

Escuela Superior Politécnica del Litoral
Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Evaluación del potencial contaminante de los relaves
del Campo Minero Ponce Enríquez, Ecuador.

INGE-2208

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero de Minas

Presentado por:

Josue Alexander Marcillo Guillen

Guayaquil – Ecuador

Año: 2023-2024

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mi madre Lurdes Guillen, quien dio su vida por protegerme demostrando su amor incondicional aun en los momentos de adversidad.

A mi padre Joselito y mis hermanos Andrés y Carlos, que me permitieron seguir con mis estudios apoyándome incondicionalmente a pesar de los problemas.

A mi enamorada María Fernanda, quien me ha demostrado lealtad, respeto y amor, contribuyendo a mi desarrollo personal y apoyándome siempre en mi desarrollo profesional.

A mi mejor amigo Guido Calderón y mis amigos José, Fabián, Ayllin, Hilary, Denisse y Luis, quienes siempre me apoyaron y me brindaron consejos para no decaer en los momentos difíciles.

Agradecimientos

Gracias a Jesucristo por brindarme la sabiduría y fuerza para seguir día a día.

Agradezco al GAD del cantón Camilo Ponce Enríquez y al Ing. Luis Auquilla, director de Gestión Agrominera por su colaboración y gestión para hacer posible este proyecto.

Agradezco al Ing. Bryan Salgado, quien contribuyó significativamente en la campaña de muestreo.

Agradezco a mi tutora la Dra. Samantha Jiménez, quién fue guía principal para poder finalizar y presentar este proyecto.

Agradezco a mi familia, amigos, enamorada, quienes siempre estuvieron apoyándome, guiándome y dándome fuerzas para no declinar aun en los momentos más difíciles.

Agradezco a la Dra. Silvia Loaiza, quien desde el inicio de mi carrera estuvo guiándome, así como también a mis profesores quienes han contribuido en esta maravillosa experiencia que ha sido estudiar la carrera Ingeniería de Minas.

Declaración Expresa

“Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Josue Alexander Marcillo Guillen y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Josue Alexander Marcillo Guillen', is written over a horizontal line. The signature is highly stylized and cursive.

Josue Alexander Marcillo Guillen

Evaluadores



Firmado electrónicamente por:
SAMANTHA TAMARA
JIMENEZ OYOLA

Samantha Jiménez Oyola. Ph.D.

Profesor de Materia y Tutor

Resumen

Este proyecto se enfoca en la evaluación del potencial contaminante de los relaves del Campo Minero Ponce Enríquez, Ecuador. La problemática radica en la falta de información sobre las características de los residuos mineros y su potencial contaminante; información crucial para la gestión adecuada de estos residuos. El estudio se realizó en tres empresas mineras: FRANROMEC, AGRIPLAZA S.A y METALESA S.A. La metodología utilizada incluyó la caracterización física y química de los relaves, así como pruebas de lixiviación en laboratorio. Mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX) se determinó el contenido de elementos potencialmente tóxicos (EPT) como As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, y Zn. Además, se aplicó un Índice de Contaminación (IC) para cuantificar el potencial riesgo para el medio ambiente. Finalmente, se realizó un modelo conceptual de los posibles escenarios de riesgo hacia el medioambiente y población. Los resultados de la caracterización física revelaron que las muestras M02, M03 y M04 presentan un porcentaje de finos del 36 al 42%, mientras que en la muestra M01 el contenido de finos fue del 69.3%. Los valores de pH en las cuatro muestras estuvieron en el rango de 7.17 a 8.09, indicando condiciones neutras a ligeramente alcalinas. El análisis de FRX determinó que la muestra M04 contiene una mayor cantidad de EPT en comparación con las otras muestras, siendo predominante el As. A pesar de que las muestras M03 y M04 corresponden a relaveras de la misma empresa, hay una diferencia en el contenido de As entre ellas del 73.14 %; en estas muestras el As y Cr superan los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en la normativa ecuatoriana. El análisis físico de los minerales realizado por medio del estereomicroscopio mostró que las especies predominantes en las 4 muestras de relaves son la Hornblenda, Calcita, Cuarzo, Smithsonita, Calcedonia y Esmectita. Por otro lado, el IC resultó “muy alto” ($IC > 15.6$) para todas las muestras, debido a la presencia de As. La prueba de lixiviación mostró que el As en las muestras M03 y M04 superó los LMP de la regulación ecuatoriana para descargas en efluentes. Los resultados resaltan la importancia de la gestión adecuada de los residuos mineros para minimizar los impactos sobre el medio ambiente. Además, este estudio contribuye con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en aspectos como; Salud y bienestar (ODS 3), Agua limpia y saneamiento (ODS 6), Industria innovación e infraestructura (ODS 9), y Producción y consumo responsables (ODS 12).

Palabras clave: Elementos potencialmente tóxicos, metales pesados, relaves mineros, índice de contaminación, test de lixiviación, modelo conceptual de riesgo.

Abstract

This study analyzes the potential contamination of tailings from the Ponce Enríquez Mining Area, Ecuador. The study was conducted at three mining companies: FRANROMEC, AGRIPLAZA S.A., and METALESA S.A. The methodology used included physical and chemical characterization, as well as laboratory leaching tests. The content of potentially toxic elements (PET) such as As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn was determined using X-ray fluorescence (FRX). In addition, a Contamination Index (IC) was applied to quantify the potential environmental risk. Finally, a conceptual model of the possible risk scenarios to the environment and population was developed. The results of the physical characterization revealed that samples M02, M03, and M04 have a fine content of 36-42%, while sample M01 has a fine content of 69.3%. The pH values in the four samples were in the range of 7.17 to 8.09, indicating neutral to slightly alkaline conditions. The FRX analysis determined that sample M04 contains a higher amount of PTEs compared to the other samples, with As being the predominant element. Although samples M03 and M04 correspond to tailings from the same company, there is a difference in the As content between them of 73.14%; in these samples, As and Cr exceed the maximum permissible limits (MPL) established in Ecuadorian regulations. The results of the physical analysis using a stereomicroscope indicated that the predominant species for the four tailings samples were hornblende, calcite, quartz, smithsonite, chalcedony, and smectite. On the other hand, the IC was "very high" (IC > 15.6) for all samples, due mainly to the presence of As. The leaching test showed that the As in samples M03 and M04 exceeds the MPLs subject to Ecuadorian regulations for discharges. The results of this study underscore the importance of proper management of mining waste to minimize potential impacts on the environment. The study also seeks to contribute to the Sustainable Development Goals (SDGs), addressing aspects such as Health and well-being (SDG 3), Clean water and sanitation (SDG 6), Industry, innovation, and infrastructure (SDG 9), and Responsible production and consumption (SDG 12).

Keywords: *Potentially toxic elements, heavy metals, mining tailings, pollution index, leaching test, risk conceptual model.*

Índice general

Resumen	I
Palabras clave:	I
<i>Abstract</i>	II
<i>Keywords:</i>	II
Índice general.....	III
Abreviaturas.....	V
Simbología.....	VI
Índice de figuras.....	VII
Índice de tablas	VIII
Capítulo 1	1
1.1 Introducción.....	2
1.2 Problemática.....	3
1.3 Justificación del problema.....	4
1.4 Objetivos	4
1.4.1Objetivo general: -----	4
1.4.2Objetivos específicos: -----	4
1.5 Marco teórico.....	5
1.5.1Relaves mineros -----	5
1.5.2Potencial contaminante de los relaves mineros -----	5
Capítulo 2	8
2. Metodología	9
2.1 Zona de estudio.....	9
2.2 Campaña de muestreo y preparación de muestras	10
2.3 Análisis de laboratorio	11
2.3.1Caracterización física -----	11
2.3.1.1. Análisis granulométrico -----	12
2.3.1.2. Determinación de pH -----	12

2.3.1.3. Límites Atterberg	13
2.3.2 Caracterización química de los relaves mineros	14
2.3.3 Identificación de las especies minerales	14
2.4 Prueba de lixiviación	15
2.5 Evaluación del Índice de contaminación (IC)	16
2.6 Modelo conceptual de riesgo	17
Capítulo 3	18
3. Resultados y análisis	19
3.1 Caracterización física	19
3.1.1 Caracterización Granulométrica	19
3.1.2 Límites de Atterberg	20
3.2 Caracterización química de los relaves mineros	21
3.3 Identificación de especies minerales	22
3.4 Índice de contaminación	23
3.5 Prueba de Lixiviación	24
3.6 Modelo conceptual de riesgo	24
Capítulo 4	26
4. Conclusiones y recomendaciones	27
4.1 Conclusiones	27
4.2 Recomendaciones	28
ANEXOS	29
Anexo A. Reporte de laboratorio. Concentración de EPT en muestra de relaves	29
Anexo B. Reporte de laboratorio. Concentración de EPT en las muestras de lixiviados	31

Abreviaturas

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ARCERNNR	Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables
EPT	Elementos Potencialmente Tóxicos
DAM	Drenaje Ácido de Mina
LMP	Límite Máximo Permisible
TULSMA	Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
FICT	Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
LEMAT	Laboratorio de Evaluación de Materiales
IC	Índice de Contaminación
LL	Límite Líquido
LP	Límite Plástico

Simbología

As	Arsénico
Cd	Cadmio
Cu	Cobre
Pb	Plomo
Cr	Cromo
CN	Cianuro Total
Zn	Zinc
pH	Potencial hidrógeno
°C	Grados Centígrados
Kg	Kilogramos
gr	Gramos
m	Metros
mm	Milímetros
cm	Centímetro

Índice de figuras

Figura 1.1. Régimen general para la evaluación simplificada de riesgos de relaves mineros propuesto por el Servicio Geológico Español.	6
Figura 2.1. Mapa de ubicación de la zona de estudio y las relaveras (M01, M02, M03 y M04) muestreadas.	9
Figura 2.2. Campaña de adquisición de muestras de relaves.	10
Figura 2.3. (a) Muestras de relaves secadas al sol, (b) muestras de relaves secadas al horno, y (c) proceso de preparación de las muestras de relaves.	10
Figura 2.4. Eliminación de finos sobre el tamiz N° 200.	11
Figura 2.5. Tamizado de las muestras de relaves.	12
Figura 2.6. (a) Se pesa 100 gr de muestras, (b) por medio del agitador de cristal se revuelve la mezcla y se deja reposar, (c) se toma las medidas del pH	13
Figura 2.7. (a) Eliminación de finos por el tamiz N°40, (b) Cuchara de Casa grande (c) Toma de muestras después de cada ensayo, (d) Elaboración de rollitos para determinación de LP.	14
Figura 3.1. Curva granulométrica.	19
Figura 3.2. Curva para determinación de LL N° de golpes Vs Contenido de humedad.	21
Figura 3.3. Concentración de metales pesados en muestras de relaves	22
Figura 3.4. Modelo conceptual de riesgo asociados a los relaves mineros del cantón Camilo Ponce Enríquez.	25

Índice de tablas

Tabla 1.1. Casos de afectación ambiental producto de la inadecuada gestión de relaves mineros en Ecuador.....	7
Tabla 2.1. Ponderación del grado de contaminación dependiendo del valor del IC.	17
Tabla 3.1. Tabla para la determinación del límite líquido (LL).	20
Tabla 3.2. Tabla para la determinación de límite plástico (LP)	20
Tabla 3.3. Concentración de metales pesados [$\frac{\text{mg}}{\text{Kg}}$] y conductividad eléctrica (CE) [$\frac{\mu\text{c}}{\text{cm}}$] en muestras de relaves con sus valores de pH correspondiente.....	23
Tabla 3.4. Índice de contaminación (IC) total e IC calculado para cada EPT	23
Tabla 3.5. Resultados de prueba de lixiviación comparándolo con los límites máximos permisibles (LMP)	24

Capítulo 1

1.1 Introducción

La actividad minera ha contribuido notablemente al desarrollo social y económico del cantón Camilo Ponce Enríquez, provincia del Azuay. La extracción de oro como mineral de interés ha provocado que las empresas requieran de lugares para la disposición final y manejo de sus residuos mineros (relaves), siguiendo con la normativa establecida por la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables (ARCERNNR) y el Acuerdo Ministerial Nro. MERNNR-MERNNR-2020-0043-AM que establece un manual para la “Construcción, operación y mantenimiento de Depósitos de Relaves para la mediana y gran Minería” (AECERNNR, 2020).

Los relaves mineros, en su gran mayoría, contienen elementos potencialmente tóxicos (EPT) que pueden reaccionar químicamente con las condiciones ambientales, y además pueden generar drenaje ácido de mina (DAM) como consecuencia de la interacción de los sulfuros, agua y oxígeno, provocando un gran impacto ambiental en los cuerpos de agua superficial y subterránea, así como también generando un daño ambiental muchas veces irreversible (Peña-Carpio & Menéndez-Aguado, 2016).

Debido a su alto potencial contaminante, la inadecuada gestión y disposición de los relaves mineros puede generar un gran impacto ambiental, no solo en el sitio donde se realiza la actividad minera, ya que puede llegar a afectar áreas más grandes. Diversos estudios han reportado EPT como el As, Cd, Cr, Cu, Pb, Ni y Zn en ríos, sedimentos y suelos del Campo Minero Ponce Enríquez (Alfonso & Franco, 2017; Peña-Carpio & Menéndez-Aguado 2016). Los valores reportados en los citados estudios han superado en gran medida los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en la normativa ecuatoriana, acorde al Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente (TULSMA), del Ministerio de Ambiente de Ecuador.

Durante décadas, la población del cantón Camilo Ponce Enríquez se ha visto afectada por los estragos de una minería ilegal, mal gestionada y/o poco regulada, lo que ha impactado directamente en el ecosistema y en el bienestar y salud de sus pobladores. Un estudio realizado por Alfonso & Franco (2017), indicó que la afectación por plomo (Pb) en las zonas aledañas al sector minero Shumiral implica graves riesgos para el medio ambiente y la salud de sus pobladores, ya que las concentraciones de Pb en suelos agrícolas en las zonas bajas a las áreas mineras sobrepasan los LMP para suelos de cultivo. Además, Escobar-Segovia et al, (2021) y

Jiménez-Oyola et al, (2021) informaron sobre la presencia de contaminantes como As y Cd en suelos del campo minero Ponce Enríquez, además de As, Cu y Pb en aguas superficiales. Otros estudios han informado que la gestión inadecuada de los relaves mineros ha sido la causa de la liberación y movilización de los EPT al medio ambiente (Carling et al., 2013; Tarras-Wahlberg et al., 2000).

En este contexto, este estudio tiene como finalidad evaluar el riesgo potencial de los relaves de las empresas mineras FRANROMEC, AGRIPAZA S.A y METALESA S.A, que operan en el Campo Minero Ponce Enríquez, mediante la caracterización fisicoquímica de los relaves mineros y la determinación de su potencial contaminante. Este proyecto permitirá al GAD del cantón Camilo Ponce Enríquez contar con información crucial para la gestión sostenible de los relaves mineros. Conocer el potencial contaminante de los relaves permitirá una gestión adecuada de los residuos mineros, minimizando el impacto ambiental negativo para el medio ambiente y las comunidades. La caracterización de los relaves también permite buscar un uso alternativo de estos materiales en distintas industrias, motivando así la economía circular y la implementación de prácticas mineras sostenibles y amigables con el medio ambiente. Finalmente, este trabajo busca contribuir al desarrollo minero sostenible, dando cumplimiento con los Objetivos de Desarrollo Sostenible; Salud y bienestar (ODS 3), Agua limpia y saneamiento (ODS 6), Industria innovación e infraestructura (ODS 9), y Producción y consumo responsables (ODS 12).

1.2 Problemática

Los relaves mineros a menudo contienen una variedad de sustancias tóxicas y contaminantes como metales pesados, metaloides y productos químicos que pueden afectar directamente al suelo, a los recursos hídricos y a la población. La caracterización de los relaves permite identificar y cuantificar estos contaminantes. En la actualidad, no existe información detallada sobre el potencial contaminante de los relaves del campo minero Ponce Enríquez. Hasta el momento, los estudios previos han identificado el alto riesgo de afectación de los residuos mineros para la salud de la población y el medio ambiente generando una gran controversia sobre una minería responsable y sostenible. Por ello, es importante realizar estudios que permitan cuantificar estos contaminantes para su posterior gestión, de cara a la mitigación de los posibles escenarios de riesgo. En este contexto, este proyecto buscar proporcionar información

básica para evaluar los riesgos para la salud humana y el medio ambiente, caracterizando el potencial contaminante de los relaves de tres empresas mineras (FRANROMEC, AGRIPAZA S.A y METALESA S.A.) que se encuentran operando actualmente en el Campo Minero Ponce Enríquez.

1.3 Justificación del problema

La finalidad de este proyecto es evaluar el potencial contaminante de los relaves del distrito minero Ponce Enríquez mediante la caracterización física, química de los relaves dispuestos en las diferentes relaveras del cantón, teniendo dentro de la primera etapa la caracterización de los relaves de las empresas mineras FRANROMEC, AGRIPAZA S.A y METALESA S.A.

La información generada con este proyecto constituye el punto de partida para futuras gestiones encaminadas a tomar decisiones informadas sobre cómo manejar y tratar los relaves mineros de manera segura. Además, esta información es fundamental para el Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Camilo Ponce Enríquez, de cara a planificar la gestión de uso de suelo a nivel cantonal de manera segura y responsable con el medio ambiente y las comunidades.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general:

- Evaluar el potencial contaminante de los relaves del Campo Minero Ponce Enríquez para el análisis del riesgo potencial hacia el medio ambiente y las comunidades, a través de actividades de campo y laboratorio.

1.4.2 Objetivos específicos:

- Caracterizar los relaves del Campo Minero Ponce Enríquez mediante análisis fisicoquímicos y mineralógicos.
- Evaluar el riesgo de los relaves mineros analizando la movilidad de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) aplicando pruebas de lixiviación en laboratorio.
- Cuantificar el potencial contaminante de los relaves mediante la aplicación de índices de contaminación (IC).

- Plantear un modelo conceptual identificando los principales escenarios de riesgo, con base en el análisis del contenido de EPT presentes en los relaves mineros.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Relaves mineros

Los relaves mineros son un subproducto que resulta del proceso de recuperación mineral en las plantas de tratamiento (Jehosua Jofre Rojas & Agustín Holgado San Martín Gerardo Octavio Diaz Rodenas, 2015). Estos residuos comúnmente están compuestos de material muy fino, por lo que son llamados lodos, y son depositados en piscinas llamadas relaveras.

Las relaveras deben cumplir con un proyecto constructivo técnico de acuerdo con la norma ecuatoriana emitida por el Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables (MERNNR, 2020), con el fin de garantizar la correcta disposición de los residuos (relaves) y mitigar algún efecto adverso que, por la constitución de los relaves (alto contenido de EPT como metales pesados, metaloides, sulfuros, entre otros) puedan afectar al ecosistema y a la población.

1.5.2 Potencial contaminante de los relaves mineros

Los riesgos de un manejo inadecuado de los relaves mineros están determinados por el tipo, mecanismos o acciones implícitas en el proceso (contención, recolección, transporte, procesamiento) y la alta toxicidad de sus componentes (As, Cd, Cu, Pb, Hg, Cr, Se y Zn, entre otros) que aumentan el riesgo potencial hacia la población y el ecosistema (Menéndez & Muñoz, 2021).

Los problemas asociados a los EPT exigen intervención inmediata para mitigar en la mayor medida posible los impactos ambientales y sociales. Teniendo en cuenta que, es importante destacar que el riesgo ambiental relacionado a los relaves mineros no solo depende de la concentración de los EPT, sino del grado de fácil liberación que presentan aquellos elementos altamente tóxicos (Castillo Rodríguez, 2018).

1.5.2.1. Riesgos para la población y el ecosistema

Los relaves mineros pueden contener una variedad de contaminantes, incluidos metales pesados, EPT y otros contaminantes producto de los procesos de recuperación mineral. Los relaves pueden representar un riesgo para la población y el ecosistema de varias maneras. El

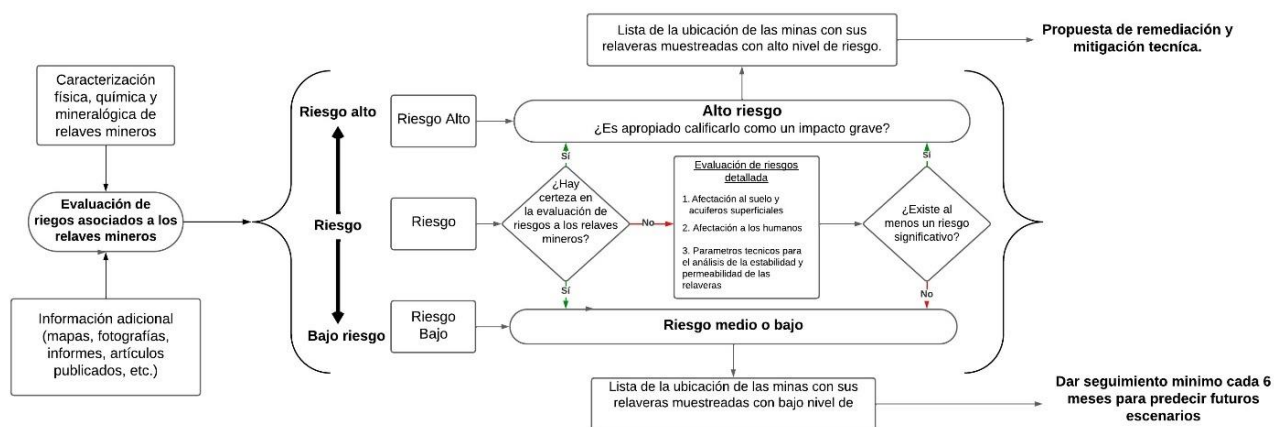
Drenaje ácido de mina (DAM) es uno de los principales problemas asociados a los residuos mineros, y se genera cuando los sulfuros presentes en los residuos reaccionan con el agua y el oxígeno. El DAM puede contaminar el agua, el suelo y el aire, y puede causar daños significativos al ecosistema y la población.

Un riesgo importante asociado a los relaves mineros es la posible contaminación del agua, ya sea superficial o subterránea, lo que puede afectar a la vida acuática, a poblaciones aledañas a la zona afectada, y a diversas actividades como la agricultura, ganadería, etc.

El contacto directo con los relaves mineros también puede representar un riesgo para la salud humana, ya que los EPT pueden ingresar al cuerpo humano a través de distintas vías de exposición (ingesta accidental, contacto dérmico, etc.). Los metales pesados presentes en los relaves mineros pueden causar problemas de salud, como cáncer, problemas neurológicos y problemas reproductivos. La Figura 1.1 presenta un esquema simplificado propuesto por el Servicio Geológico Español para evaluar los riesgos asociados a los relaves mineros.

Figura 1.1

Régimen general para la evaluación simplificada de riesgos de relaves mineros propuesto por el Servicio Geológico Español.



1.5.2.2. Casos de afectación ambiental producto de la inadecuada gestión de relaves mineros

La minería es una actividad económica importante en Ecuador, que genera empleo, ingresos y desarrollo. Sin embargo, también puede tener un impacto negativo en el medio ambiente y la salud humana. La inadecuada gestión de los relaves mineros es uno de los detonantes de la problemática ambiental y afectación al ser humano. Por ello, se detalla a continuación algunos casos relevantes donde la inadecuada gestión en la disposición, contención y trasporte de los relaves mineros han causado graves estragos hacia la población y al medio ambiente (Tabla 1.1).

Tabla 1.1

Casos de afectación ambiental producto de la inadecuada gestión de relaves mineros en Ecuador.

Casos	Descripción	Autor
Contaminación del río Zaruma por relaves mineros	Este estudio evaluó la contaminación del río Zaruma por relaves mineros. Se realizó análisis de laboratorio para determinar la concentración de metales pesados en el agua del río. Los resultados mostraron que las concentraciones de metales pesados, como el zinc, el cobre y el plomo, superaban los límites establecidos por la normativa ambiental ecuatoriana.	Brito-Escala, D. (2022)
Contaminación del río Amarillo por relaves mineros	El río Amarillo, ubicado en la provincia de El Oro, Ecuador, es un importante recurso hídrico para la agricultura y la industria. Sin embargo, la contaminación por relaves mineros ha afectado significativamente la calidad del agua del río. Este estudio evaluó los riesgos de contaminación asociados a los relaves mineros del río Amarillo. Se utilizó una metodología basada en la identificación de fuentes, escenarios y receptores de contaminación.	García-Chávez, J. M., Sánchez-Ortiz, L. A., Calero-Tamayo, M., & Brito-Escala, D. (2023)
Contaminación del río Santiago por relaves mineros	Los relaves mineros provenientes de la mina de cobre de Panantza, ubicada en la provincia de Zamora Chinchipe, han contaminado el río Santiago, un importante recurso hídrico para la población local. La contaminación del río ha afectado a la vida acuática y al abastecimiento de agua de la población.	Sánchez-Ortiz, L. A. (2021)
Contaminación del río Zamora por relaves mineros	Los relaves mineros provenientes de las minas de oro ubicadas en la provincia de Zamora Chinchipe han contaminado el río Zamora, un importante recurso hídrico para la población local. La contaminación del río ha afectado a la vida acuática y al abastecimiento de agua de la población.	Brito-Escala, D., Sánchez-Ortiz, L. A., Calero-Tamayo, M., & García-Chávez, J. M. (2023)

Capítulo 2

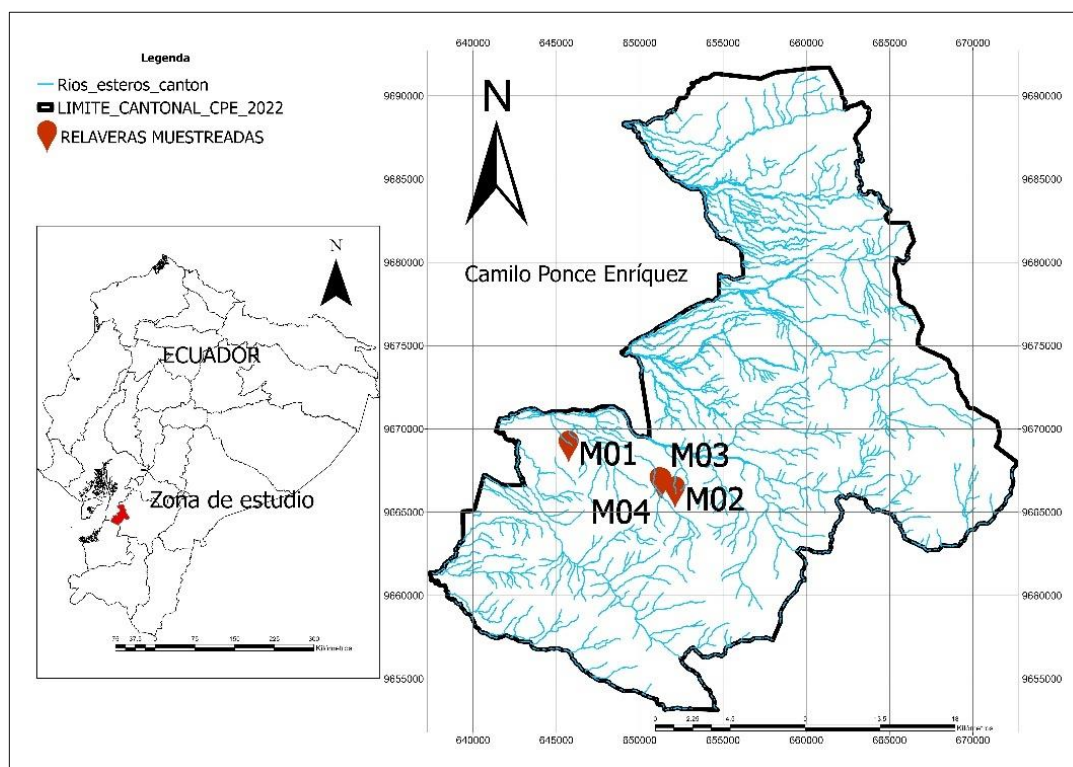
2. Metodología

2.1 Zona de estudio

El Cantón Camilo Ponce Enríquez, pertenece a la Provincia del Azuay (Figura 2.1) y se encuentra localizado a 200 km al suroeste de la ciudad de Cuenca. Cuenta con un área de 639.53 Km^2 y goza de enormes potencialidades para su desarrollo, gracias a su extensa red hídrica, suelos aptos para actividades agrícolas y ganaderas, y reservas de recursos minerales metálicos y no metálicos. Según ARCOM (2018), en la zona existen alrededor de 50 concesiones mineras metálicas y 8 no metálicas. Gracias a la presencia de minerales de sulfuros, Ponce Enríquez es cede de varias empresas mineras, según lo detalla el Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables en su catálogo de concesiones mineras del Ecuador (MERNNR, 2023). Por lo tanto, Ponce Enríquez es una de las zonas mineras más importantes del país, ya que cuenta con un gran potencial para la explotación de minerales, lo que genera importantes beneficios económicos, según reportes de la Corporación de Promoción de Exportaciones e Inversiones del Ecuador (CORPEI, 2023) y del Banco Central del Ecuador (BCE, 2023).

Figura 2.1

Mapa de ubicación de la zona de estudio y las relaveras (M01, M02, M03 y M04) muestreadas.



2.2 Campaña de muestreo y preparación de muestras

La campaña de muestreo se realizó en octubre de 2023 y consistió en la recolección de cuatro muestras tomadas en las relaveras de tres empresas mineras en operación: FRANROMEC, AGRIPLAZA S.A y METALESA S.A. Para el muestreo de cada relavera se tomó 30 submuestras de forma aleatoria, de 0.5 kg aproximadamente, con la finalidad de que la muestra sea representativa. La toma de muestras se realizó de manera manual con una pala plástica a una profundidad de 30-40 cm (Figura 2.2).

Figura 2.2

Campaña de adquisición de muestras de relaves.



Para la preparación de la muestra se procedió a realizar el secado (Figura 2.3 a), con ello se tomó una muestra representativa de 1000 g aproximadamente que fue llevada al horno durante 24 horas a una temperatura de 60°C (Figura 2.3b), para posteriormente realizar el análisis granulométrico, químico y mineralógico correspondiente. Debido a que la muestra se encontraba apelmazada (Figura 2.3 c), después del proceso de secado, se procedió a disgregar la muestra con un martillo de goma para pasarlas por el tamiz N° 40, con el fin separar el material grueso.

Figura 2.3

(a) secado de relaves, (b) muestras secadas al horno, y (c) proceso de preparación de las muestras.



2.3 Análisis de laboratorio

2.3.1 Caracterización física

La caracterización física de las muestras de relaves mineros fue realizada en el Laboratorio de Geotecnia y Construcción de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra (FICT) de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Esta consistió en la medición de pH, contenido de humedad, análisis granulométrico y límites Atterberg. Con la finalidad de disminuir el exceso de humedad las muestras de relaves fueron secadas a temperatura ambiente (Figura 2.3a) durante 3 días. Posteriormente, una porción de muestra (200 gramos) fue secada en el horno (Figura 2.3b) durante 24 horas a una temperatura de 60 °C para evitar alterar las muestras. Previamente preparada la muestra, se procedió a la eliminación de finos, para ello se tomaron 200 g de cada muestra y se lo depositó sobre el tamiz N°200. El lavado de la muestra sobre el tamiz N°200 (Figura 2.4) se realizó con agua del grifo durante 25-30 minutos.

Figura 2.4

Eliminación de finos sobre el tamiz N° 200.



Para la determinación del exceso de finos, se procedió a pesar la muestra previamente lavada y secada. Una vez obtenido el peso se procedió a restar los 200 gr iniciales y el peso final. Esta diferencia proporcionó la cantidad de finos eliminados durante el lavado. Para determinar el porcentaje de finos se dividió el peso del material fino para la masa inicial (200 gr) y se multiplicó por cien.

2.3.1.1. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico se realizó con la muestra seca después del lavado. Para ello, se utilizó los tamices N°10, N°16, N°30, N°50, N°100 y N°200, respectivamente ordenados (Figura 2.5). Se introdujo la muestra en la parte superior y se tapó. Posteriormente, se graduó el tiempo de la tamizadora a 3 minutos. El movimiento que la tamizadora realiza es circular horizontal y de impacto vertical con el fin de que la muestra vaya atravesando cada una de las aberturas de la malla en el tamiz. Finalmente, se pesó el contenido retenido en cada uno de los tamices con una balanza digital. Ya con los datos obtenidos se realizó la curva granulométrica que permitió caracterizar el tipo de relaves por su tamaño de grano.

Figura 2.5

Tamizado de las muestras de relaves.

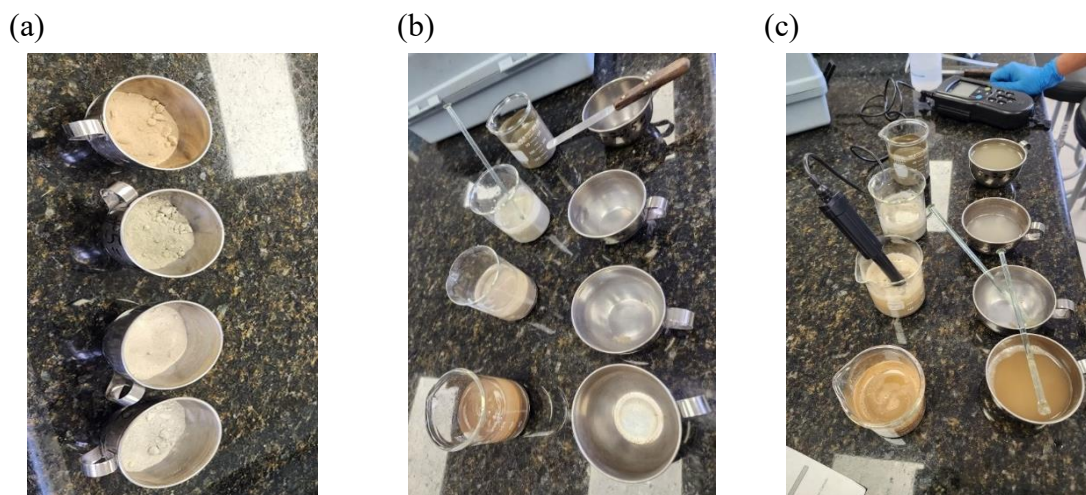


2.3.1.2. Determinación de pH

Para la determinación del pH se realizó una dilución 1:1 de muestra y agua desionizada. Se tomó 100 g (Figura 2.6 a) de muestra y lo proporcional a 100 ml de agua. Posteriormente, se realizó la mezcla con la ayuda de un agitador de vidrio (aproximadamente de 20-40 segundos) (Figura 2.6 b), para dejarlo reposar durante 25 segundos hasta observar el sobrenadante. El pH se midió con una sonda multiparamétrica HACH HQ40D calibrada en el Laboratorio de Sanitarias de la FICT-ESPOL (Figura 2.6 c). Los datos se registraron una vez se estabilizó el valor de pH.

Figura 2.6

(a) Se pesa 100 gr de muestras, (b) por medio del agitador de cristal se revuelve la mezcla y se deja reposar, (c) se toma las medidas del pH por medio de la sonda multiparamétrica.

**2.3.1.3. Límites Atterberg**

Para determinar los Límites de Atterberg, la muestra deberá tener un porcentaje de finos $\geq 50\%$. El porcentaje de finos de las muestras M01, M02, M03 y M04 se calculó con anterioridad al momento de realizar el análisis granulométrico. La muestra M01 obtuvo un porcentaje de finos $>50\%$, mientras que las muestras M02, M03 y M04 obtuvieron un porcentaje $<40\%$.

Los límites de Atterberg permiten caracterizar el comportamiento de los suelos finos y con ello determinar el Límite líquido (LL), Límite plástico (PL) y Límite de contracción (LP). Para ello, se preparó la muestra M01 pasándola por el tamiz N°40 de la serie ASTM (Figura 2.7 a), de la cual se obtuvo 100 gr del pasante. Luego, se colocó la muestra levemente saturada en una cuchara de Casagrande (Figura 2.7 b) y se realizó una partición vertical en medio de la cuchara con el ranurador. La muestra se dejó caer de 25-40 veces desde una altura de 1 cm hasta que el surco realizado se una. Se recogió una porción de las muestras con una espátula y al restante se lo volvió a saturar levemente. Se repitió el procedimiento cuatro veces. Las muestras recogidas fueron llevadas al horno (Figura 2.7 c) durante 24 horas a una temperatura de 60°C para ser pesadas y poder determinar el LL. Para el ensayo del límite plástico se separó dos muestras (Figura 2.7 d) de aproximadamente 8 gr provenientes del primer ensayo en la copa de casa grande, ya que se conocía el contenido de humedad. Luego, se enrolló la muestra entre los dedos hasta que se formó un hilo de 3 mm de diámetro. Se llevó al horno durante 24 horas a una temperatura de 60°C y se procedió a pesar.

2.3.2 Caracterización química de los relaves mineros

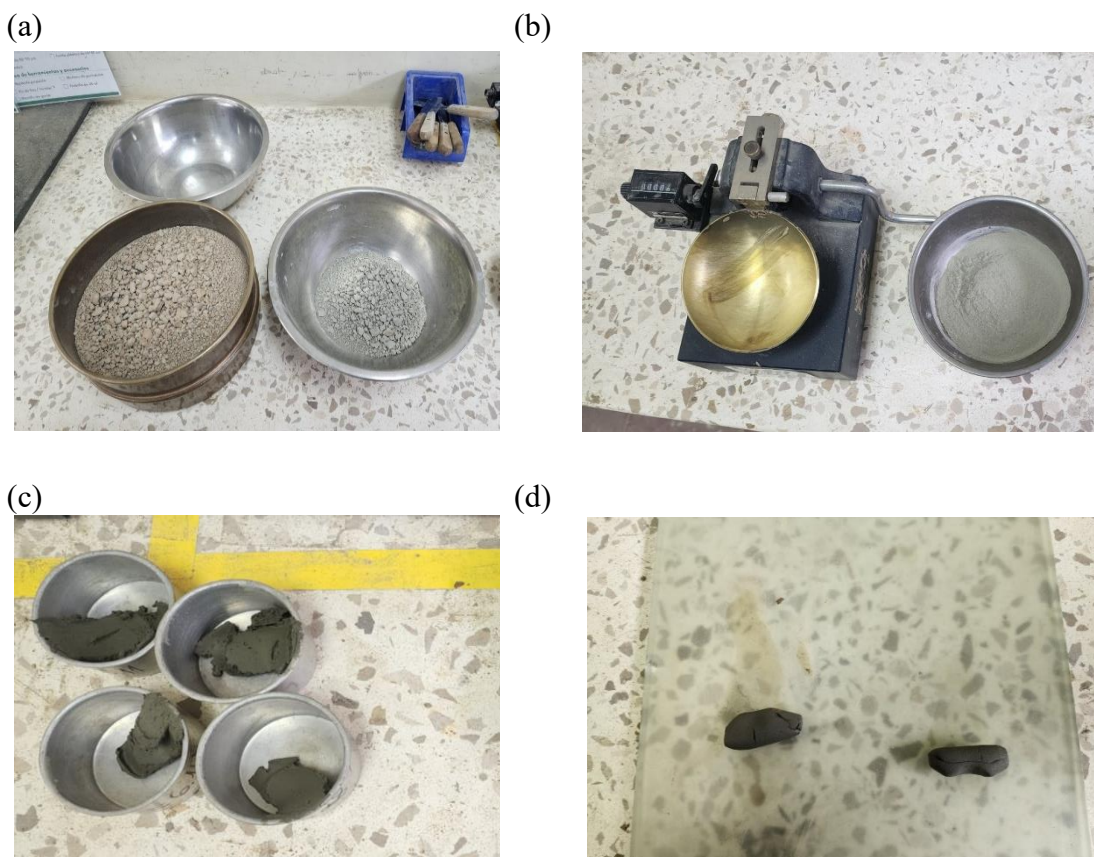
Para la determinación del contenido EPTs (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, y Zn), las muestras M01, M02, M03 y M04 fueron pulverizadas a $850\ \mu\text{m}$ y leídas por Fluorescencia de Rayos X (XRF, ZSpec-EMax). Este análisis se realizó en el Laboratorio de Suelos y Nutrición Vegetal de ESPOL.

2.3.3 Identificación de las especies minerales

La identificación de las especies minerales en las muestras de relaves se realizó con el uso de un estereomicroscopio en el Laboratorio de Petrografía de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Figura 2.7

(a) Eliminación de finos por el tamiz N°40, (b) Cuchara de Casa grande (c) Toma de muestras después de cada ensayo realizado, (d) Elaboración de rollitos para determinación de LP.

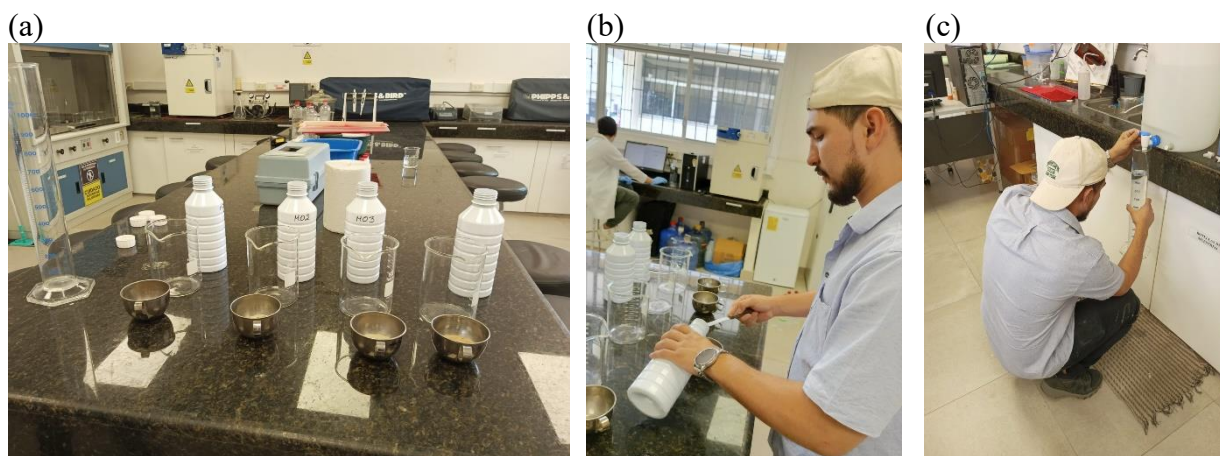


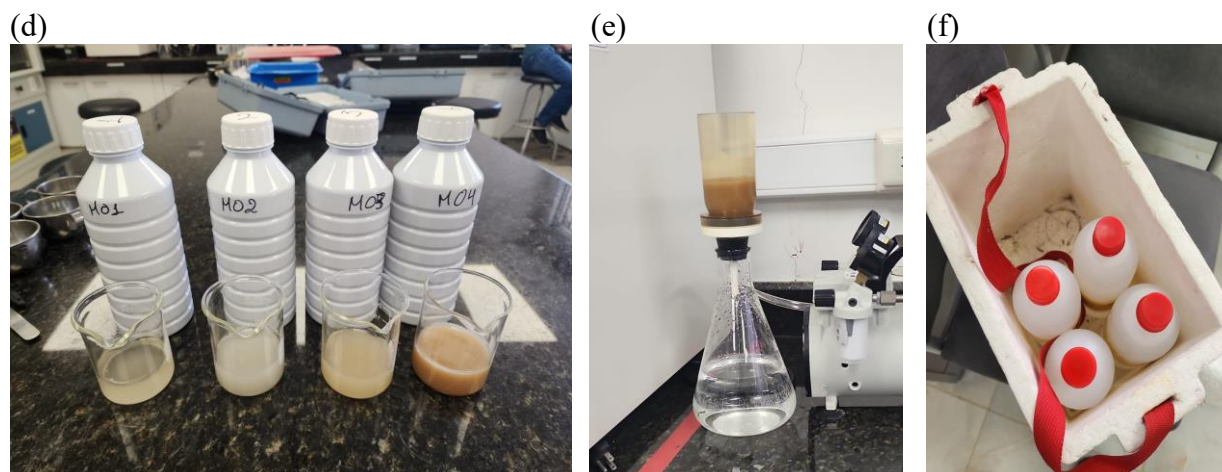
2.4 Prueba de lixiviación

La prueba de lixiviación permite determinar la cantidad de EPT que pueden ser movilizados en un relave minero. En este estudio se aplicó la Prueba de Lixiviación propuesta por el Servicio Geológico de los Estados Unidos. Como primer paso se pesó 50 g de muestra de relave (Figura 2.8 a) y se agregó a una botella plástica de boca ancha de 1 L (Figura 2.8 b). Se adicionó 1 L de agua desionizada (Figura 2.8 c). El frasco se tapó herméticamente y se agitó energicamente a mano durante 5 minutos. Tras la agitación, se puso los frascos en posición vertical y se dejó reposar el contenido durante 10 minutos (Figura 2.8 d). Tras la decantación, se colocaron las submuestras del lixiviado sin filtrar en vasos de plástico desechables y se midió el pH (Figura 2.8 e) y la conductividad eléctrica. Una parte del lixiviado se filtró para recoger las submuestras (1L); que fueron depositadas en botellas plásticas selladas herméticamente para su análisis correspondiente en el laboratorio (Figura 2.8 f). Los EPT (As, Fe, Cu, Cr, Ni, Pb, y cianuro) contenidos en los lixiviados se analizaron en el laboratorio LABCESSTA de Guayaquil mediante Espectroscopía de Emisión Atómica con Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES) con un equipo de marca THERMO SCIENTIFIC, modelo iCAP 7400 Duo MFC NA. Los porcentajes de recuperación estuvieron entre 85 y 110%.

Figura 2.8

(a) Preparación de 50gr de relave, (b) Colocación de muestra en la botella, (c) Medición de 1L de agua desionizada para la mezcla agua-relave, (d) Tiempo de reposo para medición de pH y conductividad, (e) Filtrado, (f) Embotellamiento y preparación de muestras para análisis de laboratorio.





2.5 Evaluación del Índice de contaminación (IC)

Se calculó el índice de contaminación (IC), que se emplea para evaluar el riesgo asociada con elementos potencialmente tóxicos (EPT) contenidos en los residuos mineros (Arranz-González et al., 2022a). Para ello, fue necesario conocer las concentraciones totales de los EPT y los niveles de fondo o de referencia local, regional o global, que son los valores umbral tolerables o aceptables para cada elemento. El cálculo del IC se realizó mediante la Ecuación 2.1.






$$IC = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{[X]_i}{NF_x} \quad (\text{ecuación 2.1})$$

Donde: $[X]_i$: La concentración del i -ésimo elemento de la muestra; NF_x : El nivel de fondo regional para el elemento X, y n : El número de elementos analizados.

El Valor de la concentración de los EPT (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, y Zn) se conoció mediante el análisis químico de las muestras de relaves. Los niveles de referencias empleados para este estudio fueron: As = 4.8 mg Kg^{-1} , Cd = 1.1 mg Kg^{-1} , Cr = 42 mg Kg^{-1} , Cu = 14 mg Kg^{-1} , Ni = 18 mg Kg^{-1} , Pb = 25 mg Kg^{-1} , y Zn = 62 mg Kg^{-1} (Kabata-Pendias, 2010). Para evaluar el potencial contaminante (IC) se empleó la Tabla 2.1.

Tabla 2.1

Ponderación del grado de contaminación dependiendo del valor del IC.

Rango de IC	Potencial contaminante	
$0 \leq IC \leq 3.5$	Muy bajo	
$3.5 \leq IC \leq 6.5$	Bajo	
$6.5 \leq IC \leq 10$	Moderado	
$10 \leq IC \leq 15.6$	Alto	
$IC \geq 15.6$	Muy alto	

2.6 Modelo conceptual de riesgo

La caracterización de los relaves mineros permite evaluar los riesgos potenciales de contaminación, así como identificar las medidas de mitigación necesarias para prevenir estos riesgos. Por ello, es de gran importancia implementar un modelo conceptual de riesgo que permita comprender los riesgos asociados a los relaves mineros, de cara a establecer estrategias de gestión y mitigación.

El modelo conceptual de riesgo se basa en plantear posibles escenarios de riesgo que permitan establecer las condiciones ambientales y las prácticas óptimas de gestión de los relaves mineros. Para la elaboración de los modelos de riesgo se debe tomar en consideración la evaluación de las posibles fuentes de riesgo, estas incluyen los diversos escenarios que pueden causar contaminación, ya sea directa o indirectamente, como las características de los relaves mineros, las prácticas de gestión, etc. Posterior a este paso, se evalúa el comportamiento ambiental que puede tener los relaves al verse en contacto con el aire, suelo, agua superficial y subterránea para posterior determinar la vía de exposición, que son los procesos que permiten que los contaminantes se transfieran a los receptores de riesgo como lo es el medio ambiente (flora y fauna local) y la población.

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los resultados de los análisis físico y químico de cuatro muestras de relaves (M01, M02, M03 y M04). También se muestran los resultados del índice de contaminación y pruebas de lixiviación, así como el modelo conceptual de riesgo para la población y el medio ambiente.

3.1 Caracterización física

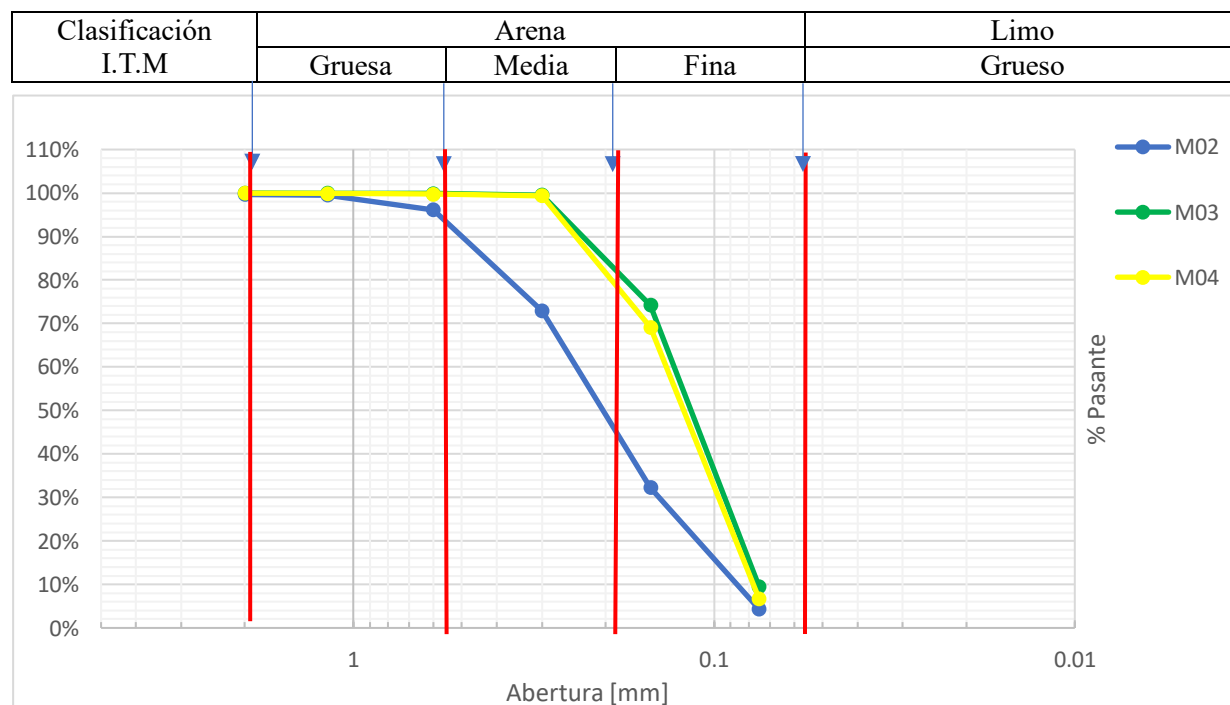
3.1.1 Caracterización Granulométrica

Se obtuvo el porcentaje de finos de cada muestra después del lavado por el tamiz N°200. Se determinó el porcentaje del material pasante que atravesó cada uno de los tamices con el fin de elaborar una curva granulométrica Abertura [mm] vs % Pasante (Figura 3.1).

La muestra M01 al tener un porcentaje de finos del 69.3% no pudo ser representada en la curva granulométrica por lo que se procedió a realizar límites de Atterberg. Las muestras M02, M03 y M04 se las clasificó mediante el sistema de clasificación de suelo SUCS donde se pudo determinar que el tamaño de grano es mayormente grueso (56%).

Figura 3.1

Curva granulométrica, abertura [mm] vs % pasante de las muestras M02, M03 y M04.



3.1.2 Límites de Atterberg

El ensayo de límites de Atterberg fue realizado únicamente a la muestra M01 por presentar el 69.3% de finos, para lo cual se realizaron cuatro iteraciones en el proceso de experimentación para determinar el Límite Líquido (LL) según lo detalla la Tabla 3.1 y para el Límite Plástico (LP) se tomaron dos muestras (Tabla 3.2). Se procedió analizar el porcentaje de humedad de las muestras obtenidas durante la realización del ensayo de casa grande (Figura 3.2) donde se pudo determinar que el LL es del 85 %. Al determinar un LL alto, la muestra presenta indicio de ser difícil de compactar, propensos a la erosión y tener tendencia a presentar problemas de estabilidad. Para la determinación del LP se promedió el contenido de humedad de las muestras y presento un 14%.

Tabla 3.1

Tabla para la determinación del Limite Liquido (LL).

Parámetros	Determinación del Límite Líquido			
	Ensayos			
	1	2	3	4
Masa del recipiente A (g)	6.09	6.29	6.14	6.26
Número de golpes	34	30	20	16
Masa de suelo húmedo + recipiente B (g)	18.72	20.28	19	16.27
Masa de suelo seco + recipiente C (g)	16.11	17.35	16.11	14.01
Masa de agua evaporada D= B-C (g)	2.61	2.93	2.89	2.26
Masa de suelo seco E= C-A (g)	3.48	3.36	3.25	4
Humedad D/E*100(%)	75%	87%	89%	57%

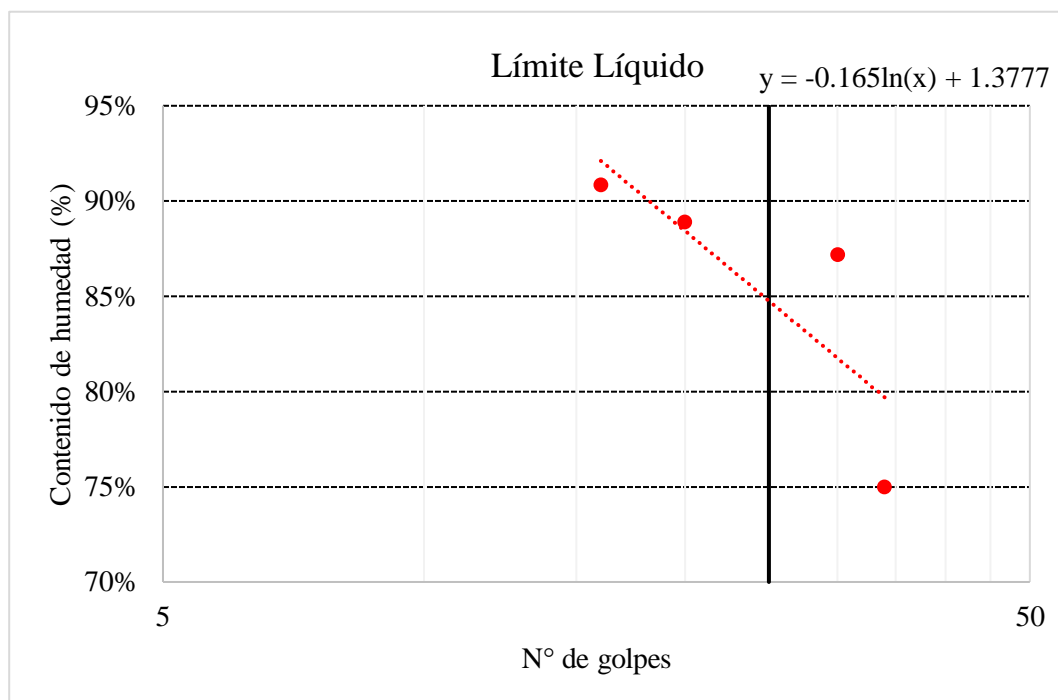
Tabla 3.2

Tabla para la determinación de Limite Plástico (LP)

Parámetros	Determinación del Límite Plástico	
	Ensayos	
	1	2
Masa del recipiente A (g)	6.06	5.93
Masa de suelo húmedo + recipiente B (g)	7.93	7.92
Masa de suelo seco + recipiente C (g)	7.68	7.69
Masa de agua evaporada D= B-C (g)	0.25	0.23
Masa de suelo seco E= C-A (g)	1.62	1.76
Humedad D/E*100(%)	15%	13%

Figura 3.4

Curva para determinación de LL N° de golpes Vs Contenido de humedad.



3.2 Caracterización química de los relaves mineros

En la Tabla 3.3 se presenta la concentración de los EPT medidos en las muestras de relave (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, y Zn), y los valores de pH y conductividad eléctrica.

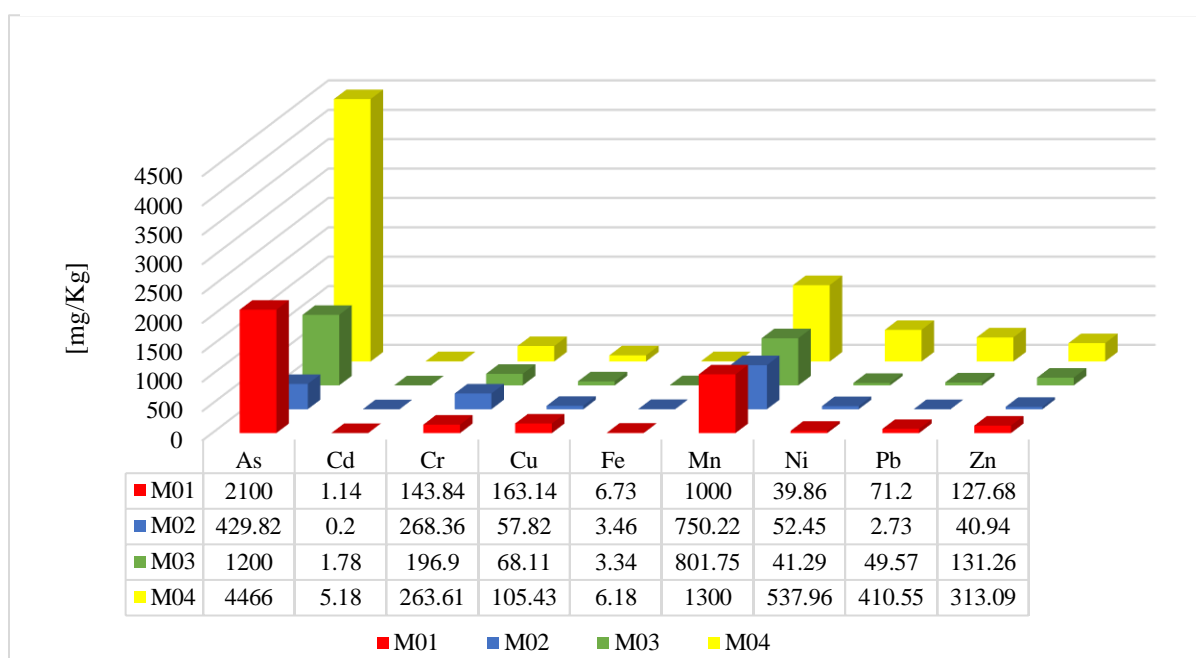
Las muestras presentaron valores de pH en el rango de 7.17 a 8.09, indicando condiciones neutras a ligeramente alcalinas en las 4 muestras. Por otra parte, los resultados del análisis por fluorescencia de rayos x determinó que la muestra M04 contiene una mayor cantidad de EPT en comparación con las otras muestras, siendo predominante la presencia de As. De igual manera, cabe recalcar que las muestras M03 y M04, son relaveras de la misma empresa, sin embargo, la diferencia de As entre ellas es del 73.14 % como se muestra en la Figura 3.3.

El contenido de As de todas las muestras superó los LMP según los criterios proporcionados en el Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente (TULSMA). Los LMP $\left[\frac{mg}{Kg}\right]$ para los elementos analizados son: As=12, Cd=2, Cu=64, Cr=65, Ni=50, Pb=60, Zn=200, estos valores fueron usados como referencia para el análisis de los datos obtenidos.

En la muestra M01 los elementos que superan los LMP son Cr, Cu y Pb; en M02 son Cr, Ni y Pb; en M03 son Cu y Cr; y en M04 son Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn, siendo la muestra M04 la que presenta mayor contenido de EPT. Al estar las relaveras en funcionamiento, los valores tienen tendencia a la variación y justifica, en cierta parte, los altos valores de EPT detectados. Pese a ello, los resultados muestran una visión preocupante de la potencial contaminación por EPT presentes en los relaves, ya que una inadecuada gestión puede afectar directa o indirectamente al ecosistema y a la población circundante.

Figura 3.7

Concentración de metales pesados en muestras de relaves



3.3 Identificación de especies minerales.

Se identificó la presencia de óxidos e hidróxidos como el cuarzo, silicatos como la hornblenda, carbonatos como la calcita, filosilicatos como la esmectita, sulfatos como la smithsonita y feldespatos como la albita en la muestra M01. En la muestra M02 se determinó la presencia de calcita y smithsonita. En la muestra M03 se evidenció la presencia de esmectita, carbonatos, albita, cuarzo, calcedonia, smithsonita y hornblenda. Por último, en la muestra M04 se evidenció la presencia de calcedonia, anfíboles, cuarzo, calcita y smithsonita. Los resultados muestran relación con la geología del campo minero Ponce Enríquez.

Tabla 3.3

Concentración de EPT [$\frac{mg}{kg}$], pH y conductividad eléctrica (CE) [$\frac{\mu c}{cm}$] en las muestras de relaves

Muestra	LMP	M01	M02	M03	M04
pH	-	7.17	8.04	8.09	7.3
CE	-	1495	249	181.5	380
As	12	2100	429.82	1200	4466
Cd	2	1.14	0.2	1.78	5.18
Cr	64	143.84	268.36	196.9	263.61
Cu	64	163.14	57.82	68.11	105.43
Fe	-	6.73	3.46	3.34	6.18
Mn	-	1000	750.22	801.75	1300
Ni	50	39.86	52.45	41.29	537.96
Pb	60	71.2	2.73	49.57	410.55
Zn	200	127.68	40.94	131.26	313.09

3.4 Índice de contaminación

Los resultados del IC se presentan en la Tabla 3.4. Se pudo determinar que todas las muestras (M01, M02, M03 y M04) presentan índice de contaminación muy altos ($IC > 15$). Las muestras con mayor potencial de contaminación, de acuerdo con su valor de IC, en orden decreciente son $M04 > M01 > M03 > M02$. El EPT que más contribuye a estos resultados es el As.

Tabla 3.4

Índice de contaminación (IC) total e IC calculado para cada EPT

Muestra	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	IC	
M01	62.500	0.148	0.489	1.665	0.316	0.407	0.294	65.82	Muy alto
M02	12.792	0.026	0.913	0.590	0.416	0.016	0.094	14.85	Alto
M03	35.714	0.231	0.670	0.695	0.328	0.283	0.302	38.22	Muy alto
M04	132.917	0.673	0.897	1.076	4.270	2.346	0.721	142.9	Muy alto

IC Muy bajo $0 \leq IC \leq 3.5$; IC Bajo $3.5 \leq IC \leq 6.5$; IC Moderado $6.5 \leq IC \leq 10$; IC Alto $10 \leq IC \leq 15.6$; IC Muy Alto $IC \geq 15.6$.

3.5 Prueba de Lixiviación

Los resultados de la prueba de lixiviación se presentan en la Tabla 3.5 donde se observa que el contenido de As de las muestras M03 y M04 supera los LMP según la normativa ecuatoriana para descargas hacia afluentes de agua dulce, acorde al Texto Unificado De legislación Secundaria De Medio Ambiente (2017). Estos resultados sugieren que, en el caso de las relaveras M03 y M04, de producirse lixiviados estos tendrían un elevado potencial contaminante para el medio ambiente debido a su toxicidad asociada a la presencia de As.

Tabla 3.5

Resultados de prueba de lixiviación y comparación con los Límites Máximos Permisibles (LMP)

EPT	LMP [$\frac{mg}{L}$]	M01 [$\frac{mg}{L}$]	M02 [$\frac{mg}{L}$]	M03 [$\frac{mg}{L}$]	M04 [$\frac{mg}{L}$]
As	0.1	0.0225	0.0225	0.177	0.1683
Cu	1	0.00689	0.0109	0.00748	0.00974
Cr	0.5	0.0008	<0.01	0.003511	0.00312
Fe	10	<0.5	<0.5	0.00849	<0.5
Ni	2	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Pb	0.2	0.0018	<0.01	<0.01	<0.01
Cianuro total	0.1	0.01	0.001	<0.01	0.02

3.6 Modelo conceptual de riesgo.

Para el modelo conceptual de los riesgos asociados a los relaves mineros se estableció cuatro escenarios potenciales de riesgo, basándonos en los mecanismos de liberación potencial de los contaminantes (Figura 3.4).

El primer mecanismo de liberación de EPT considera al viento como uno de los principales actores para el arrastre y movilización de los EPT hacia otros compartimentos ambientales como suelo, agua superficial, y sedimentos.

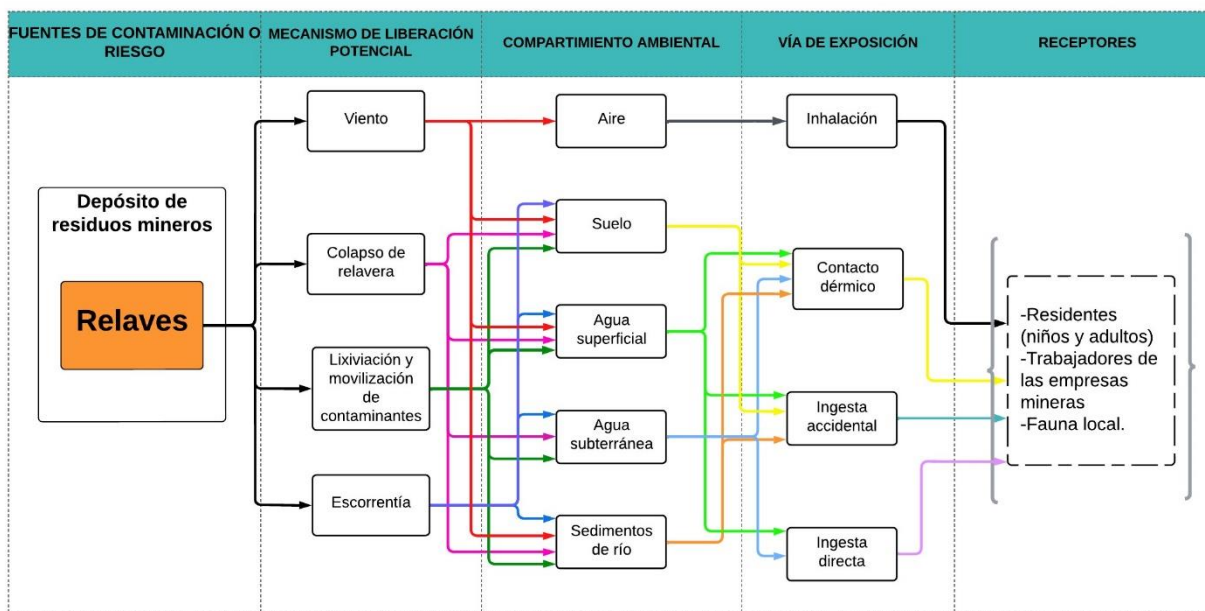
El segundo mecanismo de liberación de EPT comprende las afectaciones potenciales causadas por posibles colapsos de las relaveras, lo que tendría graves afectaciones hacia el suelo, cuerpo de agua superficial y sedimentos. El gran volumen de EPT que podrían ser liberados con el colapso de las relaveras provocaría un gran daño ambiental con consecuencias severas para la población y ecosistema.

La escorrentía y la lixiviación/movilización de contaminantes son otros dos mecanismos de liberación potencial de los EPT. Estos pueden afectar a suelos, aguas superficiales, sedimentos y finalmente, en caso de infiltrarse, podrían afectar a cuerpos de aguas subterráneas.

En suelos y sedimentos la vía de exposición de los EPT para los receptores incluye el contacto dérmico y la ingesta accidental. En el caso del agua superficial y subterránea, las vías de exposición incluyen la ingesta directa y el contacto dérmico. Además, en agua superficial se añade la ingesta accidental en caso de usar los ríos con fines recreativos. Finalmente, la contaminación del aire establece los posibles factores de riesgo que afectan directamente a la población y fauna local, mediante la inhalación de los EPT.

Figura 3.10

Modelo conceptual del riesgo potencial asociado a los relaves mineros del cantón Camilo Ponce Enríquez



Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Este proyecto se desarrolló con la finalidad de evaluar el potencial contaminante de los relaves mineros del Campo Minero Camilo Ponce Enríquez, provincia de Azuay. Para este propósito, se realizó la caracterización física de los relaves, se determinó el contenido de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) mediante fluorescencia de rayos X, se determinó las especies minerales presentes en las muestras de relaves con el uso de un estereomicroscopio, se calculó el índice de contaminación (IC) y el grado de afectación de los residuos mediante una prueba de lixiviación. Finalmente, se planteó un modelo conceptual de riesgo donde se analizó los posibles escenarios y sus afectaciones hacia el medio ambiente y la población.

La caracterización física de los relaves determinó que las muestras M02, M03 y M04 presentaron un rango de 36 - 42 % de finos, mientras que la muestra M01 presentó un 69.3% de finos; el alto contenido de finos puede resultar en problemas de estabilidad de la relavera si no se toman las medidas de seguridad necesarias, ya que si el volumen a depositar sigue creciendo de manera desproporcional podría provocar un fallo y con ello problemas de contaminación muy graves para el entorno.

Los valores de pH de las cuatro muestras estuvieron en el rango de 7.17 a 8.09, indicando condiciones neutras a ligeramente alcalinas. Por otra parte, los resultados del análisis por fluorescencia de rayos x determinó que la concentración de algunos EPT superó los límites máximos permisibles según la normativa ecuatoriana, como en la muestra M01 el Cr, Cu y Pb; en M02 el Cr, Ni y Pb; en M03 el Cu y Cr; y en M04 As, Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn, siendo la muestra M04 la que presenta mayor contenido de EPT, específicamente de As y Cu. Cabe recalcar que las muestras M03 y M04 son relaveras de la misma empresa, sin embargo, la diferencia de As entre ellas es del 73.14 %. La gran diferencia del contenido de As se debe a que la planta de beneficio presta servicio a otras empresas mineras, teniendo dentro de sus procesos materiales de diferente mineralización. El proceso de beneficio para la extracción del mineral de interés varía dependiendo de las necesidades de sus clientes, la mineralización del material, el porcentaje de As declarado al inicio del proceso y el volumen del material a procesar.

La prueba de lixiviación dio como resultado que el contenido de As de las muestras M03 y M04 superan los LMP según la normativa ecuatoriana TULSMA para descargas hacia afluentes de agua dulce. Por otro lado, el índice de contaminación (IC) presentó valores muy elevados (IC >

15.6), debido a la presencia de As. Con base en los resultados de la prueba de lixiviación y el índice de contaminación, se concluye que es de suma importancia contar con una adecuada gestión y plan de cierre de estas estructuras de residuos, ya que son áreas de alto riesgo debido a que contienen sustancias tóxicas, que si entran en contacto con el ecosistema y/o población tendrían efectos adversos significativos para los receptores. También es importante considerar que, si las sustancias tóxicas de los entornos mineros son liberadas y movilizadas, pueden afectar y contaminar regiones mucho más grandes; es decir, no se limitan al área donde se desarrolló del proyecto minero. Así mismo, con base en el modelo conceptual de riesgo, se identificó que la contaminación podría afectar a los distintos compartimientos ambientales (agua, suelo, aire), a distintas actividades productivas (agricultura, ganadería, entre otras), y finalmente podría llegar a la cadena trófica afectando a las personas.

La información proporcionada por este estudio constituye una línea base en la caracterización de los relaves mineros del campo Ponce Enríquez, y la evaluación de su potencial contaminante. Esta información es de suma importancia para los tomadores de decisiones, de cara a realizar una gestión adecuada de los residuos y la planificación territorial de uso de suelo, con el fin de priorizar el cuidado ambiental, la salud y el bienestar de la población.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda mejorar el manejo de relaves a través de procesos físicos, químicos, mineralógicos dentro del beneficio mineral, con el fin de que el residuo minero generado tenga la menor cantidad de metales y/o metaloides.
- Implementar procesos físicos, químicos o de base biológica, para tratar los relaves mineros y disminuir su carga contaminante.
- Establecer un programa de monitoreo continuo de los residuos y de los efluentes generados.
- Establecer un programa de monitoreo continuo de la calidad del agua en áreas cercanas a las relaveras, especialmente aquellas identificadas como de mayor riesgo.
- Evaluar la viabilidad de implementar proyectos de secado de relaves y de recirculación de agua en las relaveras.
- Colaborar con las autoridades ambientales para evaluar y, si es necesario, actualizar las normativas locales y nacionales relacionadas con la gestión de relaves, así como, proponer

estándares más rigurosos y adaptados a la realidad específica del Campo Minero Ponce Enríquez.

- Proponer la gestión integral de residuos y desechos mineros a empresas público-privadas calificadas como gestoras de residuos y desechos peligrosos.

Referencias

- Alfonso, J., & Franco, A. (2017). *La contaminación con Plomo (Pb) en suelos adyacentes a la vía San Gerardo de Chaupitranca - Barranco Colorado, debido al derrame de relaves de procesos minero-metalúrgicos.*
- Arián Briones. (2022). *Caracterización del riesgo asociado a la presencia de relaves mineros en la provincia de El Oro.*
- Arranz-González, J. C., Guzmán-Martínez, F., Tapia-Téllez, A., Jiménez-Oyola, S., & García-Martínez, M. J. (2022). *Polluting potential from mining wastes: proposal for application a global contamination index. Environmental Monitoring and Assessment, 194(10).* <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10433-w>
- Campoverde-Muñoz, P., Aguilar-Salas, L., Romero-Crespo, P., Valverde-Armas, P. E., Villamar-Marazita, K., Jiménez-Oyola, S., & Garcés-León, D. (2023). *Risk Assessment of Groundwater Contamination in the Gala, Tenguel, and Siete River Basins, Ponce Enriquez Mining Area—Ecuador. Sustainability (Switzerland), 15(1).* <https://doi.org/10.3390/su15010403>
- Carling, G. T., Diaz, X., Ponce, M., Perez, L., Nasimba, L., Pazmino, E., Rudd, A., Merugu, S., Fernandez, D. P., Gale, B. K., & Johnson, W. P. (2013). *Particulate and Dissolved Trace Element Concentrations in Three Southern Ecuador Rivers Impacted by Artisanal Gold Mining. Water, Air, & Soil Pollution, 224(2), 1415.* <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1415>
- Castillo Rodríguez, J. J. (2018). *El Suelo y las causas de la contaminación. Ruta Minera: un camino a la minería bien hecha, 1, 44-47.* <https://revistas.sena.edu.co/index.php/RM/article/view/1591>
- Dirección De Planificación Territorial Y Tránsito Del Canton Camilo Ponce Enríquez. (2018). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón camilo Ponce Enríquez.*
- Escobar-Segovia, K., Jiménez-Oyola, S., Garcés-León, D., Paz-Barzola, D., Navarrete, E. C., Romero-Crespo, P., & Salgado, B. (2021). *Heavy metals in rivers affected by mining activities in Ecuador: Pollution and human health implications. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 250, 61-72.* <https://doi.org/10.2495/WRM210061>
- Fredy Guzmán. (2022). *Evaluación de la peligrosidad de los elementos potencialmente tóxicos presentes en los residuos mineros.*
- Jiménez-Oyola, S., García-Martínez, M. J., Ortega, M. F., Chavez, E., Romero, P., García-Garizabal, I., & Bolonio, D. (2021). *Ecological and probabilistic human health risk*

- assessment of heavy metal(loid)s in river sediments affected by mining activities in Ecuador. Environmental Geochemistry and Health, 43(11), 4459-4474.*
<https://doi.org/10.1007/s10653-021-00935-w>
- Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace Elements in Soils and Plants*. CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/b10158>
- Méndez, D., Guzmán-Martínez, F., Acosta, M., Collahuazo, L., Ibarra, D., Lalangui, L., & Jiménez-Oyola, S. (2022). *Use of Tailings as a Substitute for Sand in Concrete Blocks Production: Gravimetric Mining Wastes as a Case Study. Sustainability (Switzerland), 14(23).*
<https://doi.org/10.3390/su142316285>
- Menéndez, J., & Muñoz, S. (2021). *Contaminación del agua y suelo por los relaves mineros. Paideia XXI, 11(1), 141-154.* <https://doi.org/10.31381/paideia.v11i1.3622>
- René Ortiz Durán ministro de energía y recursos naturales no renovables. (2020). *MERNNR-MERNNR-2020-0043-AM-Instructivo-aprobacion-proyectos-relaves-mineria.*
- Paula Martínez Ramírez. (2019). *Protocolo de caracterización para la predicción de drenaje ácido en depósitos de relaves mineros.*
- Sánchez-Ortiz, L. A. (2021). *Contaminación del río Santiago por relaves mineros. Environmental Science and Pollution Research International.*
- Peña-Carpio, E., & Menéndez-Aguado, J. M. (2016). *Environmental study of gold mining tailings in the Ponce Enriquez mining area (Ecuador). DYNA (Colombia), 83(195), 237-245.*
<https://doi.org/10.15446/dyna.v83n195.51745>
- García-Chávez, J. M., Sánchez-Ortiz, L. A., Calero-Tamayo, M., & Brito-Escala, D. (2023). *Contaminación del río Amarillo por relaves mineros.*
- Brito-Escala, D., Sánchez-Ortiz, L. A., Calero-Tamayo, M., & García-Chávez, J. M. (2023). *Contaminación del río Zamora por relaves mineros. Revista Sustainability, 15(22), 10425.*
- Pesantes, A. A., Carpio, E. P., Vitvar, T., López, M. M. M., & Menéndez-Aguado, J. M. (2019). *A multi-index analysis approach to heavy metal pollution assessment in river sediments in the Ponce Enríquez Area, Ecuador. Water (Switzerland), 11(3).*
<https://doi.org/10.3390/w11030590>
- Rudnick, R., & Gao, S. (2013). *Composition of the Continental Crust. Treatise on geochemistry, 4.* <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6>

- Brito-Escala, D., Sánchez-Ortiz, L. A., Calero-Tamayo, M., & García-Chávez, J. M. (2023). *Contaminación del río Zamora por relaves mineros. Revista Sustainability.*
- Salgado-Almeida, B., Falquez-Torres, D. A., Romero-Crespo, P. L., Valverde-Armas, P. E., Guzmán-Martínez, F., & Jiménez-Oyola, S. (2022). *Risk Assessment of Mining Environmental Liabilities for Their Categorization and Prioritization in Gold-Mining Areas of Ecuador. Sustainability (Switzerland), 14(10).* <https://doi.org/10.3390/su14106089>
- Tarras-Wahlberg, N. H., Flachier, A., Fredriksson, G., Lane, S., Lundberg, B., & Sangfors, O. (2000). *Environmental Impact of Small-scale and Artisanal Gold Mining in Southern Ecuador. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 29(8), 484-491.* <https://doi.org/10.1579/0044-7447-29.8.484>

ANEXOS

Anexo A. Reporte de laboratorio. Concentración de EPT en muestra de relaves

REPORTE DE RESULTADOS DE ANÁLISIS TÉCNICO

CLIENTE:	FICT – ESPOL
DIRECCIÓN CLIENTE:	Campus Gustavo Galindo
SOLICITADO POR:	Samantha Jiménez
TIPO DE MUESTRA:	Suelo
ANÁLISIS SOLICITADO:	Elementos totales
NÚMERO DE MUESTRAS:	4
IDENTIFICACIÓN DE MUESTRAS:	.1, 2, 3, 4
# ORDEN DE TRABAJO	LSYNV-147-2023
FECHA DE ANÁLISIS:	09-noviembre-2023

PARÁMETRO	MÉTODO
DETERMINACIÓN DE MACRO, MICROELEMENTOS Y METALES PESADOS TOTALES	Muestra pulverizada a 850 μm y leída por Fluorescencia de Rayos X (XRF, ZSpec-EMax)
Nota: Los resultados corresponden únicamente a las muestras analizadas por el laboratorio.	

1) Macro elementos

Nombre Muestra	Ca %	K %	Fe %
1	9,60	1,37	6,73
2	11,12	1,56	3,46
3	8,48	1,16	3,34
4	4,19	1,06	6,18

Macroelementos:
Ca = Calcio, K= Potasio, Fe= Hierro,

2) Micro elementos

Nombre Muestra	Cu mg/kg	Mn mg/kg	Ni mg/kg	Zn mg/kg
1	163,14	1000	39,86	127,68
2	57,82	750,22	52,45	40,94
3	68,11	801,75	41,29	131,26
4	105,43	1300	537,96	313,09


Microelementos:
Cu= Cobre; Mn = Manganeseo,
Ni= Níquel; Zn = Zinc;
mg/kg = miligramo/kilogramo



3) *Metales Pesados*

Nombre Muestra	As mg/kg	Cd mg/kg	Pb mg/kg	Cr mg/kg
1	2100	1,14	71,20	143,84
2	429,82	0,20	2,73	268,36
3	1200	1,78	49,57	196,90
4	4466	5,18	410,55	263,61

Metales Pesados:
As= Arsénico; Cd = Cadmio; Pb= Plomo; Cr = Cromo
mg/kg = miligramo/kilogramo
BLD= Bajo límite de detección

FIRMA DE APROBACIÓN

<p>Dr. Eduardo Chávez Navarrete</p> <p>Jefe de Laboratorio de Suelos y Nutrición Vegetal</p>
<p>Preguntas, comentarios o sugerencias contactarse con: Dra. Martha Hidalgo Laboratorio de Suelos – ESPOL, Km 30.5 Vía Perimetral - Campus Gustavo Galindo, Facultad de Ciencias de la Vida (FCV) Edificio 12 K (Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, atrás del edificio STEM) Correos electrónicos labsuelos@espol.edu.ec; mahidal@espol.edu.ec; Página Web: www.espol.edu.ec</p>



Anexo B. Reporte de laboratorio. Concentración de EPT en las muestras de lixiviados

 LABCESTTA <small>TECNOLOGÍA Y CALIDAD</small>	DEPARTAMENTO: ANALITICALAB	 SERVICIO DE ACREDITACIÓN ECUATORIANO <small>Acreditación N° SAE LEN 18-034 LABORATORIO DE ENSAYOS</small>
--	---------------------------------------	---

INFORME DE RESULTADOS No: APT-234-23

INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE			
NOMBRE CLIENTE:	EMPRESA PUBLICA DE SERVICIOS ESPOL - TECH E.P	ATENCIÓN A.	Karla Carolina Filián Haz
DIRECCIÓN:	Km. 30.5 vía perimetral – ESPOL Campus Gustavo Galindo de la ESPOL/Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra	TELÉFONO:	0994127737
TIPO DE MUESTRA:	Agua (Residual)	PUNTO DE TOMA DE MUESTRA:	Dato no proporcionado por el cliente
CÓDIGO CLIENTE:	MOI	FECHA Y HORA DE TOMA DE MUESTRA RESPONSABLE:	Dato no proporcionado por el cliente

INFORMACIÓN DEL LABORATORIO

TOMA DE MUESTRA REALIZADO POR:	CLIENTE	NÚMERO DE MUESTRAS:	01
FECHA Y HORA DE TOMA DE MUESTRA:	N.A.	ANÁLISIS SOLICITADO:	Químico
FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:	24/11/2023 10:40	FECHA DE ANÁLISIS:	24/11/2023 – 06/12/2023
FECHA DE EMISIÓN DE INFORME:	06/12/2023	CÓDIGO LABORATORIO:	AL-APT-234-23
RESPONSABLE DE LA TOMA DE MUESTRA:	N.A.	COORDENADAS:	N.A.
CONDICIONES AMBIENTALES DE ANÁLISIS:		T máx.:25,0 °C. T mín.: 15,0 °C	

RESULTADOS ANALÍTICOS

ENSAYO	UNIDAD	RESULTADO	INCERTIDUMBRE (k=2)	MÉTODO /NORMA	VALOR LÍMITE PERMISIBLE
Arsénico	mg/L	0,02	±18%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP-AES Rev.4.4 1994	-
Cobre	mg/L	<0,05	±13%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP-AES Rev.4.4 1994	-
Cromo	mg/L	<0,01	±23%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP-AES Rev.4.4 1994	-
Hierro	mg/L	<0,5	±17%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP-AES Rev.4.4 1994	-
Níquel	mg/L	<0,05	±10%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP-AES Rev.4.4 1994	-
Plomo	mg/L	<0,01	±13%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP-AES Rev.4.4 1994	-

	DEPARTAMENTO: ANALITICALAB	
---	---------------------------------------	---

Cianuro	mg/L	0,01	±16%	PE/AL/09 Standard Methods Ed.23.2017 4500CN- E modificado	-
---------	------	------	------	---	---

OBSERVACIONES:

- Muestra receptada en el laboratorio.
- La columna: Valor límite permisible, está fuera del alcance de acreditación del SAE.

AUTORIZACIÓN Y RESPONSABLE DEL INFORME:



Ing. Verónica Bravo
DIRECTORA TÉCNICA

NOTAS:

- Este documento no puede ser reproducido ni total ni parcialmente sin la aprobación escrita del laboratorio.
- Los resultados arriba indicados sólo están relacionados con los objetos ensayados.
- Las condiciones ambientales no afectan a los resultados de los ensayos analizados.
- LABCESTTA S.A. no se responsabiliza cuando la información proporcionada por el cliente puede afectar la validez de los resultados.
- Cuando se emitan criterios de conformidad y aplique, se tendrá en cuenta el: Instructivo de Regla de decisión para una declaratoria de conformidad IE-AL-26.



DEPARTAMENTO:
ANALITICALAB



INFORME DE RESULTADOS No: APT-235-23

INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE			
NOMBRE CLIENTE:	EMPRESA PUBLICA DE SERVICIOS ESPOL - TECH E.P	ATENCIÓN A.	Karla Carolina Filián Haz
DIRECCIÓN:	Km. 30.5 vía perimetral – ESPOL Campus Gustavo Galindo de la ESPOL/Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra	TELÉFONO:	0994127737
TIPO DE MUESTRA:	Agua (Residual)	PUNTO DE TOMA DE MUESTRA:	Dato no proporcionado por el cliente
CÓDIGO CLIENTE:	MO2	FECHA Y HORA DE TOMA DE MUESTRA RESPONSABLE:	Dato no proporcionado por el cliente

INFORMACIÓN DEL LABORATORIO

TOMA DE MUESTRA REALIZADO POR:	CLIENTE	NÚMERO DE MUESTRAS:	01
FECHA Y HORA DE TOMA DE MUESTRA:	N.A.	ANÁLISIS SOLICITADO:	Químico
FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:	24/11/2023 10:40	FECHA DE ANÁLISIS:	24/11/2023 – 06/12/2023
FECHA DE EMISIÓN DE INFORME:	06/12/2023	CÓDIGO LABORATORIO:	AL-APT-235-23
RESPONSABLE DE LA TOMA DE MUESTRA:	N.A.	COORDENADAS:	N.A.
CONDICIONES AMBIENTALES DE ANÁLISIS:		T máx.:25,0 °C. T mín.: 15,0 °C	

RESULTADOS ANALÍTICOS

ENSAYO	UNIDAD	RESULTADO	INCERTIDUMBRE (k=2)	MÉTODO /NORMA	VALOR LÍMITE PERMISIBLE
Arsénico	mg/L	0,02	±18%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP- AES Rev.4.4 1994	-
Cobre	mg/L	<0,05	±13%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP- AES Rev.4.4 1994	-
Cromo	mg/L	<0,01	±23%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP- AES Rev.4.4 1994	-
Hierro	mg/L	<0,5	±17%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP- AES Rev.4.4 1994	-
Níquel	mg/L	<0,05	±10%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP- AES Rev.4.4 1994	-
Plomo	mg/L	<0,01	±13%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP- AES Rev.4.4 1994	-

INFORME DE RESULTADOS No: APT-236-23

INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE			
NOMBRE CLIENTE:	EMPRESA PUBLICA DE SERVICIOS ESPOL - TECH E.P	ATENCIÓN A.	Karla Carolina Filián Haz
DIRECCIÓN:	Km. 30.5 vía perimetral – ESPOL Campus Gustavo Galindo de la ESPOL/Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra	TELÉFONO:	0994127737
TIPO DE MUESTRA:	Agua (Residual)	PUNTO DE TOMA DE MUESTRA:	Dato no proporcionado por el cliente
CÓDIGO CLIENTE:	MO3	FECHA Y HORA DE TOMA DE MUESTRA RESPONSABLE:	Dato no proporcionado por el cliente

INFORMACIÓN DEL LABORATORIO

TOMA DE MUESTRA REALIZADO POR:	CLIENTE	NÚMERO DE MUESTRAS:	01
FECHA Y HORA DE TOMA DE MUESTRA:	N.A.	ANÁLISIS SOLICITADO:	Químico
FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:	24/11/2023 10:40	FECHA DE ANÁLISIS:	24/11/2023 – 06/12/2023
FECHA DE EMISIÓN DE INFORME:	06/12/2023	CÓDIGO LABORATORIO:	AL-APT-236-23
RESPONSABLE DE LA TOMA DE MUESTRA:	N.A.	COORDENADAS:	N.A.
CONDICIONES AMBIENTALES DE ANÁLISIS:		T máx.:25,0 °C. T mín.: 15,0 °C	

RESULTADOS ANALÍTICOS

ENSAYO	UNIDAD	RESULTADO	INCERTIDUMBRE (k=2)	MÉTODO /NORMA	VALOR LÍMITE PERMISIBLE
Arsénico	mg/L	0,18	±18%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP- AES Rev.4.4 1994	-
Cobre	mg/L	<0,05	±13%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP- AES Rev.4.4 1994	-
Cromo	mg/L	<0,01	±23%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP- AES Rev.4.4 1994	-
Hierro	mg/L	<0,5	±17%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP- AES Rev.4.4 1994	-
Níquel	mg/L	<0,05	±10%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP- AES Rev.4.4 1994	-
Plomo	mg/L	<0,01	±13%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP- AES Rev.4.4 1994	-

	DEPARTAMENTO: ANALITICALAB	 <p>SERVICIO DE ACREDITACIÓN ECUATORIANO Acreditación N° SAE LEN 18-034 LABORATORIO DE ENSAYOS</p>
---	---------------------------------------	---

Cianuro	mg/L	<0,01	±16%	PE/AL/09 Standard Methods Ed.23.2017 4500CN- E modificado	-
---------	------	-------	------	---	---

OBSERVACIONES:

- Muestra receptada en el laboratorio.
- La columna: Valor limite permisible, está fuera del alcance de acreditación del SAE.

AUTORIZACIÓN Y RESPONSABLE DEL INFORME:


LABCESTTA
 TECNOLOGÍA Y CALIDAD
 RUC:06902210001
 Ing. Verónica Bravo
 DIRECTORA TÉCNICA

NOTAS:

- Este documento no puede ser reproducido ni total ni parcialmente sin la aprobación escrita del laboratorio.
- Los resultados arriba indicados sólo están relacionados con los objetos ensayados.
- Las condiciones ambientales no afectan a los resultados de los ensayos analizados.
- LABCESTTA S.A. no se responsabiliza cuando la información proporcionada por el cliente puede afectar la validez de los resultados.
- Cuando se emitan criterios de conformidad y aplique, se tendrá en cuenta el: Instructivo de Regla de decisión para una declaratoria de conformidad IE-AL-26.



DEPARTAMENTO:
ANALITICALAB



Accreditación N° SAE LEN 18-034
LABORATORIO DE ENSAYOS

INFORME DE RESULTADOS No: APT-237-23

INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR EL CLIENTE			
NOMBRE CLIENTE:	EMPRESA PUBLICA DE SERVICIOS ESPOL - TECH E.P	ATENCIÓN A.	Karla Carolina Filián Haz
DIRECCIÓN:	Km. 30.5 vía perimetral – ESPOL Campus Gustavo Galindo de la ESPOL/Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra	TELÉFONO:	0994127737
TIPO DE MUESTRA:	Agua (Residual)	PUNTO DE TOMA DE MUESTRA:	Dato no proporcionado por el cliente
CÓDIGO CLIENTE:	MO4	FECHA Y HORA DE TOMA DE MUESTRA RESPONSABLE:	Dato no proporcionado por el cliente

INFORMACIÓN DEL LABORATORIO

TOMA DE MUESTRA REALIZADO POR:	CLIENTE	NÚMERO DE MUESTRAS:	01
FECHA Y HORA DE TOMA DE MUESTRA:	N.A.	ANÁLISIS SOLICITADO:	Químico
FECHA Y HORA DE RECEPCIÓN EN LAB:	24/11/2023 10:40	FECHA DE ANÁLISIS:	24/11/2023 – 06/12/2023
FECHA DE EMISIÓN DE INFORME:	06/12/2023	CÓDIGO LABORATORIO:	AL-APT-237-23
RESPONSABLE DE LA TOMA DE MUESTRA:	N.A.	COORDENADAS:	N.A.
CONDICIONES AMBIENTALES DE ANÁLISIS:	T máx.:25,0 °C. T mín.: 15,0 °C		

RESULTADOS ANALÍTICOS

ENSAYO	UNIDAD	RESULTADO	INCERTIDUMBRE (k=2)	MÉTODO /NORMA	VALOR LÍMITE PERMISIBLE
Arsénico	mg/L	0,17	±18%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP-AES Rev.4.4 1994	-
Cobre	mg/L	<0,05	±13%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP-AES Rev.4.4 1994	-
Cromo	mg/L	<0,01	±23%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP-AES Rev.4.4 1994	-
Hierro	mg/L	<0,5	±17%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP-AES Rev.4.4 1994	-
Níquel	mg/L	<0,05	±10%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP-AES Rev.4.4 1994	-
Plomo	mg/L	<0,01	±13%	PE/AL/17 EPA 200.7 ICP-AES Rev.4.4 1994	-

	DEPARTAMENTO: ANALITICALAB	 SERVICIO DE ACREDITACIÓN ECUATORIANO Acreditación N° SAE LEN 18-034 LABORATORIO DE ENSAYOS
---	---------------------------------------	--

Cianuro	mg/L	0,02	±16%	PE/AL/09 Standard Methods Ed.23.2017 4500CN- E modificado	-
---------	------	------	------	---	---

OBSERVACIONES:

- Muestra receptada en el laboratorio.
- La columna: Valor límite permisible, está fuera del alcance de acreditación del SAE.

AUTORIZACIÓN Y RESPONSABLE DEL INFORME:


LABCESTTA
 TECNOLOGÍA Y CALIDAD
 RUC: 099102710001
 Ing. Verónica Bravo
 DIRECTORA TÉCNICA

NOTAS:

- Este documento no puede ser reproducido ni total ni parcialmente sin la aprobación escrita del laboratorio.
- Los resultados arriba indicados sólo están relacionados con los objetos ensayados.
- Las condiciones ambientales no afectan a los resultados de los ensayos analizados.
- LABCESTTA S.A. no se responsabiliza cuando la información proporcionada por el cliente puede afectar la validez de los resultados.
- Cuando se emitan criterios de conformidad y aplique, se tendrá en cuenta el: Instructivo de Regla de decisión para una declaratoria de conformidad IE-AL-26.

ANEXO

EMPRESA PÚBLICA DE SERVICIOS ESPOL-TECH E.P.

Se adjunta tabla con valores reales correspondientes a los siguiente informes de resultados :

- AL-ATP-234-23

Parámetro	Valor Real	Valor acreditado
As	0,022583	0,02
Cu	0,006895	<0,05
Cr	0,000822	<0,01
Fe	ND	<0,5
Ni	ND	<0,05
Pb	0,001843	<0,01
Cianuro Total	-	0,01

- AL-ATP-235-23

Parámetro	Valor Real	Valor acreditado
As	0,022583	0,02
Cu	0,010957	<0,05
Cr	ND	<0,01
Fe	ND	<0,5
Ni	ND	<0,05
Pb	ND	<0,01
Cianuro Total	0,001	<0,01

- AL-ATP-236-23

Parámetro	Valor Real	Valor acreditado
As	0,177072	0,18
Cu	0,007480	<0,05
Cr	0,003511	<0,01
Fe	0,008492	<0,5
Ni	ND	<0,05
Pb	ND	<0,01
Cianuro Total	0,002	<0,01

- AL-ATP-237-23

Parámetro	Valor Real	Valor acreditado
As	0,168372	0,17
Cu	0,009747	<0,05
Cr	0,003120	<0,01
Fe	ND	<0,5
Ni	ND	<0,05
Pb	0,000278	<0,01
Cianuro Total	-	0,02

Evaluación del potencial contaminante de los relaves del Campo Minero Ponce Enríquez, Ecuador.

PROBLEMA

Los relaves mineros contienen elementos potencialmente tóxicos (EPT) como As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, y Zn que representan un riesgo para el ecosistema y la población. La caracterización de los relaves permite identificar y cuantificar estos contaminantes. En la actualidad, no existe información sobre el contenido de los relaves del campo minero Ponce Enríquez. Por esta razón, es importante realizar estudios que permitan cuantificar las sustancias contaminantes presentes en los residuos mineros para su posterior gestión, de cara a la mitigación de los posibles escenarios de riesgo.

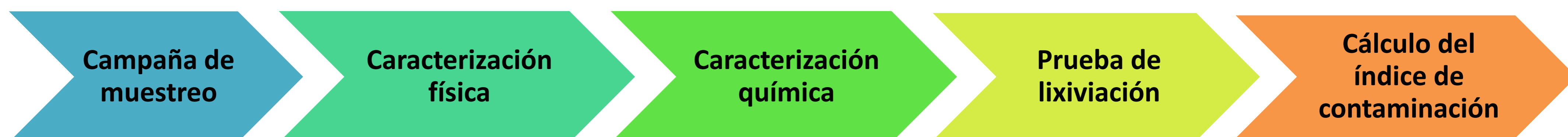


OBJETIVO GENERAL

Evaluar el potencial contaminante de los relaves del Campo Minero Ponce Enríquez, aplicando pruebas de campo y laboratorio para la determinación del riesgo para el medio ambiente y las comunidades.

PROPUESTA

El proyecto se realizó en cinco fases:



Recolección de muestras en 4 relaveras mineras

Análisis granulométrico, y medición de pH

Determinación de contenido de EPT mediante Fluorescencia de rayos X (FRX)

Determinación de la peligrosidad de los residuos mineros

Cálculo de potencial contaminante con base en el contenido de EPT



Índice de contaminación IC		
$0 \leq IC \leq 3.5$	Muy bajo	Green
$3.5 \leq IC \leq 6.5$	Bajo	Light Green
$6.5 \leq IC \leq 10$	Moderado	Yellow
$10 \leq IC \leq 15.6$	Alto	Orange
$IC \geq 15.6$	Muy alto	Red

RESULTADOS

La caracterización granulométrica arrojó que la muestra M01 presentó un 69.3% de finos, mientras que las muestras M02, M03 y M04 presentaron un 36 - 42 % de finos. El pH varió entre 7.17 y 8.09, indicando condiciones neutras a ligeramente alcalinas. Los resultados del análisis por FRX (Figura 1) indican que el As es el contaminante más abundante en las muestras analizadas, siendo mayor en la muestra M04.

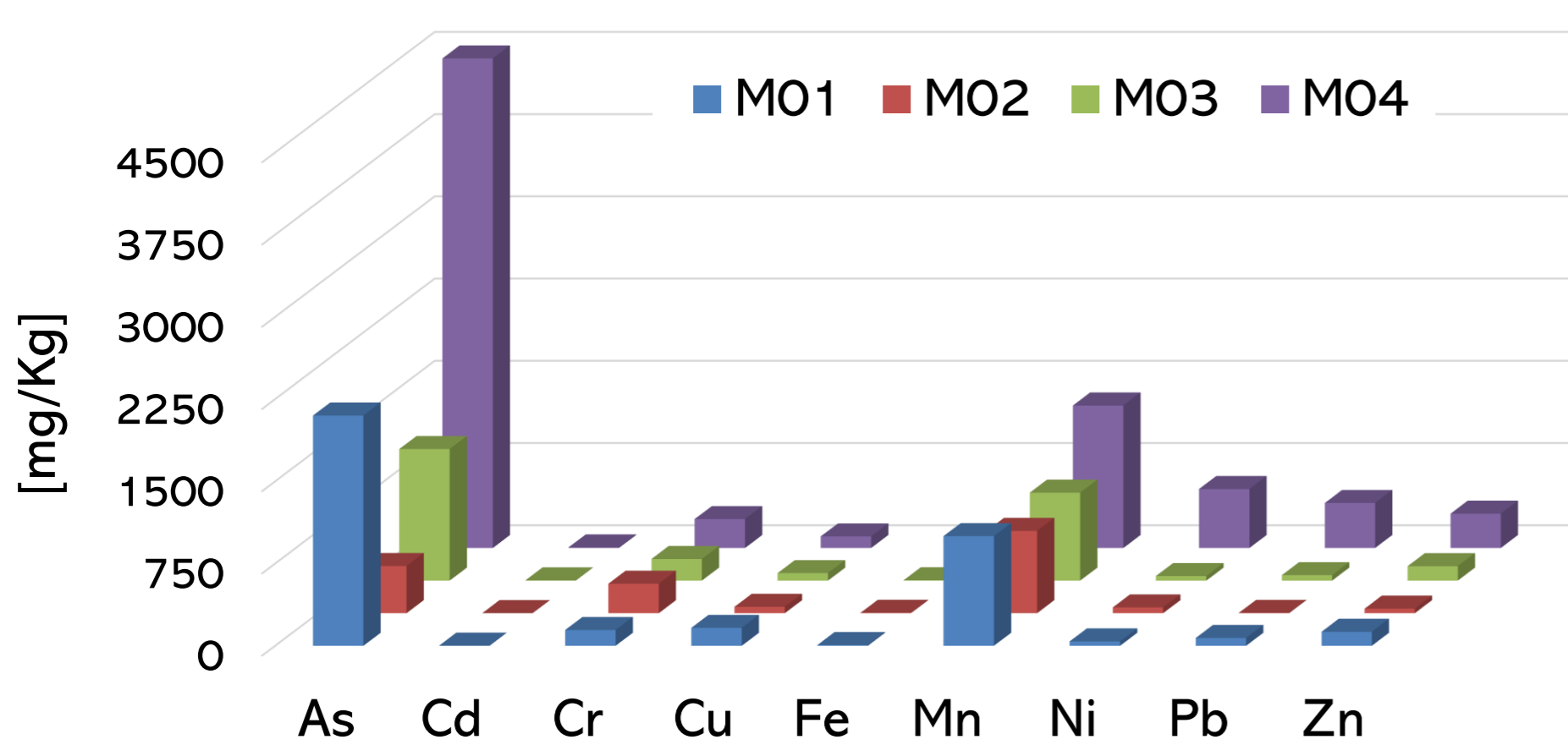


Figura 1. Concentración de EPT

Los resultados del IC se presentan en la Tabla 1. Se pudo determinar que todas las muestras presentan índice de contaminación muy altos ($IC > 15.6$), siendo el As el mayor contribuyente a estos resultados. El mayor IC se determinó en la muestra M04. Por otro lado, los resultados de la prueba de lixiviación arrojaron valores superiores al límite máximo permitido (LMP) solo para el As en las muestras M03 y M04.

Tabla 1. Índice de contaminación (IC) total y calculado para cada EPT.

Muestra	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	IC
M01	62.50	0.148	0.489	1.665	0.316	0.407	0.294	65.82
M02	12.79	0.026	0.913	0.590	0.416	0.016	0.094	14.85
M03	35.71	0.231	0.670	0.695	0.328	0.283	0.302	38.22
M04	132.9	0.673	0.897	1.076	4.270	2.346	0.721	142.9

IC Muy bajo $0 \leq IC \leq 3.5$; IC Bajo $3.5 \leq IC \leq 6.5$; IC Moderado $6.5 \leq IC \leq 10$; IC Alto $10 \leq IC \leq 15.6$; IC Muy Alto $IC \geq 15.6$

CONCLUSIONES

- Los resultados del IC de las cuatro muestras de relaves arrojaron índices de contaminación muy altos ($IC > 15.6$), siendo el As el EPT de mayor preocupación.
- Las pruebas de lixiviación demostraron que, en las muestras M03 y M04 el As supera los LMP para descargas de efluentes a cuerpos de agua dulce, lo que indica que, en caso de producirse lixiviados, el contenido altamente tóxico del As representaría un riesgo alto para el ecosistema y los usuarios de los ríos en el entorno minero.
- La concentración de los EPT supera el LMP según la normativa ecuatoriana en todas las muestras analizadas, siendo la muestra M04 la que presenta mayor contenido de EPT, específicamente de As y Cu.
- Los resultados de este estudio resaltan la importancia de realizar una buena gestión de los residuos mineros, de cara a mitigar los posibles eventos de contaminación y riesgo para el medio ambiente y población.