimentos en columna con dos etapas de lixiviación que simulaban diferentes condiciones hidrológicas, utilizando diversos influentes para emular escenarios de lluvia, lluvia ácida y lixiviado de compost.

Estrategias de Movilidad: Cómo los Metales Escapan y se Transforman

Los resultados de Wei et al. (2021) revelaron patrones fascinantes en el comportamiento de los metales, mostrando cómo diferentes condiciones desencadenan distintas estrategias de movilidad. El arsénico y el cobre demostraron una mayor movilización en las columnas con lixiviado de compost como afluente, contrastando con su comportamiento en ambientes libres de materia orgánica. Este fenómeno se atribuyó a procesos de disolución reductora, complejación y desorción facilitados por la presencia de materia orgánica. Por otro lado, el cromo y el plomo mostraron concentraciones más elevadas en los efluentes de columnas con afluente de pH bajo (simulando lluvia ácida), donde la desorción promovida por protones y la disolución de óxidos de hierro amorfos emergieron como los mecanismos principales de movilización. Un hallazgo particularmente revelador fue la disminución del oxígeno disuelto con el aumento del nivel de agua, creando condiciones que favorecen la respiración microbiana y las reducciones de óxidos de Fe/Mn, lo que a su vez elevaba las concentraciones de metales en el agua intersticial.

La revisión comprehensiva realizada por Violante et al. (2010) nos ofrece una visión panorámica de estas interacciones, examinando el impacto de las relaciones físicas, químicas y biológicas en la biodisponibilidad y movilidad de metales y metaloides en el suelo. Su trabajo describe minuciosamente los procesos de sorción/desorción, las reacciones de

precipitación y óxido-reducción tanto en solución como en las superficies de los componentes del suelo, y los mecanismos de especiación química, fraccionamiento y biodisponibilidad. Una de sus conclusiones más significativas revela cómo el comportamiento de los ligandos extraños difiere radicalmente entre elementos de forma catiónica y aniónica, estableciendo reglas distintas en el juego de las escondidas según la naturaleza química de cada metal. Para los elementos catiónicos, la reacción de complejación con ligandos orgánicos e inorgánicos juega un papel crucial en sus procesos de sorción-desorción, mientras que para los aniónicos, la competencia por sitios disponibles y la reducción de la carga superficial emergen como factores determinantes en su movilidad a través del perfil del suelo.

El Incesante Viaje de los Metales: Descifrando su Camino a Través de los Ecosistemas

La movilidad de los metales pesados representa uno de los conceptos más cruciales y dinámicos dentro de las ciencias del suelo, funcionando como un termómetro que mide el riesgo de contaminación hacia otros componentes ambientales. Este concepto multidimensional es abordado por diferentes investigadores con perspectivas complementarias: algunos se concentran en los flujos masivos a través de los ecosistemas y su potencial de contaminación de cadenas tróficas o recursos hídricos, mientras otros se especializan en la evaluación de toxicidad o en descifrar los procesos físico-químicos que gobiernan la migración e inmovilización de estos elementos. La esencia de la movilidad se manifiesta cuando los metales pesados entran en la fase acuosa, ya sea en forma disuelta o asociada con partículas coloidales, lo que dirige la atención científica hacia el estudio de la solubilidad metálica y la reactividad de las superficies del suelo. Un aspecto fundamental que Domergue y Vedy (1992) destacan es la temporalidad inherente al concepto: la movilidad cuantificada mediante flujos masivos refleja lo ya movilizado, el análisis de la fracción soluble captura lo actualmente en movimiento, mientras que los procedimientos de extracción secuencial revelan el potencial móvil latente de estos metales.

Este viaje constante de los metales a través de la matriz del suelo no ocurre en vacío, sino que es el resultado de una compleja sinfonía de fuer-

zas naturales interconectadas. Como señaló Bourg (1995), la movilidad natural de los metales pesados emerge como consecuencia de múltiples drivers ambientales: la actividad biológica de microorganismos y raíces, las intrincadas interacciones sólido-líquido que ocurren en las interfaces, y la acción dual del agua y el viento que transportan estos elementos tanto en forma soluble como particulada. El agua particularmente ejerce una influencia dominante en este proceso, aunque su efecto está lejos de ser simple o uniforme. Solano (2005) enfatiza que la movilidad por acción hídrica está profundamente modulada por el balance de agua en el suelo, el cual interactúa constantemente con las propiedades químicas específicas de cada tipo de suelo. Esta dinámica crea un equilibrio delicado donde, como notaron Pagnanelli et al. (2004), los metales pesados pueden quedar temporalmente retenidos en el suelo o ser movilizados activamente mediante mecanismos biológicos y químicos que operan en la solución del suelo.

La importancia de descifrar estos patrones de movilidad trasciende lo académico para convertirse en una cuestión de relevancia ambiental práctica inmediata. La movilidad relativa de los elementos traza en los suelos, como destacó Solano (2005), adquiere significado crítico cuando consideramos su biodisponibilidad para las plantas y su potencial para lixiviarse desde los perfiles del suelo hacia los acuíferos subterráneos. Esta doble posibilidad de transferencia vertical hacia aguas profundas y horizontal hacia la vegetación establece a la movilidad como el factor determinante en la evaluación de riesgo ecotoxicológico. Los mecanismos que gobiernan este comportamiento son tan complejos como fascinantes, involucrando una red de interacciones con diversos componentes del suelo. Caporale y Violante (2016) identificaron que la movilidad de metales pesados está influenciada significativamente por sus interacciones con filosilicatos, materia orgánica, minerales de carga variable y comunidades microbianas, a través de procesos fisicoquímicos que incluyen reacciones de sorción/desorción, complejación en solución, oxidación-reducción y precipitación-disolución que colectivamente determinan el destino final de estos elementos en el ambiente.

El Baile de los Gigantes Ocultos: La Coreografía Secreta de los Metales en Nuestros Suelos

Bajo nuestros pies se desarrolla un complejo ballet químico donde los metales pesados ejecutan movimientos precisos que determinan el destino de ecosistemas completos. Estos elementos pueden quedar temporalmente retenidos en la matriz del suelo mediante procesos de adsorción, complejación y precipitación, o permanecer en la solución edáfica donde se convierten en disponibles para la absorción radicular y su posterior incorporación a las cadenas tróficas. Alternativamente, pueden emprender rutas alternas de escape hacia la atmósfera a través de la volatilización, o desplazarse lateral y verticalmente contaminando aguas superficiales y subterráneas mediante procesos de lixiviación. Esta intrincada danza ambiental sigue patrones predecibles pero extremadamente sensibles a las condiciones del medio, creando un equilibrio dinámico que oscila constantemente entre la inmovilización y la liberación, entre la retención segura y la dispersión contaminante que pone en riesgo la salud de los ecosistemas y las comunidades que dependen de ellos.

La Fuerza de la Atracción: Mecanismos de Retención Metálica

El proceso de adsorción representa el primer paso en la inmovilización temporal de los metales pesados, funcionando como un abrazo electrostático que retiene estos elementos en las superficies de las partículas del suelo. Como explican Soliman y Moustafa (2020), este mecanismo de captura está influenciado por múltiples factores que incluyen la concentración inicial de iones metálicos, el tiempo de contacto, el pH de la solución, la temperatura y la dosis de adsorbente disponible. La acumulación de metales pesados puede ocurrir sobre diversas materias orgánicas e inorgánicas, aunque como señalan Czikkely et al. (2018), los adsorbentes más efectivos suelen ser compuestos orgánicos de origen biológico y químico. Este fenómeno se manifiesta principalmente a través de los coloides del suelo que conforman el complejo arcillo-húmico, el cual al poseer carga eléctrica negativa incrementa sustancialmente la capacidad de intercambio catiónico del suelo, permitiendo la adhesión y retención de cationes metálicos que de otra manera circularían libremente por el sistema.

El Viaje Subterráneo: Movilización por Lixiviación y Escorrentía

La lixiviación constituye uno de los procesos más críticos en la dispersión de contaminantes, actuando como un sistema de transporte hidrodinámico que redistribuye los metales a través del perfil del suelo. Este mecanismo ocurre cuando el agua de percolación logra infiltrarse a través de la matriz sólida del suelo, disolviendo sus componentes y arrastrando consigo metales pesados hacia los acuíferos subterráneos y cuerpos de agua superficiales. El Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM, 2015) advierte que cuando estos lixiviados atraviesan regiones del subsuelo originalmente no contaminadas, los metales pesados pueden ser retenidos mediante adsorción o absorción, o precipitar en nuevas zonas, expandiendo así la superficie de contaminación de manera silenciosa pero constante. Fang et al. (2016) aportan evidencia crucial sobre el rol amplificador de la materia orgánica en este proceso, demostrando su influencia significativa en la intensidad y velocidad de lixiviación de metales pesados a través de las capas del suelo.

Transformaciones y Elevaciones: Volatilización y Ascenso Trófico

La volatilización introduce una dimensión aérea al ciclo de los metales, permitiendo su transferencia desde la matriz terrestre hacia la atmósfera mediante procesos controlados principalmente por la temperatura. Este mecanismo adquiere especial relevancia en el caso del arsénico, que puede volatilizarse en forma de arsina gaseosa (AsH_3) bajo condiciones extremadamente reductoras. La metilación de metaloides como el arsénico facilita su conversión a formas volátiles que abandonan el suelo para incorporarse a los flujos atmosféricos, demostrando cómo la química de transformación molecular puede alterar completamente el destino ambiental de estos elementos. Paralelamente, la bioacumulación opera como un sistema de concentración biológica donde los organismos vivos, particularmente la vegetación, absorben y almacenan metales pesados en sus tejidos hasta alcanzar concentraciones muy superiores a las presentes en su medio abiótico circundante.

Este proceso de concentración biológica alcanza su máxima expresión en la biomagnificación, fenómeno por el cual las concentraciones de metales pesados se intensifican progresivamente al ascender de un nivel trófico inferior a uno superior dentro de la red alimentaria. La peligrosidad de este mecanismo reside en las propiedades intrínsecas de los metales pesados: su larga persistencia ambiental y su alta movilidad les permiten infiltrarse fácilmente en los sistemas biológicos a través de alimentos y agua, acumulándose en cada eslabón de la cadena hasta alcanzar concentraciones potencialmente tóxicas en los depredadores superiores, incluidos los seres humanos que consumen estos recursos contaminados.

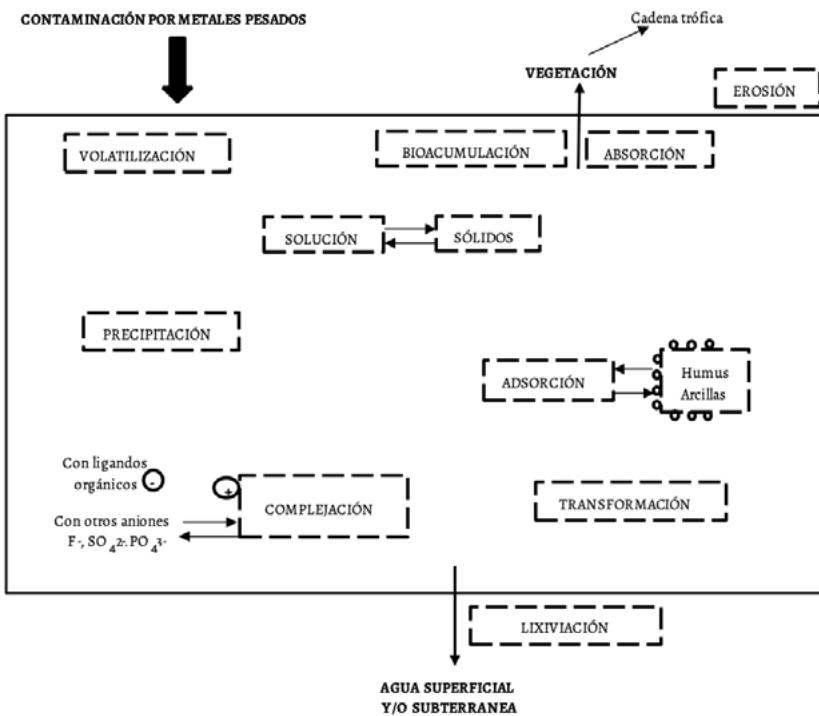
Fuerzas de Transporte y Transformación Química

La erosión actúa como una fuerza de redistribución masiva que moviliza metales pesados a escala landscape mediante procesos superficiales impulsados por agua y viento. La erosión hídrica desencadena un proceso destructivo que comienza con la separación de partículas del suelo por acción de la lluvia, continúa con su transporte mediante escorrentía superficial y finaliza con la sedimentación en nuevos territorios. La erosión eólica representa una forma más gradual pero igualmente efectiva de movilización, generada por el movimiento y transporte de partículas finas a través de la acción del viento sobre terrenos secos y con escasa cobertura vegetal. Ambos procesos contribuyen significativamente a la dispersión horizontal de contaminantes metálicos hacia áreas originalmente no impactadas.

La complejación emerge como el proceso químico mediante el cual los metales establecen enlaces reversibles con aniones inorgánicos (F^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-}) o con compuestos orgánicos como malatos, ácidos orgánicos y citratos, formando complejos metálicos que alteran sustancialmente su comportamiento ambiental. Las especies que se enlazan al ión metálico se denominan ligandos, y el producto resultante de esta unión se conoce como complejo. Un caso especial de este fenómeno es la quelación, donde el ligando se une por dos o más sitios a un ión metálico, modificando drásticamente la solubilidad de los metales pesados y aumentando su biodisponibilidad para la absorción por organismos vivos. En contraste, la precipitación representa el proceso inverso mediante el cual las especies solubles de metales pesados reaccionan químicamente y abandonan la so-

lución en forma de sólidos, como hidróxidos, carbonatos o minerales de sulfuro, quedando así temporalmente inmovilizados en la matriz del suelo hasta que cambios en las condiciones ambientales permitan su redisoluci ón y reactivaci ón.

Figura 1. Dinámica de los metales pesados en el suelo



Fuente: adaptado de Cruz & Guzmán (2007).

Factores edáficos que interactúan en la movilidad

a) Potencial de Hidrógeno (pH)

La mayoría de los metales pesados tienden a estar más disponibles a pH ácido, excepto As, y Cr, los cuales tienden a estar más disponibles a pH Alcalino. El pH, es un parámetro importante para definir la movilidad del catión, debido a que en medios de pH moderadamente alto se produce la

precipitación como hidróxidos. En medios muy alcalinos, pueden nuevamente pasar a la solución del suelo como hidroxicomplejos. Por otra parte, algunos metales pueden estar en la disolución del suelo como aniones solubles, tal es el caso del As, Cr. La adsorción de los metales pesados está fuertemente condicionada por el pH del suelo y por tanto, su solubilidad. b) Arcilla la arcilla tiende a adsorber a los metales pesados, que quedan retenidos en sus posiciones de cambio, sin embargo, a medida que disminuya el porcentaje de arcilla los metales pesados pueden contaminar los niveles freáticos. cada tipo de arcilla tiene unos determinados valores de superficie específica y descompensación eléctrica. Ambas características son las responsables del poder de adsorción de estos minerales.

b) Materia orgánica

La materia orgánica con los metales pesados forma complejos de cambio y quelato, estos pueden migrar con mayor facilidad a lo largo del perfil. La materia orgánica puede adsorber tan fuertemente a algunos metales, que pueden quedar en posición no disponible por las plantas, por el contrario, la complejación por materia orgánica del suelo es uno de los procesos que gobierna la solubilidad y la absorción de metales pesados. La toxicidad de los metales pesados se potencia en gran medida por su fuerte tendencia a formar complejos organometálicos, lo que facilita su solubilidad y disponibilidad. Como parte de la materia orgánica encontramos a las sustancias húmicas (ácidos fúlvicos, huminas y ácidos húmicos), donde los ácidos fúlvicos pueden formar complejos metálicos más solubles, biodisponibles y móviles, por el contrario, los ácidos húmicos tienden a inmovilizar y a acumular al metal en la fase sólida del suelo.

c) Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

La capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) es función del contenido de arcilla y materia orgánica, fundamentalmente. En general cuando mayor sea la capacidad de intercambio catiónico, mayor será la capacidad del suelo de fijar metales. El poder de adsorción de los distintos metales pesados depende de su valencia y del radio iónico hidratado; a mayor tamaño y menor valencia, menos fuertemente quedan retenidos.

d) *Potencial redox (Eh)*

El potencial de oxidación-reducción es responsable de que el metal se encuentre en estado oxidado o reducido: por ejemplo: i) cambio directo en la valencia de ciertos metales, los iones reducidos son mucho más solubles, ii) las condiciones redox pueden afectar indirectamente la movilidad de metales, así muchos metales están asociados o adsorbidos a hidróxidos de Fe y Mn.

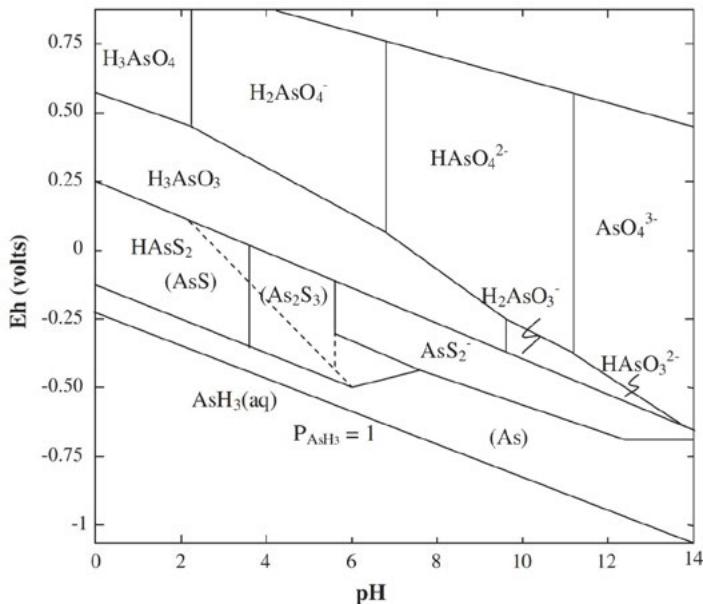
Metales pesados en estudio

a) *El arsénico (As)*

El arsénico (As) es uno de los metaloides más tóxicos presentes en el ambiente y su especiación depende de diversos factores químicos, físicos y biológicos. La distribución y contaminación del arsénico se debe a procesos naturales y antropogénicos, y su problemática se debe a su fácil movilización en el ambiente. La comprensión del comportamiento en función del Eh y pH del arsénico y su movilización es importante para el desarrollo de estrategias que ayuden en la descontaminación de suelo afectados por la contaminación de arsénico.

El estado de oxidación del As y su movilidad se controlan fundamentalmente por las condiciones redox (potencial redox Eh) y el pH (Figura 2). La mayor proporción de compuestos de arsénico en suelos y sedimentos suele ser As (III) y As (V). En condiciones oxidantes, el arsénico inorgánico está presente predominantemente como As (V). H_2AsO_4^- es la especie más estable entre pH 2 y 7, mientras que HAsO_4^{2-} es la especie más estable por encima de pH 7. As (V) puede reducirse a As (III) en condiciones moderadamente reductoras ($\text{Eh} < 100 \text{ mV}$), que puede ser inducido por inundaciones. H_3AsO_3 es la especie predominante dentro del rango de pH normal del suelo (pH 4 a 9) y es estable hasta aproximadamente pH 9. La arsina gaseosa (AsH_3) se puede formar en condiciones extremadamente reducidas. La biotransformación y metilación del arsénico ocurren naturalmente como resultado de la actividad microbiana (Wang & Mulligan, 2006).

Figura 2. El diagrama Eh – pH para el arsénico a 25 °C y 101,3 kPa



Fuente: Wang & Mulligan (2006).

El arsénico existe principalmente como arseniato inorgánico (AsV) o arsenito (AsIII), ambos muy tóxicos. El AsV es un análogo del fosfato y puede ser tóxico cuando se interfiere con procesos esenciales que requieren fosfato, como la síntesis de ATP. Por el contrario, la toxicidad de AsIII se originó por su tendencia a unirse con tioles (Wan et al., 2020). El arsenito (As (III)) y el arsenato (As (V)) son las dos formas comunes en las que el arsénico existe en el suelo y el agua subterránea, siendo el primero más móvil y tóxico (Kumari & Jagadevan, 2016).

Los relaves y efluentes de las minas generalmente contienen altas concentraciones de arsénico y son motivo de preocupación como posibles fuentes de contaminación ambiental. En los relaves de la mina, el arsénico se presenta en diversas formas, como arsenopirita (FeAsS), pirita de arsénico (AsFeS_2), arseniatos y asociado con oxihidróxidos de hierro (Wang & Mulligan, 2006).

El arsénico se puede encontrar en diferentes estados de oxidación: arseniato As (V), arsenito As (III), As elemental (o) y arseniuro As (-III)

(Tsai et al., 2009); encontrándose más frecuentemente como arsenito o arseniato. El arsenito es 70 veces más tóxico que las especies metiladas y 10 veces más tóxico que el arseniato, el cual es poco soluble en agua y, por tanto, menos biodisponible (Valenzuela et al., 2009).

El As (III) se encuentra como H_3AsO_3 y sus correspondientes productos de disociación (H_4AsO^{3+} , $H_2AsO_3^{2-}$ y AsO_3^{3-}), los cuales, en condiciones oxidantes, son dominantes a pH alcalinos. Sin embargo, la forma sin carga del As (III) $[As(OH)_3]$ es dominante en ambientes reducidos y anóxicos, siendo así el más tóxico y difícil de eliminar. Por su parte el As (V) está presente en la forma H_3AsO_4 y sus correspondientes productos de disociación ($H_2AsO_4^{2-}$, $HAsO_4^{2-}$, AsO_4^{3-}), siendo dominante bajo condiciones oxidantes a pH ácidos en ambientes acuosos y aeróbicos (Tsai et al., 2009). La escala de toxicidad de los compuestos de arsénico decrece en el siguiente orden: arsina (H_3As) > arsenito (As III) > arseniato (As V) > compuestos arsenicales > arsénico elemental. Cuando el arsénico se encuentra en formas insolubles, como un mineral en combinación con sulfuro y hierro: oropimente (por ejemplo: trisulfuro de arsénico As_2S_3) y rejalar (por ejemplo: Arsenopirita $FeAsS$), no se considera tóxico. En cambio, cuando se encuentra en formas solubles, como As (III) y As (V), es tóxico para los organismos vivos.

b) Plomo (Pb)

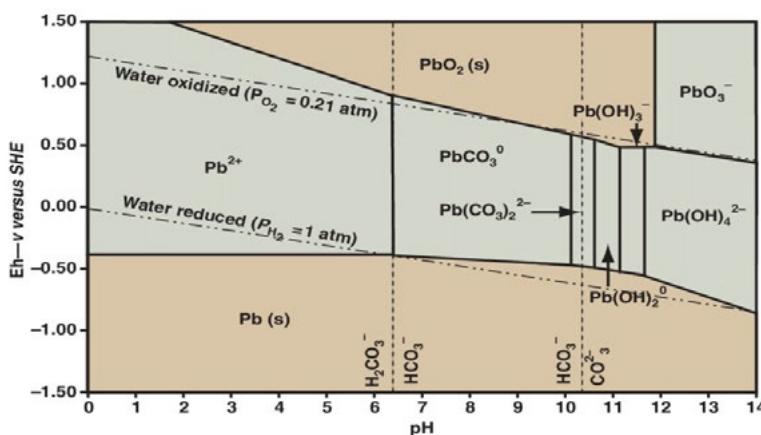
El Plomo (Pb) es un metal dañino que tiene efectos tóxicos para muchos órganos del cuerpo, se absorbe a través de la piel, pero principalmente a través de los sistemas respiratorios y digestivos. La exposición al Pb puede inducir trastornos neurológicos, respiratorios, urinarios y cardiovasculares debido a mecanismos de inmunomodulación, oxidativos e inflamatorios (BalaliMood et al., 2021).

El plomo se encuentra presente en un gran número de minerales, siendo el más común el sulfuro de plomo (galena: PbS), también son comunes, aunque en orden decreciente, la cerusita ($PbCO_3$) y la anglesita ($PbSO_4$). El plomo es un metal poco móvil, es así que el principal riesgo relacionado con el plomo no radica en su solubilidad ya que precipita como carbonato o sulfato. Debido a su tamaño y carga, el plomo (Pb^{2+}) puede sustituir al calcio (Ca^{2+}), y además de manera preferente se acumula en los tejidos óseos.

El plomo en el suelo a pH ácidos tiene una alta desorción, pero debido a que es poco móvil permanece en los horizontes superiores y es poco asimilable por las plantas. El plomo tiene una gran afinidad con las sustancias húmicas. El plomo puede bioacumularse en ciertas partes de algunas plantas en los que no tiene efecto alguno y que luego serán ingeridas por animales o personas en las que si podrá ejercer efectos adversos.

En la Figura 3, se muestra que la región de estabilidad redox para PbO_2 se ensancha a medida que aumenta el pH. El cambio en el límite del campo de estabilidad es consistente con la observación experimental de que el PbO_2 se formó más fácilmente a un pH más alto, lo que podría atribuirse a un nivel más alto de sobresaturación y una mayor fuerza motriz termodinámica para el mismo ORP (Lytle & Schock, 2005).

Figura 3. Diagrama fuerza electromotriz-pH para el sistema plomo-aguacarbonato



Fuente: Lytle & Schock (2005).

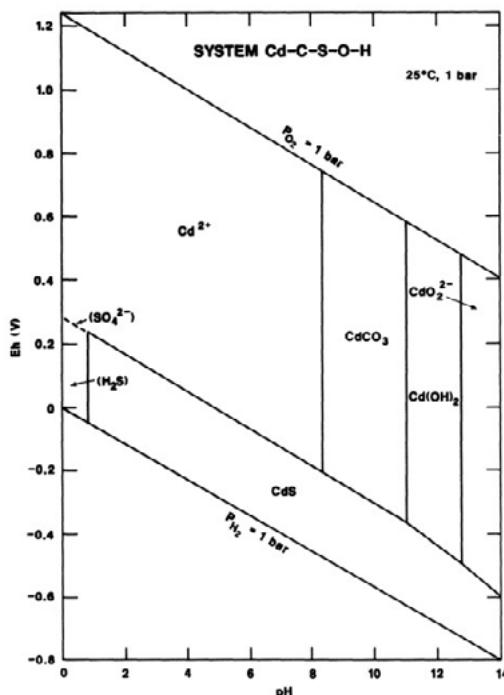
c) Cadmio (Cd)

El Cadmio (Cd) se encuentra naturalmente en el suelo y en minerales como sales de sulfuro, sulfato, carbonato, cloruro e hidróxido, así como en el agua (Balali-Mood et al., 2021). Entre los minerales de cadmio, la greenockita (CdS) es el más común. Este mineral se encuentra casi siempre asociado con la esfalerita (ZnS). De esta manera, el cadmio se recupera

principalmente como un subproducto de la minería, fundición, y refinación del zinc, y en menor grado de la del plomo y cobre.

El diagrama Eh-pH para el sistema Cd-C-S-O-H se muestra en la Figura 4. Por debajo del límite de sulfuro-sulfato, existe un gran campo de CdS (greenockita), aunque en la naturaleza gran parte del Cd en estas condiciones está camuflado por Zn en minerales como la esfalerita. Por encima de este límite, el Cd^{2+} ocupa un gran campo Eh-pH bajo un pH ligeramente básico a muy ácido. A pH más altos, se forma CdCO_3 , luego Cd(OH)_2 y luego CdO_2^{2-} acuoso (Brookins, 1988).

Figura 4. Diagrama Eh-pH para parte del sistema Cd-C-S-O-H



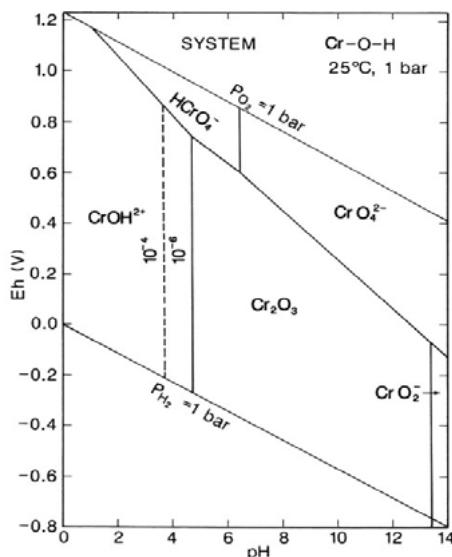
Fuente: Brookins (1988).

d) Cromo (Cr)

El Cromo (Cr) tiene varios estados de oxidación que va desde -2 +6, en la que Cromo (III) y Cromo (VI) son las formas estables más comunes,

siendo el Cr (VI) cancerígeno, más tóxico y móvil que el Cr (III). El Cr (VI) está relacionado con una serie de enfermedades y patologías, mientras que el Cr (III) se requiere en cantidades traza para el metabolismo natural de lípidos y proteínas (Balali-Mood et al., 2021). En la Figura 5 se representan gráficamente los campos de estabilidad en función del Eh-pH. Gran parte del espacio Eh-pH está ocupado por Cr_2O_3 insoluble. Esta especie se disuelve para formar CrOH^{2+} ligeramente por debajo de pH = 5 (actividad de Cr = 10^{-6}), y para formar CrO_4^{2-} por encima de pH 13,5. Cr (III) se oxida para formar Cr (VI) como HCrO_4^- y los iones CrO_4^{2-} a Eh alta. Las especies de Cr (VI) son carcinógenos conocidos, y se observa que tanto el HCrO_4^- como el CrO_4^{2-} ocupan campos Eh-pH bastante grandes (Brookins, 1988).

Figura 5. Diagrama Eh-pH para parte del sistema Cr-O-H.



Fuente: Brookins (1988).

Definición de términos

- **Bofedal:** son ecosistemas altoandinos hidromórfico con vegetación herbácea de tipo hidrófila de gran importancia ambiental, social y económica, que proveen bienes y servicios para satisfacer las necesidades de la población asentada en sus cercanías; ade-

más, son considerados como ecosistemas frágiles por la alta y constante presión a la que están expuestos (MINAM, 2019).

- **Metales pesados:** nombre de un grupo para metales y metaloides que se han asociado con contaminación y toxicidad potencial o ecotoxicidad (Duffus, 2002).
- **Metales:** elementos que conducen electricidad, tienen brillo metálico, son maleables y dúctiles, forman cationes y tienen óxidos básicos.
- **Metaloides:** es un elemento que tiene propiedades intermedias entre la de los metales y las de los no metales. Los metaloides también se pueden llamar semimetales.
- **Movilidad:** concepto utilizado en la ciencia del suelo para estimar el riesgo de contaminación a otros componentes ambientales (agua, vegetación), toxicidad y procesos físico-químicos que gobernan la migración y/o inmovilización de metales pesados en el suelo.
- **Pasivo Ambiental Minero (PAM):** son instalaciones, efluentes, emisiones, restos o depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, abandonadas o inactivas y que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población y el ecosistema circundante y la propiedad (Castillo et al., 2021).

[3] Capítulo

*El Mapa del Riesgo Oculto: Descifrando los
Caminos de la Contaminación Minera*

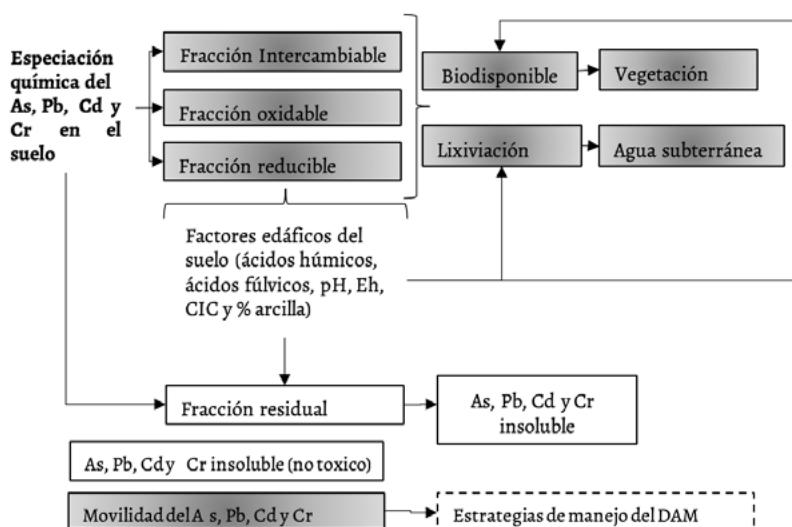
MOVILIDAD TÓXICA

Esta investigación adopta un enfoque explicativo que busca develar las complejas relaciones causales detrás de la movilidad del arsénico, plomo, cadmio y cromo en el ecosistema de bofedal, centrándose específicamente en cómo la especiación química interactúa con los factores edáficos para determinar el destino de estos contaminantes. El diseño no experimental permite observar estos fenómenos en su estado natural sin manipulación artificial de variables, preservando así las interacciones ecológicas auténticas que gobiernan los procesos de movilidad metálica en este ambiente vulnerable. Este acercamiento metodológico reconoce que los sistemas ambientales funcionan como redes complejas donde múltiples factores interactúan simultáneamente, requiriendo por tanto un análisis que capture estas dinámicas sin alterarlas mediante intervenciones experimentales que podrían simplificar artificialmente la realidad del ecosistema.

El Diagrama de la Movilidad: Un Camino de Tres Vías

El diseño de la investigación se articula alrededor de un diagrama integral que traza las múltiples rutas posibles de los metales pesados a través del ecosistema, reconociendo que la contaminación sigue caminos simultáneos que deben ser evaluados de manera conjunta para comprender el riesgo completo. La especiación química en el suelo constituye el núcleo de esta evaluación, distinguiendo entre la fracción móvil —compuesta por las fracciones intercambiable, oxidable y reducible— y la fracción no móvil representada por la fracción residual insoluble. Paralelamente, se medirá un conjunto completo de factores edáficos incluyendo ácidos húmicos, ácidos fulvicos, pH, potencial redox (Eh), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y porcentaje de arcilla, para identificar cuáles ejercen mayor influencia en los procesos de movilidad. La evaluación se complementa con el análisis de la transferencia trófica mediante factores de bioconcentración hacia la vegetación y el monitoreo de la lixiviación hacia aguas subterráneas, creando así un modelo tridimensional de la dispersión contaminante.

Figura 6. Diagrama para determinar la movilidad del As, Pb, Cd y Cr en el suelo del bofedal



Fuente: Palomino Cadenas (2022).

Los Métodos del Desciframiento: Cuatro Pasos hacia la Verdad Química

La investigación de la movilidad en el suelo se realizará mediante un protocolo de especiación química de cuatro etapas adaptado de Hu et al. (2017), diseñado para discriminar entre las diferentes formas químicas que determinan el comportamiento ambiental de los metales. La primera etapa se enfoca en la fracción intercambiable, donde se utilizará ácido acético 0.11 M para extraer los metales débilmente adsorbidos y más inmediatamente disponibles para los organismos. La segunda etapa targeting la fracción reducible empleará hidrocloruro de hidroxilamina 0.5 M a pH 1.5 para liberar metales asociados con óxidos de hierro y manganeso que podrían movilizarse bajo condiciones reductoras. La tercera etapa abordará la fracción oxidable mediante peróxido de hidrógeno 8.8 M para extraer metales vinculados a materia orgánica y sulfuros, que se liberarían bajo condiciones oxidantes. La cuarta etapa cuantificará la fracción residual contenida en estructuras minerales estables, representando la porción no móvil que permanece inertizada en la matriz del suelo.

Del Suelo a la Vida: Rastreando la Transferencia Trófica

La evaluación de la movilidad hacia la vegetación empleará el factor de bioconcentración (BFC) como metric clave para cuantificar la transferencia de metales desde el suelo hacia los tejidos vegetales, según la metodología descrita por Gemedá et al. (2021). Este índice se calculará mediante la relación entre la concentración de cada metal en los tejidos de la planta (C_{planta}) y su concentración correspondiente en el suelo (C_{suelo}), proporcionando una medida estandarizada de la eficiencia de absorción y acumulación para cada especie metálica y vegetal. Este enfoque permitirá identificar no solo la magnitud de la transferencia, sino también las diferencias específicas entre metales y posiblemente entre especies vegetales en su capacidad para acumular estos contaminantes, información crucial para evaluar el riesgo de entrada en las cadenas tróficas que sustentan la ganadería local.

$$BFC = \frac{C_{planta}}{C_{suelo}}$$

Donde, BFC es el Factor de Bioconcentración, C_{planta} es la concentración de As, Pb, Cd y Cr en la planta y C_{suelo} es la concentración de As, Pb, Cd y Cr en el suelo.

Las Aguas Subterráneas: El Río Oculto de la Contaminación

El monitoreo de la movilidad hacia aguas subterráneas involucrará la colecta estratégica de muestras de siete piezómetros instalados en ubicaciones representativas del bofedal, siguiendo el protocolo establecido por Defo et al. (2017). Cada muestra se recolectará a 30 centímetros por debajo del nivel freático para capturar agua que ha interactuado significativamente con la zona radicular y la matriz del suelo contaminado. Además de la cuantificación de metales, se medirán parámetros críticos como pH, conductividad eléctrica (CE) y potencial redox (Eh) que influyen directamente en la solubilidad y movilidad de los contaminantes, permitiendo así

correlacionar las condiciones hidrogeoquímicas con las concentraciones detectadas de arsénico, plomo, cadmio y cromo.

Estrategias de Contención: De la Diagnóstico a la Solución

La identificación de las fracciones móviles de metales through la especiación química proporcionará la base científica para diseñar estrategias específicas de manejo del drenaje ácido de mina orientadas a la inmovilización de contaminantes. Las intervenciones propuestas se estructurarán en tres enfoques complementarios: estabilización física mediante control de erosión en taludes de relaves y construcción de sedimentadores que prevengan la dispersión particulada; estabilización química through la aplicación de enmiendas específicas que transformen las formas móviles de metales en especies insolubles y estables; y estabilización biológica mediante revegetación con especies seleccionadas que estabilicen el suelo y reduzcan la infiltración de agua. El análisis integrado de los procesos de sorción/desorción, precipitación/disolución y los factores de bioconcentración permitirá diseñar estrategias de contención multidimensionales que aborden simultáneamente la inmovilización en la fuente (relaves) y la prevención de la transferencia hacia otros componentes ambientales como aguas subterráneas y vegetación.

Muestra

La muestra espacial corresponde a siete puntos de muestreo, de las cuales cinco muestras son para el área de mayor impacto, un punto de muestreo como control (antes del relave) y un punto de muestreo post impacto. La muestra temporal se tomará 2 veces por año (una para la época de estiaje en el mes de junio y la otra para la época de lluvia en el mes de noviembre). Se realizarán 4 repeticiones por cada punto de muestreo, además se tomarán las siguientes consideraciones por componente ambiental.

- **Suelo:** se ubicarán siete puntos de muestreo, de los cuales uno se usará como control, otro como muestra post impacto y cinco puntos de muestreo para el área de mayor impacto (determinado mediante un muestreo estadístico, el cual se utiliza para compro-

bar de manera homogénea la presencia o ausencia y distribución de As, Pb, Cd y Cr en el suelo, realizada de manera sistemática con una retícula de dos hectáreas). En estos puntos de muestreo se tomará la muestra en los veinte primeros centímetros, ya que esta capa representa el mayor riesgo ecológico, para lo cual se recolectará 1/2 kg de suelo para determinar el As, Pb, Cd y Cr, además se medirán los parámetros edáficos del suelo (ácido húmicos y fúlvicos, CIC, % arcilla, pH y Eh). En el laboratorio se realizará la especiación química para el As, Pb, Cd y Cr, para los siete puntos de muestreo, para determinar su biodisponibilidad para las plantas o su lixiviación hacia el agua subterránea. De ser necesario se realizarán muestreos en el subsuelo (antes de 1.5 metros de profundidad).

- **Vegetación:** se realizarán análisis en siete puntos de muestreo (incluyendo el punto de control y el punto post impacto) de As, Pb, Cd y Cr en la vegetación en la parte aérea, medido en una unidad de muestreo de 1 m². La muestra será dividida en 4 sub muestras de 0.25 m² ubicadas en forma de cruz.
- **Agua subterránea:** análisis en siete puntos de muestreo (incluye el punto de control y el punto post impacto) de As, Pb, Cd y Cr mediante piezómetros instalados (puntos de observación), además se medirá los parámetros de campo (pH, Eh y CE), para explicar la movilidad.

Técnicas de acopio de información

La investigación se llevará a cabo en tres etapas

Etapa 1: pre-campo; se realizará una evaluación preliminar del área de estudio a partir de fuentes secundarias la cual permitirá definir el área impactada por As, Pb, Cd y Cr y los puntos de muestreo, los permisos correspondientes y la logística necesaria para la siguiente etapa.

Etapa 2: campo; se realizará los muestreos correspondientes del As, Pb, Cd y Cr en el área de estudio, siendo las fechas de muestreo una para la temporada de lluvia y la otra en temporada seca, además se medirá

los factores edáficos del suelo y los parámetros de campo para agua subterránea.

Etapa 3: gabinete; en esta etapa se efectuará el análisis, procesamiento, interpretación y discusión de los resultados. Se generarán los modelos de regresión lineal múltiple de la movilidad del As, Pb, Cd y Cr en el suelo evaluado.

Tratamiento estadístico de datos e información

Las técnicas utilizadas para el procesamiento y análisis de datos se realizaran en programas estadísticos; aplicando estadística no paramétrica de medidas repetidas; Kolmogorov Smirnov y de Shapiro – Wilk (el cual indica la normalidad de los datos), correlación de Spearman (para analizar la relación entre los controles edáficos con respecto a la concentración del As, Pb, Cd y Cr), y Regresión lineal múltiple por el método “Enter” y por pasos (analiza qué variables son las predictoras, y las únicas que predicen) respectivamente.

Aspectos administrativos

Recursos humanos

Asesor.

Tesista.

Bienes y servicios

Bienes

Libros de la especialidad, Lap top.

Microsoft Office.

Cuaderno de apuntes, papel bond, lapicero, lápiz, borrador.

Servicios

Movilidad, alimentación

Fotocopias, impresión, anillado, empastado.

Telefonía.

Presupuesto

El presupuesto del proyecto de tesis se muestra en Tabla 2, la cual asciende a veinte y cuatro mil quinientos cuarenta y cinco con 40 /100 Soles (S/ 24,545.40).

Tabla 2. Presupuesto

Nº	Descripción	Uni- dad	Canti- dad	Precio Uni- tario (S/)	Parcial (S/)
1	Personal				
1.1	Personal de apoyo	Día	6	40	240.00
	Costo total personal				240.00
2	Bienes	Unidad	Cantidad	Precio Unitá- rio (S/)	Parcial (S/)
2.1	Libros de la especialidad	Und	2	150	300.00
2.2	Wincha de 50 m	Und	1	60	60.00
	Costo total bienes				360.00
3	Servicios	Unidad	Cantidad	Precio Unitá- rio (S/)	Parcial (S/)
3.1	Suelo				14,712.60
3.1.1	Especiación química del As, Pb, Cd y Cr	Glb	14	885.6	12,398.40
3.1.2	Controles edáficos (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos, CIC, % de arcilla, pH, Eh)	Glb	14	165.3	2,314.20
3.2	Agua subterránea				4,768.40
3.2.1	As, Pb, Cd y Cr total	Glb	14	213.8	2,993.20
3.2.2	Parámetros de campo (Eh, pH, y CE)	Glb	14	26.8	375.20
3.2.3	Instalación de piezómetros	Glb	7	200	1,400.00
3.3	Vegetación				3,984.40
3.3.1	As, Pb, Cd y Cr total en parte aérea de la planta	Glb	14	284.6	3,984.40
3.4	Otros servicios				480.00
3.4.1	Movilidad	Glb	6	50	300.00
3.4.2	Alimentación	Glb	6	30	180.00
	Costo total servicios				23,945.40
	Costo Total				24,545.40

Son: Veinte y cuatro mil quinientos cuarenta y cinco con 40 /100 Soles

Fuente: Palomino Cadenas (2022).

Financiación

La tesis será financiada por: 50 por ciento por el tesista y 50 por ciento por el proyecto de investigación “Sistema de biorremediación compacto aerobio-anaerobio (BIODAM) para el tratamiento de drenaje acido de mina (DAM) del pasivo ambiental minero de Mesapata, Recuay, Ancash” desarrollado por la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo bajo el contrato 044-2021 FONDECYT.

El cronograma del proyecto de tesis se muestra en Tabla 3, la cual tiene una duración de 12 meses.

Tabla 3. Cronograma de actividades

Actividades	Meses											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Revisión de fuentes bibliográficas												
Diagnóstico del área de estudio												
Muestreo del As, Pb, Cd y Cr en agua subterránea, suelo y vegetación												
Análisis de parámetros en laboratorio												
Análisis y procesamiento de datos												
Interpretación de resultados												
Discusión de los resultados												
Elaboración del informe final												

Fuente: Palomino Cadenas (2022).

Matriz de consistencia

Definición del problema	Hipótesis
<p>El Pasivo Ambiental Minero (PAM) de Mesapata viene contaminando al bofedal que está en su entorno, mediante el Drenaje Ácido de Mina (DAM) y lixiviados cargados con metales pesados el cual degrada el bofedal. Esta degradación por la toxicidad del As, Pb, Cd y Cr, afecta los servicios ecosistémicos que provee el bofedal. Por lo que es necesario comprender la movilidad de los metales pesados en los suelos contaminados y sus amenazas potenciales para la vegetación y las aguas subterráneas.</p> <p>¿Cuál es la movilidad del As, Pb, Cd y Cr en el bofedal del entorno del pasivo ambiental minero de Mesapata, Ancash – Perú, 2022-2023?</p>	<p>El bofedal del entorno del Pasivo Ambiental Minero (PAM) de Mesapata se encuentra a una altitud de 3525 m s.n.m. a esta altitud la temperatura ambiental es baja y hay deficiencia de oxígeno por lo que la materia orgánica en el bofedal se degradada lentamente y existe acumulación de materia orgánica en forma de turba, lo cual favorece la adsorción del Plomo (Pb), Cadmio (Cd) y Cromo (Cr) a excepción del Arsénico (As), ya que este último existe en la naturaleza en forma de anión, además, el régimen de lluvia de octubre a abril favorece la erosión de metales pesados del relave minero al bofedal. El Drenaje Ácidos de Mina tiene pH ácidos lo que favorece la lixiviación, solubilidad del Pb, Cd y Cr a excepción del As que precipita a estos niveles de pH. Por lo que la movilidad del As, Pb, Cd y Cr en el suelo está condicionada a su especiación química e interacción con los factores edáficos del suelo y su concentración en la parte aérea de la planta y la concentración en el agua subterránea. Siendo la movilidad del Pb, Cd y Cr es baja y la del As es alta, en el bofedal.</p>

Variables e Indicadores	Metodología
Suelo	Tipo de investigación
Variable Dependiente	Explicativo
Movilidad del As, Pb, Cd y Cr en el suelo Indicador:	Diseño de investigación
• Especiación química	No experimental
Variables independientes Factores edáficos del suelo Indicadores:	Movilidad en el suelo
<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="129 591 463 640">• Materia orgánica (ácidos húmicos y fulvicos) <li data-bbox="129 644 463 693">• Capacidad de Intercambio catiónico (CIC) <li data-bbox="129 696 463 745">• % de arcilla <li data-bbox="129 749 463 776">• Potencial de Hidrogeno (pH) <li data-bbox="129 749 463 776">• Potencial redox (Eh) 	Se determinará mediante la especiación química del As, Pb, Cd y Cr en el suelo, se determinará:
Vegetación	Fracción móvil
Variable Dependiente	• Fracción intercambiable
Movilidad del As, Pb, Cd y Cr hacia la vegetación Indicador:	• Fracción oxidable
• As, Pb, Cd y Cr en la parte aérea de la planta	• Fracción reducible
Variable independiente As, Pb, Cd y Cr en el suelo Indicador:	Fracción no móvil (insoluble)
<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="129 996 463 1045">• Fracción móvil del As, Pb, Cd y Cr 	• Fracción residual
Agua subterránea	Método: extracción secuencial de 3 etapas (Hu et al., 2017).
Variable Dependiente	Movilidad hacia la vegetación:
Movilidad del As, Pb, Cd y Cr hacia el agua subterránea Indicador:	Se determinará mediante la concentración de As, Pb, Cd y Cr en la parte aérea de la planta:
• As, Pb, Cd y Cr total en el agua subterránea	Método: Factor de bioconcentración (Gemedá et al., 2021)
Variables independientes Parámetros de campo Indicadores:	Movilidad hacia el agua subterránea
<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="129 1259 463 1290">• Potencial de Hidrogeno (pH) <li data-bbox="129 1294 463 1317">• Potencial redox (Eh) <li data-bbox="129 1321 463 1344">• Conductividad Eléctrica (CE) 	Se determinará mediante la concentración total del As, Pb, Cd y Cr en el agua subterránea:
Tratamiento estadístico	Método: As (DIN – 38405), Pb (PAR), Cd (Derivé de cation) y Cr (Oxidación alcalina con hipobromito)
Estadística no paramétrica	Población
• Kolmogorov Smirnov	La población son los componentes ambientales (suelo, vegetación y agua subterránea) del bofedal del entorno del pasivo ambiental minero de Mesapata
• Shapiro – Wilk	Muestra
Correlación de Spearman	Espacial: 7 puntos de muestreo para suelo, vegetación y agua subterránea distribuidos de la siguiente manera:
Regresión lineal múltiple	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="498 1181 971 1205">• Una (1) Muestra control antes del relave
	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="498 1208 971 1232">• Cinco (5) muestras en área de mayor impacto
	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="498 1237 820 1261">• Una (1) muestra post impacto
Temporal: dos (2) veces por año	Temporal: dos (2) veces por año
	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="498 1295 987 1321">• Una (1) para la época de estiaje (mes de junio)
	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="498 1323 987 1372">• Una (1) para la época de lluvia (mes de noviembre)

Fuente: Palomino Cadenas (2022).

MOVILIDAD TÓXICA

Referencias

- Balali-Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M. R., & Sadeghi, M. (2021). Toxic Mechanisms of Five Heavy Metals: Mercury, Lead, Chromium, Cadmium, and Arsenic. *Frontiers in Pharmacology*, 12. <https://doi.org/10.3389/fphar.2021.643972>
- Balmuri, S. R., Selvaraj, U., Kumar, V. V., Anthony, S. P., Tsatsakis, A. M., Golokhvast, K. S., & Raman, T. (2017). Effect of surfactant in mitigating cadmium oxide nanoparticle toxicity: Implications for mitigating cadmium toxicity in environment. *Environmental Research*, 152, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.10.005>
- Banerjee, S., Datta, S., Chattyopadhyay, D., & Sarkar, P. (2011). Arsenic accumulating and transforming bacteria isolated from contaminated soil for potential use in bioremediation. *Journal of Environmental Science and Health—Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 46(14), 1736–1747. <https://doi.org/10.1080/10934529.2011.623995>
- Bourg, A. C. M. (1995). Speciation of Heavy Metals in Soils and Groundwater and Implications for Their Natural and Provoked Mobility. In *Heavy Metals* (pp. 19–31). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79316-5_2
- Brookins, D. G. (1988). *Eh-pH diagrams for geochemistry*. Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-73093-1>
- Caporale, A. G., & Violante, A. (2016). Chemical Processes Affecting the Mobility of Heavy Metals and Metalloids in Soil Environments. *Current Pollution Reports*, 2(1), 15–27. <https://doi.org/10.1007/s40726-015-0024-y>
- Castillo, L., Satalaya, C., Paredes, Ú., Encalada, M., Zamora, J., & Cuadros, M. (2021). *Pasivos ambientales en el Perú*. Contraloría General de la República.
- Cruz, M., & Guzmán, Á. (2007). *La contaminación de suelos y aguas. Su prevención con nuevas sustancias naturales*. Universidad de Sevilla.
- Czikkely, M., Neubauer, E., Fekete, I., Ymeri, P., & Fogarassy, C. (2018). Review of heavy metal adsorption processes by several organic matters

- from wastewaters. *Water*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/w10101377>
- Defo, C., Kfuban, Y. B. P., Kaur, R., & Bemmo, N. (2017). Spatial distribution of heavy metals in groundwaters and health risks associated in the Ntem watershed, Yaoundé, Cameroon. *Water Science and Technology: Water Supply*, 17(3), 855–868. <https://doi.org/10.2166/ws.2016.178>
- Dianyi Yu, M. D. (2008). *Chromium (Cr) toxicity*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. <https://n9.cl/u90ek>
- Domergue, F. L., & Vedy, J. C. (1992). Mobility of heavy metals in soil profiles. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 46(1-3), 13–23. <https://doi.org/10.1080/03067319208026993>
- Duffus, J. H. (2002). “Heavy metals”–A meaningless term? (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*, 74(5), 793–807. <https://doi.org/10.1351/pac200274050793>
- Fang, W., Wei, Y., & Liu, J. (2016). Comparative characterization of sewage sludge compost and soil: Heavy metal leaching characteristics. *Journal of Hazardous Materials*, 310, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.02.025>
- Gemedha, F. T., Guta, D. D., Wakjira, F. S., & Gebresenbet, G. (2021). Occurrence of heavy metal in water, soil, and plants in fields irrigated with industrial wastewater in Sabata town, Ethiopia. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(10), 12382–12396. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10621-6>
- Hu, J., Zhou, S., Wu, P., & Qu, K. (2017). Assessment of the distribution, bioavailability and ecological risks of heavy metals in the lake water and surface sediments of the Caohai plateau wetland, China. *PLOS ONE*, 12(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0189295>
- Kumar, A., Kumar, A., Cabral-Pinto, M., Chaturvedi, A. K., Shabnam, A. A., Subrahmanyam, G., Mondal, R., Gupta, D. K., Malyan, S. K., Kumar, S. S., Khan, S. A., & Yadav, K. K. (2020). Lead toxicity: Health hazards, influence on food chain, and sustainable remediation approaches. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(7). <https://doi.org/10.3390/ijerph17072179>

- Kumari, N., & Jagadevan, S. (2016). Genetic identification of arsenate reductase and arsenite oxidase in redox transformations carried out by arsenic metabolising prokaryotes – A comprehensive review. *Chemosphere*, 163, 400–412. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.044>
- Lytle, D. A., & Schock, M. R. (2005). Formation of Pb(IV) oxides in chlorinated water. *Journal-American Water Works Association*, 97(11), 102–114.
- MINAM. (2015). *Guía para la elaboración de estudios de Evaluación de Riesgos a la Salud y el Ambiente (ERSA) en sitios contaminados*. Ministerio del Ambiente.
- MINAM. (2019). *Guia de evaluación del estado del ecosistema de bofedal*. Ministerio del Ambiente.
- Miranda, L. S., Wijesiri, B., Ayoko, G. A., Egodawatta, P., & Goonetilleke, A. (2021). Water-sediment interactions and mobility of heavy metals in aquatic environments. *Water Research*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117386>
- Pagnanelli, F., Moscardini, E., Giuliano, V., & Toro, L. (2004). Sequential extraction of heavy metals in river sediments of an abandoned pyrite mining area: Pollution detection and affinity series. *Environmental Pollution*, 132(2), 189–201. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.05.002>
- Palomino Cadenas, J. H. (2022). *Movilidad del As, Pb, Cd y Cr en el bofedal del entorno del pasivo ambiental minero de Mesapata, Ancash-Perú, 2022-2023* [Proyecto de tesis, Universidad Nacional]
- Pavesi, T., & Moreira, J. C. (2020). Mechanisms and individuality in chromium toxicity in humans. *Journal of Applied Toxicology*, 40(9), 1183–1197. <https://doi.org/10.1002/jat.3965>
- Solano, A. M. (2005). Estudio de la movilización de metales pesados. In *Movilización de metales pesados en residuos y suelos industriales afectados por la hidrometalurgia del Cinc* (pp. 21-40). Universidad de Barcelona.
- Soliman, N. K., & Moustafa, A. F. (2020). Industrial solid waste for heavy metals adsorption features and challenges; a review. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 10235–10253. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.045>

Tsai, S. L., Singh, S., & Chen, W. (2009). Arsenic metabolism by microbes in nature and the impact on arsenic remediation. *Current Opinion in Biotechnology*, 20(6), 659–667. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2009.09.013>

Valenzuela, C., Campos, V. L., Yañez, J., Zaror, C. A., & Mondaca, M. A. (2009). Isolation of arsenite-oxidizing bacteria from arsenic-enriched sediments from camarones river, Northern Chile. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 82(5), 593–596. <https://doi.org/10.1007/s00128-009-9659-y>

Violante, A., Cozzolino, V., Perelomov, L., Caporale, A. G., & Pigna, M. (2010). Mobility and bioavailability of heavy metals and metalloids in soil environments. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 10(3), 268–292. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162010000100005>

Wan, X., Lei, M., & Chen, T. (2020). Review on remediation technologies for arsenic-contaminated soil. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 14(2), 24. <https://doi.org/10.1007/s11783-019-1203-7>

Wang, S., & Mulligan, C. N. (2006). Occurrence of arsenic contamination in Canada: Sources, behavior and distribution. *Science of the Total Environment*, 366(2–3), 701–721. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.09.005>

Wei, L., Ding, Q., Guo, H., Xiu, W., & Guo, Z. (2021). Forms and mobility of heavy metals/metalloids in sewage-irrigated soils in the North China Plain. *Journal of Soils and Sediments*, 21(1), 39–50. <https://doi.org/10.1007/s11368-020-02744-7>



Religación
Press

Ideas desde el Sur Global



Religación
Press

ISBN: 978-9942-561-78-7



9 789942 561787