

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

Evaluación del potencial de generación de drenaje ácido en depósitos de
relaves del Campo Minero Ponce Enríquez, Ecuador.

INGE-2434

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero de Minas

Presentado por:

Sebastian Jaramillo Zambrano

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mi madre, por ser un pilar fundamental en mi vida y por su apoyo incondicional en todo momento.

A mi prima Claudia Poppe, mi tía Sonia Jaramillo y mis abuelos Ángel y Norma, quienes fueron una fuente constante de inspiración durante tiempos difíciles.

A mi esposa y compañera de vida, Md. Viviana García, cuyas palabras de aliento y apoyo constante fueron esenciales para lograr esta meta.

Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi tutora, Dra. Samantha Jiménez, por su guía y apoyo, los cuales hicieron posible la culminación de este proyecto.

Agradezco al Ing. Cristhian Aguilar por su colaboración y predisposición en los procedimientos de laboratorio.

También agradezco al Ing. Bryan Salgado quien ha sido un gran profesor y amigo durante los últimos años de carrera.

Declaración Expresa

Yo Sebastian Jaramillo Zambrano acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 30 de mayo del 2024.


Sebastian Jaramillo Zambrano

Evaluadores



Firmado electrónicamente por:
SAMANTHA TAMARA
JIMENEZ OYOLA

Samantha Tamara Jiménez Oyola

Profesor de Materia / Tutor de proyecto

Resumen

El proyecto evalúa el potencial de generación de drenaje ácido de mina (DAM) en cuatro relaveras del campo minero Camilo Ponce Enríquez, Ecuador, para determinar el riesgo de contaminación y apoyar la gestión sostenible de los residuos mineros en uno de los principales distritos mineros metálicos del país. Se plantea la hipótesis de que las relaveras contienen materiales con alta capacidad de generar acidez, debido a la presencia de minerales sulfurados. Para esto, se recolectaron cuatro muestras representativas (M1-M4) y se analizó el pH, la concentración de elementos potencialmente tóxicos (EPT), y los contenidos de sulfatos y azufre. Se realizaron las pruebas de Generación Neta de Acidez (NAG) y Balance Ácido-Base (ABA). Los resultados indicaron que todas las muestras tienen un pH ligeramente alcalino entre 7.69 a 7.79, clasificándose como no generadoras de acidez según la prueba NAG. Sin embargo, las muestras M3 y M4 presentaron sulfatos por encima del LMP, según la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua, con valores de 5100 y 3300 mg/L, respectivamente. Además, se reportó contenidos de azufre de 1.66%, 0.16%, 0.16% y 1.00%, en las muestras M1, M2, M3 y M4, respectivamente. El test ABA reveló que todas las muestras tienen alta capacidad de generar DAM, demostrando la necesidad de medidas de gestión para prevenir impactos ambientales adversos.

Palabras Clave: Residuos Mineros, Prueba De Neutralización, Balance Ácido-Base, Elementos Potencialmente Tóxicos, Drenaje Ácido De Mina, Minería Sostenible.

Abstract

The project evaluates the acid mine drainage (AMD) generation potential in four tailings dams at the Camilo Ponce Enríquez mining site, Ecuador, to determine the risk of contamination and support sustainable management of mining waste in one of the country's main metallic mining districts. The hypothesis is that the tailings contain materials with a high acid-generating capacity due to the presence of sulfide minerals. To test this, four representative samples (M1-M4) were collected, and their pH, concentration of potentially toxic elements (PTE), and sulfate and sulfur contents were analyzed. Net Acid Generation (NAG) and Acid-Base Accounting (ABA) tests were performed. The results indicated that all samples have a slightly alkaline pH, ranging from 7.69 to 7.79, and are classified as non-acid generating according to the NAG test. However, samples M3 and M4 showed sulfate levels above the Maximum Permissible Limit (MPL) according to the Environmental Quality and Effluent Discharge Standards: Water Resource, with values of 5100 and 3300 mg/L, respectively. Additionally, sulfur contents exceeding the MPL were reported with values of 1.66%, 0.16%, 0.16%, and 1.00% for samples M1, M2, M3, and M4, respectively. The ABA test revealed that all samples have a high potential for AMD generation, highlighting the need for management measures to prevent adverse environmental impacts.

Keywords: *Mining Waste, Neutralization Test, Acid-Base Accounting, Potentially Toxic Elements, Acid Mine Drainage, Sustainable Mining.*

Índice general

Resumen _____	I
<i>Abstract</i> _____	II
Índice general _____	III
Abreviaturas _____	VI
Simbología _____	VII
Índice de figuras _____	VIII
Índice de tablas _____	IX
Capítulo 1 _____	1
1. Introducción _____	2
1.1 Descripción del Problema.....	4
1.2 Justificación del Problema.....	5
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos	5
1.4 Marco teórico.....	6
1.4.1 Relaves Mineros.....	6
1.4.2 DAM	7
1.4.3 Casos de estudio de proyectos mineros donde se ha generado grandes cantidades de DAM.....	7
1.4.4 Pruebas de generación de DAM.....	9

Capítulo 2	14
2. Metodología	15
2.1. Área de estudio	15
2.2 Análisis de la concentración de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) ...	16
2.3 Análisis mediante Microscopia electrónica de barrido	16
2.4 Determinación de sulfatos y contenido de azufre total	17
2.4 Evaluación del potencial de generación de DAM	18
2.4.1. Generación Neta de Ácido (NAG)	19
2.4.1 Prueba de Balance Ácido Base (ABA)	20
Capítulo 3	22
3. Resultados y análisis	24
3.1 Análisis de la concentración de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) ...	24
3.4 Análisis de la prueba de sulfatos y de azufre	26
3.2 Análisis de imágenes SEM	27
3.3 Evaluación de potencial de generación de DAM	29
3.3.1. Prueba NAG	29
3.3.2 Prueba ABA	30
3.6 Recomendaciones para la gestión y cierre de relaveras	30
Capítulo 4	33
4. Conclusiones y recomendaciones	34
4.1 Conclusiones	34

4.2 Recomendaciones	35
Bibliografía	33
Apéndice A Reporte técnico: Contenido de Azufre	37
Apéndice B Reporte técnico: Contenido de Elementos Potencialmente Tóxicos	38
Apéndice C Imágenes SEM de las muestras	40

Abreviaturas

ABA	Acid Base Accounting (Balance Ácido Base)
AGI	American Geosciences Institute
AP	Acidez Potencial
DAM	Drenaje Ácido de Mina
DRX	Difracción de Rayos X
EC	Conductividad Eléctrica
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FICT	Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
LEMAT	Laboratorio de Evaluación de Materiales
LMP	Límite Máximo Permisible
NAG	Net Acid Generation (Generación Neta de Ácido)
NNP	Net Neutralization Potential (Potencial Neto de Neutralización)
NP	Neutralización Potencial
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
SEM	Scanning Electron Microscopy (Microscopía Electrónica de Barrido)
TULSMA	Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente
USGS	United States Geological Survey

Simbología

Al	Aluminio
As	Arsénico
CaCO₃	Carbonato de Calcio
Cd	Cadmio
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Fe	Hierro
Fe(OH)₃	Hidróxido Férrico
FeS₂	Pirita
H⁺	Ion Hidrógeno
H₂O	Agua
H₂SO₄	Ácido Sulfúrico
Kg	Kilogramo
L	Litro
Mg	Miligramo
Mn	Manganeso
Ni	Níquel
pH	Potencial Hidrógeno
Pb	Plomo
SO₄²⁻	Sulfato
Zn	Zinc

Índice de figuras

Figura 1.1 Relación entre los potenciales de neutralización y acidez	10
Figura 2.1 Ubicación de las revaleras muestreadas	15
Figura 2.2 Preparación de las muestras para la prueba de Sulfatos	18
Figura 2.3 Dilución de muestra y preparación de celdas de turbidímetro	18
Figura 2.4 Obtención de muestra significativa	20
Figura 2.5 Preparación de las muestras para realización de prueba NAG.....	20
Figura 2.6 Proceso de prueba ABA	21
Figura 3.1 Concentración de sulfatos en las muestras	26
Figura 3.2 Concentración de azufre en las muestras	27
Figura 3.3 Imágenes SEM de muestra M1	27
Figura 3.4 Imágenes SEM de muestra M2	28
Figura 3.5 Imágenes SEM de muestra M3	28
Figura 3.6 Imágenes SEM de muestra M4	29

Índice de tablas

Tabla 2.1 Denominación de los diferentes grados de perturbación	16
Tabla 2.2 Clasificación de los relaves mineros con base en los resultados de la prueba NAG	19
Tabla 2.3 Clasificación de los resultados del test ABA según diferentes autores	22
Tabla 3.1 Comparación de concentraciones de EPT en muestras y el LMP en uso agrícola.....	24
Tabla 3.2 Comparación de concentraciones de EPT en muestras y el LMP en uso residencial	25
Tabla 3.3 Comparación de concentraciones de EPT en muestras y el LMP en uso comercial.....	25
Tabla 3.4 Comparación de concentraciones de EPT en muestras y el LMP en uso industrial	25
Tabla 3.5 Denominación del grado de perturbación de los EPT en las muestras	25
Tabla 3.6 Resultado de prueba NAG y pH de las muestras	29
Tabla 3.7 Resultado de prueba ABA	30

Capítulo 1

1. Introducción

La minería ha existido durante miles de años y es esencial para la extracción de minerales y recursos valiosos que impulsan los avances tecnológicos y el crecimiento económico (Mauric, 2012). Sin embargo, estas actividades también generan cantidades significativas de desechos, los cuales, al ser mal administrados pueden generar daños significativos al medio ambiente (Lottermoser, 2007).

Las actividades mineras se clasifican en minería de superficie y en minería subterránea (Darling, 2011). Los desechos mineros, que incluyen material estéril, relaves y escombreras, son materiales que carecen de valor económico en el presente (Lottermoser, 2007) y que, según el tipo de desecho, presentan diferentes desafíos con relación a su gestión. No obstante, uno de los principales riesgos relacionados a los desechos mineros ocurre cuando el agua se infiltra a través de estos desechos y entra en contacto con los minerales presentes, dando lugar a la formación de drenaje ácido de mina (DAM) (American Geosciences Institute [AGI], 2024), que suele ser extremadamente ácido y contiene altas concentraciones de metales pesados y tóxicos, con gran potencial de daño a organismos vivos.

El DAM se produce debido a una serie de reacciones químicas que ocurren cuando el material que contiene sulfuros, asociados a metales como plomo, zinc, cobre, plata, cadmio, entre otros, es expuesto al agua y al oxígeno, provocando una oxidación, donde el sulfuro de hierro se convierte en sulfato y óxidos de hierro, liberando ácido sulfúrico en el proceso. Esto resulta en aguas con pH ácido, ricas en ácido sulfúrico y hierro disuelto, que también disuelve metales pesados como cobre, plomo, zinc, plata, mercurio, etc., pudiendo contaminar los cuerpos de agua cercanos en la superficie o drenar hacia los cuerpos de agua subterránea. La acción de ciertas bacterias puede acelerar la velocidad y el grado del drenaje ácido de minas (United States Geological Survey [USGS], 2019).

El aprovechamiento de los recursos minerales en naciones en vías de desarrollo se vuelve cada vez más importante para generar empleo a nivel regional, fomentar el crecimiento económico y promover el desarrollo de infraestructuras (Mauric, 2012). Sin embargo, la regulación minera, especialmente en estos países, suele ser deficiente por motivos técnicos, económicos y/o políticos, lo que abre la puerta a posibles impactos ambientales y sociales (Lottermoser, 2007).

En el cantón Camilo Ponce Enríquez, Ecuador, la población ha sufrido las consecuencias de una actividad minera ilegal, mal gestionada y poco regulada, lo que ha generado un impacto directo en el entorno natural y en la calidad de vida y salud de la población (Marcillo, 2023). Según Paz-Barzola, et al. (2021), los suelos cercanos a las zonas de extracción de oro en el campo minero Ponce Enríquez presentan una concentración significativamente alta de metales pesados. El citado estudio informa que se encontraron niveles de metales pesados y metaloides que exceden los límites máximos permitidos según la normativa ecuatoriana. El cromo y el níquel superan el límite en todas las muestras analizadas, seguidos por cobre, zinc, cadmio y plomo en menor medida y sin una distribución clara, así mismo, se encontró un alto contenido de arsénico en el agua del grifo y en el agua superficial en las ubicaciones del sur del área de estudio, y altos contenidos de cromo, cobre, níquel y zinc en más del 90% de las muestras de suelo (Jiménez-Oyola, et al., 2021).

La prevención de la generación del DAM requiere, principalmente, evitar el contacto de los minerales sulfurosos con el agua y el oxígeno, que son los principales factores que influyen en los procesos de oxidación de sulfuros. Además, es fundamental controlar la presencia de ciertas bacterias que actúan como catalizadoras del proceso (Kebede K., et al., 2017). En la actualidad, no existe información sobre el potencial de generación de DAM de los relaves del campo minero Ponce Enríquez, sin embargo, se han desarrollado varios procedimientos para determinar las características de formación de ácido de los materiales de

desechos mineros. Los métodos de evaluación más ampliamente utilizados para la caracterización de la generación de DAM son el Balance Ácido-Base (ABA) y el Test de Generación Neta de Ácido (NAG). Estos métodos se conocen como procedimientos estáticos porque cada uno implica una sola medición en un momento determinado (AMIRA International, 2002).

En este contexto, este proyecto busca proporcionar información básica para identificar los minerales potencialmente generadores de acidez y de alcalinidad, y finalmente, evaluar el grado de riesgo de generación de DAM para las relaveras analizadas. Esta información es esencial para tomar decisiones informadas sobre cómo gestionar y minimizar los riesgos en los entornos mineros, de cara a garantizar la sostenibilidad de las operaciones mineras, aportando a los objetivos de desarrollo sostenible de Salud y bienestar (ODS 3), Agua limpia y saneamiento (ODS 6) y Producción y consumo responsable (ODS12).

1.1 Descripción del Problema

En el cantón Camilo Ponce Enríquez, la comunidad ha padecido los efectos de una minería ilegal, mal administrada y escasamente regulada, lo que ha provocado un impacto significativo en el medio ambiente, así como en la calidad de vida y la salud de los habitantes. Los residuos mineros metálicos contienen una variedad de sustancias contaminantes que pueden causar la degradación de los ecosistemas. Uno de los principales problemas ambientales es la alta posibilidad de generación de drenaje ácido de mina (DAM). En la actualidad, no existe información sobre el potencial de generación de DAM de los relaves del campo minero Ponce Enríquez. En este contexto, este proyecto busca proporcionar información básica para identificar los minerales potencialmente generadores de acidez y de alcalinidad, y finalmente, evaluar el grado de riesgo de generación de DAM para las relaveras analizadas. Esta información es esencial para tomar decisiones informadas sobre

cómo gestionar y minimizar los riesgos en los entornos mineros, de cara a garantizar la sostenibilidad de las operaciones mineras.

1.2 Justificación del Problema

Evaluar el potencial de generación de DAM proveerá la información necesaria para determinar la capacidad de los relaves para generar DAM y la capacidad del medio para neutralizarlo. En este contexto, el propósito de este estudio es determinar el potencial generador de DAM de cuatro relaveras mineras ubicadas en el cantón minero Ponce Enríquez, mediante la aplicación de la prueba NAG, generación neta de acidez. La información de este proyecto permitirá al Gobierno Autónomo del Cantón Camilo Ponce Enríquez contar con la información necesaria para cualificar los relaves mineros con relación a su capacidad de generar DAM, lo que permitirá la toma de decisiones de gestión y remediación necesarias para el bienestar del medio ambiente y de la población, contribuyendo así al desarrollo de una minería responsable y al cumplimiento de los ODS en lo referente a salud y bienestar (ODS 3), agua limpia y saneamiento (ODS 6) y producción y consumo responsable (ODS12).

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Evaluar el potencial de generación de drenaje ácido de minas (DAM) en cuatro relaveras que operan en el Campo Minero Camilo Ponce Enríquez, mediante la aplicación de pruebas estáticas de laboratorio para la estimación del potencial contaminante de los residuos mineros.

1.3.2 Objetivos específicos

- Evaluar el contenido de los elementos potencialmente tóxicos presentes en los relaves mineros, con base en el análisis químico de las muestras de relaves.

- Analizar el potencial de generación de drenaje ácido de mina (DAM), mediante la aplicación de la prueba NAG (Net Acid Generation).
- Determinar el potencial de neutralización de las muestras de relaves mediante la aplicación de la prueba ABA (Acid Base Accounting).

1.4 Marco teórico

1.4.1 Relaves Mineros

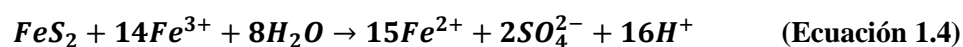
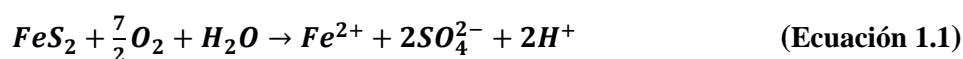
Los relaves son una mezcla de materiales sólidos de grano fino (usualmente de tamaño limo, entre 0.001 y 0.6 mm) que quedan tras la extracción de metales y minerales aprovechables del mineral extraído, junto con el agua y otros compuestos químicos utilizada en el proceso de recuperación mineral. Las características físicas y químicas de los relaves dependen de la naturaleza del mineral y del método de procesamiento empleado, sin embargo, a menudo contienen sustancias tóxicas. Por ello, la gestión de los relaves es un aspecto crucial en la administración de desechos durante el procesamiento de minerales (Australian Government, 2016).

La forma de almacenar los relaves varía según sus características físicas y químicas, la topografía del lugar, las condiciones climáticas, las normativas y restricciones ambientales, así como el contexto socioeconómico de las operaciones mineras y la planta de procesamiento. Generalmente, los relaves se transportan en forma de pulpa a instalaciones de almacenamiento, también pueden almacenarse en fosas o en formas integradas de desechos. Los objetivos fundamentales de una instalación de almacenamiento de relaves es garantizar un almacenamiento seguro, estable, no contaminante y económico de los relaves, presentando riesgos mínimos para la salud y seguridad pública, así como impactos sociales y ambientales aceptablemente bajos durante la operación y después del cierre de la mina.

1.4.2 DAM

El drenaje ácido de minas (DAM) es un drenaje derivado de la meteorización y oxidación de los sulfuros metálicos (Ministerio de ambiente, agua y transición ecológica, 2016). El DAM se produce cuando el material que contiene sulfuros se expone al oxígeno y al agua. La producción de DAM generalmente, pero no exclusivamente, ocurre en rocas agregadas de sulfuros de hierro y aunque este proceso ocurre naturalmente, la minería puede promover la generación de DAM al aumentar la cantidad de sulfuros expuestos.

Las reacciones involucradas en el proceso de generación se presentan en las ecuaciones 1-4. La ec. 1 indica la formación de hierro debido a la oxidación del sulfuro mineral. La ec. 2 muestra la hidrólisis del hierro férrico. La ec. 3 señala que algunos cationes férricos pueden seguir oxidando a la pirita. La ec. 4 representa a la reacción final de la generación ácida. Las bacterias que ocurren naturalmente pueden acelerar la producción de DAM al ayudar en la descomposición de los minerales sulfurados (Akcil & Koldas, 2006).



1.4.3 Casos de estudio de proyectos mineros donde se ha generado grandes cantidades de DAM

El análisis de estos estudios nos permite entender las consecuencias reales del DAM, así mismo, facilita la identificación de mejores prácticas con el fin de prevenir la generación de DAM.

1.4.3.1 Río tinto, España. El río Tinto en España es uno de los ejemplos más antiguos y conocidos de contaminación por drenaje ácido de minas. La actividad minera en esta área data de tiempos romanos, y el drenaje ácido resultante ha producido un ambiente extremadamente ácido y rico en metales pesados. Las investigaciones han demostrado índices de acidez de 2.5 pH, con aguas que circulan con aproximadamente 16,000 toneladas de ácidos equivalentes, 1,300 de cobre y 8,500 de hierro (Datum Ambiental, 2024).

1.4.3.2 Berkley Pit, Montana, Estados Unidos. La mina de cobre Berkeley Pit es un ejemplo emblemático de una mina a cielo abierto que ha generado cantidades significativas de drenaje ácido de minas, debido a que casi 10,000 millas de túneles quedaron expuestos al aire durante décadas. Cuando cesó la minería en el Berkeley Pit, se apagaron las bombas de desagüe subterráneo y el agua subterránea regresó, generando DAM, creando un lago tóxico. El agua en el Berkeley Pit ha tenido un pH que ronda los 2.5. Con el tiempo, el tratamiento ha mejorado el pH del Berkeley Pit para medir igual o por encima de 4.0. Sin embargo, la concentración de cobre en partes por billón (ppb) es de aproximadamente 70,000 (PitWatch, 2024).

1.4.3.3 Iron Mountain, California, Estados Unidos. Se han encontrado aguas minerales subterráneas extremadamente ácidas con pH negativo de -3.6, altas concentraciones de metales disueltos de hasta 200 g/L y sulfatos de hasta 760 g/L. Estas aguas se destacan por ser las más ácidas registradas en el planeta. Se observó la formación de numerosos minerales eflorescentes a partir de estas aguas extremadamente ácidas. La acidez extrema de estas aguas se originó principalmente por la oxidación de la pirita y su concentración por evaporación, con efectos menores debido a la oxidación del hierro ferroso en solución acuosa y la formación de minerales eflorescentes. Las operaciones mineras se dieron entre 1897 y 1962, sin embargo, se observó la generación de DAM desde el 1940 (Nordstrom D., et al., 2000).

1.4.3.4 Mount Morgan, Queensland, Australia. La antigua mina de oro y cobre Mount Morgan ha generado un DAM significativo que ha afectado al río Dee durante más de 100 años. El agua es muy ácida con valores de pH de 2.8, además las muestras de agua han mostrado concentraciones altas de contaminantes que sobrepasan el límite establecido para Al, Cu y Zn según ANZECC (2000) y el valor más elevado encontrado para Cd es de 0.0592 mg/L. Así mismo, se han estudiado especies de peces comúnmente consumidas por humanos y se encontraron concentraciones por encima de los niveles máximos permitidos para el consumo humano por ANZFA (2000), de Al de 1,100 mg/L y de Cu de 61.6 mg/L, también se encontraron contaminantes dentro del rango permitido, de Cd de 0.3 mg/L y de Zn de 195 mg/L (Syeda S., et al., 2007).

1.4.4 Pruebas de generación de DAM

La generación de DAM es un proceso que puede tener graves consecuencias ambientales, por lo que es crucial realizar ensayos para predecir su ocurrencia. Estos ensayos se dividen en dos categorías: ensayos estáticos y ensayos cinéticos.

1.4.4.1 Ensayos estáticos. Los ensayos estáticos son pruebas iniciales utilizadas en la caracterización ambiental de los residuos mineros para determinar su potencial de generar DAM. Estas pruebas proporcionan una evaluación cuantitativa del equilibrio químico entre la generación de ácido y la neutralización de este, basado en la composición mineralógica de la muestra. Los ensayos estáticos son fundamentales en la fase de planificación y evaluación de un proyecto minero, ya que permiten la identificación temprana de materiales que pueden presentar riesgos ambientales significativos si no se gestionan adecuadamente.

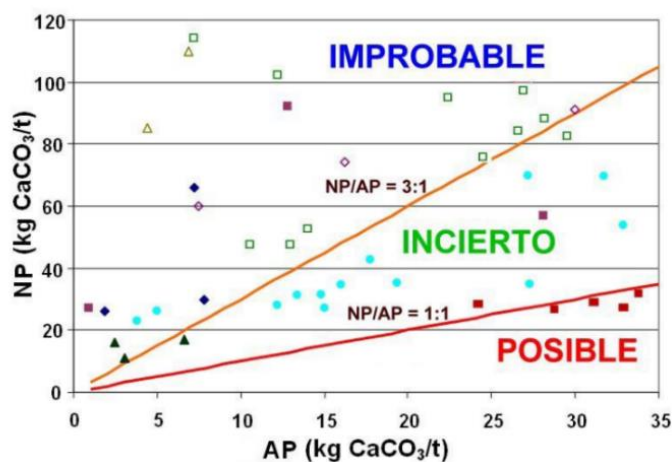
Los ensayos estáticos se centran en medir el contenido de minerales sulfurosos que tienen la capacidad de oxidarse y producir ácido cuando están expuestos al oxígeno y al agua. Al mismo tiempo, estos ensayos evalúan la presencia de minerales carbonatados y otros

minerales alcalinos que pueden neutralizar el ácido generado. El balance entre estos dos procesos es crucial para determinar el potencial de una muestra para contribuir al DAM.

1.4.4.1.1 Relación ácido/base. La relación ácido/base es un método rápido para evaluar la acidez en rocas y materiales de minas, aunque para mayor precisión se debe correlacionar con variables como mineralogía y pH. La neutralización potencial (NP) mide la capacidad de los carbonatos y silicatos para neutralizar la acidez, y su valor depende del ácido añadido y consumido en la muestra. Este ensayo predice cualitativamente la capacidad de generar acidez al comparar la acidez potencial (AP) con la NP. El AP se determina principalmente por el tipo y contenido de sulfuros, sulfatos y metales hidrolizables como Fe, Al y Mn, mientras que el NP considera los carbonatos y silicatos. Las unidades de NP, AP y NNP se expresan en toneladas de carbonato de calcio (CaCO_3) por 1,000 toneladas de material. El potencial de neutralización neta (NNP) se calcula como la diferencia entre NP y AP, indicando la acidez o basicidad de una muestra (Aduvire, 2006). Así mismo, es posible denominar la probabilidad de generación de DAM con base en la relación NP/AP (*Figura 1.1*)

Figura 1.1

Relación entre los potenciales de neutralización y acidez



Nota: La figura muestra que mientras mayor sea la relación NP/AP, menor será la probabilidad de generación de DAM (Aduvire, 2006).

1.4.4.1.2 Generación neta de acidez. Este ensayo se utiliza para determinar la probabilidad de generación de drenajes ácidos al acelerar la oxidación y las reacciones de neutralización. Aunque requieren un alto nivel de interpretación, los ensayos NAG son preferidos para caracterizar estériles y residuos de mina. En la práctica, los resultados de pH y conductividad eléctrica (EC) de los ensayos NAG se combinan para predecir el potencial ácido de los materiales almacenados en presas y escombreras, permitiendo una clasificación que ayuda a reducir el impacto ambiental y mejorar el diseño de estas estructuras para evitar la entrada de agua y oxígeno. La generación ácida por la oxidación de sulfuros es común en la minería cuando los materiales excavados se exponen al aire. La relación ácido/base es un procedimiento rápido y sencillo para evaluar la acidez en rocas y materiales de minas y escombreras, aunque para mayor precisión se debe correlacionar con otras variables como mineralogía, pH y color. En muestras de material inorgánico con azufre, el potencial de generación ácida se debe a la oxidación de sulfuros minerales como pirita, pirrotita, calcopirita, esfalerita y galena. El azufre del sulfuro reacciona con agua y oxígeno, formando ácido sulfúrico, cuyo equivalente en CaCO_3 representa el potencial de generación ácida en kg de CaCO_3/t o $\text{t CaCO}_3/1000 \text{ t}$ (Aduvire, 2006).

1.4.4.2 Ensayos cinéticos. Los ensayos cinéticos, a diferencia de los ensayos estáticos, imitan las reacciones de oxidación naturales y requieren más tiempo y mayor volumen de muestra. Proporcionan datos sobre la velocidad de oxidación de los sulfuros y la producción de ácido, así como la calidad del agua de drenaje. No existe un ensayo cinético preferido de manera universal, ya que la preferencia cambia con la experiencia y el conocimiento. Estos ensayos pueden evaluar cómo diferentes variables afectan la generación de ácido, incluyendo la inoculación con bacterias y el control de temperatura. Generalmente, se requiere que las muestras sean menores a una malla específica, aunque también se pueden examinar partículas más gruesas. Los ensayos cinéticos pueden también evaluar mecanismos

de control del drenaje ácido, como la adición de cal para aumentar la alcalinidad. Es beneficioso complementar estos ensayos con datos empíricos de la muestra, como su área superficial específica, mineralogía y contenido de metales, ya que estos datos influyen en la interpretación de los resultados y son cruciales para comparaciones espaciales y temporales. Al igual que con los ensayos estáticos, el tamaño de partícula de la muestra es un factor importante al comparar resultados de ensayos con aplicaciones a gran escala (U.S. Environmental Protection Agency, 1994).

1.4.4.2.1 Pruebas en Reactores por Lotes (Frascos Agitados). En las pruebas de reactor por lotes, una muestra de mina se mezcla con agua en un frasco, similar a la prueba de confirmación de Columbia Británica. Se utiliza agua destilada, con o sin nutrientes, y los volúmenes de muestra y solución son determinados por el usuario. Por ejemplo, Coastech (1989) usó 250 g de desechos y 500 mL de agua. Los frascos se agitan continuamente y se toman muestras de agua a intervalos regulares para analizar parámetros como pH, sulfatos y metales disueltos. En pruebas más largas, puede ser necesario añadir agua para mantener el volumen, lo que complicaría la interpretación de los datos. Los resultados se usan para estimar la oxidación de minerales de sulfuro y la liberación de contaminantes. El método del reactor por lotes es simple y permite probar múltiples factores simultáneamente, como pH y temperatura. También se puede evaluar la influencia de bacterias y medidas de control. Sin embargo, la duración de la prueba puede ser insuficiente para observar la formación de ácido, y el volumen de agua puede inhibir esta formación. Además, las bacterias pueden no aclimatarse bien a las condiciones de la prueba (U.S. Environmental Protection Agency, 1994).

1.4.4.2.2 Pruebas a Escala de Campo. Las pruebas a escala de campo utilizan grandes volúmenes de material en condiciones ambientales naturales, generalmente en el sitio de la mina. A diferencia de las pruebas de laboratorio, que son controladas, estas pruebas

emplean muestras de hasta 1000 toneladas métricas sin reducir el tamaño de las partículas, para simular mejor las condiciones reales. Las muestras se colocan sobre revestimientos impermeables para recolectar el lixiviado, que luego se analiza para determinar parámetros como pH, sulfatos y metales disueltos. Es crucial considerar las condiciones climáticas, ya que afectan la tasa de descarga, pero no las reacciones químicas del lixiviado. Las pruebas a escala de campo, realizadas en condiciones ambientales similares a las de los residuos, permiten monitorear la influencia de las bacterias y las medidas de control. Sin embargo, estas pruebas requieren largos periodos y no aceleran las condiciones ambientales, proporcionando información sobre el potencial de generación de ácido a lo largo del tiempo, desde antes de comenzar la colocación de residuos (U.S. Environmental Protection Agency, 1994).

1.4.4.2.3 Prueba de celda de humedad o celda húmeda. La prueba de celda de humedad, según descrita por Sobek (1978), utiliza una muestra de 200 g triturada a menos de 2.38 mm en un recipiente plástico cerrado. Esta prueba se extiende a lo largo de diez semanas y sigue un ciclo semanal de siete días. A la muestra se le puede introducir bacterias. Durante este ciclo, se introduce aire seco en el recipiente durante los primeros tres días y aire humidificado durante los siguientes tres días. El séptimo día, la muestra se enjuaga con 200 mL de agua destilada. Posteriormente, la solución se analiza para determinar parámetros como pH, acidez, alcalinidad, conductividad específica, potencial redox, sulfatos y metales disueltos (U.S. Environmental Protection Agency, 1994).

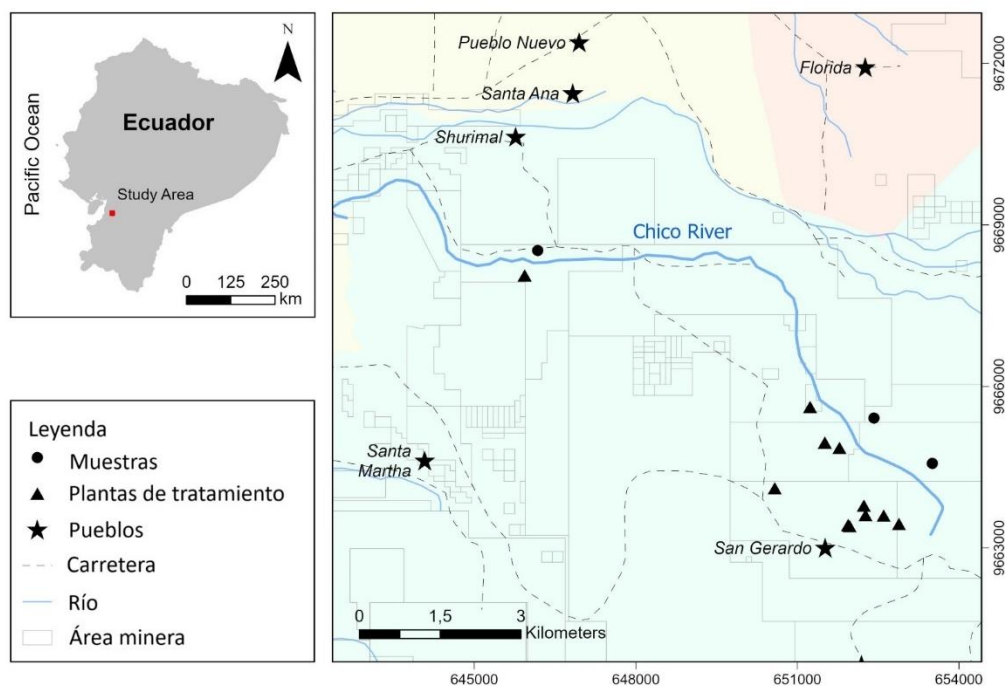
Capítulo 2

2. Metodología

2.1. Área de estudio

Las muestras de relave fueron obtenidas de 4 relaveras localizadas en el cantón Camilo Ponce Enríquez, Azuay, Ecuador (*Figura 2.1*), donde predomina la presencia de sulfuros metálicos y altas concentraciones de elementos potencialmente tóxicos en los relaves (Banco Central del Ecuador, 2017), lo que hace necesario un tratamiento de neutralización para prevenir la acidez y la lixiviación de metales.

Figura 2.1
Ubicación de las relaveras muestreadas



Este estudio se realizó en marco del proyecto de investigación FICT-ESPOL “Evaluación del Potencial Contaminante de Residuos Mineros Masivos”. Las muestras fueron recolectadas en 2023 y posteriormente sometidas a diferentes análisis químicos y físicos.

2.2 Análisis de la concentración de los elementos potencialmente tóxicos (EPT)

La determinación del contenido de los elementos potencialmente tóxicos (EPT) en las muestras de relaves fue realizado en el Laboratorio de Suelos y Nutrición Vegetal de FICV-ESPOL, mediante Fluorescencia de Rayos X (XRF, ZSpec-EMax), con una muestra pulverizada a 850 μm . Se determinó la concentración de Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Niquel (Ni), Plomo (Pb), Zinc (Zn). Así mismo, se midió los valores de pH en relación 1:1 y la conductividad eléctrica de las muestras.

Las concentraciones de EPT fueron comparadas con los valores de referencia establecidos en la Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados, libro VI anexo 2 del TULSMA, con un enfoque dirigido hacia los diferentes usos del suelo y a la denominación de la perturbación generada por las concentraciones de los EPT (*Tabla 2.1*).

Tabla 2.1

Denominación de los diferentes grados de perturbación

Factor de contaminación	Grado de perturbación	Denominación
Menor a 1.5	0	Perturbación insignificante
1.5 a 3	1	Perturbación evidente
3 a 10	2	Perturbación severa
Mayor a 10	3	Perturbación muy severa

Nota: El factor de contaminación es la relación entre la concentración presente en la muestra analizada y la concentración de fondo escogida.

2.3 Análisis mediante Microscopia electrónica de barrido

Las muestras fueron analizadas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, *Scanning Electron Microscopy*) en el Laboratorio de Evaluación de Materiales (LEMAT) de la ESPOL, utilizando un equipo SEM-EDAX de la marca FEI, modelo INSPECTS. Este tipo de microscopio utiliza un haz de electrones para escanear la superficie de una muestra, lo que

genera señales electrónicas que son recolectadas y procesadas para construir imágenes de alta resolución y gran detalle de la superficie (McMullan, 2006). A partir de esta información, se realizó un análisis detallado de las imágenes SEM, enfocado en la evaluación de la morfología, el contraste de brillo y la textura de las muestras.

2.4 Determinación de sulfatos y contenido de azufre total

La determinación de sulfatos se llevó a cabo en el Laboratorio de Sanitarias de la ESPOL. El análisis consistió en precipitar los sulfatos (SO_4^{2-}) presentes en la muestra mediante la adición de cloruro de bario (BaCl_2), lo que resultó en la formación de sulfato de bario (BaSO_4). Los iones de sulfato en la muestra reaccionan con el cloruro de bario para formar una suspensión de partículas de sulfato de bario. La turbidez de la solución causada por estas partículas se midió utilizando un turbidímetro (Hach DR3900) y la concentración de sulfato se determinó en función de la turbidez (American Public Health Association, 1992).

A 1 g de muestra se le agregó 5 ml de agua desionizada y 5 ml de ácido nítrico concentrado ($\text{HNO}_3(\text{c})$), se calentó a $105\text{ }^\circ\text{C}$ durante una hora y luego se dejó enfriar a temperatura ambiente. Cuando las muestras alcanzaron los $25\text{ }^\circ\text{C}$ se filtró y diluyó con agua desionizada hasta conseguir 100 ml de muestra (*Figura 2.2*).

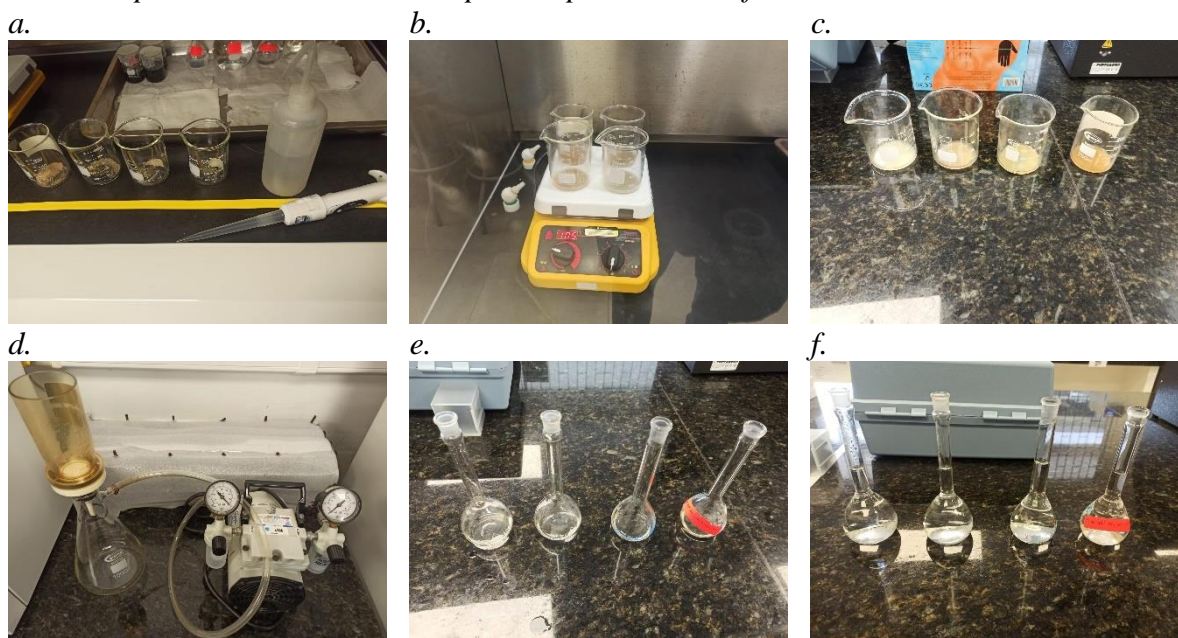
Posteriormente, fueron preparadas dos celdas para cada muestra con 10 ml de la dilución, una celda fue la medida cero y a la segunda celda se le añadió el reactivo SulfaVer 4 Sulfate, agitándolo y dejándolo reaccionar por cinco minutos para luego tomar la medida de sulfatos (*Figura 2.3*).

La determinación del contenido de azufre total se realizó en el Laboratorio de Análisis Químico ESPOL mediante la metodología detallada en la norma NTE INEN 237 Determinación del Azufre. Para el análisis se utilizó 1 g de muestra significativa, permitiendo

determinar y cuantificar el porcentaje de azufre en las muestras de relaves; información esencial para la realización del test ABA.

Figura 2.2

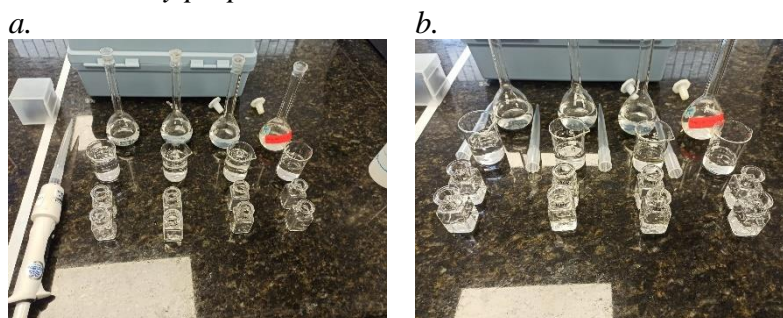
Preparación de las muestras para la prueba de Sulfatos



Nota: (a) 1g de muestra pasante del tamiz No. 100; (b) Calentamiento de las muestras con agua y ácido nítrico; (c) Muestras enfriadas a temperatura ambiente; (d) Bomba de vacío para el filtrado de muestras; (e) Muestras filtradas; (f) Dilución de 10 ml de muestras con 90 ml de agua.

Figura 2.3

Dilución de muestra y preparación de celdas de turbidímetro



Nota: (a) Preparación de celdas; (b) Celdas con el reactivo SulfaVer 4 Sulfate

2.4 Evaluación del potencial de generación de DAM

Para evaluar el potencial de generación de DAM se aplicó dos pruebas estáticas, la prueba de Generación Neta de Ácido (NAG) y la prueba de Balance Ácido Base (ABA); ambas pruebas se realizaron en el Laboratorio de Sanitarias de la FICT-ESPOL.

2.4.1. Generación Neta de Ácido (NAG)

La Generación Neta de Ácido (NAG) es una prueba que evalúa la capacidad de los residuos sulfurosos para generar ácido sulfúrico. La prueba NAG implica la adición de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) a una muestra pulverizada y la medición del pH de la solución después de 24 horas. Un pH NAG final menor a 4.5 indica que la muestra puede generar ácido. Los resultados clasifican los materiales en categorías como no formadores de ácido y potencialmente formadores de ácido de gran capacidad y de baja capacidad (**Tabla 2.2**).

Los materiales con alta capacidad para formar ácido requieren pruebas adicionales integrando pruebas cinéticas en las que se utilizan varios kilogramos de muestra expuesta a ciclos húmedos y secos durante varios meses o años, permitiendo determinar el volumen de ácido creado y la tasa de creación, además requieren gestión específica, implementando prácticas para minimizar la exposición de estos materiales al agua y al aire, como el encapsulamiento, la cobertura con material inerte y el tratamiento de agua de escorrentía (Lottermoser, 2007; Vilela, F., et. al., 2018).

Tabla 2.2

Clasificación de los relaves mineros con base en los resultados de la prueba NAG

Clasificación	NAG [$Kg H_2SO_4t^{-1}$]
Potencial formador de ácido de gran capacidad	>5
Potencial formador de ácido de baja capacidad	≤5
No formador de ácido	0

Nota: Con base en la capacidad de formar H_2SO_4 por tonelada de material

El método de análisis NAG consistió en tamizar las muestras a través de una malla de abertura de 2mm, luego conseguir 2.5 g de muestra significativa del pasante mediante la técnica de cuarteo (**Figura 2.4**). A continuación, se agregó H_2O_2 al 15% a relación de 100 ml por 1 g de muestra, después de 12 horas se llevó a ebullición para eliminar el excedente de H_2O_2 (**Figura 2.5**). Una vez que la muestra se enfrió a temperatura ambiente, se tituló con

NaOH hasta obtener un pH de 4.5 para luego determinar el valor de NAG con uso de la

Ecuación 2.1.

$$NAG \left(kg \frac{H_2SO_4}{t} \right) = \frac{V_{NaOH} M_{NaOH} C}{wt} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Donde:

V_{NaOH} es el volumen de base $NaOH$ titulada en ml

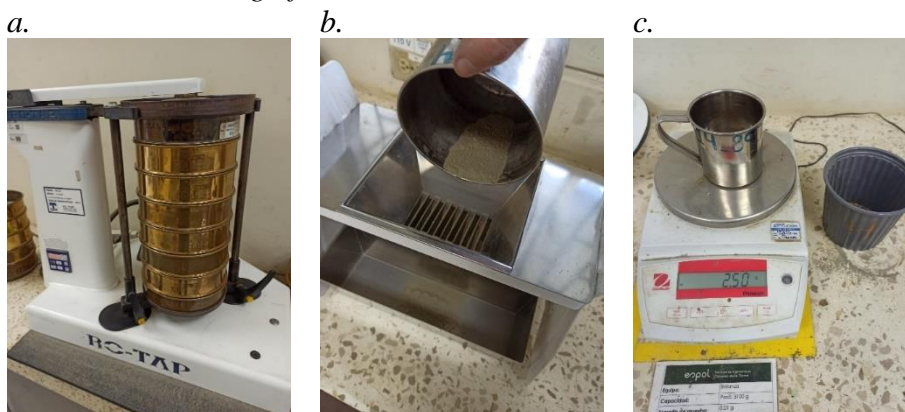
M_{NaOH} es la molaridad de la base $NaOH$ en moles/L

C es el factor de conversión igual a 49 para obtener $kg \frac{H_2SO_4}{t}$

wt es el peso de la muestra en g

Figura 2.4

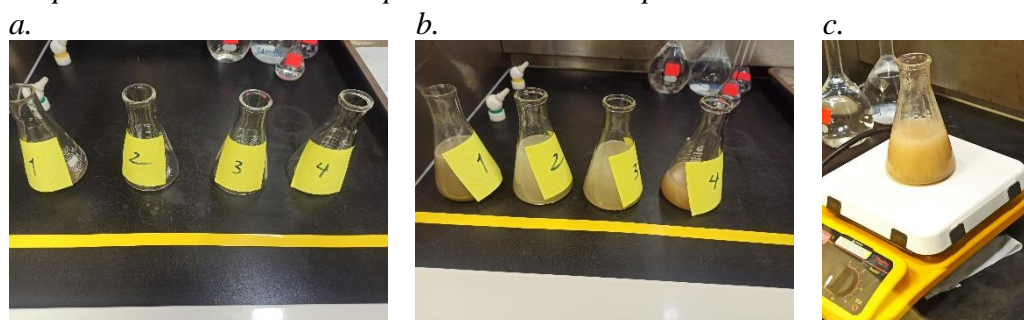
Obtención de muestra significativa



Nota: (a) Configuración de tamices N°4, N°8, N°10, N°18, N°30, N°50; (b) Método de cuarteo; (c) Muestra significativa de 2.5 g.

Figura 2.5

Preparación de las muestras para realización de prueba NAG



Nota: (a) Matracas etiquetados con las muestras; (b) Muestras con el H₂O₂ al 15%; (c) Eliminación del H₂O₂ excedente.

2.4.1 Prueba de Balance Ácido Base (ABA)

La prueba de Balance Ácido Base o Acid Base Accounting (ABA) se realizó calculando el potencial ácido (AP), potencial neutralizante (NP) y el potencial neto de

neutralización (NNP), todas en unidades de Kg de carbonato de calcio (CaCO_3) por tonelada de material.

Para calcular el AP, se multiplicó el % de azufre como sulfuros por un factor de 32.25. Para determinar el NP se tomó 2 gramos de muestra ($<75 \mu\text{m}$), se añadió 20 ml de HCl 1N y se calentó a 90°C durante una hora. Seguido se dejó enfriar la muestra a temperatura ambiente. Luego, se tituló el ácido con una solución de NaOH 0.1N, usando fenolftaleína como indicador, hasta alcanzar un color rosado persistente (pH 8.3). Se registró el volumen de consumido durante la titulación y se calculó el NP usando la **Ecuación 2.2**. La **Figura 1.1** presenta evidencia fotográfica del proceso.

$$NP = \frac{(V_{NaOH} * N_{NaOH} - V_{HCl} * N_{HCl}) * 50 * M_{NaOH}}{\text{Masa de la muestra (g)}} \quad \text{(Ecuación 2.2)}$$

Donde:

V_{NaOH} es el volumen de base $NaOH$ ml

N_{NaOH} es la normalidad de base $NaOH$

V_{HCl} es el volumen de HCl ml

N_{HCl} es la normalidad de HCl

M_{NaOH} es la masa molar de la base $NaOH$ en g/mol

Figura 2.6

Proceso de prueba ABA



Nota: (a) Muestras de relaves; (b) Preparación de muestras; (c) Reacción de muestras

En la **Tabla 2.3** se presenta la clasificación de los resultados según diferentes autores.

En este estudio se consideró el valor del parámetro NNP. Si el NNP es superior a 20 kg/ton CaCO_3 , se determina que el material no es generador de acidez. Si el NNP es inferior a -20 kg/ton CaCO_3 , se determina que el material es generador de acidez. Los valores de NNP entre -20 y 20 kg/ton CaCO_3 determinan incertidumbre en los resultados. (Ferguson & Morin, 1991)

Tabla 2.3*Clasificación de los resultados del test ABA según diferentes autores*

Parámetro ABA	Valor Calculado	Denominación de Calidad de agua	Fuente
NP	<20	Neto ácido	diPretoro and Ranch, 1988
	>40	Neto alcalino	
	<10	Neto ácido	Brady et al., 1994
	>21	Neto alcalino	
NNP	<10	Neto ácido	diPretoro and Ranch, 1988
	>30	Neto alcalino	
	<20	Neto ácido	Erickson and Hedin, 1988
	>80	Neto alcalino	
	<0	Neto ácido	Brady et al., 1994
	>12	Neto alcalino	
	<5	Neto ácido	Skousen et al., 1987
	>15	Neto alcalino	

Nota: Adaptado de Perry (1998).

Capítulo 3

3. Resultados y análisis

3.1 Análisis de la concentración de los elementos potencialmente tóxicos (EPT)

Se llevó a cabo un análisis detallado de las concentraciones de elementos potencialmente tóxicos presentes en las muestras, con un enfoque particular en los diversos usos potenciales del suelo presentes en la Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados, libro VI anexo 2 del TULSMA. Clasificando los posibles usos de suelo sujetos a remediación o restauración como, agrícola (*Tabla 3.1*), residencial (*Tabla 3.2*), comercial (*Tabla 3.3*) e industrial (*Tabla 3.4*), representando con color verde los valores por debajo del Límite Máximo Permissible (LMP), con color amarillo los valores cercanos al LMP y con color rojo los valores mayores al LMP. Los parámetros de Fe y Mn no fueron considerados en este análisis al no tener valores de referencia en la normativa ecuatoriana.

Además, se realizó una denominación del grado de perturbación asociado a cada contaminante identificado en las muestras (*Tabla 3.5*), representando con color verde la perturbación insignificante, con color amarillo la perturbación evidente, con color naranja la perturbación severa y con color rojo la perturbación muy severa.

Tabla 3.1

Comparación de concentraciones de EPT en muestras y el LMP en uso agrícola

Parámetro	LMP	M1	M2	M3	M4
As	12	2100	429.82	1200	4466
Cd	2	1.14	0.2	1.78	5.18
Cr	65	143.84	268.36	196.9	263.61
Cu	63	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	100	71.2	2.73	49.57	410.55
Zn	200	127.68	40.94	131.26	313.09

Tabla 3.2*Comparación de concentraciones de EPT en muestras y el LMP en uso residencial*

Parámetro	LMP	M1	M2	M3	M4
As	15	2100	429.82	1200	4466
Cd	5	1.14	0.2	1.78	5.18
Cr	65	143.84	268.36	196.9	263.61
Cu	63	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	100	39.86	52.45	41.29	537.96
Pb	100	71.2	2.73	49.57	410.55
Zn	200	127.68	40.94	131.26	313.09

Tabla 3.3*Comparación de concentraciones de EPT en muestras y el LMP en uso comercial*

Parámetro	LMP	M1	M2	M3	M4
As	15	2100	429.82	1200	4466
Cd	10	1.14	0.2	1.78	5.18
Cr	90	143.84	268.36	196.9	263.61
Cu	91	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	100	39.86	52.45	41.29	537.96
Pb	150	71.2	2.73	49.57	410.55
Zn	380	127.68	40.94	131.26	313.09

Tabla 3.4*Comparación de concentraciones de EPT en muestras y el LMP en uso industrial*

Parámetro	LMP	M1	M2	M3	M4
As	15	2100	429.82	1200	4466
Cd	10	1.14	0.2	1.78	5.18
Cr	90	143.84	268.36	196.9	263.61
Cu	91	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	100	39.86	52.45	41.29	537.96
Pb	150	71.2	2.73	49.57	410.55
Zn	380	127.68	40.94	131.26	313.09

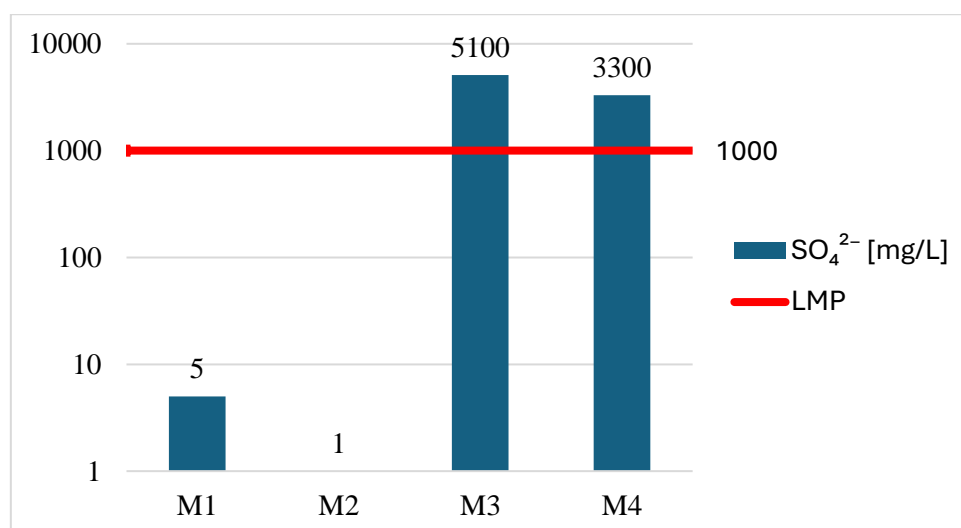
Tabla 3.5*Denominación del grado de perturbación de los EPT en las muestras*

Muestra	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
M1	175	2.28	359.60	6.53	2.10	3.75	2.13
M2	35.82	0.40	670.90	2.31	2.76	0.14	0.68
M3	100	3.56	492.25	2.72	2.17	2.61	2.19
M4	372.17	10.36	659.03	4.22	28.31	21.61	5.22

3.4 Análisis de la prueba de sulfatos y de azufre

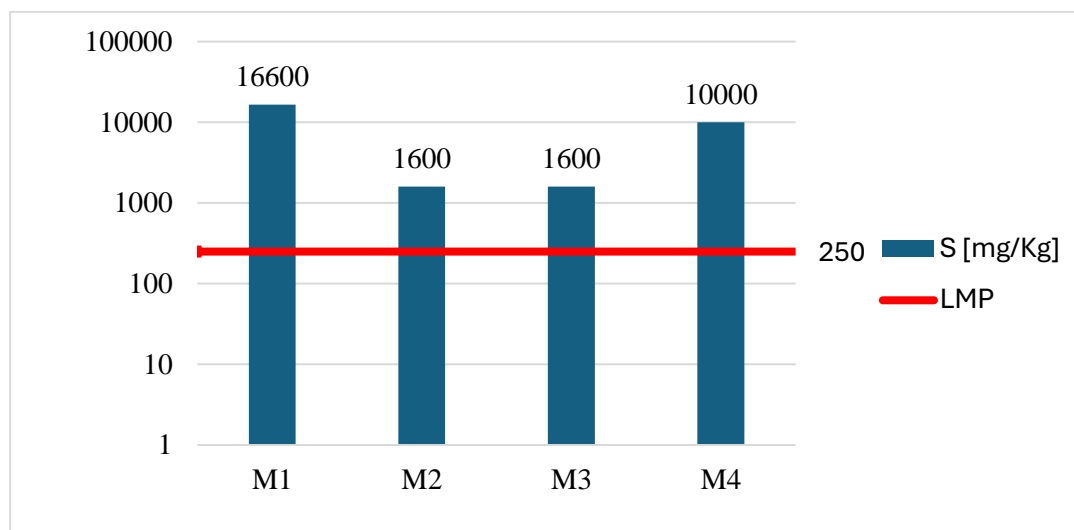
La **Figura 3.1** muestra las concentraciones de sulfatos en las muestras y la comparación de los resultados con el LMP según la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua. Los valores de mayor impacto en las muestras 3 y 4 fueron tan elevados que fue necesario diluir 0.1 ml de muestra con 9.9 ml de agua desionizada, obteniendo valores de 51 y 33, respectivamente, para luego multiplicarlos por un valor de conversión de 1000 para conseguir finalmente la concentración de sulfatos en mg/L.

Figura 3.1
Concentración de sulfatos en las muestras



Con respecto al contenido de azufre, se reportó porcentajes de 1.66%, 0.16%, 0.16% y 1.00%, respectivamente, en las muestras M1, M2, M3 y M4. La **Figura 3.2** muestra el contenido de azufre (en mg/Kg) y la comparación de los resultados según la Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados. Todas las muestras contienen valores mayores al límite máximo permisible, sin embargo, los resultados más alarmantes corresponden a las muestras M1 y M4 con 16600 y 10000 mg/Kg, respectivamente.

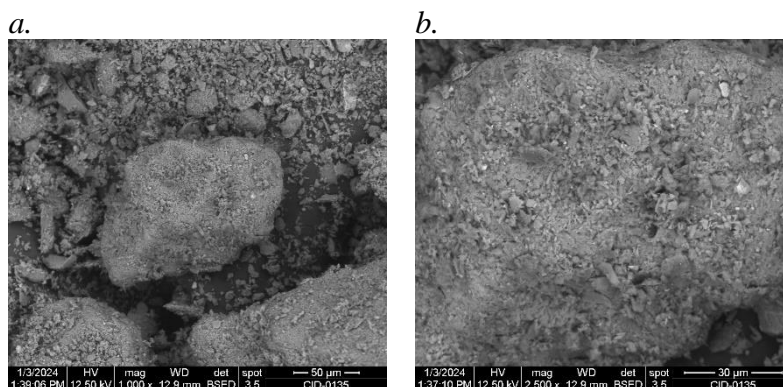
Figura 3.2
Concentración de azufre en las muestras



3.2 Análisis de imágenes SEM

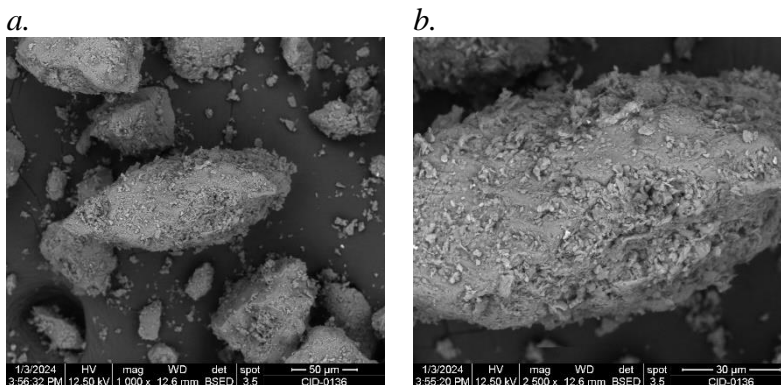
La **Figura 3.3** demuestra la morfología granular y fracturada de la muestra M1, lo que sugiere que los minerales presentes podrían estar fácilmente expuestos a la oxidación. En la **Figura 3.4** la superficie de la muestra M2 también muestra una textura rugosa, pero con menos fracturas visibles que la M1. En las muestras M1 y M2 no se observa una cantidad considerable de áreas con un brillo elevado, lo que se puede atribuir a la baja cantidad de sulfatos. El **Apéndice B** presenta en detalle las imágenes SEM de las muestras analizadas.

Figura 3.3
Imágenes SEM de muestra M1



Nota: (a) Magnificación 1000x; (b) Magnificación 2500x

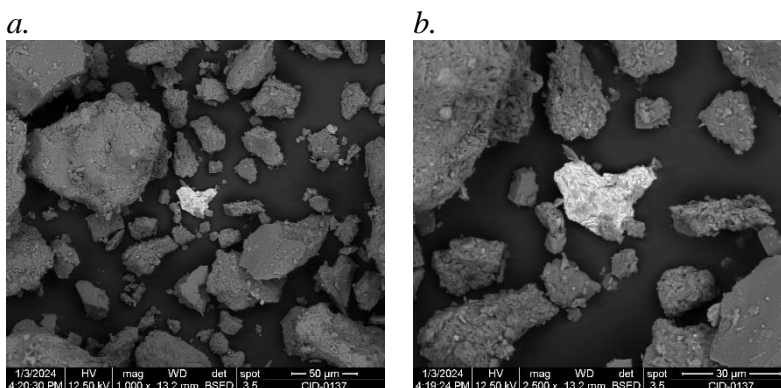
Figura 3.4
Imágenes SEM de muestra M2



Nota: (a) Magnificación 1000x; (b) Magnificación 2500x

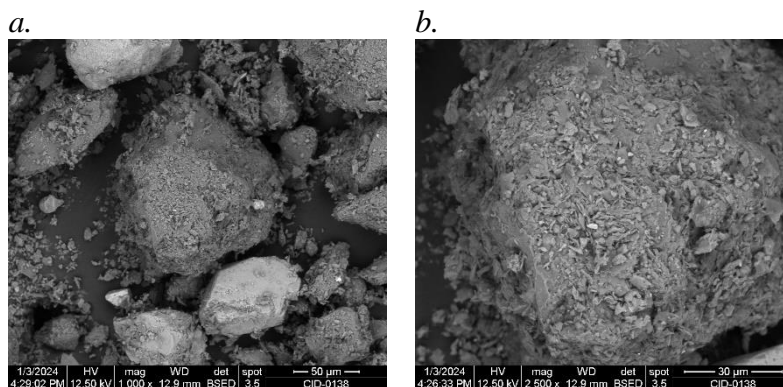
En la **Figura 3.5**, se aprecia la presencia de granos fragmentados en la muestra M3, lo que podría indicar una mayor reactividad. Los bordes afilados y las fracturas en los minerales facilitan el acceso del agua y del oxígeno, lo que puede acelerar la oxidación de sulfuros, mientras que en la **Figura 3.6** los granos de la muestra M4, más grandes y menos fragmentados, podría indicar una menor susceptibilidad a la oxidación. Tanto en la muestra M3 y M4 se observa una cantidad importante de áreas brillosas, lo que se puede atribuir a la alta concentración de sulfatos.

Figura 3.5
Imágenes SEM de muestra M3



Nota: (a) Magnificación 1000x; (b) Magnificación 2500x

Figura 3.6
Imágenes SEM de muestra M4



Nota: (a) Magnificación 1000x; (b) Magnificación 2500x

3.3 Evaluación de potencial de generación de DAM

3.3.1. Prueba NAG

En la **Tabla 3.6** se presenta el pH de las muestras luego de la reacción de las muestras con el H_2O_2 . Al no haber necesitado titular usando NaOH para alcanzar un pH de 4.5, se determina un volumen de cero ml de NaOH en la Error! Reference source not found., obteniendo una clasificación NAG de no formador de ácido para las muestras.

Tabla 3.6
Resultado de prueba NAG y pH de las muestras

Muestra	pH	Clasificación	Resultado de Prueba NAG
M1	7.69	Ligeramente alcalino	No generador de acidez
M2	7.79	Ligeramente alcalino	No generador de acidez
M3	7.79	Ligeramente alcalino	No generador de acidez
M4	7.71	Ligeramente alcalino	No generador de acidez

Los resultados indican que el material no es generador de acidez, esto podría significar que tiene suficiente capacidad de neutralización o que el material no está contribuyendo a la formación de ácidos bajo las condiciones de la prueba. Sin embargo, es necesario realizar más ensayos para obtener resultados más concluyentes. Una práctica

común en muchas empresas mineras es la adición de cal para incrementar el pH, esto puede influir en los resultados de la prueba NAG.

3.3.2 Prueba ABA

La **Tabla 3.7** muestra los resultados de la prueba ABA, demostrando un NNP negativo, lo que indica que el potencial de generar acidez sobrepasa al potencial neutralizante.

Tabla 3.7
Resultado de prueba ABA

Muestra	AP (kg CaCO ₃ /t)	NP (kg CaCO ₃ /t)	NNP
M1	51.87	-170.5	-222.37
M2	5	-250	-255
M3	5	-160	-165
M4	31.25	-160	-191.25

La prueba ABA muestra que el material es generador de acidez, esto significa que el material tiene el potencial de liberar ácidos, esto puede deberse a la presencia de sulfuros u otros compuestos que pueden formar ácidos cuando se oxidan. En este sentido, también se requiere análisis adicionales para comprender a profundidad el comportamiento geoquímico de los residuos mineros.

3.6 Recomendaciones para la gestión y cierre de relaveras

La gestión y el cierre adecuados de las relaveras son cruciales para minimizar los riesgos ambientales y sociales asociados con el DAM y otros elementos potencialmente tóxicos que pueden ser liberados y movilizados desde las estructuras de residuos mineros. El diseño de cierre debe considerar tanto la estabilización química (para prevenir la generación de DAM) como la física (para evitar la erosión y el desplazamiento de materiales). Esto incluye el uso de geotextiles, capas de protección y barreras químicas.

Se recomienda tener en cuenta las siguientes consideraciones para una apropiada gestión y cierre de relaveras:

Implementar un programa de monitoreo continuo de la calidad del agua y suelo, especialmente para detectar la presencia de metales pesados y otras sustancias tóxicas en los suelos, las aguas subterráneas y superficiales cercanas a las relaveras. Esto incluye la medición regular de parámetros como pH, conductividad eléctrica, sulfatos, metales disueltos y sólidos suspendidos totales.

Realizar estudios periódicos de estabilidad geotécnica para evaluar el estado de las estructuras de contención de los relaves. Esto debe incluir el monitoreo de asentamientos, desplazamientos y posibles signos de falla o desestabilización de las estructuras de almacenamiento. Se recomienda utilizar sensores de deformación, piezómetros, y técnicas de monitoreo remoto como el radar de apertura sintética (SAR).

La adición de materiales neutralizantes como la cal o caliza al relave, puede ayudar a controlar la generación de ácido. Esto puede incluir la mezcla in situ de materiales neutralizantes o la adición de capas de material neutralizante.

Diseñar cubiertas con materiales impermeables como la arcilla y capas de sellado reduce la infiltración de agua y oxígeno y minimiza el área de contacto con los sulfuros presentes en los relaves.

Implementar programas de revegetación utilizando especies nativas es crucial para estabilizar los suelos, prevenir la erosión y promover la restauración ecológica. La revegetación ayuda a restablecer la cubierta vegetal y crear hábitats para la fauna local, contribuyendo así a la restauración del ecosistema.

Se recomienda realizar un cierre progresivo de las relaveras en lugar de esperar al cierre total al final de la vida útil de la mina. Esto permite la recuperación temprana de áreas,

reduce los riesgos a largo plazo y distribuye los costos de cierre durante la operación además de brindar mayor flexibilidad en la gestión de los residuos.

Mantener una comunicación transparente y constante con las comunidades locales es esencial para construir confianza y asegurar la aceptación social de las actividades de cierre y gestión de relaves. Esto incluye la realización de reuniones informativas periódicas, la difusión de informes de monitoreo ambiental y la creación de canales de comunicación para recibir y atender las preocupaciones de la comunidad.

Así mismo, involucrar a las comunidades locales en la planificación y ejecución de los planes de cierre puede mejorar los resultados ambientales y sociales. Esto puede incluir la capacitación y el empleo de trabajadores locales en actividades de cierre y revegetación.

Es necesario asegurar el cumplimiento de todas las normativas locales, nacionales e internacionales aplicables a la gestión y cierre de relaves. Esto incluye la adherencia a los estándares de calidad del agua, aire y suelo, así como a los requisitos de seguridad y salud.

Realizar auditorías ambientales regulares para evaluar la efectividad de las medidas de gestión implementadas y garantizar que se cumplan los objetivos de cierre. Las auditorías deben ser realizadas por terceros independientes para asegurar la objetividad y la transparencia en el proceso de evaluación.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

Este trabajo fue desarrollado con el propósito de evaluar el potencial de generación de DAM de relaves en el Campo Minero Camilo Ponce Enríquez. Por lo que se realizaron diferentes análisis y evaluaciones a las muestras de relaves.

- Se evaluó el contenido de los EPT y se los clasificó en base a los diferentes usos de suelo y al grado de perturbación que representan en relación con muestras obtenidas en poblados cercanos. Obteniendo valores mayores a los límites máximos permisibles para cada tipo de uso de suelo, con un 40% de los resultados siendo perturbaciones muy severas, 10% severas, 30% poco severas y 10% perturbaciones insignificantes. Siendo la muestra M4 la de mayor perturbación con un valor del 90.48%, seguida de la muestra M1 con un valor de 61.90%, muestra M3 con un valor de 57.14% y la muestra M2 con un valor de 38.10%.
- Se valoró el potencial de generación de drenaje ácido mediante la prueba NAG, las muestras demostraron un pH ligeramente alcalino de entre 7.69 y 7.79, siendo clasificadas como no formadoras de ácido.
- Se determinó el contenido de sulfatos y de azufre en las muestras, con la muestra M3 y M4 mostrando valores de sulfatos superiores al límite máximo permisible y a todas las muestras mostrando valores de azufre mayores al límite máximo permisible. La prueba ABA demostró que todas las muestras tienen la capacidad de generar ácido cuando se oxidan.

Es importante resaltar que tanto la muestra M3 como la muestra M4 tienen una gran concentración de sulfatos que sobrepasa el LMP y que, aunque la muestra M1 y la muestra

M2 tienen un contenido de sulfatos por debajo del LMP, todas las muestras tienen contenidos de azufre que sobrepasan el LMP. Así mismo, la prueba ABA determinó que el potencial neutralizante de las muestras es menor que el potencial de generar acidez, no obstante, la prueba NAG demuestra que todas las muestras tienen la capacidad de neutralizar los ácidos y generar un pH ligeramente alcalino.

4.2 Recomendaciones

Tras culminar este proyecto, se elaboran las siguientes recomendaciones para futuros estudios y proyectos.

- El análisis de las imágenes SEM provee una estimación y cualificación de las muestras basado en su morfología, textura y brillo. Para obtener una caracterización mineralógica completamente precisa y determinar los minerales acidogénicos presentes, se recomienda realizar un estudio con DRX.
- La prueba NAG y ABA son métodos muy eficientes en predecir el potencial de generar DAM en un corto periodo de tiempo. Sin embargo, la clasificación obtenida no cuantifica el posible caudal de ácido generado y no relaciona los resultados con factores como el tiempo. En base a esto, se recomienda realizar un estudio de carbonatos o de celdas húmedas.

Bibliografía

- Aduvire, O. (2006). *Drenaje Ácido de Mina: Generación y Tratamiento*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Akcil, A., & Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Journal of Cleaner Production*, 1139-1145.
- American Public Health Association. (1992). *Standard Methods for the Examination of Waste and Water*. Washington DC: American Public Health Association.
- AMIRA International. (2002). *ARD Test Handbook: Prediction & Kinetic Control of Acid Mine Drainage*. Melbourne: Ian Wark Research Institute and Environmental Geochemistry International Ltd.
- Arteaga Chango, W. F., Arias Villamarin, A. Á., Andrade Mantilla, F. D., & Llerena Carrera, G. M. (2024). *Geología económica del distrito minero Ponce Enríquez, provincia del Azuay, Ecuador*. UNMSM.
- Australian Government. (2016). *Tailings Management - Leading practice sustainable development program for the mining industry*.
- Banco Central del Ecuador. (2017). *Reporte de Minería*. Dirección Nacional de Síntesis Macroeconómica.
- Darling, P. (2011). *SME Mining Engineering Handbook, Third Edition*. SME.
- Datum Ambiental. (2024). *Río Tinto: contaminación natural o resultado de la actividad minera*. Obtenido de Datum Ambiental - Consultoría Ambiental: Estudios y Proyectos: <https://datumambiental.es/rio-tinto-contaminacion-natural-resultado-la-actividad-minera/#:~:text=Los%20datos%20que%20maneja%20la,cobre%20y%208.500%20de%20hierro.>

- Edwards, K. J., Bond, P. L., Druschel, G. K., McGuire, M. M., Hamers, R. J., & Banfield, J. F. (2000). Geochemical and biological aspects of sulfide mineral dissolution: lessons from Iron Mountain, California. *Chemical Geology*, 383-397.
- Ferguson, K. D., & Morin, K. A. (1991). *The Prediction of Acid Rock Drainage—Lessons from the Database*. Montreal, Canada: In Proceedings of the Second International Conference on the Abatement of Acid Drainage.
- Jiménez-Oyola, S., Bolonio, D., Guzmán-Martínez, F., García-Garizabal, I., Romero, P., Chavez, E., . . . Ortega, F. M. (2021). *Probabilistic multi-pathway human health risk assessment due to heavy metal(loid)s in a traditional gold mining area in Ecuador*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112629>
- Kebede, K. k., Titus, M. A., & Bhekie, M. B. (2017). *Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review*. *Journal of Cleaner Production*.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.082>
- Lapakko, k. (1992). *Evaluation of Tests for Predicting Mine Waste Drainage pH*. Draft Report to the Western Governors' Association.
- Lapakko, K. (1993). *Predictive Testing for Mine Waste Drainage Quality*. In Mine Operation and Closure Short Course. Sponsored by EPA and others.
- Lottermoser, B. G. (2007). *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Springer Science & Business Media.
- Marcillo, J. (2023). *Evaluación del potencial contaminante de los relaves*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Mauric, A. M.-C. (2012). Closure planning in a developing country – a case study from the Phu Kham Mine, Laos, Southeast Asia. En A. C. Geomechanics, *Mine Closure 2012:*

- Proceedings of the Seventh International Conference on Mine Closure* (págs. 295-303). Perth: Australian Centre for Geomechanics.
- McMullan, D. (2006). *Scanning electron microscopy 1928–1965*. Cambridge: SCANNING.
- Ministerio de ambiente, agua y transición ecológica. (2016). *REGLAMENTO AMBIENTAL DE ACTIVIDADES MINERAS*.
- Ministerio del Ambiente. (2015). *TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNDARIA DE MEDIO AMBIENTE LIBRO VI*. Quito: Presidencia de la República del Ecuador.
- Nordstrom, D. K., Alpers, C. N., Ptacek, C. J., & Blowes, D. W. (2000). *Negative pH and Extremely Acidic Mine Waters from Iron Mountain, California*. Nebraska: US Geological Survey.
- Paz-Barzola, D., Escobar-Segovia, K., & Jiménez-Oyola, S. (2022). *Evaluación de la calidad del suelo en núcleos poblados cercanos a la zona minera aurífera de Ponce Enríquez*. Universidad Tecnológica Equinoccial. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.811>
- Peña-Carpio, E., & Menéndez-Aguado, J. M. (2016). *Environmental study of gold mining tailings in the Ponce Enriquez mining area (Ecuador)*. Medellín: DYNA.
- PitWatch. (2024). *Water Composition: Berkley Pit pH Levels*. Obtenido de PitWatch: <https://pitwatch.org/learn/water-composition/>
- Quirós, A., & Leandro, A. (2022). *Monitoreo de drenaje ácido de mina en el río Tinto mediante imágenes Sentinel-2*. Andalucía: Universidad Internacional de Andalucía.
- 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*. Guayaquil: Sustainability 2022. <https://doi.org/10.3390/su14106089>

- Syeda, S., Midmore, D., Qureshi, S., & Reid, D. (2007). *Acid mine drainage from the historic Mt Morgan gold mine : devastating to river water quality, and fish*. Kuwait University-College of Graduate Studies.
- U.S. Environmental Protection Agency. (1994). *Acid Mine Drainage Prediction*. Washington.
- United States Environmental Protection Agency. (1994). *Method 200.7, Revision 4.4: Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry*. Ohio: OFFICE OF RESEARCH AND DEVELOPMENT.
- United States Environmental Protection Agency. (1994). *Record of decision Butte Mine Flooding Operable Unit Silver Bow Creek-Butte Area*.
- Vilela, F., Lima, G., Macniks, J., Ferreira, J., & Le Petit, M. (2018). *Evaluation and Comparison of Kinetic Tests Performed with the Humidity Cell, Column and Funnel Methods and Proposition of a Model with the Disposition Way*. International Mine Water Association.
- Wels, C., Findlanter, L., Shaw, S., & Laurencont, T. (2004). *Mt Morgan Mine – A Case Study of ARD Impacted Groundwater*.

Apéndice A

Reporte técnico: Contenido de Azufre



Escuela Superior Politécnica del Litoral
Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas
Laboratorio de Análisis Químico Instrumental
LAQUINS – ESPOL

INFORME DE ANÁLISIS

Informe de Análisis N°: **111-2024**
Cliente: **ING. DANIEL GARCÉS LEÓN**
Dirección: **Guayaquil, Tarqui, Solar 5**
Solicitado por: **Ing. Daniel Garcés L.**
Fecha de recepción de muestra: **15-08-2024**
Fecha de inicio de ensayo: **23-08-2024**
Fecha de finalización de ensayo: **27-08-2024**
Analizado por: **Ing. Yesenia Pacheco**
Fecha de emisión del informe: **27-08-2024**

Muestra	Parámetro	Unidad	Resultados	Método de Análisis
1.- "M01"	Azufre (S)	%	1.66	NTE INEN 237
2.- "M02"	Azufre (S)	%	0.16	NTE INEN 237
3.- "M03"	Azufre (S)	%	0.16	NTE INEN 237
4.- "M04"	Azufre (S)	%	1.00	NTE INEN 237

Observaciones:	
Los datos proporcionados por el cliente se encuentran subrayados y no son responsabilidad del Laboratorio.	
Muestra(s) entregada(s) e ingresada(s) por el cliente como: <u>"M01"</u> , <u>"M02"</u> , <u>"M03"</u> , <u>"M04"</u> .	
Condiciones en que se recibe la muestra: muestras molidas, polvo fino color beige oscuro, en fundas ziploc, rotuladas	
Código de la muestra en Laboratorio: 111-2024	Tipo o matriz de la muestra: caliza
Temperatura ambiente promedio: 23.5 °C	Humedad relativa promedio: 61.5 %



Coordinador Técnico

ChM/LC

Notas: El informe original impreso o digital es válido solo con la firma digital del director de Laboratorio o su delegado y no debe ser reproducido de forma parcial o total, excepto por su emisor como copia autorizada.
La información completa relativa a los ensayos y de las incertidumbres calculadas están a disposición del cliente. Los resultados obtenidos corresponden solo a la muestra analizada. Las cifras luego del punto (.) deben ser consideradas como decimales. Las cifras luego de la coma (,) deben ser consideradas como enteros.

Ecuador - Guayaquil – Campus Gustavo Galindo, km 30.5 vía Perimetral, Código Postal 090903
Teléfono: 2269559, correo electrónico: labquimica@espol.edu.ec

Apéndice B

Reporte técnico: Contenido de Elementos Potencialmente Tóxicos

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

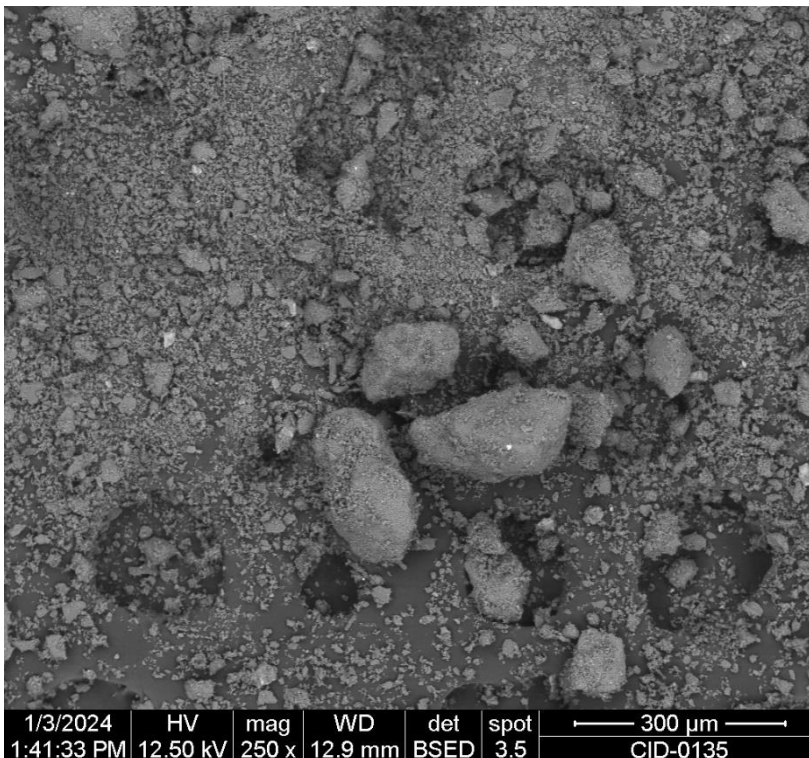
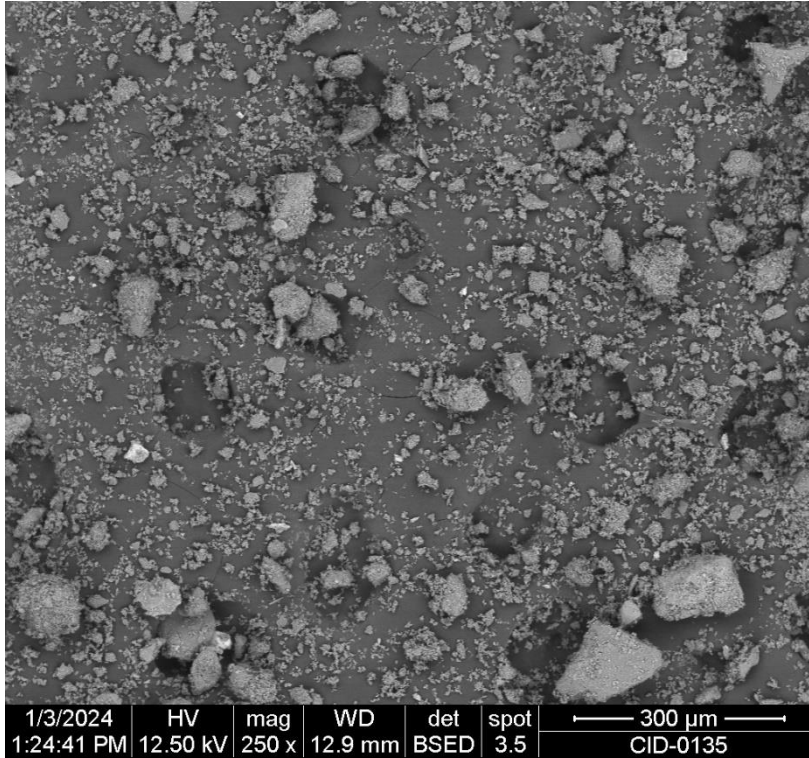
FIRMA DE APROBACIÓN

<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>

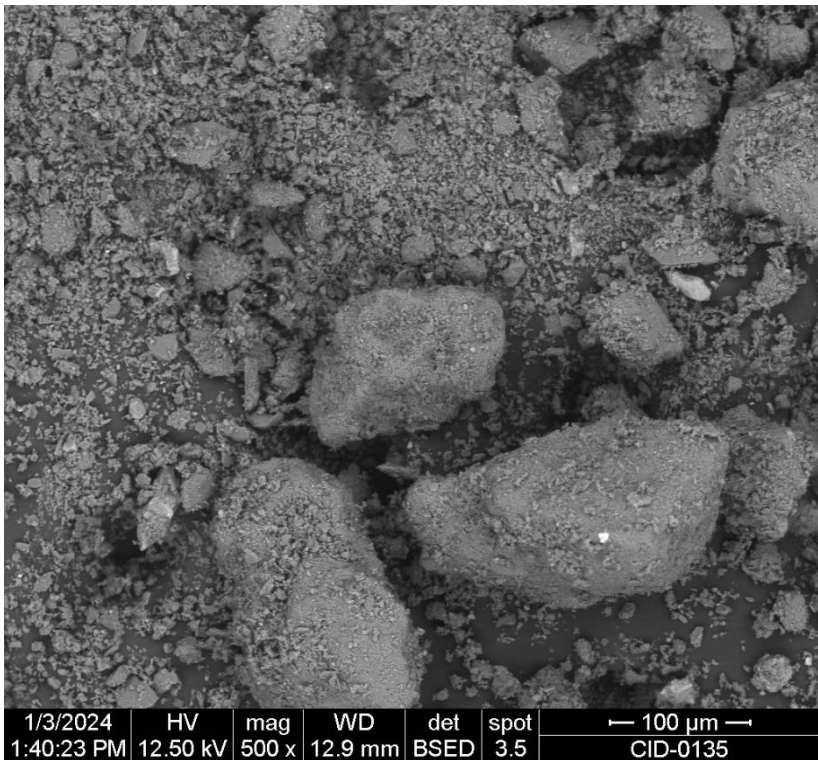
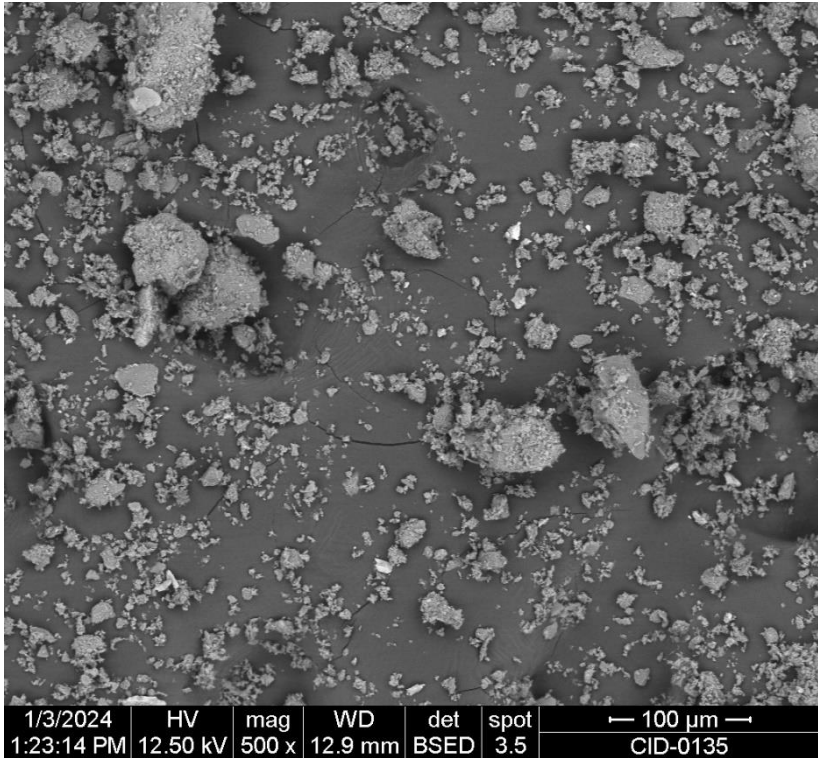


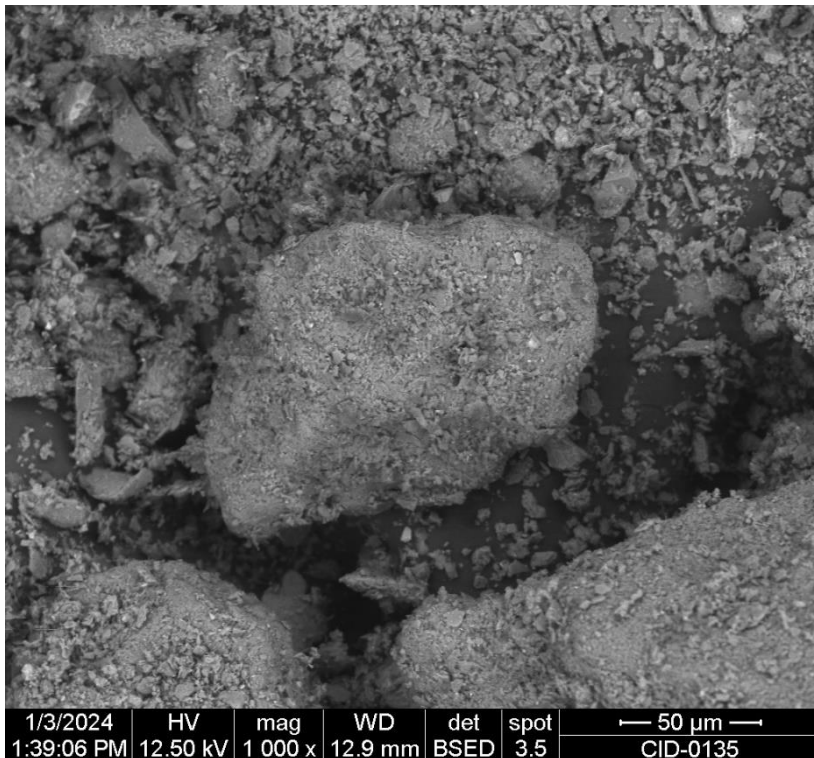
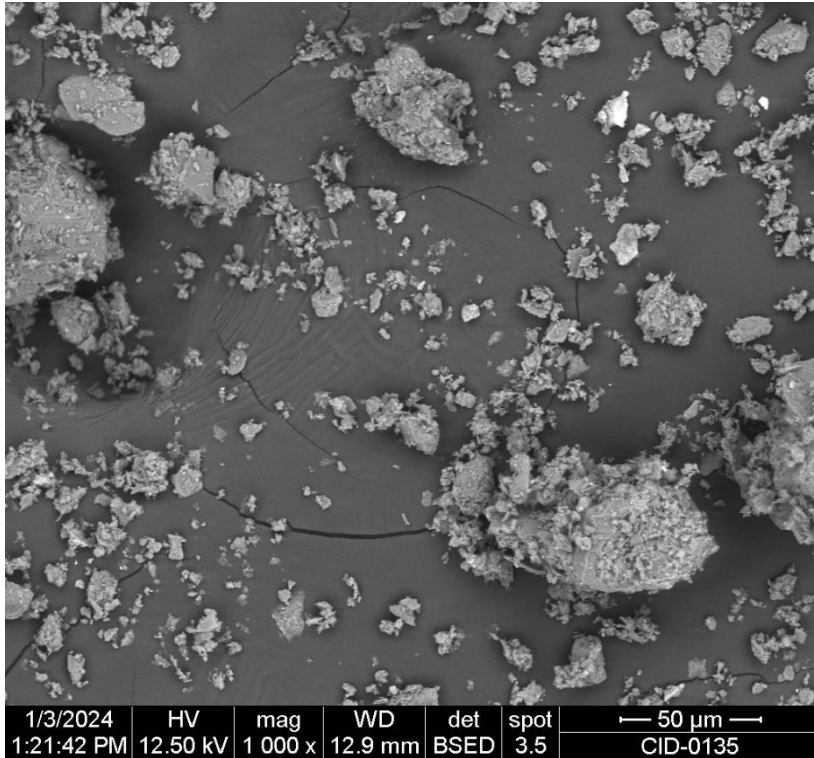
Apéndice C

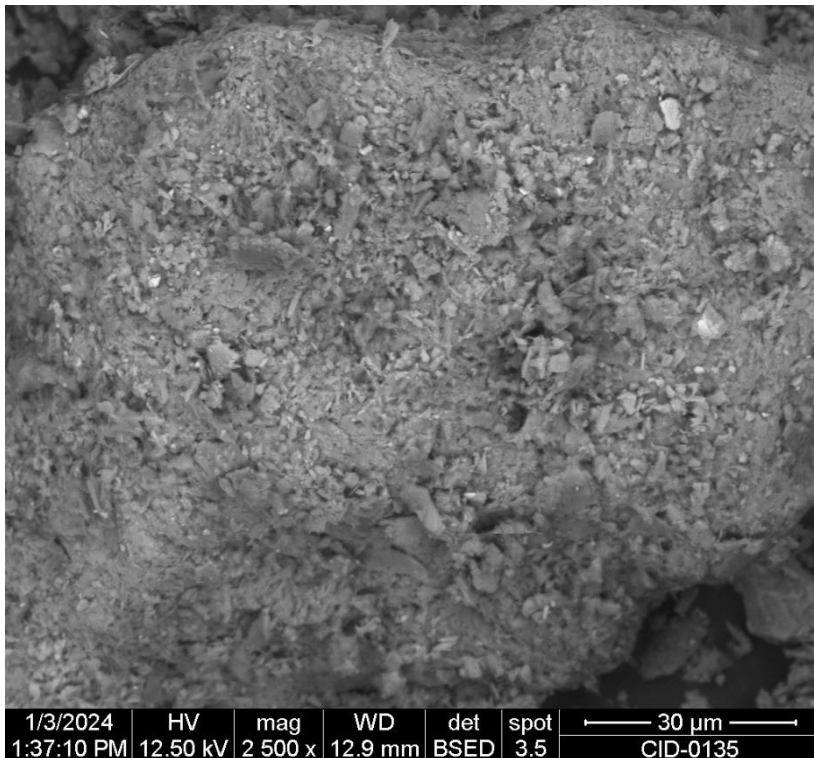
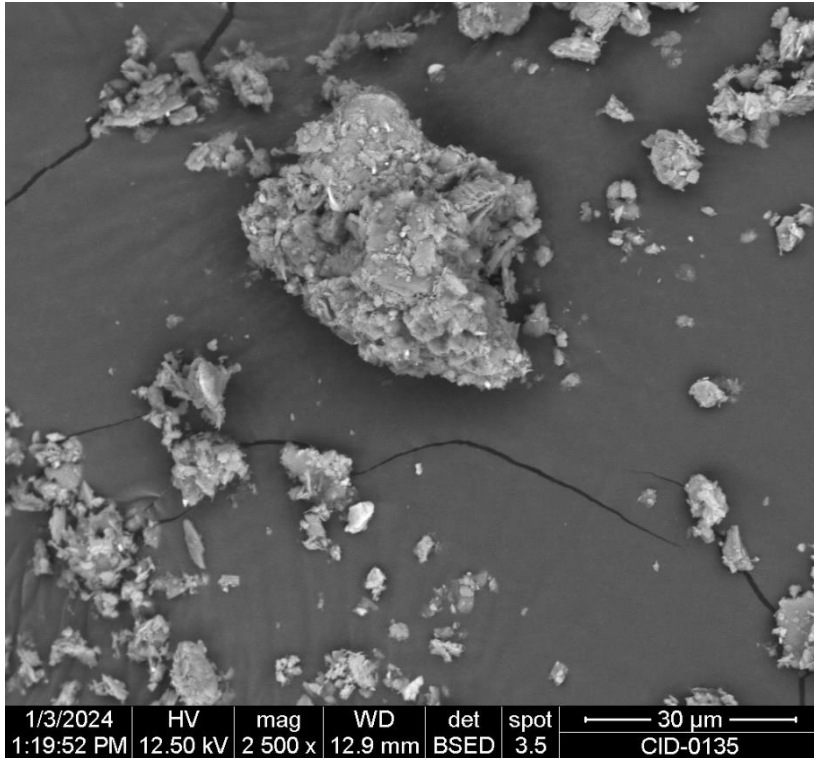
Imágenes SEM

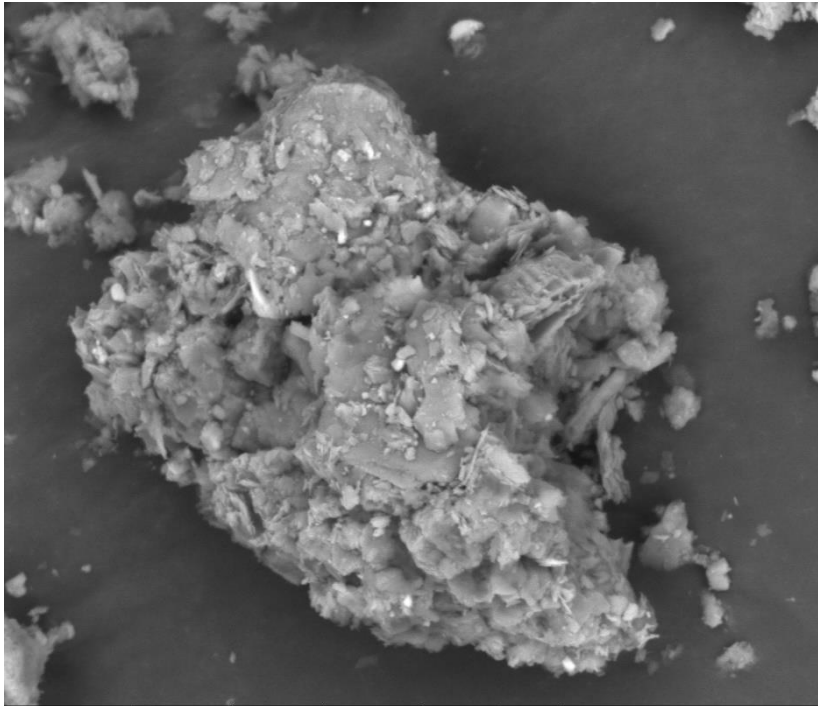
Muestra M1



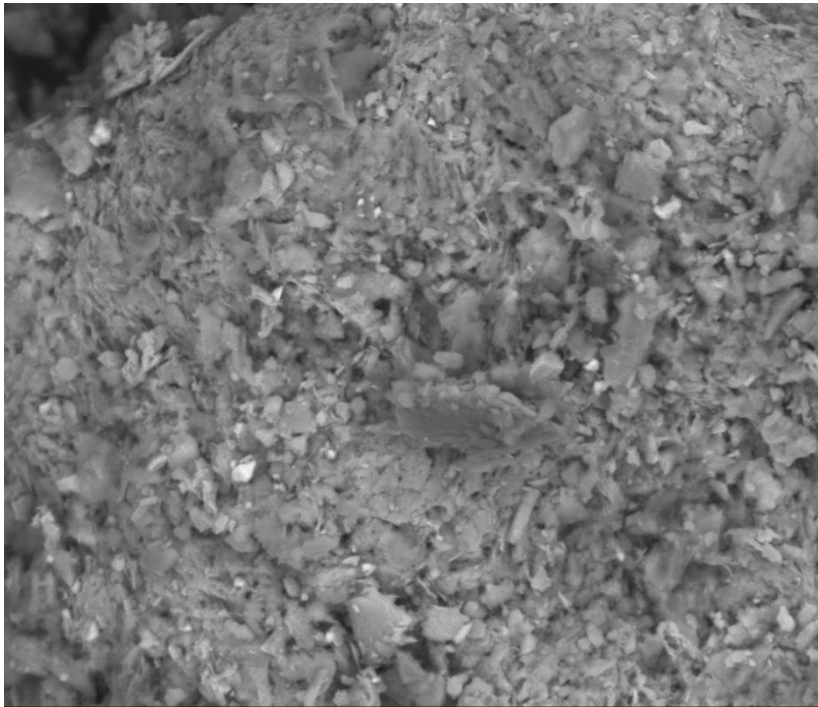




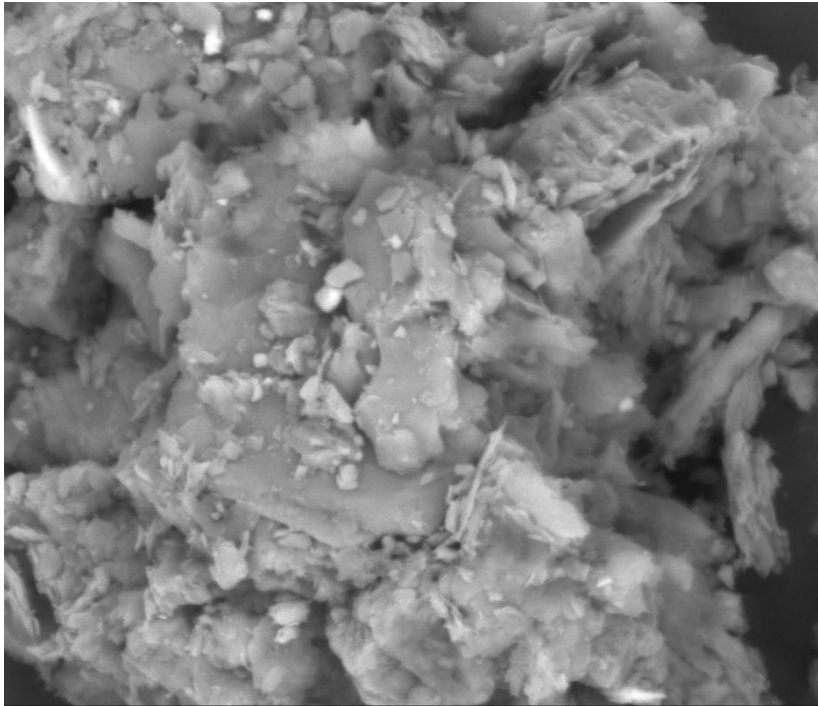




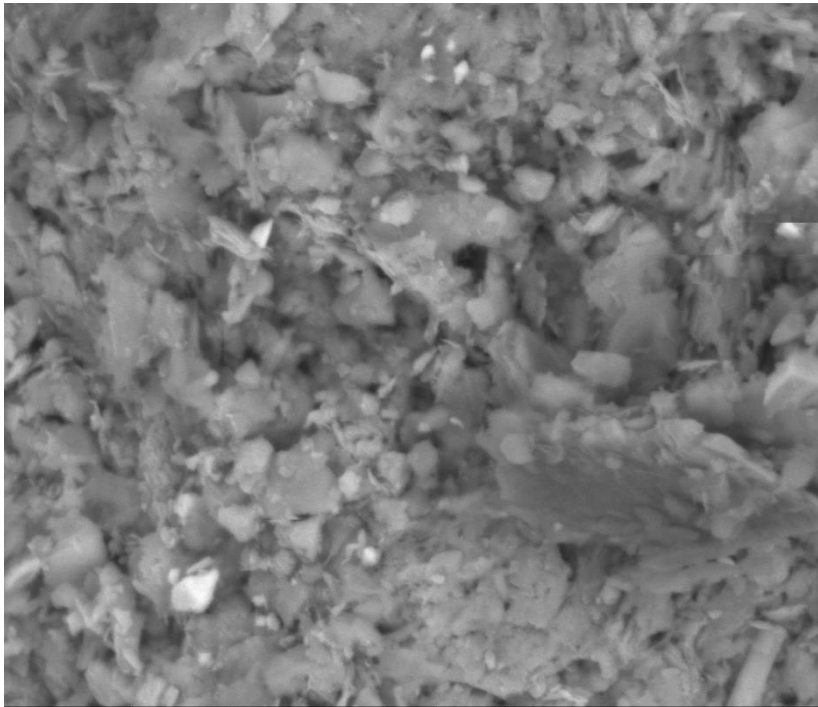
1/3/2024	HV	mag	WD	det	spot	← 10 μm →
1:17:32 PM	12.50 kV	5 000 x	12.9 mm	BSED	3.5	CID-0135



1/3/2024	HV	mag	WD	det	spot	← 10 μm →
1:35:13 PM	12.50 kV	5 000 x	12.9 mm	BSED	3.5	CID-0135

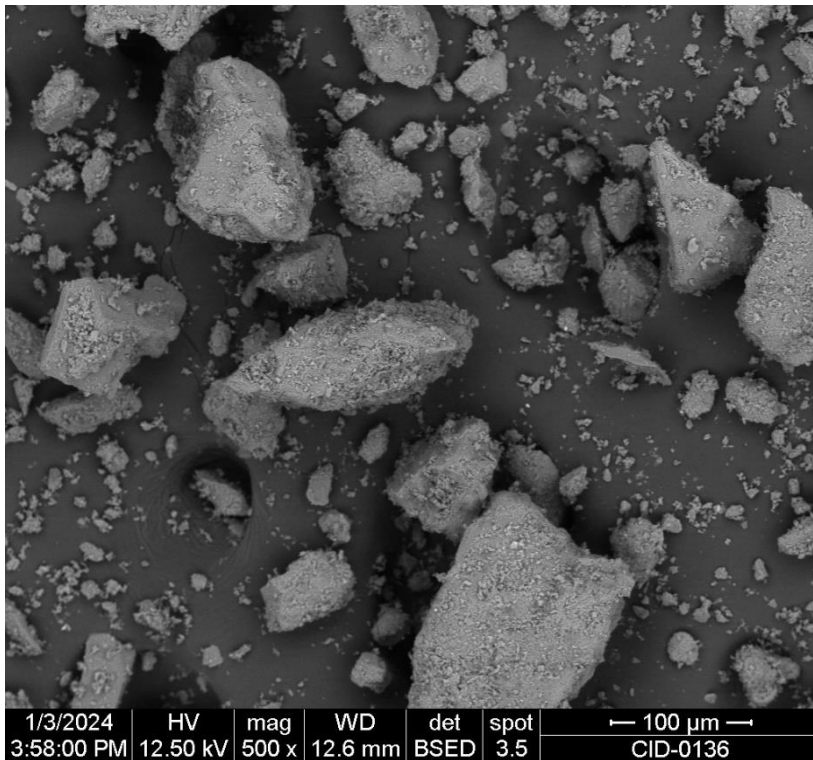
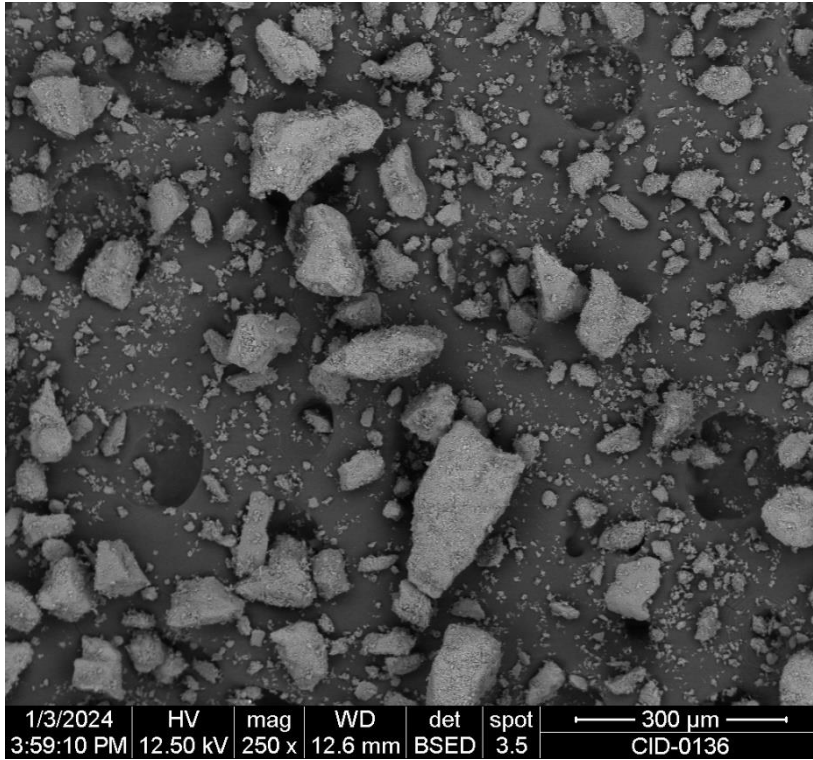


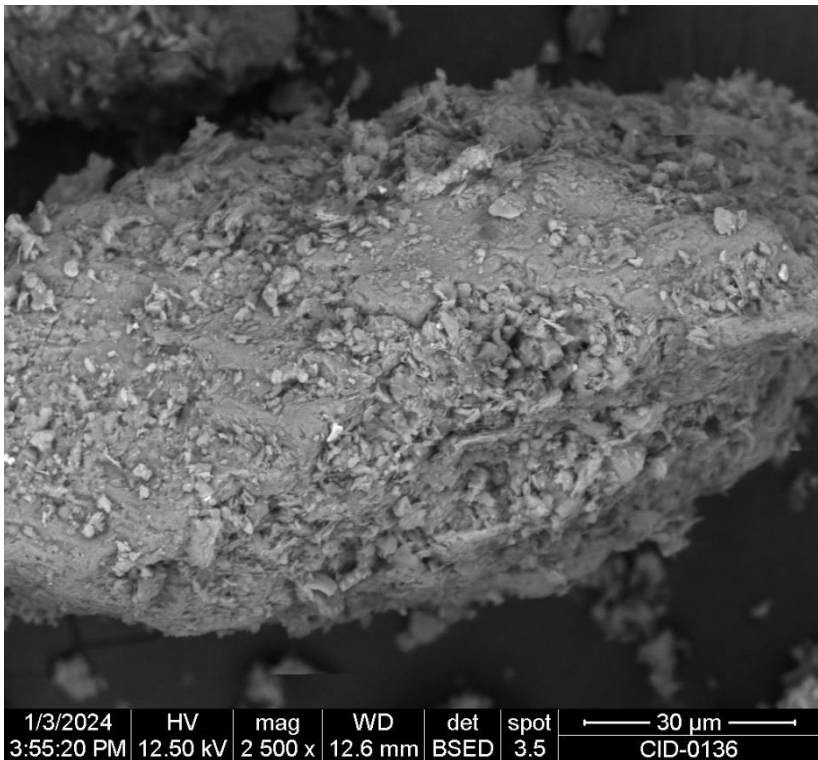
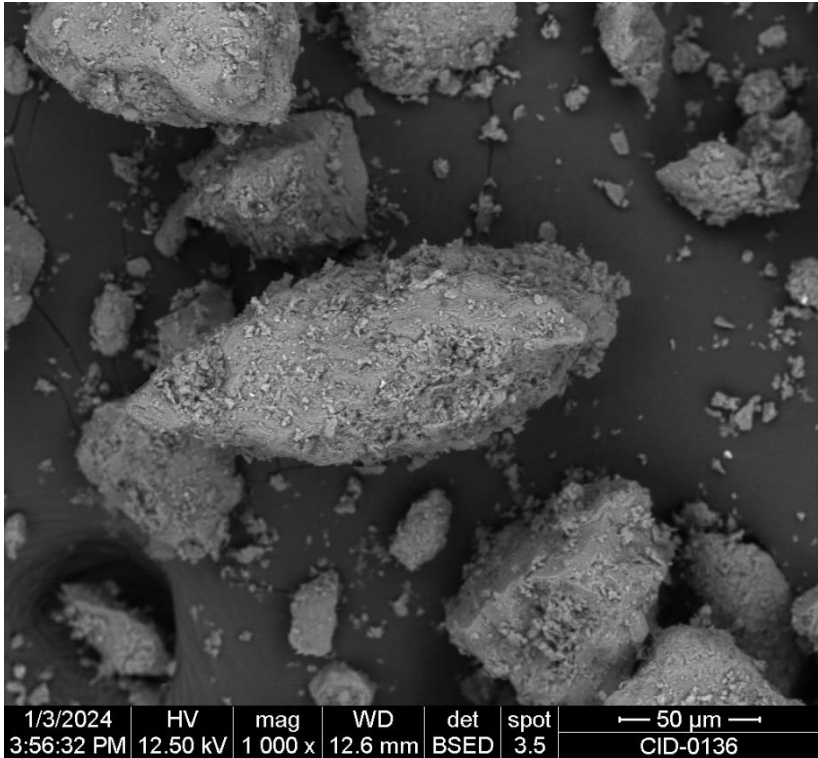
1/3/2024	HV	mag	WD	det	spot	← 5 μm →
1:13:26 PM	12.50 kV	10 000 x	12.9 mm	BSED	3.5	CID-0135

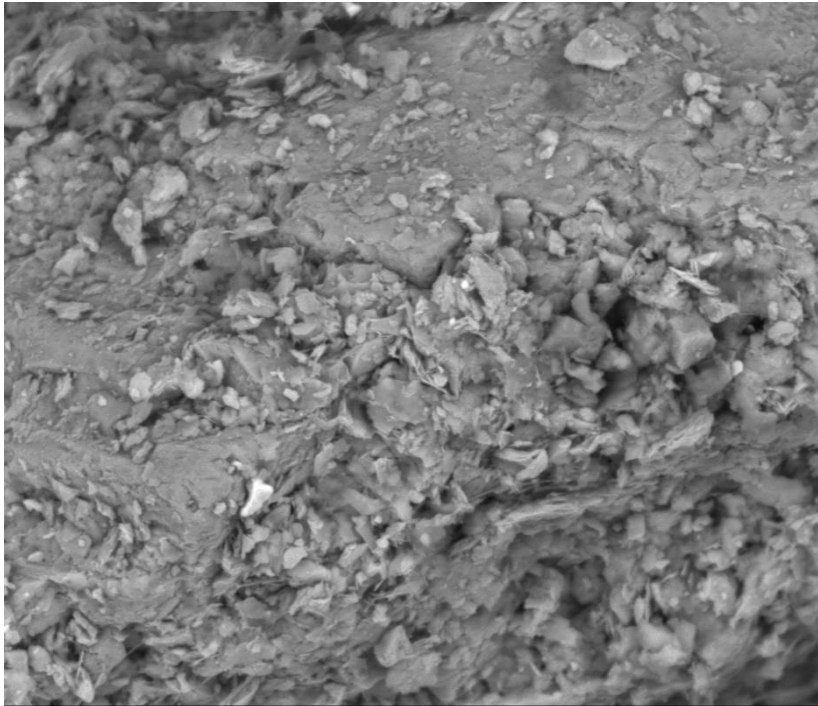


1/3/2024	HV	mag	WD	det	spot	← 5 μm →
1:33:29 PM	12.50 kV	10 000 x	12.9 mm	BSED	3.5	CID-0135

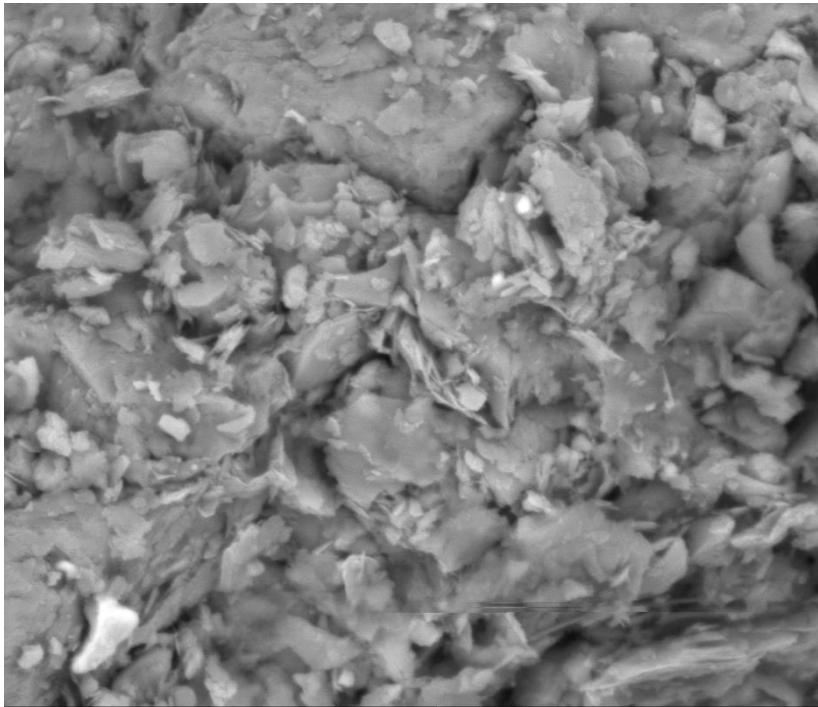
Muestra M2





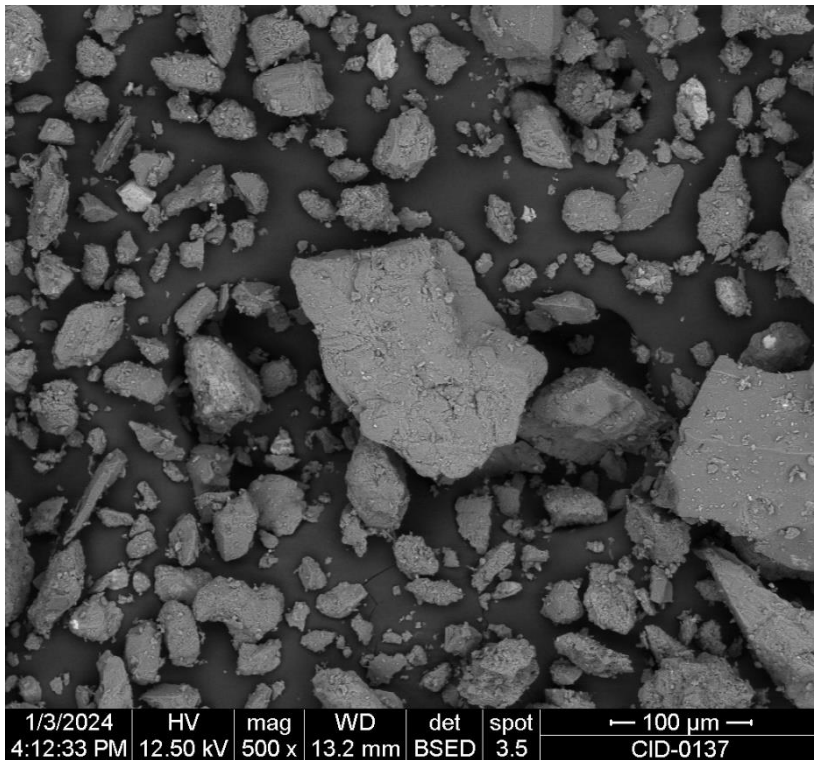
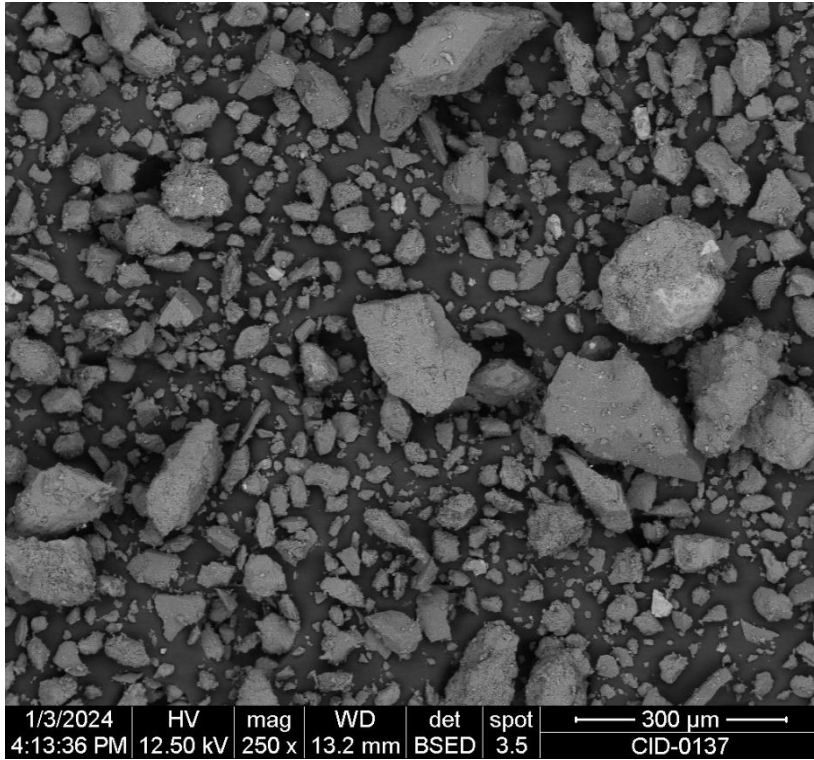


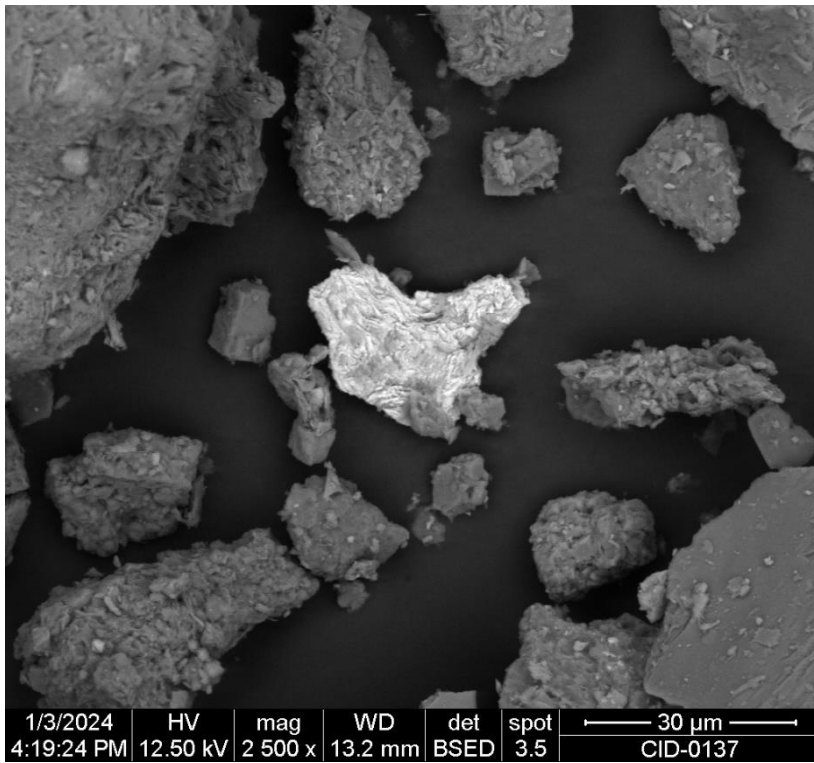
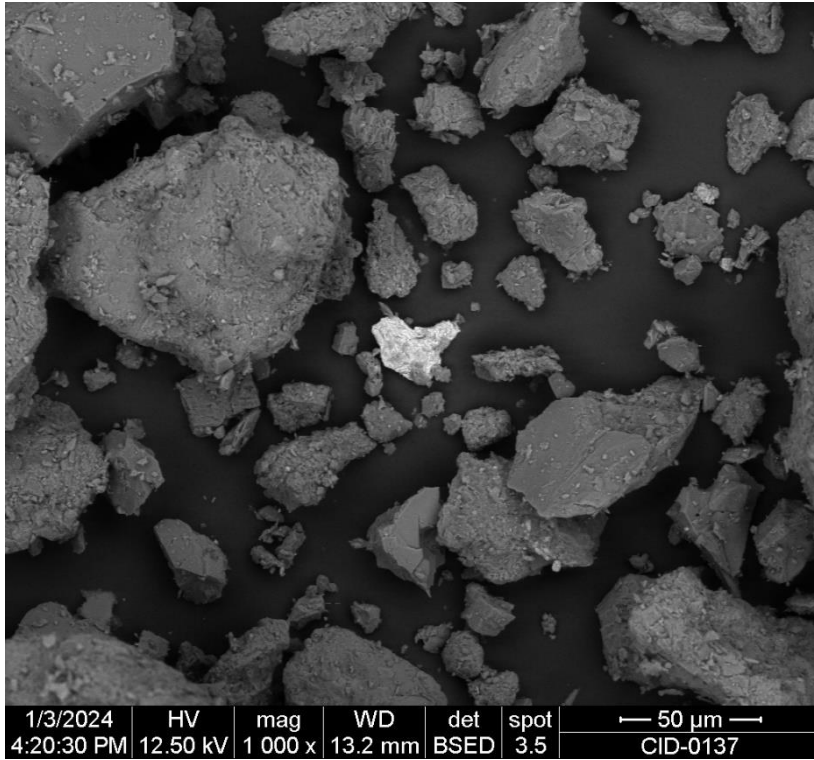
1/3/2024	HV	mag	WD	det	spot	← 10 μm →
3:53:46 PM	12.50 kV	5 000 x	12.6 mm	BSED	3.5	CID-0136

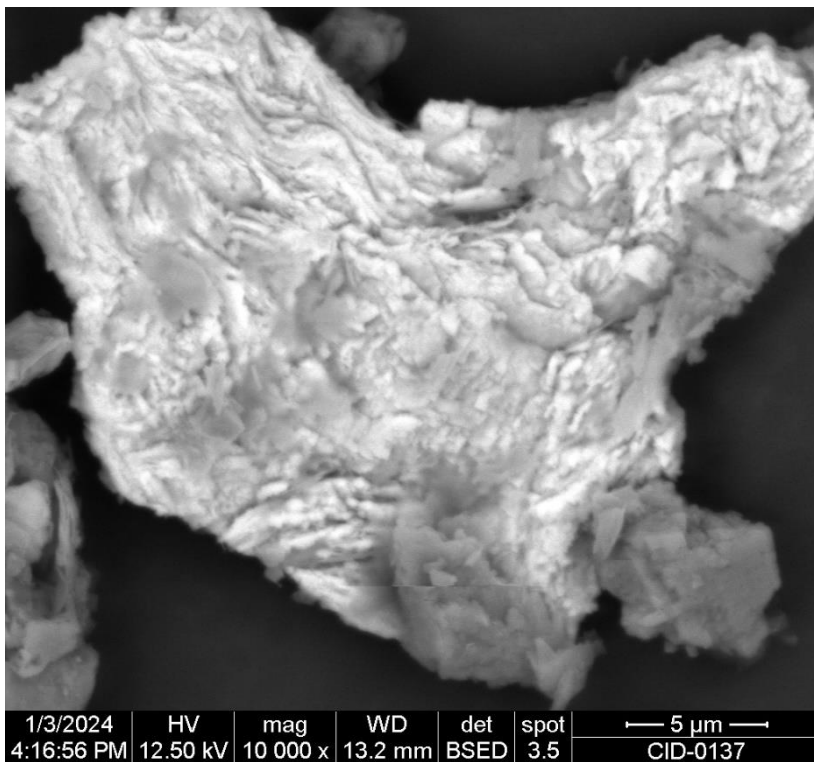
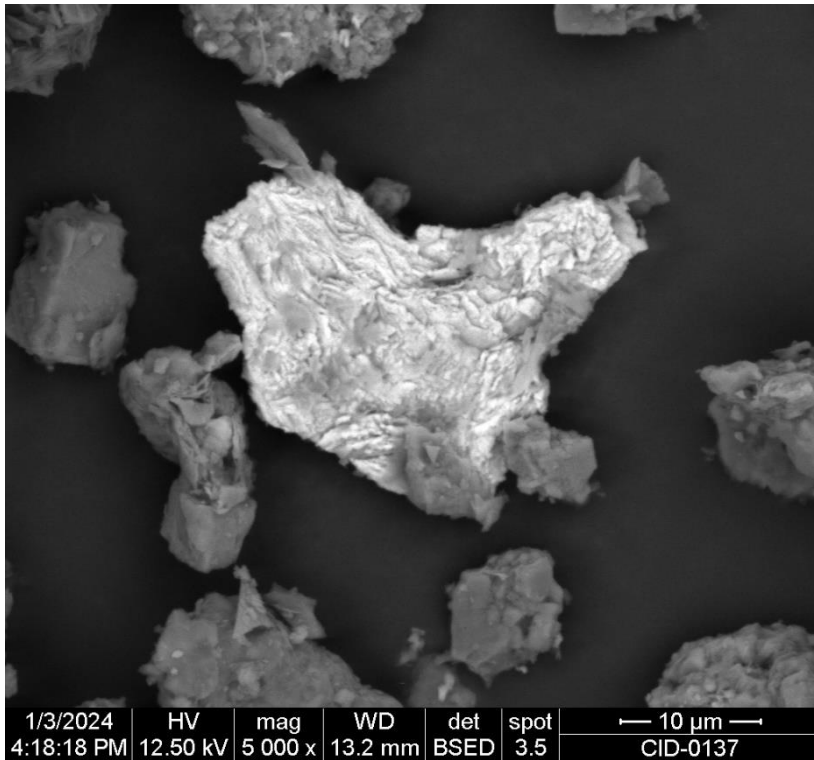


1/3/2024	HV	mag	WD	det	spot	← 5 μm →
3:52:13 PM	12.50 kV	10 000 x	12.6 mm	BSED	3.5	CID-0136

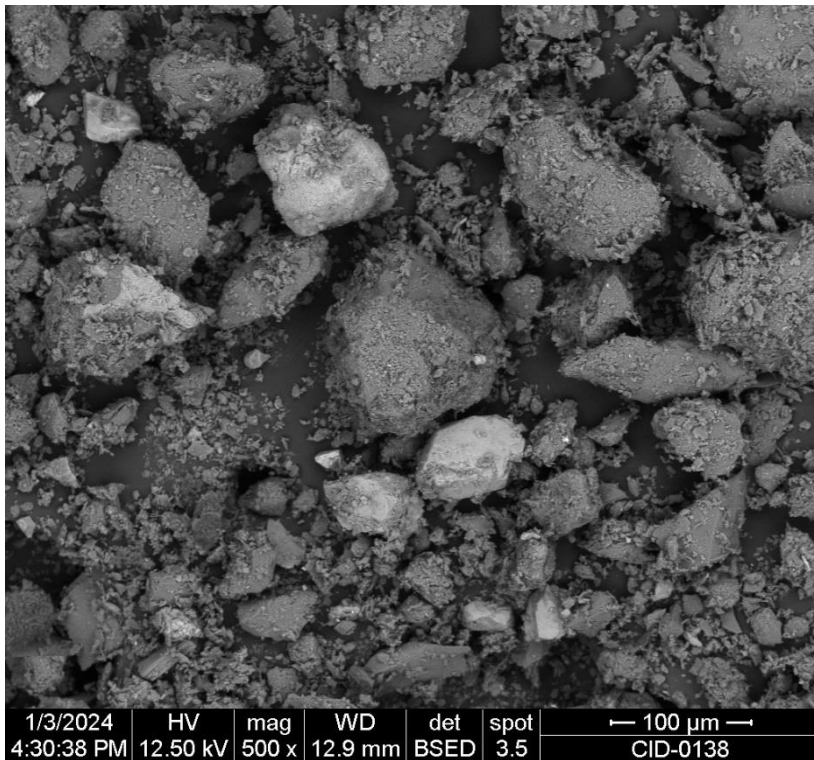
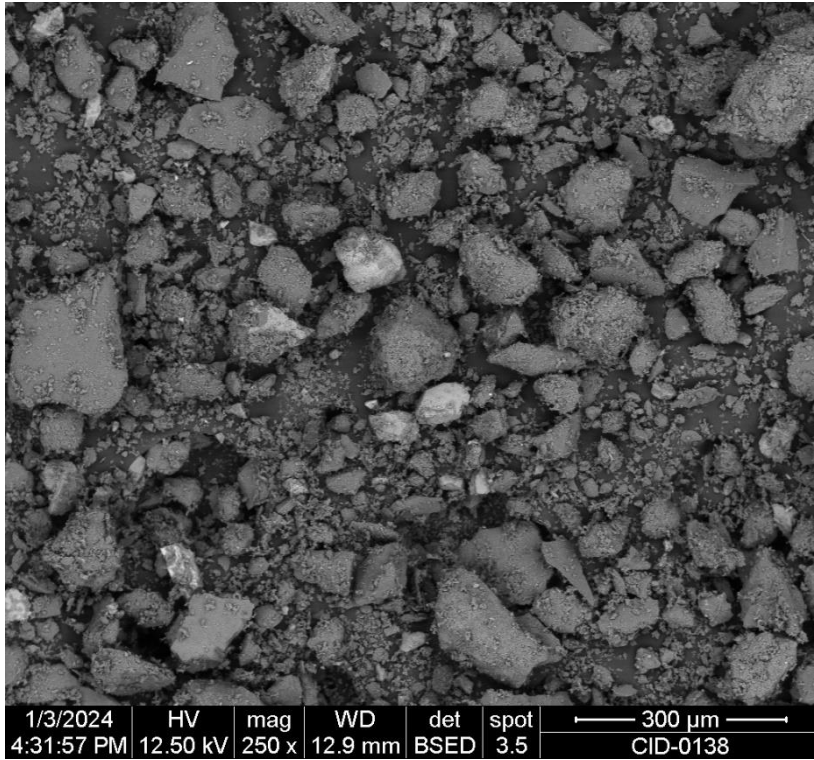
Muestra M3

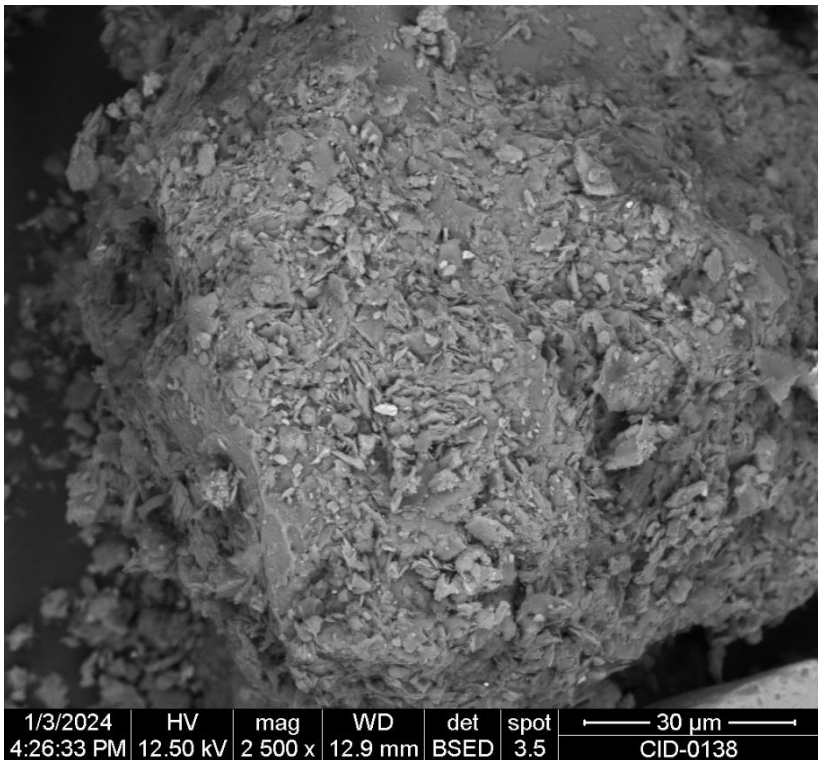
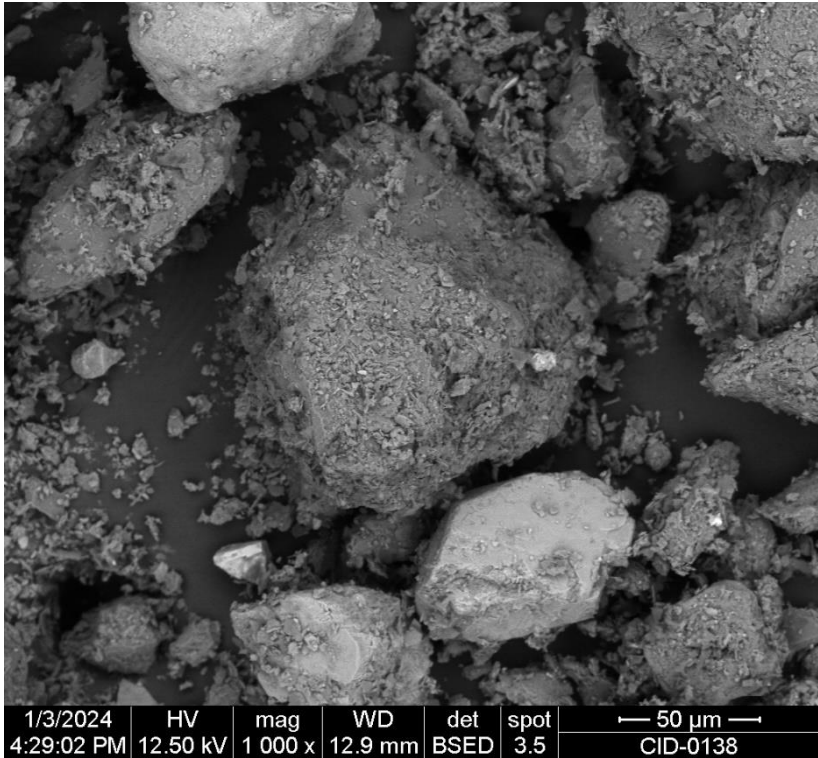


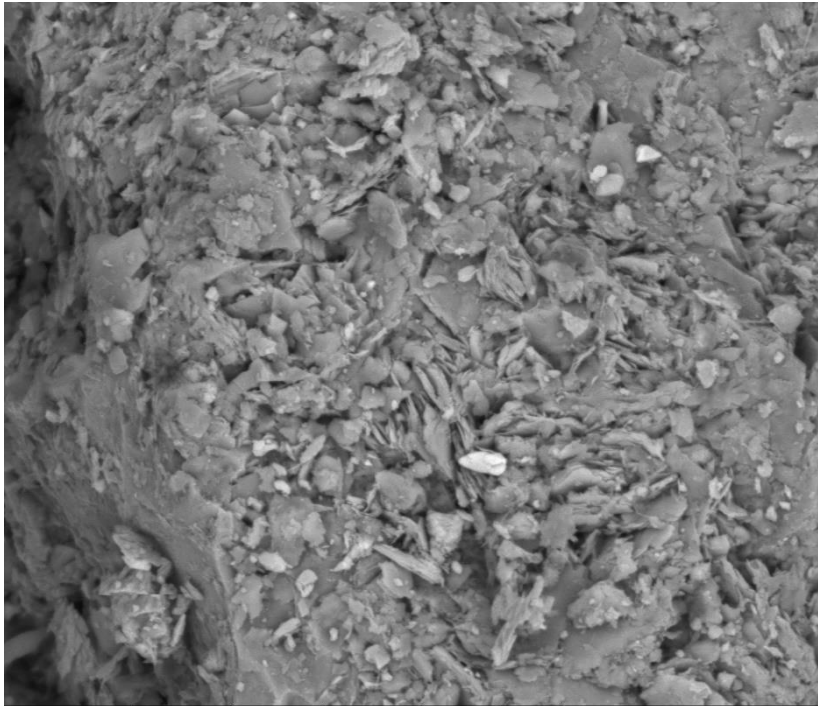




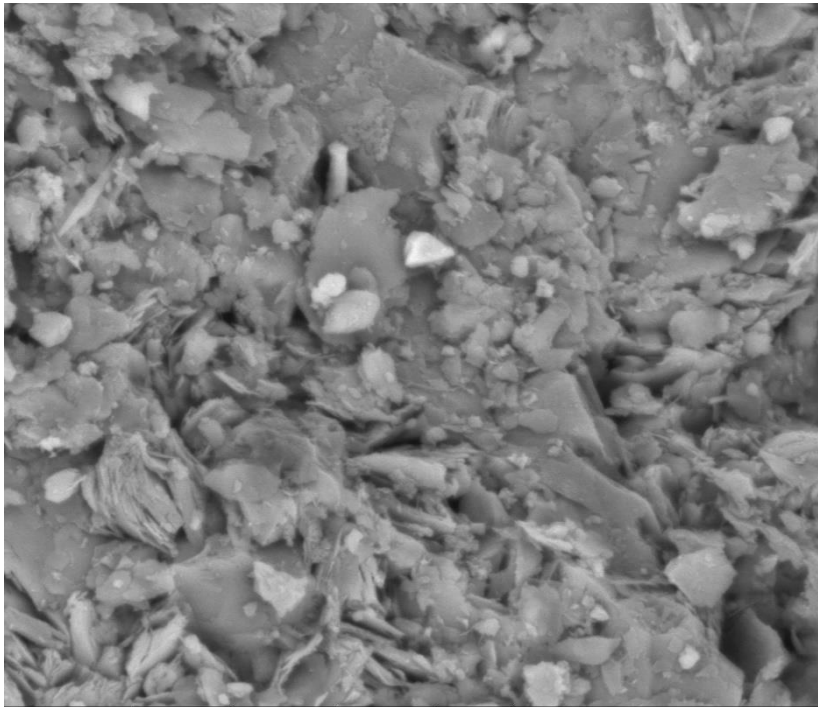
Muestra M4







1/3/2024	HV	mag	WD	det	spot	← 10 μm →
4:24:59 PM	12.50 kV	5 000 x	12.9 mm	BSED	3.5	CID-0138



1/3/2024	HV	mag	WD	det	spot	← 5 μm →
4:23:12 PM	12.50 kV	10 000 x	12.9 mm	BSED	3.5	CID-0138

EVALUACIÓN PREVENTIVA Y GESTIÓN DEL POTENCIAL CONTAMINANTE DE LOS RELAVES MINEROS

PROBLEMA

Los residuos mineros metálicos contienen diversas sustancias contaminantes que pueden degradar los ecosistemas y afectar negativamente a las comunidades cercanas. Actualmente, no se dispone de información sobre el potencial de generación de drenaje ácido de mina (DAM) en los relaves del Campo Minero Ponce Enríquez, lo que dificulta la toma de decisiones informadas para gestionar y mitigar los riesgos ambientales asociados a estos residuos.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el potencial de generación de drenaje ácido de minas (DAM) en cuatro relaveras que operan en el Campo Minero Camilo Ponce Enríquez, mediante la aplicación de la prueba NAG (Net Acid Generation), para la estimación del potencial contaminante de los relaves mineros.

PROPUESTA

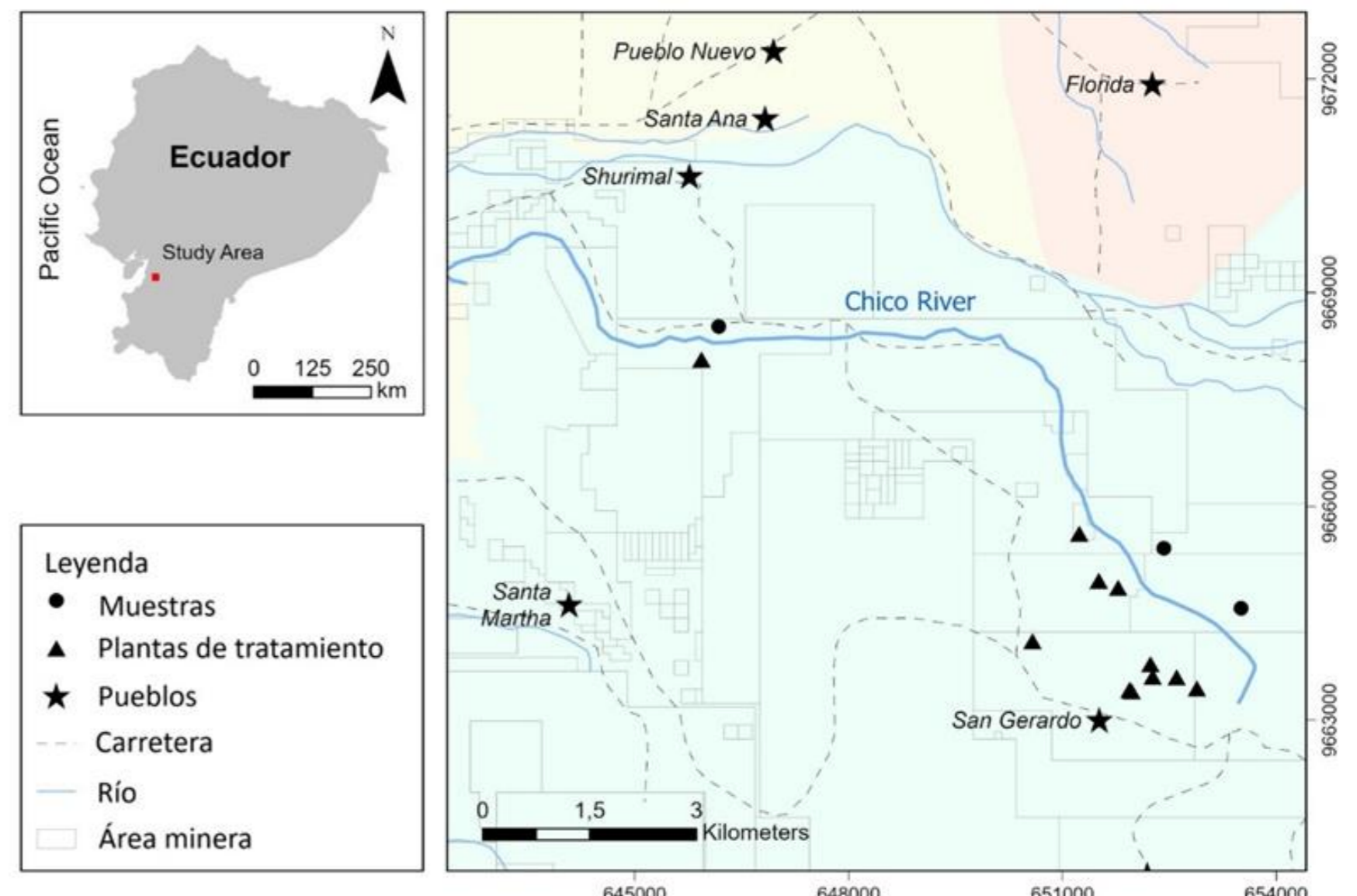
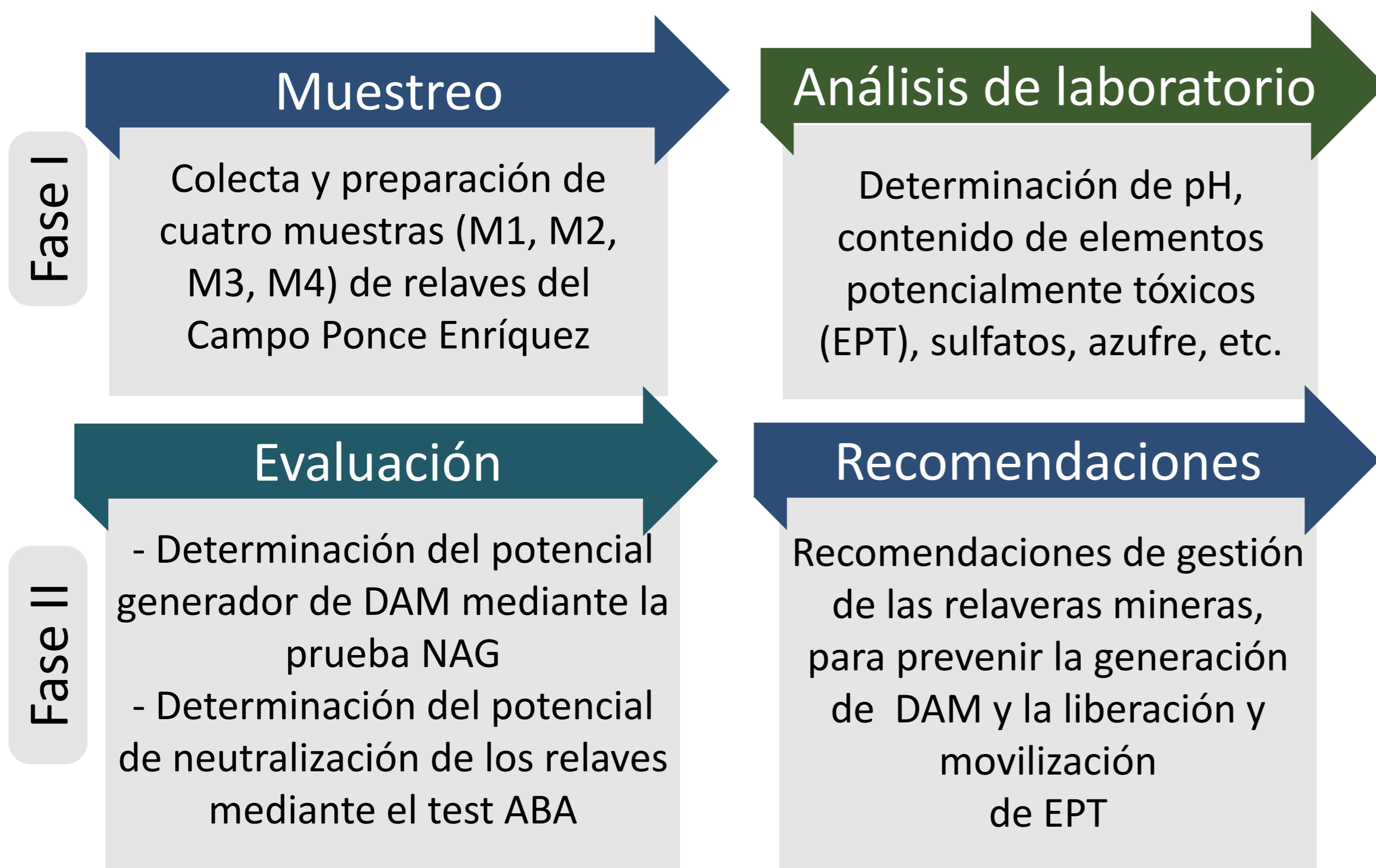


Figura 1. Puntos de muestreo de relaveras mineras



Figura 2. Análisis de sulfatos

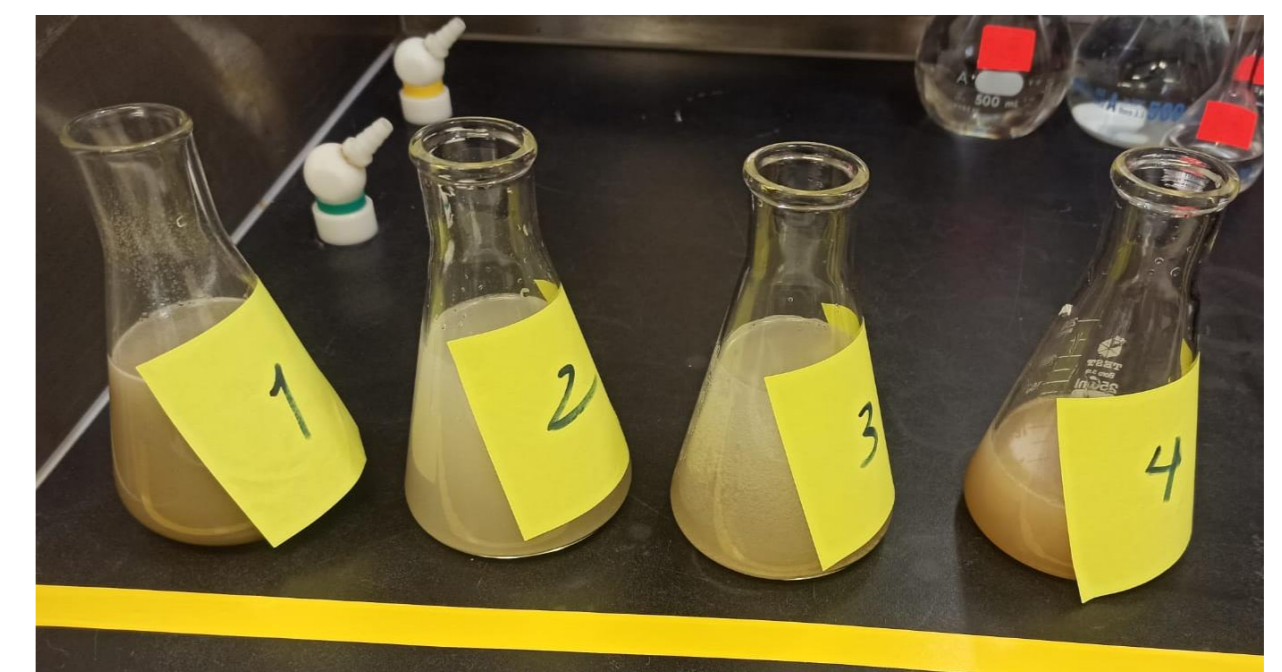


Figura 3. Reacción de prueba NAG

RESULTADOS

- Las muestras de relaves presentan valores de pH que indican ligeras condiciones de alcalinidad.
- Se determinó un elevado contenido de sulfatos en las muestras M3 y M4, con valores de 5100 mg/L y 3300 mg/L, respectivamente.
- La concentración de EPT como el As, Cd, Cr, Ni, Pb y Zn, superan el límite permitido para distintos usos de suelos, según la normativa ecuatoriana.
- El test NAG cataloga a las cuatro muestras relaves como no generadores de acidez.

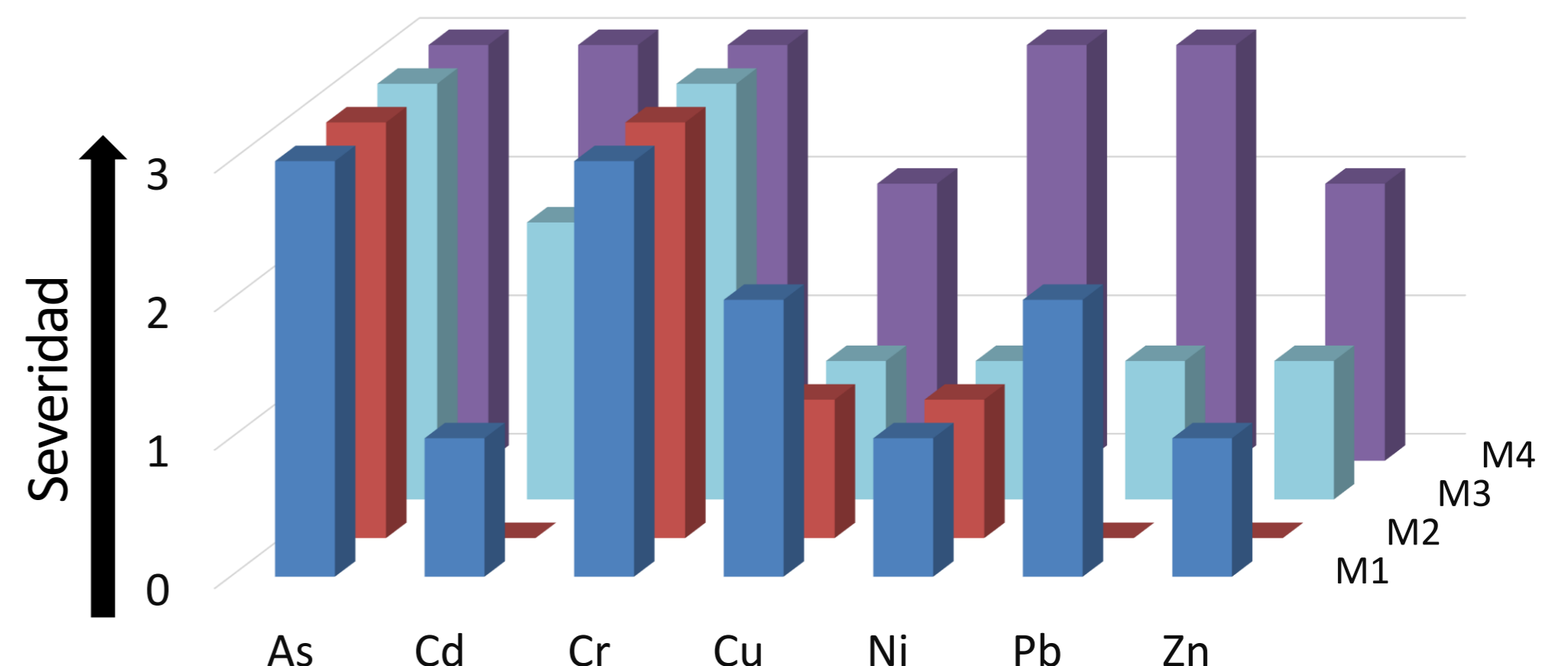


Figura 5. Grado de severidad por presencia de EPT

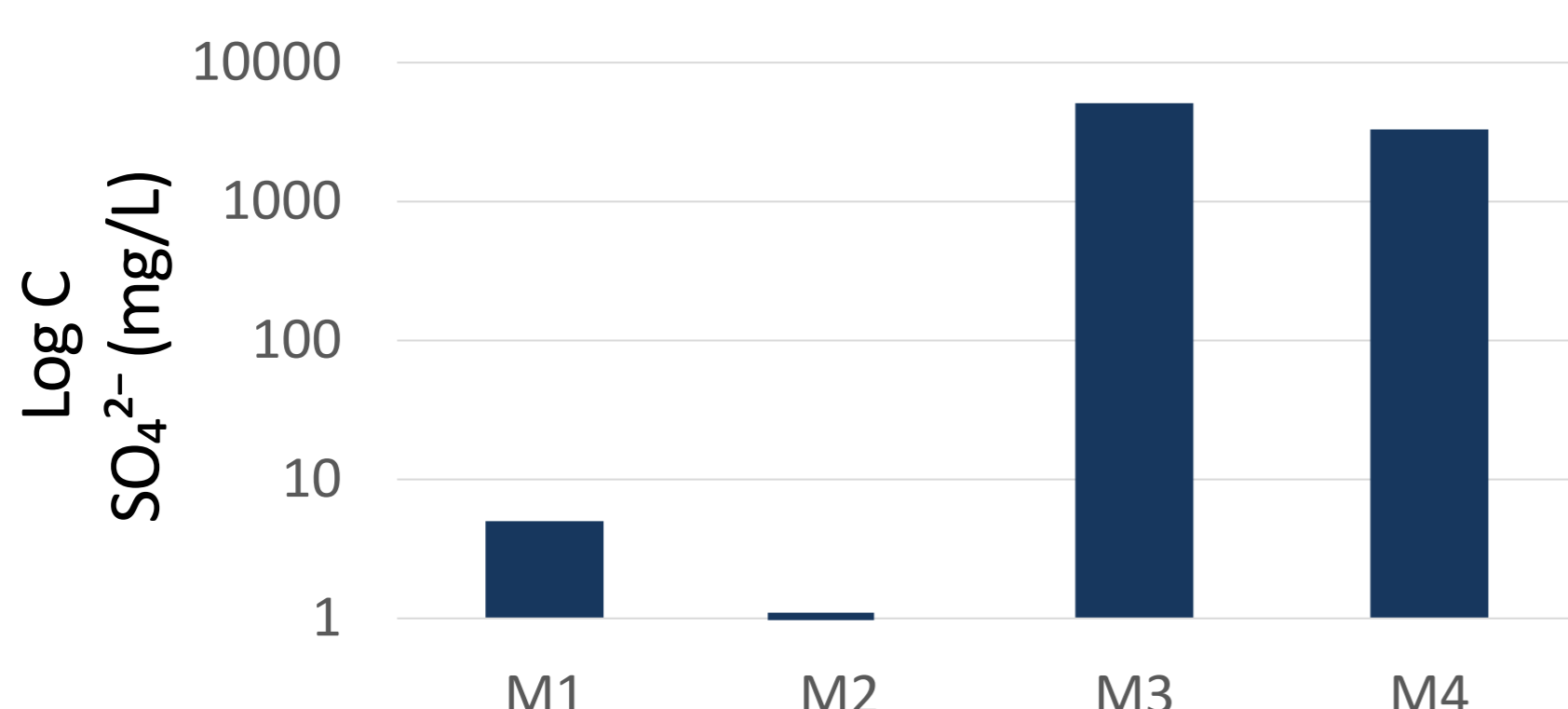


Figura 4. Concentración de sulfatos

Tabla 2. Resultados de prueba NAG

Muestra	pH	Clasificación	Prueba NAG
M1	7.69	Ligeramente alcalino	No generador de acidez
M2	7.79	Ligeramente alcalino	No generador de acidez
M3	7.79	Ligeramente alcalino	No generador de acidez
M4	7.71	Ligeramente alcalino	No generador de acidez

CONCLUSIONES

- La elevada concentración de EPT en las muestras de relaves refleja un considerable riesgo de contaminación, al superar el LMP establecido para la calidad del suelo destinado a usos agrícolas, residenciales e industriales. Esto subraya la necesidad de implementar una gestión adecuada de los residuos mineros.
- Aunque la prueba NAG clasifica a los relaves como no generadores de acidez, es esencial mantener un monitoreo continuo de estos residuos para asegurar su estabilidad física y química a largo plazo.
- Los datos obtenidos en este estudio son cruciales para quienes toman decisiones, ya que permiten optimizar la gestión de residuos y la planificación del uso del suelo. Esto es fundamental para priorizar la protección del medio ambiente, así como la salud y el bienestar de la comunidad.

