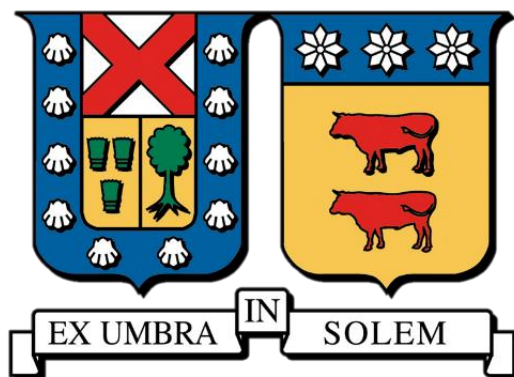


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL



Efecto del tamaño de partícula sobre la movilidad
potencial de Cu, Fe y Zn en relaves sulfurados
mediante extracción secuencial BCR y digestión ácida
EPA 3050B

Catalina Sofia Retamal Romero

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA

PROFESOR GUÍA: Dr. Henrik Hansen

CO-REFERENTE: MSc. Claudia Gutiérrez

Agosto 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Efecto del tamaño de partícula sobre la movilidad potencial de Cu, Fe y Zn en relaves sulfurados mediante extracción secuencial BCR y digestión ácida EPA 3050B _____

Nombre del candidato(a): Catalina Sofía Retamal Romero _____

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Química / Pregrado _____

Campus: Casa Central _____ **Departamento:** Ingeniería Química y Ambiental _____

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Knud Henrik Kirstein Hansen, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

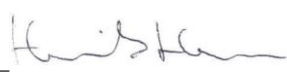
☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

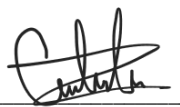
Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 06-08-2026 **Firma:** 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 05-08-2026 **Firma:** 

RESUMEN

La masiva producción de relaves generada por la actividad minera en Chile representa un desafío crítico en términos de gestión de desechos y estabilidad geoquímica, retención o movilidad en el residuo minero. Tradicionalmente, el control ambiental de estos depósitos se ha basado en la determinación de la concentración de dichos metales, omitiendo el potencial de liberación de los elementos ante variaciones físicoquímicas del entorno. En este contexto, el método de extracción secuencial BCR (*Bureau Communautaire de Référence*) surge como herramienta para evaluar la movilidad potencial de metales pesado, a través de fracciones operacionales.

En esta investigación se evalúa la movilidad para los metales Cu, Fe y Zn, en tres muestras originales de relave con tamaños característicos P80 de 147 μm , 214 μm y 298 μm , las cuales han sido sometidas a un tamizado en húmedo para obtener la fracción menor a 75 μm . El propósito es evaluar cómo la eliminación de las fracciones gruesas mediante segregación física influye en la distribución y movilidad de Cu, Fe y Zn, así como identificar posibles oportunidades para la recuperación económica de cobre. Adicionalmente, el método de extracción secuencial BCR se complementa con una digestión ácida fuerte según el protocolo EPA 3050B, con el fin de determinar las concentraciones totales de los elementos y evaluar la recuperación y consistencia analítica de los resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos para el Cu evidencian que el tamizado favorece una redistribución de la masa del metal entre las fracciones operacionales, observándose una disminución aproximada del 50% de la masa asociada inicialmente a la fracción oxidable y un incremento relativo en la fracción ácido soluble de la fracción fina obtenida.

En el caso del Fe, las muestras originales presentan una marcada dominancia en la fracción residual. Tras el proceso de tamizado, se observa una disminución significativa de la masa asociada a dicha fracción, concentrándose el remanente principalmente en las fracciones ácido soluble y residual, fenómeno que podría asociarse al incremento del área superficial específica de las partículas finas. Por otra parte, el Zn presenta una marcada dominancia en la fracción residual de las muestras tamizadas, donde aproximadamente el 80% de la masa neta se encuentra asociada a esta etapa. En comparación con las muestras originales, las

fracciones finas obtenidas mediante tamizado muestran un incremento considerable en la masa de Zn, comportamiento que podría relacionarse con la concentración de fases portadoras de Zn en la fracción fina y con el incremento del área superficial específica asociado a la reducción del tamaño de partícula. Finalmente, en términos de consistencia analítica, se obtienen resultados con adecuada recuperación para Cu y Zn, mientras que el Fe presenta ciertas inconsistencias en la recuperación analítica. Entre los escenarios evaluados, la molienda T1 ($P_{80} = 147 \mu\text{m}$ y fracción $<75 \mu\text{m}$) la fracción bajo $75 \mu\text{m}$ se destaca por presentar la mayor recuperación analítica y la mayor estabilidad experimental.

ABSTRACT

The massive production of tailings generated by mining activity in Chile represents a critical challenge in terms of waste management and geochemical stability, retention, or mobility in the mining residue. Traditionally, the environmental control of these deposits has been based on determining the concentration of these metals, omitting the potential release of the elements due to physicochemical variations in the environment. In this context, the BCR (*Bureau Communautaire de Référence*) sequential extraction method emerges as a tool to assess the potential mobility of heavy metals thru operational fractions. In this research, the mobility of the metals Cu, Fe, and Zn is evaluated in three original tailing samples with characteristic P80 sizes of 147 μm , 214 μm , and 298 μm , which have been subjected to wet sieving to obtain the fraction smaller than 75 μm . The purpose is to evaluate how the removal of coarse fractions thru physical segregation influences the distribution and mobility of Cu, Fe, and Zn, as well as to identify potential opportunities for the economic recovery of copper. Additionally, the BCR sequential extraction method is complemented by a strong acid digestion according to the EPA 3050B protocol, in order to determine the total concentrations of the elements and evaluate the recovery and analytical consistency of the obtained results.

The results obtained for Cu show that sieving promotes a redistribution of the metal mass among the operational fractions, with an approximate 50% decrease in the mass initially associated with the oxidizable fraction and a relative increase in the acid-soluble fraction of the fine fraction obtained. In the case of Fe, the original samples show a marked dominance in the residual fraction. After the sieving process, a significant decrease in the mass associated with this fraction is observed, with the remainder mainly concentrated in the acid-soluble and residual fractions, a phenomenon that could be associated with the increase in the specific surface area of the fine particles. On the other hand, Zn shows a marked dominance in the residual fraction of the sieved samples, where approximately 80% of the net mass is associated with this stage. In comparison with the original samples, the fine fractions obtained through sieving show a considerable increase in the mass of Zn, a behavior that could be related to the concentration of Zn-bearing phases in the fine fraction and the increase in specific surface area associated with the reduction in particle size. Finally, in terms of

analytical consistency, results with adequate recovery for Cu and Zn are obtained, while Fe shows certain inconsistencies in analytical recovery. Among the evaluated scenarios, grinding T1 ($P_{80} = 147 \mu\text{m}$ and fraction $<75 \mu\text{m}$) stands out for presenting the highest analytical recovery and the greatest experimental stability in the fraction below $75 \mu\text{m}$.

.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a mi profesor guía, el Dr. Henrik Hansen, por su paciencia, por haberme escuchado y por brindarme la oportunidad de desarrollar esta investigación junto a él. Asimismo, agradezco enormemente a mi profesora co-referente, la MSc. Claudia Gutiérrez, por su constante apoyo, orientación y valiosa guía en este trabajo.

Gracias infinitas a mi madre, por su apoyo incondicional, por todo el trabajo y esfuerzo dedicado a cuidarme, protegerme y escucharme, y por su inmenso amor y sacrificio a lo largo de todos estos años.

Me gustaría agradecer a la Universidad Técnica Federico Santa María por brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente, y especialmente al Departamento de Ingeniería Química y Ambiental por su excelente disposición y constante respaldo.

Finalmente, agradezco sinceramente el apoyo de mis amigos, quienes me acompañaron durante toda la carrera compartiendo momentos de alegría y estrés, en cada uno de los altos y bajos de este camino.

Índice General

RESUMEN	3
AGRADECIMIENTOS	I
CAPÍTULO I	1
1. Introducción.....	1
1.1. Objetivo general	2
1.2. Objetivos específicos.....	2
CAPÍTULO II.....	4
2. Antecedentes Generales.....	4
2.1. Contexto de la minería nacional	4
2.2. Generación y estado de relaves mineros.....	5
2.3. Marco regulatorio de los relaves mineros.....	5
2.4. Relaves mineros.....	6
2.5. Movilidad potencial de metales en relaves y propiedades influyentes.....	9
2.6. Método para evaluar la movilidad de los metales	10
CAPITULO III	12
3. Metodología.....	12
3.1. Materiales, equipos y reactivos	12
3.2. Preparación de las muestras.....	13
3.3. Extracción secuencial BCR	14
3.4. Método EPA 3050B	17
3.5. Análisis de muestras	19
CAPÍTULO IV	21
4. Resultados.....	21

4.1. Fracciones operacionales obtenidas mediante la extracción secuencial BCR y fracción residual obtenida por el método EPA 3050B.....	21
4.2. Digestión ácida para T1', T2' y T3'	22
5. Análisis y discusión de resultados	23
5.1. Discusión de fracciones operacionales para los metales Cu, Fe y Zn	23
5.2. Síntesis de la discusión	45
5.3. Concentración total mediante Método EPA 3050B	46
CAPÍTULO V.....	51
6. Conclusiones.....	51
6.1. Conclusiones.....	51
6.2. Recomendaciones	53
Referencias	54

Índice de Figuras

Figura 1. Distribución porcentual del cobre en cada fracción operacional del BCR y Residual	24
Figura 2. Concentración mg/kg de las muestras de P80 y P80 + tamizado bajo 75 μm , para la E1 del Cu	26
Figura 3. Concentración mg/kg de las muestras de P80 (T1, T2 y T3) y P80 + tamizado (T1', T2' y T3') 75 μm , para la E2 del Cu	27
Figura 4. Concentración mg/kg de las muestras P80 (T1, T2 y T3) y P80 + tamizado (T1', T2' y T3') bajo 75 μm , para la E3 del Cu.....	29
Figura 5. Concentración mg/kg de las muestras de P80 (T1, T2 y T3) y P80 + tamizado (T1', T2' y T3') bajo 75 μm , para la E4 del Cu.....	30
Figura 6. Distribución porcentual del hierro en cada fracción operacional del BCR y Residual	31
Figura 7. Concentración mg/kg de las muestras de P80 (T1, T2 y T3) y P80 + tamizado (T1', T2' y T3') bajo 75 μm , para la E1 del Fe	33
Figura 8. Concentración mg/kg de las muestras de P80 (T1, T2 y T3) y P80 + tamizado (T1', T2' y T3') bajo 75 μm , para la E2 del Fe	34
Figura 9. Concentración mg/kg de las muestras de P80 (T1, T2 y T3) y P80 + tamizado (T1', T2' y T3') bajo 75 μm , para la E3 del Fe	36
Figura 10. Concentración mg/kg de las muestras P80 (T1, T2 y T3) y P80 + Tamizado (T1', T2' y T3') bajo 75 μm , para la E4 del Fe	38
Figura 11. Distribución porcentual del zinc en cada fracción operacional del BCR y Residual	39
Figura 12. Concentración mg/kg de las muestras de P80 (T1, T2 y T3) y P80 + tamizado (T1', T2' y T3') bajo 75 μm , para la E1 del Zn.....	41
Figura 13. Concentración mg/kg de las muestras de P80 (T1, T2 y T3) y P80 + tamizado (T1', T2' y T3') bajo 75 μm , para la E2 del Zn.....	42
Figura 14. Concentración mg/kg de las muestras de P80 (T1, T2 y T3) y P80 + tamizado (T1', T2' y T3') bajo 75 μm , para la E3 del Zn.....	43

Figura 15. Concentración mg/kg de las muestras de P80 (T1, T2 y T3) y P80 + tamizado (T1', T2' y T3') bajo 75 μ m, para la E4 del Zn.....	45
Figura 16. Recuperación (%) del Cu, Fe y Zn, para T1', T2' y T3', de las fracciones BCR y residual entre las concentraciones totales por digestión ácida	46
Figura 17. Comparativa de recuperación de T1, entre los P80 (T1 = 147 μ m) de las muestras originales y P80 + tamizado (T1') bajo 75 μ m	48

Índice de Tablas

Tabla 1. Resultados experimentales para la fracción ácido soluble (E1) mediante la extracción secuencial BCR	21
Tabla 2. Resultados experimentales para la fracción reducible (E2) mediante la extracción secuencial BCR	21
Tabla 3. Resultados experimentales para la fracción oxidable (E3) mediante la extracción secuencial BCR	22
Tabla 4. Resultados experimentales para la fracción residual (E4) mediante el método EPA 3050B	22
Tabla 5. Concentración total de los metales estudiados para T1', T2' y T3', mediante el método EPA 3050B.....	22
Tabla 6. Concentraciones totales de T1 para el relave original del P80 (T1 = 147 µm) y para la fracción fina (T1') bajo 75 µm.....	49

1. Introducción

La minería constituye uno de los pilares de la economía chilena, siendo Chile el mayor productor mundial de cobre y uno de los principales productores de otros minerales. Sin embargo, el procesamiento de minerales sulfurados genera grandes volúmenes de residuos, los cuales son depositados en tranques o depósitos de relaves. Estos materiales, compuestos principalmente por roca finamente molida, trazas de minerales y agua de proceso, representan un desafío significativo en términos de gestión, sustentabilidad y disponibilidad de espacio, debido a los riesgos potenciales que su disposición implica para el entorno natural. Los relaves sulfurados contienen diversos metales pesados, entre ellos cobre, hierro y zinc, los cuales pueden movilizarse como consecuencia de procesos de meteorización asociados a la oxidación de minerales sulfurados. Este fenómeno puede conducir a la generación de drenaje ácido de roca (DAR), favoreciendo la lixiviación y liberación de metales potencialmente tóxicos hacia los ecosistemas circundantes.

Frente a este escenario, la percepción de los relaves ha evolucionado desde considerarlos exclusivamente como pasivos ambientales hacia reconocerlos como potenciales fuentes secundarias de recursos, debido a la presencia de elementos de valor económico, como el cobre. Tradicionalmente, la caracterización de estos materiales se ha basado en la determinación de las concentraciones totales de los elementos (masa absoluta); sin embargo, este enfoque no proporciona información acerca de su movilidad potencial, capacidad de liberación o biodisponibilidad. En este contexto, resulta necesario emplear metodologías complementarias capaces de describir el comportamiento geoquímico de los metales, entre las cuales destaca el método de extracción secuencial BCR, ampliamente utilizado para la especiación geoquímica. Este procedimiento permite fraccionar operacionalmente los metales según su grado de labilidad mediante la aplicación secuencial de diferentes reactivos químicos, obteniéndose las fracciones ácido soluble, reducible, oxidable y residual. Asimismo, diversos factores fisicoquímicos, tales como el potencial de hidrógeno (pH), el potencial redox (Eh) y el tamaño de partícula, ejercen una influencia significativa sobre la movilidad de los metales. En particular, la disminución del tamaño de partícula incrementa

el área superficial específica y puede modificar la reactividad y la liberación potencial de los elementos presentes en los relaves.

Este trabajo estudia la potencial movilidad de metales pesados en relaves sulfurados. Para ello, se aplica el método de extracción secuencial BCR a la fracción fina ($<75\ \mu\text{m}$) obtenida a partir de tres tamaños de molienda diferentes, con el propósito de determinar la distribución operacional de Cu, Fe y Zn en las fracciones ácido soluble, reducible, oxidable y residual. Adicionalmente, se emplea el protocolo de digestión ácida EPA 3050B para determinar las concentraciones totales de los elementos y complementar la interpretación de los resultados mediante la evaluación de la recuperación analítica y la consistencia de los balances de masa. De esta manera, se busca evaluar el potencial de valorización de los metales presentes en los relaves y aportar antecedentes relevantes para su gestión ambiental.

1.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de la reducción granulométrica mediante segregación física sobre la movilidad potencial de Cu, Fe y Zn en relaves sulfurados, mediante la aplicación del método de extracción secuencial BCR y su complementación con el protocolo de digestión ácida EPA 3050B, con el fin de determinar el potencial de valorización de los metales y aportar antecedentes para la gestión ambiental de estos depósitos.

1.2. Objetivos específicos

- Determinar la distribución operacional de Cu, Fe y Zn en las fracciones ácido soluble, reducible, oxidable mediante la aplicación del método de extracción secuencial BCR en las fracciones finas obtenidas y la fracción residual mediante el protocolo EPA 3050B.
- Comparar la distribución operacional y la movilidad potencial de Cu, Fe y Zn entre las muestras originales con tamaños de partícula P80 de 147, 214 y 298 μm y sus respectivas fracciones menores a 75 μm , con el fin de evaluar el efecto de la reducción granulométrica sobre el comportamiento geoquímico de estos elementos.

- Determinar las concentraciones totales de Cu, Fe y Zn mediante digestión ácida según el protocolo EPA 3050B, con el propósito de evaluar la recuperación analítica y la consistencia de los balances de masa obtenidos.

2. Antecedentes Generales

2.1. Contexto de la minería nacional

La actividad minera ha estado históricamente presente en Chile. Esta industria constituye uno de los pilares fundamentales del desarrollo económico y social del país. Gracias a la abundancia y diversidad de sus recursos minerales, Chile se ha consolidado como un actor estratégico en el suministro global de minerales metálicos y no metálicos (Sociedad Nacional de Minería (SONAMI), 2026). En este contexto, el país destaca como proveedor relevante de cobre, hierro, oro, molibdeno y compuestos de litio. De acuerdo con los balances concretados para el periodo 2019, Chile se consolida como el principal productor global de cobre, alcanzando un 28% de la producción mundial; asimismo, lidera la producción de yodo con un 67% del mercado global, y la de renio con un 56% del total mundial. (U.S. Geological Survey (USGS), 2023)

Durante el año 2025, las exportaciones mineras alcanzan cifras significativas, totalizando US\$ 63 mil millones con un crecimiento anual del 10%, lo que llega a representar el 59% de las exportaciones totales del país (Consejo Minero, 2026). Durante el año 2024, en el sector laboral se registra un promedio de 286.000 trabajadores directos (considerando personal propio y contratistas), lo que equivale a un incremento del 2,9% en comparación con el periodo 2023 (Consejo Minero, 2025). Posteriormente, para el año 2025, se alcanza un promedio anual de 305.000 personas, cifra que representa un aumento del 6% respecto al año anterior y se consolida como el registro más alto de los últimos quince años (Consejo Minero, 2026).

Por otro lado, debido al incremento en los precios internacionales de los metales, el PIB minero eleva su contribución al PIB nacional, pasando de un 11.9% en 2024 a un 13.1% en 2025. En el ámbito del aporte al fisco en 2025 se observa que la recaudación total proveniente de la actividad minera registra un notable incremento del 43% en comparación con el año anterior, llegando a representar el 10% de los ingresos fiscales del periodo.

2.2. Generación y estado de relaves mineros

La intensa actividad extractiva y de beneficio de minerales en Chile genera importantes beneficios económicos y sociales; sin embargo, conlleva a la producción de un volumen masivo de residuos mineros. La explotación a gran escala de los yacimientos se caracteriza por procesar matrices rocosas donde el mineral de interés representa una fracción muy reducida del total removido, transformando la mayor parte de la roca en residuos sólidos, denominados relaves, los cuales se generan al finalizar las etapas de concentración.

A nivel nacional, la acumulación histórica de estos descartes representa un gran desafío ambiental. De acuerdo con los registros consolidados del Visor de Catastro de Depósitos de Relaves en Chile, dirigido por el Servicio Nacional de Geología y Minería (Servicio Nacional de Geología y Minería, 2026), Chile registra un total de 836 depósitos, de los cuales 455 se encuentran en estado de abandono (54,4%), 223 están inactivos (26,7%) y 129 permanecen en operación (15,3%), mientras que el porcentaje restante corresponde a proyectos en fase de construcción, relaves en estado de revisión y relaves eliminados. Geográficamente, del total de los 836 relaves, la Región de Coquimbo concentra la mayor cantidad de relaves con un total de 423 depósitos, seguida por la Región de Atacama con 200 depósitos. Ante esta magnitud de estructuras abandonadas e inactivas, resulta imperativo la gestión segura y sostenible de estos desechos.

2.3. Marco regulatorio de los relaves mineros

La seguridad de los depósitos de relaves en Chile es imprescindible al ser un país sísmico. Se han registrados hitos catastróficos como el colapso del tranque “El Cobre” en la provincia de Quillota (1965), en donde se produce la movilización de grandes cantidades de relaves, causando graves pérdidas humanas y daños ambientales (Consejo Minero, 2023), este hecho se traduce en la dictación del Reglamento sobre las exigencias de diseño, construcción, operación y cierre de los relaves en 1970 y actualizado en 2006, el cual garantiza la seguridad pública, y está bajo la fiscalización de SERNAGEOMIN (Ministerio de Minería, 2007). De manera complementaria, la Ley N°20.551 (Ministerio de Minería, 2011) regula el cierre de faenas, obligando a las empresas a ejecutar medidas que aseguren la estabilidad física y química de las estructuras a largo plazo una vez finalizada su vida útil.

Asimismo, debido a que los relaves pueden liberar elementos potencialmente tóxicos, la actividad minera se rige por la Ley 19.300 sobre las bases generales del medio ambiente la cual establece, el derecho a vivir en un ambiente libre de contaminación, la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental (Ministerio del Medio Ambiente, 1994).

2.4. Relaves mineros

Los relaves mineros se definen como suspensiones de partículas sólidas finamente molidas y agua de procesos, las cuales se descartan tras las operaciones del proceso de flotación. Las características físicas y químicas de los relaves varían según la naturaleza de la mina, su entorno geológico y el clima del lugar de emplazamiento de los relaves (Consejo Minero & International Council on Mining & Metals (ICMM), 2016). En el caso de la minería de sulfuros de cobre, el elemento de interés económico suele ser inferior al 1% de la roca extraída. Tras la conminución y concentración en el proceso de flotación, se obtiene un concentrado con una ley de cobre que oscila entre el 20% y el 30% (Consejo Minero, 2023), el cual es posteriormente sometido a procesos metalúrgicos como fundición o lixiviación para la obtención del metal refinado. El material restante constituido por partículas con bajo contenido de cobre, es descartado en forma de pulpa y depositado en instalaciones de almacenamiento de relaves (Codelco, s.f.).

Si bien la matriz inicial de estos descartes está compuesta principalmente por roca molida y agua de procesos, no se clasifica inicialmente como un residuo peligroso según lo señalado por el artículo 23 del Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos (Ministerio de Salud, 2004) (Consejo Minero, 2023). Sin embargo, la toxicidad de estos puede manifestarse con en el tiempo. Esto se debe a que, ciertos depósitos de relaves cupríferos al interactuar con el agua y el oxígeno atmosférico experimentan reacciones químicas de oxidación que solubilizan y movilizan metales potencialmente nocivos para el ser humano y ecosistema, tales como el arsénico (As), cobre (Cu), plomo (Pb), zinc (Zn), entre otros (InduAmbiente, 2025).

2.4.1. Geoquímica de los relaves cupríferos

En Chile los relaves cupríferos mineros son generados principalmente a través del proceso de flotación, están compuestos por roca finamente molida junto con minerales sulfurados remanentes, como la calcopirita, pirita y restos de molibdeno, entre otros. Con el abandono prolongado de estos depósitos, los minerales se exponen a diferentes condiciones atmosféricas, como el oxígeno y el agua desencadenando el proceso conocido como drenaje ácido de mina o drenaje ácido de roca, lo cual favorece la disolución y movilización de los metales (Akcil & Koldas, 2006) (International Council on Mining & Metals, 2025). La pirita (FeS_2) al ser uno de los minerales sulfurados más comunes en los relaves cupríferos, juega un rol crítico debido a que su oxidación produce ácido sulfúrico (H_2SO_4), óxidos e hidróxidos de hierro y fases secundarias del Fe (Dold, 2010) (Akcil & Koldas, 2006). Esta generación de acidez disminuye drásticamente el pH del sistema, incrementando la agresividad química del medio y facilitando la posterior lixiviación de otros metales presentes en los relaves. (International Council on Mining & Metals, 2025).

2.4.2. Metales pesados en los relaves

2.4.2.1. Cobre

En los yacimientos de sulfuros, el cobre se encuentra asociado a minerales como la calcopirita (CuFeS_2), covelina (CuS), bornita (Cu_5FeS_4), enargita (Cu_3AsS_4) y calcocita (Cu_2S) (Consejo Minero, s.f.). Su presencia en los relaves se debe a ineficiencias operacionales del proceso de concentración por flotación, donde parte del material mineralizado no es recuperado y es descartado en forma de pulpa junto con los metales residuales.

Tras la exposición prolongada al entorno, la oxidación química de la matriz desestabiliza la estructura de estos sulfuros, favoreciendo la liberación de especies de cobre hacia la fase acuosa, principalmente como Cu^{2+} . El cobre posee alta movilidad en medios ácidos, no obstante, a pH cercanos a la neutralidad, su migración disminuye por fenómenos de adsorción en las superficies de los oxihidróxidos de hierro secundarios formados durante el drenaje ácido (Dold, 2010).

En el ámbito de la salud, el cobre es un nutriente esencial para los seres vivos y se encuentra en muchos alimentos. No obstante, ingerir una gran cantidad de cobre, común en el agua potable contaminada, puede provocar efectos agudos como vómitos y dolor abdominal,

mientras que la exposición a altas dosis puede causar daño hepático y renal (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2004).

2.4.2.2. Hierro

El hierro es un componente mayoritario dentro de los relaves provenientes de la minería de sulfuros de cobre. Debido a que el cobre se extrae principalmente a partir de especies como la calcopirita (CuFeS_2), esta coexiste en los yacimientos con grandes volúmenes de pirita (FeS_2). Al no poseer valor económico directo en el contexto de la recuperación de cobre, es clasificada como ganga y descartada en los depósitos de relaves tras concluir el proceso de concentración por flotación (Codelco Educa, s.f.).

Geoquímicamente, el hierro es el principal catalizador del drenaje ácido de roca (Dold, 2010). En el caso de la pirita (FeS_2) al oxidarse, por exposición al agua y al oxígeno, libera hierro ferroso (Fe^{2+}) el cual se oxida a hierro férrico (Fe^{3+}), un agente oxidante altamente reactivo que acelera la disolución de otros sulfuros (Dold, 2010). A medida que el pH del medio cambia, este hierro disuelto precipita como oxihidróxidos e hidróxidos de hierro (Fe (III)) (Shi, y otros, 2021).

Desde el punto de vista ambiental y biológico, el hierro es un elemento esencial para los organismos vivos y participa en múltiples procesos fisiológicos. Sin embargo, concentraciones elevadas de hierro en sistemas acuáticos, asociadas a procesos de lixiviación, pueden generar efectos adversos en la salud humana, tales como trastornos gastrointestinales, hemocromatosis y daños en órganos como el hígado, el páncreas y el corazón (Akhtar, y otros, 2022)..

2.4.2.3. Zinc

El zinc se encuentra concentrado principalmente en depósitos de sulfuros y yacimientos polimetálicos, siendo la esfalerita (ZnS) su mena primaria de extracción (Rodríguez, Pedroza, Aguilar, & Aguilera-González, 2025). En la minería del cobre, este mineral coexiste en la roca y sin ser el metal objetivo comercial, es descartado hacia los depósitos de relaves en forma de ganga. La degradación y oxidación de la esfalerita provoca la lixiviación del metal, liberando iones solubles de zinc (Zn^{2+}) y sulfatos (SO_4^{2-}) hacia el medio acuoso (Dold, 2010).

En el ámbito ambiental, el zinc es un micronutriente esencial en bajas concentraciones; sin embargo, el aumento de zinc en los recursos hídricos puede generar toxicidad significativa en organismos acuáticos. Para el ser humano, la exposición a este metal genera un riesgo por la inhalación del material particulado fino provocando la "fiebre de vapores de metal", un cuadro respiratorio agudo pero reversible (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 2005).

2.5. Movilidad potencial de metales en relaves y propiedades influyentes

La movilización de metales pesados desde la matriz sólida de un relave hacia el entorno no depende únicamente de su concentración total, si no de las condiciones fisicoquímicas del medio y de las propiedades físicas del depósito. En este contexto, la movilidad potencial puede entenderse como la capacidad de un metal para liberarse desde las fases sólidas y transferirse a compartimentos ambientales más disponibles o móviles. Entre los factores que ejercen una mayor influencia sobre este comportamiento se encuentran el potencial de hidrógeno (pH), las condiciones redox (Eh) y las características granulométricas del material.

- Potencial de Hidrógeno (pH) y Condiciones Redox (Eh):

El pH corresponde a un parámetro crítico en la movilidad y lixiviación de los metales en los depósitos de relaves mineros, ya que un descenso de este favorece la solubilización de numerosas especies metálicas, incrementando su disponibilidad y potencial liberación al medio (Dold, 2010). Asimismo, el potencial de oxidación-reducción (Eh) define la estabilidad de las fases sólidas dado que pueden movilizar o inmovilizar metales (Violante et al., 2010). En condiciones oxidantes, se promueve la oxidación de minerales sulfurados mediante la acción de especies oxidantes como el ion férrico Fe (III), lo que puede generar la liberación de metales asociados. En contraste, bajo condiciones reductoras puede producirse la disolución reductiva de óxidos e hidróxidos de hierro (Fe (III)), liberando elementos traza previamente retenidos en estas fases, tales como cobre (Cu) y plomo (Pb) (Dold, 2010) (Violante et al., 2010)

- Granulometría y área superficial:

El tamaño de partícula es otro factor crítico en la liberación de los metales, ocurriendo a través de múltiples procesos, como la disolución, desorción, formando complejos metálicos

y precipitados de minerales secundarios (Kim, Wilson, & Rytuba, 2011). A su vez, una disminución de la granulometría incrementa el área superficial específica disponible para las reacciones fisicoquímicas, favoreciendo la oxidación de minerales sulfurados y aumentando la velocidad de disolución de las fases portadoras de metales. Como consecuencia, las partículas más finas suelen presentar una mayor reactividad y un mayor potencial de liberación de metales hacia medios acuosos. Por lo tanto, el efecto del tamaño de partícula se consolida como un factor determinante para evaluar la movilidad potencial de los metales hacia el entorno (Corriveau et al., 2011) (Kim, Wilson, & Rytuba, 2011).

2.6. Método para evaluar la movilidad de los metales

La evaluación del impacto ambiental en depósitos de relaves mineros se ha realizado históricamente mediante la determinación de la concentración total de metales. Sin embargo, este análisis directo no entrega información suficiente sobre la biodisponibilidad, la liberación, ni el comportamiento de las especies metálicas ante perturbaciones del entorno, tales como variaciones de pH o potencial redox.

Para esto, se utiliza el método de extracción secuencial desarrollado por el *Community Bureau of Reference* (BCR), el cual permite fraccionar los metales en base a su susceptibilidad química, rigiéndose bajo la metodología realizada por (Ptistišek, Milačič, & Veber, 2001).

2.6.1. Extracción secuencial BCR

El procedimiento de extracción secuencial BCR, originalmente fue diseñado para evaluar la especiación operacional de metales en suelos, sedimentos y lodos, y posteriormente, su uso se extendió a otras matrices sólidas, entre ellas los relaves mineros, debido a que también contienen metales asociados a diferentes fases geoquímicas. Este método consiste en someter muestras sólidas a distintos reactivos químicos en etapas sucesivas, con el propósito de fraccionar los metales según su asociación con distintas fases geoquímicas y su potencial movilidad ambiental. De acuerdo con la metodología descrita por Ptistišek et al. (2001), los metales se distribuyen en las siguientes fracciones operacionales:

Fracción 1 (Ácido-soluble / Intercambiable): Agrupa los metales intercambiables, adsorbidos en la superficie de las partículas y los asociados a carbonatos. Es la fracción más móvil, liberada ante descensos del pH.

Fracción 2 (Reducible): Identifica los metales ligados a óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso, los cuales se movilizan en condiciones de reducción (Shi, y otros, 2021).

Fracción 3 (Oxidable): Corresponde a los metales asociados a la materia orgánica y a sulfuros, requiriendo condiciones oxidantes para su liberación.

Fracción 4 (Residual): Corresponde a los metales incorporados en la estructura cristalina de minerales primarios y secundarios, tales como silicatos y óxidos cristalinos. Esta fracción presenta la menor movilidad potencial y se determina mediante la digestión ácida del residuo sólido remanente tras las etapas de extracción anteriores.

2.6.2. Digestión ácida de metales

El procedimiento, basado en el método EPA 3050B (EPA, 1996), emplea una combinación de reactivos oxidantes y ácidos fuertes con el fin de solubilizar los metales presentes en la muestra mediante la destrucción de materia orgánica, la disolución de fases minerales secundarias y la liberación de metales asociados a estructuras minerales susceptibles al ataque químico.

Mediante este protocolo se determina la fracción remanente de la etapa 3 (fracción oxidable), para la determinación de la fracción reducible. Al sólido remanente se le aplica un ataque químico ácido, mediante la adición de alícuotas de ácido nítrico (HNO_3), ácido clorhídrico (HCl) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2), a altas temperaturas. Asimismo, es también aplicado para la determinación de la concentración total de los metales, sobre una muestra de relave sin tratamiento previo, para así poder evaluar consistencia y recuperación mediante un cierre de balance másico, mediante la siguiente ecuación.

$$\text{Recuperacion (\%)} = \frac{\text{Suma de fracciones (E1 + E2 + E3 + E4)}}{\text{Concentración Total}_{\text{EPA 3050B}}} \quad (1)$$

3. Metodología

A continuación, se describe la metodología empleada para la aplicación del procedimiento de extracción secuencial BCR y de la digestión ácida EPA 3050B, para la evaluación de la movilidad de Cu, Fe, Zn y Pb en la fracción granulométrica menor a 75 μm . También, se detalla la preparación de las soluciones como el pretratamiento de las muestras.

3.1. Materiales, equipos y reactivos

3.1.1. Materiales

- Tubos de centrífuga de 50 mL.
- Propipeta.
- Pipetas graduadas de 10 mL.
- Pipeta volumétrica de 25 mL.
- Vasos precipitados de 100 mL y 250 mL.
- Parafilm.
- Piseta de 1000 mL.
- Termómetro (0 a 100°C).
- Varilla de vidrio.
- Matraz aforado de 100 mL, 250 mL, 500 mL y 1L.
- Papel filtro MFS 131 de 7 cm.
- Espátula macro cuchara y plano de acero inoxidable.
- Gradilla de plástico para tubos centrífuga de 50 mL.
- Sistema de filtración por succión al vacío.
- Embudo de vidrio.
- Vidrio reloj.
- Frascos de plásticos para almacenamiento de muestras.
- Frascos de vidrio para almacenamiento de soluciones de 1L.
- Elementos de protección personal.

3.1.2. Equipos

- Balanza analítica BOECO modelo BAS 31 plus.
 - Capacidad 220 g y Precisión 0.0001 g
- Agitador Orbital Shaker FINEPCR SH30.
 - Rango de velocidad: 40-300 RPM
- Centrífuga HERMLE Z323K.
 - Velocidad máxima: 17.000 RPM
- Placa calefactora TEMPRA SH-3.
 - Temperatura máxima: 380°C
 - Potencia: 500 W
- Medidor de pH Orion Star A11.
- Tamiz 8" N° 200 – 75 µm.
- Equipo de filtro a presión de laboratorio.

3.1.3. Reactivos

- Ácido acético glacial (CH_3COOH) al 99.8% TEDIA.
- Hidroxilamina clorhidrato ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$) al 99% Supelco.
- Peróxido de hidrogeno (H_2O_2) al 30% CAS (7722-84-1).
- Acetato de amonio *Cryst* ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$) al 98% EMESURE Supelco.
- Ácido clorhídrico al 38% BAKER ANALYZED, J.T Baker.
- Ácido nítrico HNO_3 65% EMESURE Supelco.
- Agua destilada
- Muestras de relaves

3.2. Preparación de las muestras

Se trabaja con tres muestras de relaves mineros denominadas T1, T2 y T3, correspondientes a tamaños característicos P80 de 147, 214 y 298 µm, respectivamente.

Para el desarrollo experimental, cada muestra es sometida a un pretratamiento de tamizado con el objetivo de obtener exclusivamente la fracción menor a 75 µm. Debido a la elevada proporción de partículas finas presentes en los relaves, la separación se realiza mediante tamizado húmedo utilizando un tamiz N.º 200 (75 µm). Para ello, el tamiz es instalado sobre

un balde de 20 L equipado con un sistema de agitación, donde, la muestra de relave es depositada sobre el tamiz y sometida a lavado con agua, favoreciendo el paso de las partículas menores a 75 μm . El proceso se mantiene hasta observar un efluente clarificado y libre de material particulado apreciable. A continuación, el balde con agua y la fracción pasante, es trasvasiado a un tanque de presurización con filtro en el fondo para la deposición del material fino.

La muestra es llevada a una estufa de secado a 90°C. Finalmente la muestra seca es homogeneizada mediante un rodillo y depositada en frascos de vidrio para su posterior análisis. A estas muestras ya tratadas se les denomina T1', T2' y T3' de aquí en adelante en este trabajo.

3.3. Extracción secuencial BCR

La extracción secuencial de metales se realiza mediante el método BCR (*Community Bureau of Reference*), siguiendo la metodología descrita por Ptistišek et al. (2001), la cual es ampliamente utilizada para evaluar la distribución geoquímica, la biodisponibilidad y la movilidad potencial de los metales presentes en matrices ambientales sólidas. Su aplicación permite fraccionar los elementos presentes en la matriz sólida en distintas fases operacionales: ácido soluble, reducible, oxidable y residual, la distribución de los metales entre estas fracciones proporciona información sobre su susceptibilidad a ser liberados bajo diferentes condiciones fisicoquímicas, permitiendo evaluar su potencial impacto ambiental.

La preparación de las soluciones extractantes se realiza tomando como referencia el procedimiento descrito por (Rauret, et al., 1999), debido a que este detalla la preparación de los reactivos. No obstante, las concentraciones finales de las soluciones y el procedimiento de extracción se ajustan a lo establecido por Ptistišek et al. (2001).

3.3.1. Preparación de soluciones

3.3.1.1. Solución de ácido acético 0,11 M

La solución utilizada en la primera etapa de extracción ácido-soluble se realiza bajo campana en donde se agregan $25 \pm 0,2$ mL de ácido acético glacial a 500 mL de agua destilada en un matraz aforado de 1L, y se afora con agua destilada hasta completar el volumen. De esta solución se toman 250 mL (correspondiente a ácido acético 0,43 M) y se diluye en un matraz

aforado de 1 L con agua destilada para obtener la solución deseada de ácido acético 0.11 M y ser almacenada en frasco de vidrio.

3.3.1.2. Solución de hidroxilamina clorhidratada 0,1 M

A continuación, se describe la preparación de una solución de hidroxilamina clorhidrato 0,1 M para un volumen final de 250 mL, utilizada en la etapa 2 de la extracción secuencial (fracción reducible). Para ello, se pesan entre 1,7373 y 1,7375 g de hidroxilamina clorhidrato en una balanza analítica y se diluye en aproximadamente 200 mL de agua destilada. Posteriormente, la solución se ajusta a un pH $2,00 \pm 0,10$ mediante la adición de ácido nítrico y se transfiere a un matraz aforado de 250 mL, completando el volumen con agua destilada. Finalmente, la solución se almacena en un frasco de vidrio.

3.3.1.3. Solución de peróxido de hidrogeno al 30%

Para la primera etapa de extracción de la fracción oxidable se utiliza peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30 %, estabilizado en medio ácido (pH 2–3). La acción oxidante de este reactivo permite la degradación de la materia orgánica y la oxidación de los minerales sulfurados presentes en la muestra, promoviendo la liberación de los metales asociados a estas fases.

3.3.1.4. Solución de acetato de amonio 1.0 M

Para la segunda etapa de extracción de la fracción oxidable, se prepara una solución de acetato de amonio 1,0 M disolviendo 38,54 g del reactivo en aproximadamente 450 mL de agua destilada. Posteriormente, el pH de la solución se ajusta a $2,00 \pm 0,10$ mediante la adición de ácido nítrico. Finalmente, la solución es transferida a un matraz aforado de 500 mL, completando el volumen con agua destilada y almacenándose en un frasco de vidrio hasta su utilización.

3.3.2. Procedimiento experimental de la extracción secuencial BCR

El procedimiento de extracción secuencial se desarrolla tomando como referencia la metodología descrita por Ptistišek et al. (2001), manteniendo las cantidades de soluciones extractantes empleadas en las etapas de extracción correspondientes a las fracciones ácido-soluble, reducible y oxidable, e incorporando una modificación en la etapa de lavado posterior a cada extracción, donde se utilizan 20 mL de agua destilada de acuerdo con lo reportado por (Rauret, et al., 1999) y un aumento en el tiempo de centrifugado.

Para la determinación de la fracción residual, el protocolo de extracción secuencial es complementado con una digestión ácida basada en el método EPA 3050B (EPA, 1996), tal como sugiere (Rauret, et al., 1999). En esta etapa se realiza una modificación experimental consistente en el control de la temperatura de digestión dentro del intervalo de 80 a 85 °C.

3.3.2.1. Paso 1: Fracción ácido soluble

En tubos de centrifuga de 50 mL se pesan $0,5000 \pm 0,0005$ g de muestra de relave correspondientes a T1', T2' y T3', a las cuales se les agregan 20 mL de ácido acético 0.11 M a pH 2,8, y la suspensión se agita brevemente para aumentar la homogeneización sólido-líquido. Las muestras son sometidas a agitación durante 16 h en el agitador orbital FINEPCR SH30 a temperatura ambiente. Finalizado el período de extracción, las suspensiones son centrifugadas a 10.000 rpm durante 35 minutos utilizando la centrífuga HERMLE Z323K. El sobrenadante obtenido, correspondiente a la fracción ácido-soluble e intercambiable, es retirado mediante pipeta volumétrica y almacenado en frascos de plástico para su posterior análisis químico. Las muestras son conservadas a 4 °C.

El residuo sólido es lavado con la adición de 20 mL de agua destilada, nuevamente centrifugado a 10.000 RPM por 35 minutos, el sobrenadante es descartado y el residuo sólido pasa al siguiente paso.

3.3.2.2. Paso 2: Fracción reducible

Al residuo sólido obtenido en la etapa anterior se le añaden 20 mL de la solución de hidroxilamina clorhidrato, preparada el día del experimento. La suspensión se homogeniza mediante agitación manual breve y posteriormente se transfiere a un agitador orbital, donde se mantiene en agitación continua durante 16 horas a temperatura ambiente. Finalizado el tiempo de reacción, la mezcla se centrifuga a 10.000 rpm durante 35 minutos. El sobrenadante se recupera cuidadosamente mediante pipeta volumétrica y se almacena a 4 °C, correspondiendo a la fracción reducible que posteriormente es analizada.

El residuo sólido remanente se somete nuevamente a un lavado con 20 mL de agua destilada, siguiendo el procedimiento descrito en el paso anterior. Luego, se centrifuga nuevamente a 10.000 rpm durante 35 minutos, se descarta el sobrenadante y el residuo sólido se conserva para la siguiente etapa del proceso.

3.3.2.3. Paso 3: Fracción oxidable

A los tubos de centrifugación que contienen los residuos sólidos provenientes del paso anterior, se les añaden 5 mL de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30 %, previamente acidificado con ácido nítrico (HNO_3) hasta alcanzar un pH entre 2 y 3. Los tubos se cubren con sus respectivas tapas y se dejan reaccionar durante 1h a temperatura ambiente, con agitación ocasional en agitador orbital. Transcurrido este tiempo, la digestión continúa en baño de agua sobre placa calefactora a temperatura controlada (80 – 85 °C), hasta que el volumen se reduzca a 1 mL. Posteriormente, se adicionan nuevamente 5 mL de H_2O_2 al 30 %, los tubos son cubiertos con su propia tapa y calentados en baño de agua por 1 h controlando la temperatura a 80 – 85 °C. Transcurrido el tiempo, los tubos son descubiertos y se reduce el volumen a 1 mL en el baño de agua.

Posteriormente, las muestras se dejan enfriar a temperatura ambiente y se les añaden 25 mL de acetato de amonio 1,0 M y son llevadas al agitador orbital por 16 h a temperatura ambiente. Finalizado el tiempo de reacción, se realiza centrifugación bajo las mismas condiciones previamente descritas (10.000 rpm durante 35 min). El sobrenadante es recuperado cuidadosamente mediante pipeta volumétrica y almacenado en frascos a 4 °C para su posterior análisis.

El residuo sólido es sometido a un lavado con agua destilada, se centrifuga nuevamente y se descarta el sobrenadante. El sólido remanente se conserva para la siguiente etapa correspondiente a la fracción residual.

3.3.2.4. Paso 4: Fracción residual

De acuerdo con lo propuesto por (Rauret, et al., 1999), la fracción residual de sólido que se obtiene tras la extracción de la fracción oxidable (paso 3), se somete a una digestión ácida, mediante el método EPA 3050B.

3.4. Método EPA 3050B

El residuo sólido remanente del paso 3 es sometido a una digestión ácida fuerte con el objetivo de completar el análisis de partición de metales. Esta fracción representa el contenido de metales que no fueron liberados en las etapas previas, encontrándose

fuertemente retenidos dentro de la red cristalina de los silicatos o asociados a óxidos cristalinos de hierro y manganeso.

El análisis del residuo se lleva a cabo mediante la aplicación del método EPA 3050B correspondiente a un protocolo estandarizado de digestión ácida para sedimentos, suelos y materiales similares, el cual permite la solubilización de metales asociados a fases minerales resistentes (EPA, 1996)

3.4.1. Digestión ácida: fase residual

3.4.1.1. Paso 1

Los residuos sólidos provenientes del paso 3 del procedimiento BCR se transfieren a vasos de precipitados de 100 mL. Bajo campana extractora de gases, se adicionan 10 mL de una mezcla de ácido nítrico (HNO_3) y agua destilada 1:1. La mezcla es cubierta con vidrio reloj y llevada a placa calefactora a 80 - 85°C evitando la ebullición por 10 a 15 minutos.

Las muestras se dejan enfriar y se agregan 5 mL de HNO_3 concentrado, continuando el calentamiento durante 30 minutos a 80 - 85°C. El proceso continúa siempre que se observe la generación de gases marrones, agregando 5 mL de HNO_3 y calentando hasta la desaparición de dicha emisión.

Con el cese de la reacción, se continúa con la evaporación de las muestras tapadas con vidrio reloj hasta que se reducen los volúmenes a 5 mL aproximadamente sin ebullición a 85°C durante 2 horas. Finalizado el tiempo, las muestras se retiran de la placa calefactora y se dejan enfriar.

3.4.1.2. Paso 2

Una vez finalizada la digestión inicial, se adicionan 3 mL de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30% y 2 mL de agua destilada a las muestras, las cuales son cubiertas con vidrio reloj y llevadas a la placa calefactora para iniciar la reacción con el cuidado de que no ocurra un exceso de efervescencia y posibles pérdidas. La mezcla se mantiene bajo calentamiento controlado hasta disminuir la efervescencia observada y se retira para enfriar.

El proceso continúa con la adición de una alícuota de 1 mL de H_2O_2 y calentamiento hasta que se observe una mínima efervescencia, sin agregar más de 10 mL de peróxido de hidrógeno en total.

Finalizada la etapa de adición de H_2O_2 , la solución con la muestra residual es tapada con vidrio reloj y llevada a una placa calefactora hasta reducir su volumen a 5 mL aproximadamente sin que ocurra ebullición a 80 - 85°C.

3.4.1.3. Paso 3

Finalizada la etapa de digestión con peróxido de hidrógeno, se agregan 10 mL de HCl concentrado y se cubre el recipiente con un vidrio reloj. Posteriormente, la muestra se lleva a una placa calefactora y se mantiene a una temperatura de 80–85 °C durante 15 minutos.

Una vez concluido el calentamiento, la solución se deja enfriar a temperatura ambiente y se filtra utilizando papel filtro MFS 131 de 7 cm de diámetro, recolectando el filtrado en tubos de centrifuga de 50 mL.

Posteriormente, el filtrado se transfiere a un matraz aforado de 100 mL con la ayuda de un embudo de vidrio y se completa el volumen con agua destilada. Finalmente, las muestras se almacenan en frascos tapados y se conservan refrigeradas a 4 °C hasta su posterior análisis.

3.4.2. Digestión ácida: concentración total

Asimismo, se determina la concentración total de los metales presentes en las muestras de relave T1', T2' y T3', con el fin de realizar la contrastación del balance másico. Para ello, se pesa 1,0000 g de muestra seca de T1', T2' y T3' y se somete al procedimiento de digestión ácida descrito en la Sección 3.4.1.

Una vez finalizada la digestión, las muestras son filtradas, transferidas a matraces aforados de 100 mL y llevadas a volumen con agua destilada. Finalmente, las soluciones se almacenan en frascos tapados y se conservan refrigeradas a 4 °C hasta su análisis.

3.5. Análisis de muestras

Las muestras obtenidas mediante el procedimiento de extracción secuencial BCR y la digestión ácida según el método EPA 3050B son analizadas mediante espectrofotometría de

absorción atómica (EAA) para la determinación de las concentraciones de cobre (Cu), hierro (Fe) y zinc (Zn). Los análisis se realizan en el Laboratorio de Análisis Instrumental de la Universidad Técnica Federico Santa María.

4. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante la metodología descrita de la extracción secuencial BCR y digestión ácida del Método EPA 3050B, para los metales cobre (Cu), hierro (Fe) y zinc (Zn).

4.1. Fracciones operacionales obtenidas mediante la extracción secuencial BCR y fracción residual obtenida por el método EPA 3050B

En el siguiente apartado se presentan los resultados experimentales realizados para las muestras correspondientes a la fracción fina bajo $75\mu\text{m}$ denominadas T1', T2' y T3', provenientes de tres muestras originales de relave con tamaños característicos P80 de $147\mu\text{m}$ (T1), de $218\mu\text{m}$ (T2) y de $298\mu\text{m}$ (T3), mediante el procedimiento de extracción secuencial BCR para las tres fracciones (E1, E2 y E3) y la fracción residual (E4) obtenida mediante digestión ácida siguiendo el método EPA 3050B. Los resultados para los metales de Cu, Fe y Zn se muestran en las Tablas 1, 2, 3 y 4.

4.1.1. Fracción ácido soluble

Tabla 1. Resultados experimentales para la fracción ácido soluble (E1) mediante la extracción secuencial BCR

Extracción 1			
Tamaños	Cu promedio $\pm \sigma$, mg/Kg	Fe promedio $\pm \sigma$, mg/Kg	Zn promedio $\pm \sigma$, mg/Kg
T1'	416,4 $\pm$ 12,3	20,5 $\pm$ 0,1	118,3 $\pm$ 6,7
T2'	475,5 $\pm$ 13,5	19,2 $\pm$ 0,3	111,9 $\pm$ 13,6
T3'	540,6 $\pm$ 13,9	21,7 $\pm$ 1,4	106,6 $\pm$ 1,4

4.1.2. Fracción reducible

Tabla 2. Resultados experimentales para la fracción reducible (E2) mediante la extracción secuencial BCR

Extracción 2			
Tamaños	Cu promedio $\pm \sigma$, mg/Kg	Fe promedio $\pm \sigma$, mg/Kg	Zn promedio $\pm \sigma$, mg/Kg
T1'	82,8 $\pm$ 1,7	4,8 $\pm$ 0,8	1095,5 $\pm$ 67,2
T2'	84,7 $\pm$ 7,9	5,3 $\pm$ 1,7	915,5 $\pm$ 87,6
T3'	88,5 $\pm$ 1,3	3,4 $\pm$ 0,0	731,2 $\pm$ 99,0

4.1.3. Fracción oxidable

Tabla 3. Resultados experimentales para la fracción oxidable (E3) mediante la extracción secuencial BCR

Extracción 3			
Tamaños	Cu promedio $\pm \sigma$, mg/Kg	Fe promedio $\pm \sigma$, mg/Kg	Zn promedio $\pm \sigma$, mg/Kg
T1'	499,5 $\pm$ 21,4	1,9 $\pm$ 0,5	1385,3 $\pm$ 33,6
T2'	664,8 $\pm$ 8,1	2,7 $\pm$ 1,2	996,0 $\pm$ 157,3
T3'	737,8 $\pm$ 100,2	3,8 $\pm$ 0,1	671,8 $\pm$ 28

4.1.4. Fracción residual

Tabla 4. Resultados experimentales para la fracción residual (E4) mediante el método EPA 3050B

Extracción 4			
Tamaños	Cu promedio $\pm \sigma$, mg/Kg	Fe promedio $\pm \sigma$, mg/Kg	Zn promedio $\pm \sigma$, mg/Kg
T1'	43,3 $\pm$ 4,2	34,2 $\pm$ 1,6	7543,3 $\pm$ 539,8
T2'	61,3 $\pm$ 6,1	35,3 $\pm$ 2,7	7680,0 $\pm$ 96,4
T3'	65,3 $\pm$ 1,2	45,8 $\pm$ 9,3	7070,7 $\pm$ 296,6

4.2. Digestión ácida para T1', T2' y T3'

A continuación, se presentan en la Tabla 5 las concentraciones totales obtenidas mediante el método EPA 3050B, para el Cu, Fe y Zn, de las tres muestras de relaves estudiadas, con la finalidad de un cierre de balance y consistencia en los fraccionamientos realizados.

Tabla 5. Concentración total de los metales estudiados para T1', T2' y T3', mediante el método EPA 3050B

Tamaño	Cu promedio $\pm \sigma$, mg/Kg	Fe promedio $\pm \sigma$, mg/Kg	Zn promedio $\pm \sigma$, mg/Kg
T1'	1122,5 $\pm$ 20,5	82,15 $\pm$ 57,1	11053 $\pm$ 282,8
T2'	1331,5 $\pm$ 64,3	48,25 $\pm$ 0,8	10086 $\pm$ 745,5
T3'	1630,5 $\pm$ 40,3	84,35 $\pm$ 54,0	8570 $\pm$ 2192,0

5. Análisis y discusión de resultados

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos mediante el procedimiento de extracción secuencial BCR y la digestión ácida EPA 3050B para la fracción residual, comparándolos con los reportados por Fuentealba (2026). El análisis se centra en evaluar el efecto del tamizado sobre la distribución operacional de cobre (Cu), hierro (Fe) y zinc (Zn), considerando que la separación granulométrica elimina la fracción gruesa, donde determinados minerales pueden encontrarse preferentemente concentrados, y enriquece la fracción fina, la cual presenta una mayor superficie específica y una mayor accesibilidad de los reactivos extractantes hacia las distintas fases minerales.

5.1. Discusión de fracciones operacionales para los metales Cu, Fe y Zn

En este apartado, se analiza la distribución obtenida experimentalmente para el cobre (Cu), hierro (Fe) y zinc (Zn), en cada fraccionamiento del método BCR y EPA 3050B para la fracción residual, con la finalidad de evaluar su movilidad potencial y el efecto de la granulometría. Las muestras analizadas corresponden a la fracción fina bajo 75µm denominadas T1', T2' y T3', provenientes de las tres muestras originales de relave con tamaños característicos P80 de 147 µm (T1), de 218 µm (T2) y de 298 µm (T3); como se ha mencionado en la sección 4.1.

5.1.1. Distribución del cobre (Cu)

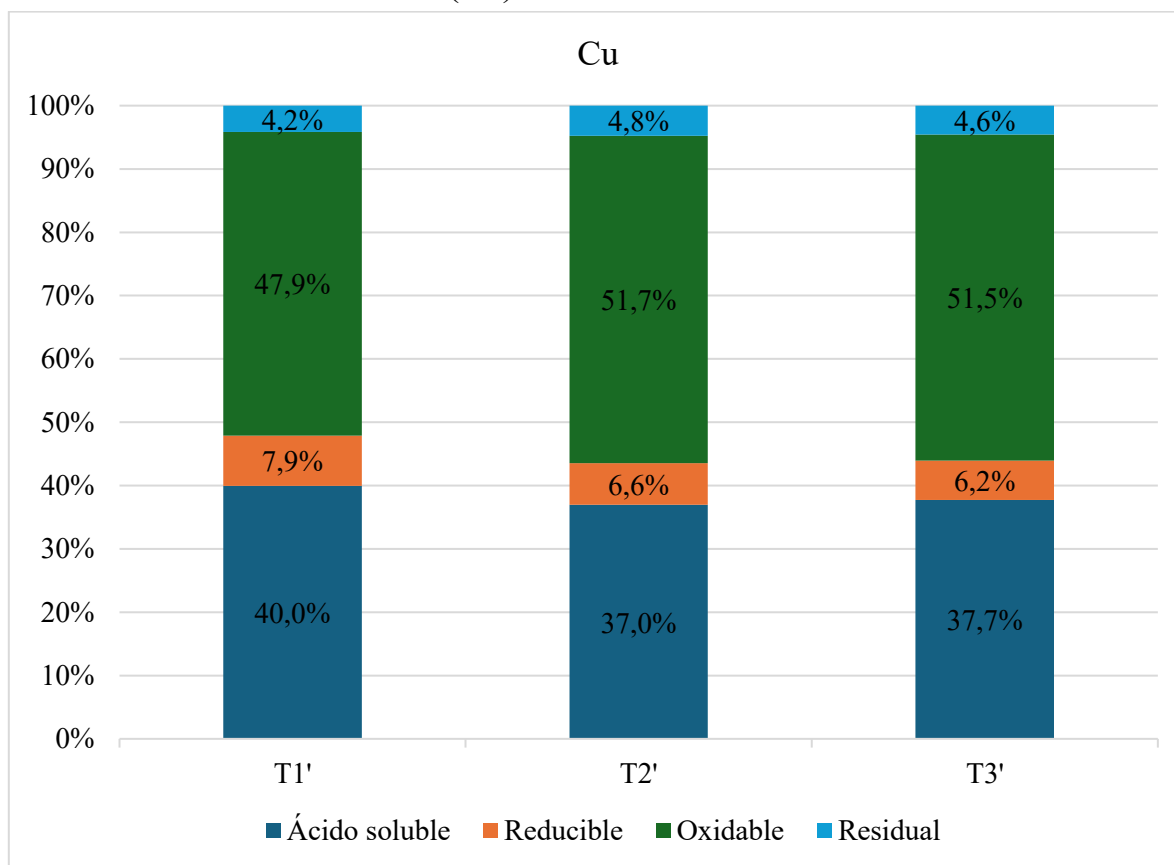


Figura 1. Distribución porcentual del cobre en cada fracción operacional del BCR y Residual

A nivel general, la Figura 1 muestra la distribución porcentual para el cobre (Cu), se visualiza un comportamiento homogéneo, con una distribución similar de este elemento entre las distintas fracciones operacionales, de las tres muestras. El metal se concentra de manera predominante en la fracción oxidable (E3), aportando un 47.9% para T1', un 51.7% en T2' y un 51.5% T3'. Le sigue la fracción ácido soluble (intercambiable) (E1) con un 40.0% para T1', 37.0% en T2' y un 37.7% para T3', estos altos porcentajes indican que una alta proporción del cobre en el relave se encuentra asociado a fases potencialmente móviles, especialmente aquellas susceptibles de liberarse bajo condiciones oxidantes o de acidificación. Desde un punto de vista ambiental, esta característica implica un mayor riesgo de movilización del metal ante cambios en las condiciones fisicoquímicas del depósito, mientras que, desde una perspectiva metalúrgica, representa una mayor disponibilidad para procesos de extracción hidrometalúrgica. Por el contrario, las fases reducibles (E2) y residual (E4) presentan aportes minoritarios, bajo el 8% y 5%, respectivamente.

a. Fracción ácido soluble (E1)

Esta fase determina la porción del metal susceptible de liberarse ante descensos del pH. En el ámbito ambiental es un factor crítico para los procesos de recuperación metalúrgica.

En términos de resultados, se aprecia una distribución relativamente similar con leves diferencias entre las muestras, registrando una participación del 40.0% en T1', un 37.0% en T2' y un 37.7% T3'. Se observa una distribución homogénea entre las muestras indicando que el cobre presenta un alto potencial de movilidad en escenarios de acidificación y al contrastar con los valores de participación porcentual de las muestras originales, los cuales son 13.4% para T1, 7.4% T2 y 9.9% para la muestra T3, se evidencia el impacto en el tamaño de partícula en este metal. Los finos de la muestra, al poseer una mayor área superficial, incrementan la presencia del cobre en la fase más lábil al favorecer la exposición de minerales previamente encapsulados dentro de partículas de mayor tamaño. El reactivo extractante accede con mayor facilidad a sitios reactivos que originalmente permanecían protegidos, aumentando la cantidad de cobre recuperada durante la primera etapa del procedimiento BCR.

Para profundizar este comportamiento desde una perspectiva de masa, la Figura 2 compara las concentraciones de cobre del tamizado frente a las muestras originales (P80). Los valores de esta primera extracción fluctúan en un rango de 242.9 mg/kg a 310.8 mg/kg en las muestras originales, mientras que al aplicar el tamizado (P80 + Tamizado) las concentraciones registran valores entre 416.4 mg/kg a 540.8 mg/kg. Este contraste, permite concluir que aumenta la cantidad de cobre extraído por el reactivo en la fracción fina, incrementando la masa de cobre recuperada en la fracción ácido soluble, impulsado por el aumento del área superficial específica de las partículas finas.

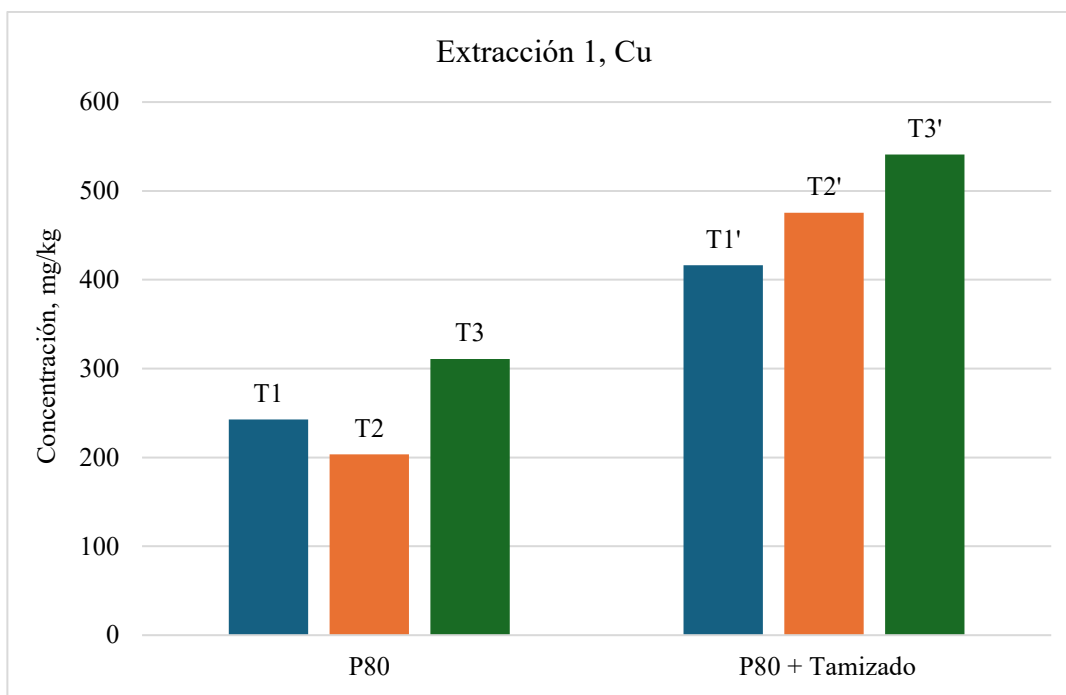


Figura 2. Concentración mg/kg de las muestras de P80 y P80 + tamizado bajo 75 μ m, para la E1 del Cu

b. Fracción reducible (E2)

Esta fase evalúa a los metales retenidos/ligados a óxidos e hidróxidos de Fe y Mn, los cuales pueden inmovilizar metales mediante procesos de adsorción y coprecipitación. Los resultados indican una participación porcentual minoritaria y estable en las tres muestras finas, siendo de 7.9%, 6.6% y 6.2% para T1', T2' y T3', respectivamente.

Estos porcentajes bajos indican que el cobre no tiene una participación relevante en las matrices de oxihidróxidos de Fe y Mn, dado que estos actúan como sitios de adsorción influyendo directamente en las distribuciones operacionales. En una comparativa con los datos de las muestras originales, se registran aportes marginales de 2,9%, 2,2% y 2,3% para las muestras T1, T2 y T3, respectivamente, se observa un leve incremento porcentual en las muestras finas debido al aumento del área superficial, sin embargo, la magnitud sigue siendo menor, evidenciando que la granulometría no altera el comportamiento geoquímico de esta fase, por lo que el Cu no es potencialmente móvil en escenarios de reducción.

Así mismo, para profundizar este análisis en la Figura 3 se ilustra el contraste entre los dos casos de la segunda extracción. Los valores registran un rango de 53.1 mg/kg a 72.0 mg/kg para las muestras originales (P80), mientras que para las muestras tamizadas se registran

concentraciones que van en desde los 82.8 mg/kg a 88.5 mg/kg. Este incremento evidencia una mayor cantidad de cobre extraída tras la reducción granulométrica, como consecuencia directa del aumento del área superficial específica y al mayor contacto entre el reactivo extractante y las fases minerales asociadas a óxidos e hidróxidos de hierro y manganeso por efecto del tamizado. A pesar de este aumento de la masa extraída, la participación porcentual de esta fracción continúa siendo reducida respecto de las demás etapas del procedimiento BCR. Asimismo, se mantiene la tendencia creciente observada entre las muestras ($T1 < T2 < T3$), lo que indica que el tamizado incrementa la eficiencia de extracción sin modificar de manera significativa el comportamiento operacional del cobre en la fracción reducible.

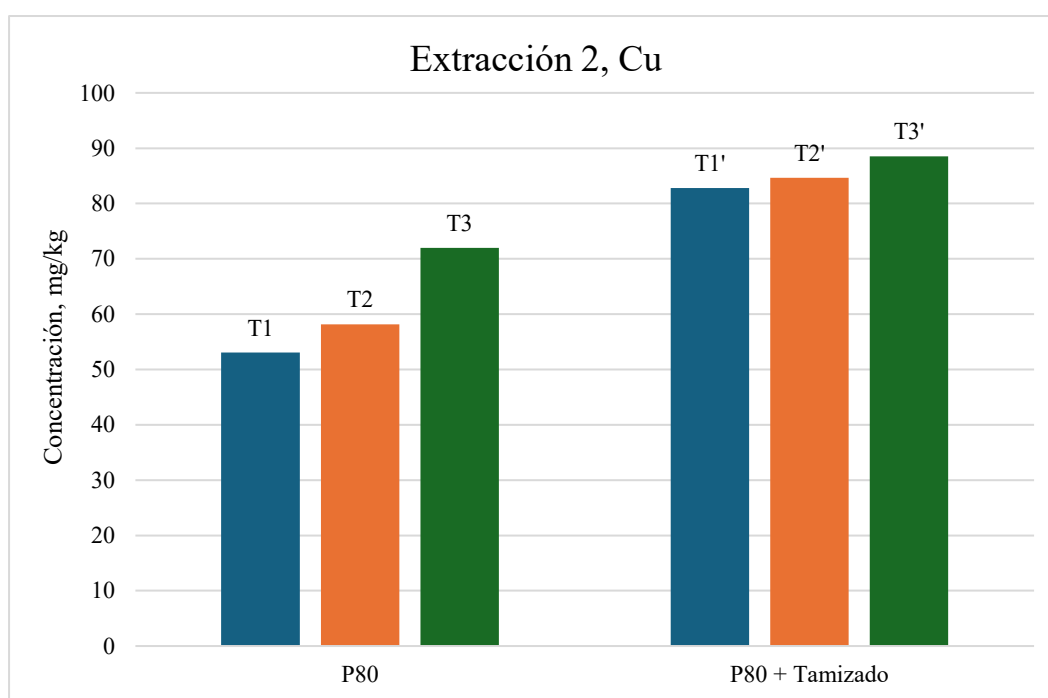


Figura 3. Concentración mg/kg de las muestras de P80 (T1, T2 y T3) y P80 + tamizado (T1', T2' y T3') 75 μ m, para la E2 del Cu

c. Fracción oxidable

Esta fracción identifica los metales asociados a la materia orgánica y a los sulfuros primarios y secundarios, en donde el procedimiento BCR extrae precisamente aquellas especies asociadas a sulfuros susceptibles de oxidación, estructuras críticas en relaves cupríferos. La fase oxidable constituye la matriz dominante para el cobre para las tres muestras analizadas. Los valores registran un 47.9% para T1', 51.7% en T2' y 51.5% T3'. En términos de la geoquímica del metal, este se encuentra ligado a especies sulfuradas, susceptible a liberarse

en escenarios de oxidación prolongada (exposición a la humedad y oxígeno) para meteorizar la matriz de azufre y liberar el metal, en los depósitos de relaves.

Al contrastar estos datos con su muestra original, se tiene un 69,4% para T1, 71,6% en T2 y un 65,4% en T3. Si bien se evidencia un mayor porcentaje en las granulometrías originales que en las finas, esto no implica una menor presencia en la asociación de materia orgánica y sulfuros. Por el contrario, al incrementar el área superficial específica de la partícula, el cobre queda más expuesto y disponible, y una mayor proporción del cobre es extraída durante las primeras etapas del procedimiento, reduciendo proporcionalmente la participación de la fracción oxidable. Esto demuestra que la reducción de la granulometría actúa como un factor determinante que distribuye el metal hacia fases más lábiles, lo que a su vez favorece los procesos de recuperación metalúrgica, al disminuir la proporción del metal en las fases blindadas, un aspecto relevante en este trabajo en la revalorización del cobre en los relaves mineros sulfurados.

Asimismo, en la Figura 4, para las muestras originales (P80) se obtienen resultados de concentraciones mayores que van desde 1102.3 mg/kg a 1850.8 mg/kg, mientras que las muestras tamizadas van desde 499.5 mg/kg a 737.8 mg/kg. Este descenso no significa que el tamizado haya sido ineficaz, al contrario, se modifica la eficiencia de extracción del procedimiento BCR y una mayor proporción del cobre es recuperada en la fase más lábil (ácido soluble), disminuyendo la cantidad de metal extraída posteriormente en la fracción oxidable. Este comportamiento pone de manifiesto la influencia de la granulometría sobre la distribución operacional del cobre y resalta la importancia de estandarizar el tamaño de partícula cuando se comparan resultados obtenidos mediante extracción secuencial.

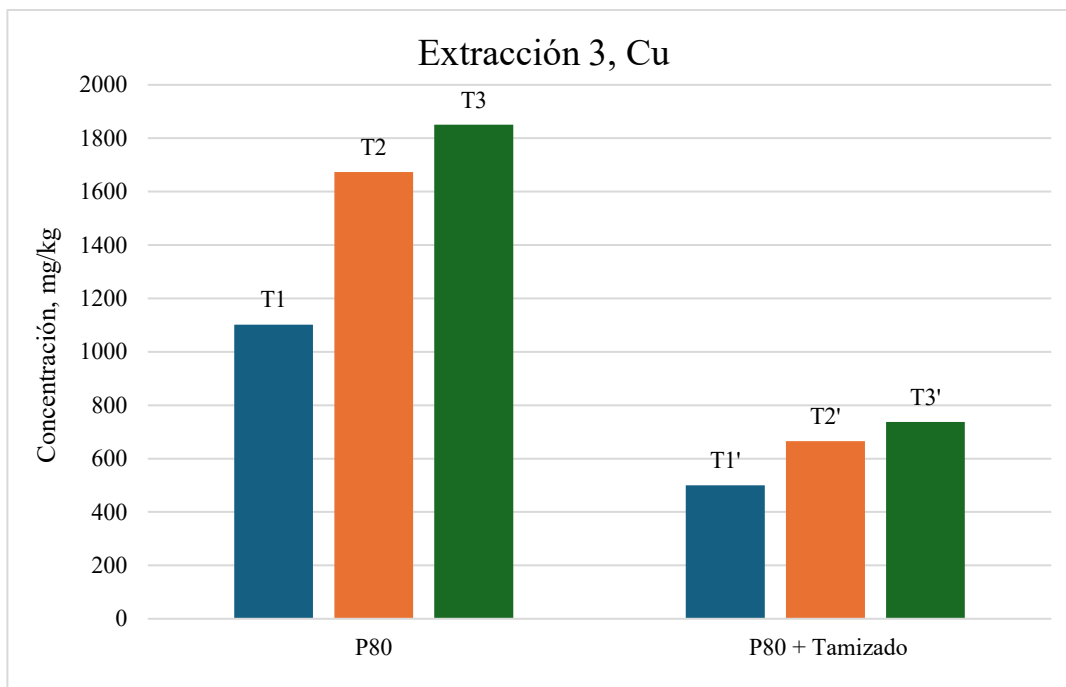


Figura 4. Concentración mg/kg de las muestras P80 (T1, T2 y T3) y P80 + tamizado (T1', T2' y T3') bajo 75 μ m, para la E3 del Cu

d. Fracción residual

El cobre retenido en las redes cristalinas de silicatos, determinado mediante la digestión ácida fuerte con el método EPA 3050B, registra valores mínimos en la fracción fina siendo de 4.2% para T1', 4.8% en T2' y 4.6% en T3', estos resultados indican que sólo una pequeña fracción del cobre permanece asociada a minerales de elevada estabilidad química, y se confirma que prácticamente la totalidad del cobre contenido en la fracción bajo 75 μ m es extraído durante las etapas previas del procedimiento BCR.

Comparativamente, los resultados de las muestras originales registran valores mayores en esta fase, con un 14,6% en T1, 18,9% en T2 y 22,4% en T3. Esta diferencia de porcentajes se debe al efecto del tamaño de partícula, en donde se provoca una modificación en la forma en que los metales se encuentran expuestos a los reactivos químicos utilizados durante la extracción secuencial. Dado que el cobre permanece encapsulado dentro de la ganga de silicatos, al disminuir la granulometría (< 75 μ m) esta barrera física se rompe permitiendo atacar químicamente al metal. Así mismo, en la Figura 5 se observar una drástica disminución en las concentraciones máscas, las cuales descienden desde un rango de 231.3 mg/kg – 630.7 mg/kg en las muestras originales (P80), hasta un rango de apenas 61.3 mg/kg a 73.3 mg/kg

en las muestras tamizadas. Este marcado descenso demuestra la alta efectividad del tamizado, donde una mayor proporción del cobre es extraída durante las etapas iniciales del procedimiento, reduciendo la cantidad de metal recuperada mediante digestión residual. Además del marcado descenso en la concentración, se observa una notable convergencia entre las tres muestras tamizadas, lo que sugiere que la estandarización granulométrica reduce la variabilidad asociada al tamaño de partícula y homogeneiza la respuesta del procedimiento de extracción secuencial.

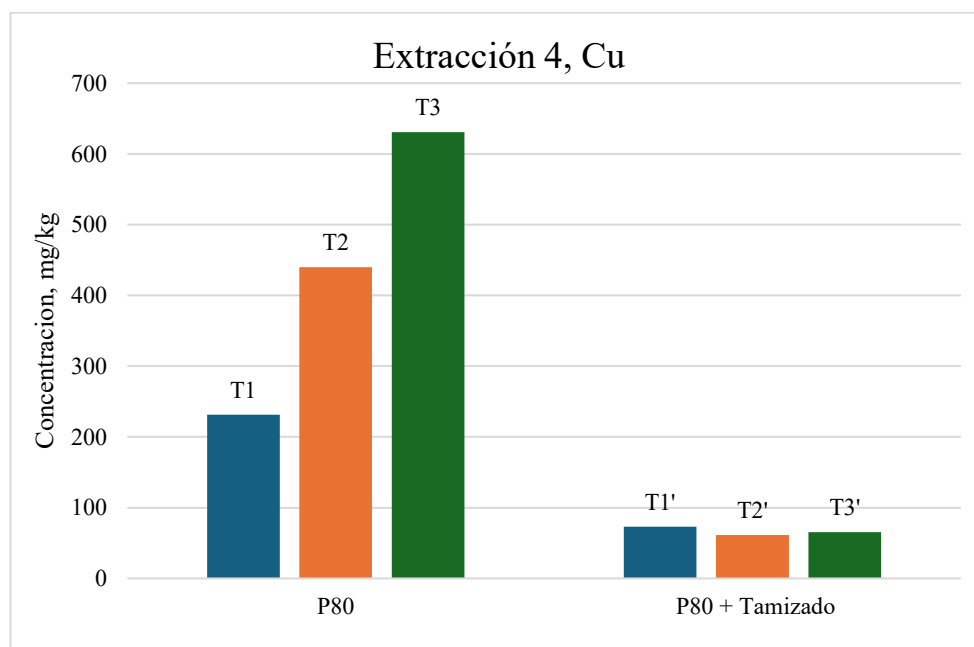


Figura 5. Concentración mg/kg de las muestras de P80 (T1, T2 y T3) y P80 + tamizado (T1', T2' y T3') bajo 75 μ m, para la E4 del Cu

En conjunto, los resultados demuestran que la reducción del tamaño de partícula ejerce una influencia significativa sobre la distribución operacional del cobre determinada mediante el método BCR. El incremento observado en las fracciones ácido soluble y, en menor medida, reducible, junto con la disminución de las fracciones oxidable y residual, indica que el tamizado incrementa la accesibilidad de los reactivos extractantes a las fases minerales portadoras de cobre. En consecuencia, la granulometría constituye un factor metodológico crítico que debe estandarizarse para garantizar la comparabilidad de los resultados de extracción secuencial y evitar interpretaciones erróneas sobre la movilidad potencial del metal.

5.1.2. Distribución del hierro (Fe)

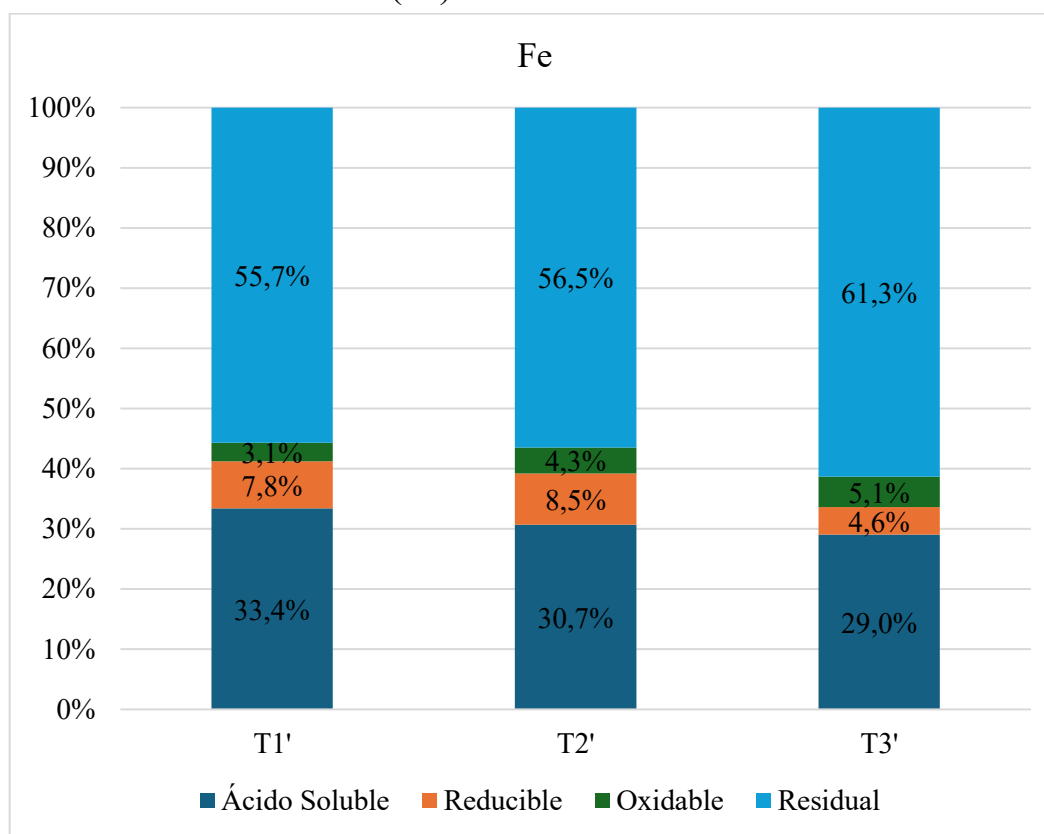


Figura 6. Distribución porcentual del hierro en cada fracción operacional del BCR y Residual

En la Figura 6 se visualizan los porcentajes de participación de cada fracción operacional del método BCR y la fracción residual para el hierro. Los resultados del fraccionamiento evidencian una alta presencia en la fracción residual (E4), seguida de la fracción ácido soluble (E1), y con participaciones minoritarias en las fases oxidables (E3) y reducibles (E2). Esta distribución indica que la mayor parte del hierro puede estar asociado a minerales estructuralmente estables (fracción residual), tales como silicatos, óxidos cristalinos de Fe y fases minerales que no son atacadas durante las primeras etapas del procedimiento BCR, cuya liberación requiere condiciones mucho más agresivas que las utilizadas durante la extracción secuencial, disminuyendo su disponibilidad geoquímica inmediata y, por lo tanto, reduciendo su potencial de liberación bajo condiciones ambientales naturales.

En términos de masa absoluta, la concentración del hierro recuperado en la suma de las extracciones es extremadamente bajo, registrando 61.4 (mg/kg) en T1', 62.5 (mg/kg) en T2' y 74.7 (mg/kg) en T3'. Estos resultados indican que la fracción menor a 75 μm concentra una cantidad significativamente menor de hierro respecto del material original, lo que sugiere que

una parte importante de los minerales portadores de hierro permanece asociada a las fracciones granulométricas más gruesas.

A diferencia del cobre, cuya fracción dominante corresponde a la fase oxidable, el hierro permanece mayoritariamente asociado a la fracción residual, indicando una estabilidad geoquímica considerablemente mayor frente al procedimiento de extracción secuencial.

a. Fracción ácido soluble (E1)

Los resultados de la fracción ácido soluble para el hierro presentan el segundo porcentaje mayoritario de las cuatro fases, se registran valores de 33.4% para T1', 30.7% para T2' y un 29.0% para T3'. Mediante estos valores se evidencia, en el escenario de los finos, que el hierro remanente pasa a ser dominado por las formas ácido soluble, que son fases susceptibles de movilización bajo condiciones de acidificación, tales como carbonatos, minerales secundarios o fases superficialmente alteradas, como consecuencia su liberación se ve favorecida en escenarios de acidificación del medio en el que se encuentra.

Al contrastar estos resultados con el de las granulometrías originales, sin tamizar, se tienen valores de 0,9% para T1, 0,5% para T2 y 0,7% para T3. Esta enorme diferencia en cuanto a la participación del Fe se explica por el efecto del tamizado del relave, en el mineral grueso original, el hierro podría encontrarse ocluido dentro de fases minerales de mayor tamaño, por lo que, con la remoción de estos fragmentos gruesos, con la aplicación del tamizado bajo 75 μm , se incrementaría el área superficial específica de las partículas. Esto provoca que el escaso hierro presente en la fracción fina quede expuesto, tornándose potencialmente móvil en esta fase.

Así mismo, desde una perspectiva más profunda para comprender esto, en la Figura 7 se ilustra el contraste en términos másicos. Las muestras del relave bruto original (P80) registran un rango de concentraciones de hierro entre 86.1 mg/kg a 101.2 mg/kg, mientras que las fracciones tamizadas registran valores menores, entre 20.5 mg/kg a 44.7 mg/kg. A pesar de que los valores porcentuales son mayores, en términos másicos se tiene que las fracciones finas disminuyen su concentración a menos de la mitad, demostrando nuevamente la alta efectividad del tamizado, el cual logra descartar preferencialmente el mineral grueso. Por lo tanto, aunque la fracción E1 aumenta su participación porcentual en las muestras tamizadas,

la cantidad absoluta de hierro disminuye considerablemente. Esto evidencia que el proceso de tamizado no incrementa la concentración total de Fe móvil, sino que modifica su distribución geoquímica relativa, favoreciendo la representación de fases más fácilmente extraíbles dentro del material fino remanente.

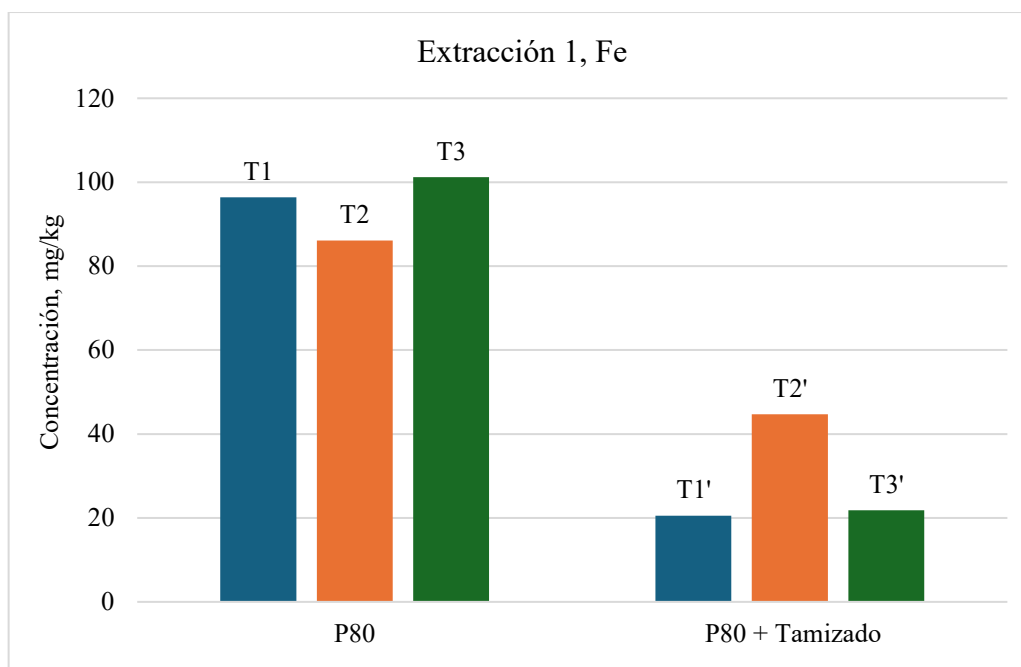


Figura 7. Concentración mg/kg de las muestras de P80 (T1, T2 y T3) y P80 + tamizado (T1', T2' y T3') bajo 75 μ m, para la E1 del Fe

b. Fracción Reducible (E2)

En la fracción reducible, los resultados porcentuales de hierro registran un 7.8% para T1', 8.5% para T2' y 4.6% en T3'. Mediante estos valores, se evidencia que el Fe no es un componente principal en esta fracción, especialmente en comparación con las etapas 1 y 4. Esto indica que la asociación de las fases de hierro a oxihidróxidos de Fe y Mn es minoritaria en la matriz fina del relave. A su vez, desde una perspectiva geoquímica ambiental, resulta relevante esta fase debido a la capacidad de estos oxihidróxidos de capturar metales trazas previamente retenidos, debido a que pueden ser potencialmente liberados bajo condiciones de reducción.

Por otro lado, al contrastar con las granulometrías originales, se registran valores de 6,1% para T1, 3,5% para T2 y 4,1% para T3. Evidenciando una tendencia baja y similar en ambos casos; permitiendo concluir que la reducción de tamaño de partícula no es un factor que altere

la distribución del Fe en esta fase, sino que en formas reducibles su tendencia es baja. A su vez, en términos másicos la Figura 8 muestra el marcado efecto del tamizado, sobre la concentración del Fe, fluctuando entre 563.1 mg/kg a 652.4 mg/kg en las muestras originales (P80). En contraparte, las muestras tamizadas, presentan una disminución masiva de la concentración, registrando valores marginales entre 3.4 mg/ kg a 5.3 mg/kg; esta reducción es superior al 99 %, demostrando la alta efectividad del descarte de la matriz gruesa por el tamizado. En consecuencia, la fracción menor a 75 μm contiene cantidades prácticamente residuales de hierro extraíble bajo condiciones reductoras, lo que explica la escasa contribución de esta fase al contenido total de hierro del material fino.

La granulometría modifica de manera distinta la distribución operacional de cada metal, dependiendo de su forma de ocurrencia mineralógica dentro del relave. El cobre permanece en la fracción fina y cambia su comportamiento operacional, aumentando la extracción en las fases más lábiles. El hierro, en cambio, se concentra preferentemente en las partículas gruesas y su contenido en la fracción fina disminuye drásticamente tras el tamizado.

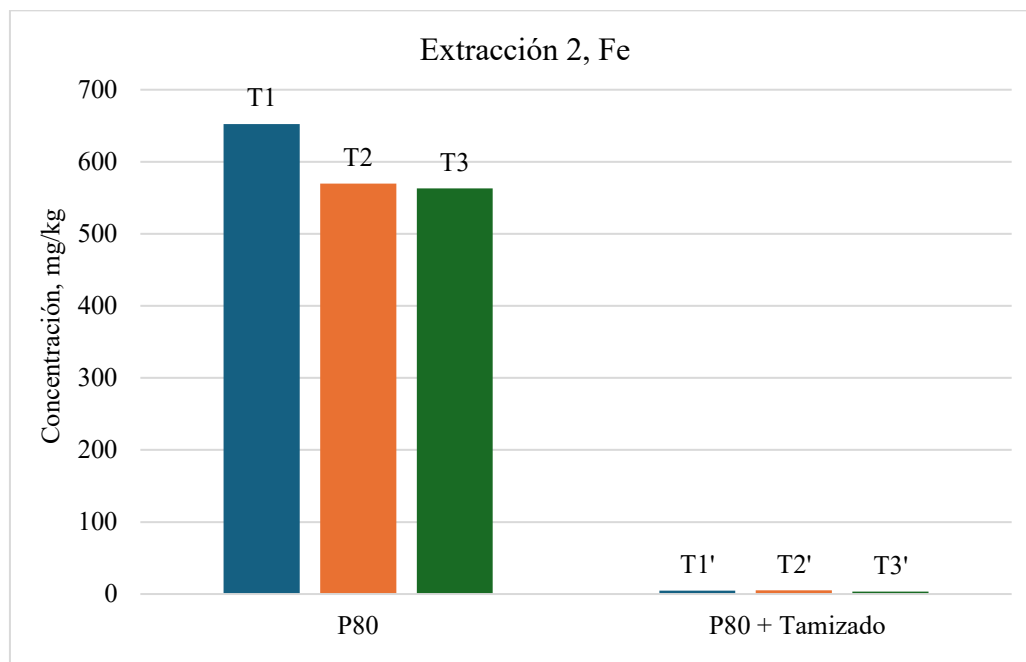


Figura 8. Concentración mg/kg de las muestras de P80 (T1, T2 y T3) y P80 + tamizado (T1', T2' y T3') bajo 75 μm , para la E2 del Fe

c. Fracción Oxidable (E3)

En la fase oxidable, asociada a metales ligados a materia orgánica y a fases sulfuradas como calcopirita y pirita, se registran los porcentajes más bajos, para T1' con un 3.4%, 4.3% en T2' y 5.1% para T3'. Estos valores permiten interpretar que el Fe remanente presente en la fracción fina no es susceptible a liberarse ante condiciones de oxidación, representando una ventaja ambiental al reducir el drenaje ácido de roca.

Al comparar con las muestras originales, se observa una marcada disminución de la concentración absoluta de hierro extraída durante esta etapa del procedimiento BCR. Las muestras originales sin tamizar reportan un 12,2% en T1, 8,9% en T2 y 6,1% para la muestra de T3. La Figura 9 muestra el gran impacto de la segregación física de las partículas finas, registrando valores en las muestras originales (P80), que oscilan entre 837.8 mg/kg y 1434.3 mg/kg, mientras que en las muestras tamizadas las concentraciones son prácticamente nulas, que varían apenas entre 1.9 mg/kg y 3.8 mg/kg. Estos resultados corroboran nuevamente la efectividad del tamizado resultando en niveles despreciables como en la Extracción 2.

Este comportamiento evidencia que los minerales portadores de hierro extraíbles en la fracción oxidable permanecen mayoritariamente asociados a las partículas de mayor tamaño, las cuales fueron removidas mediante el tamizado. En consecuencia, la fracción menor a 75 μm contiene cantidades muy reducidas de hierro susceptible de ser extraído en esta etapa del procedimiento, confirmando que la reducción granulométrica disminuye significativamente la presencia de hierro en las fases operacionales más reactivas.

Al comparar con el comportamiento del cobre, en el cual se observa que permanece en la fracción fina, el hierro por otro lado prácticamente desaparece de ella. Ese contraste es, un resultado muy importante ya que se logra demostrar de manera muy clara que la respuesta al tamizado depende del metal y de su forma de ocurrencia mineralógica.

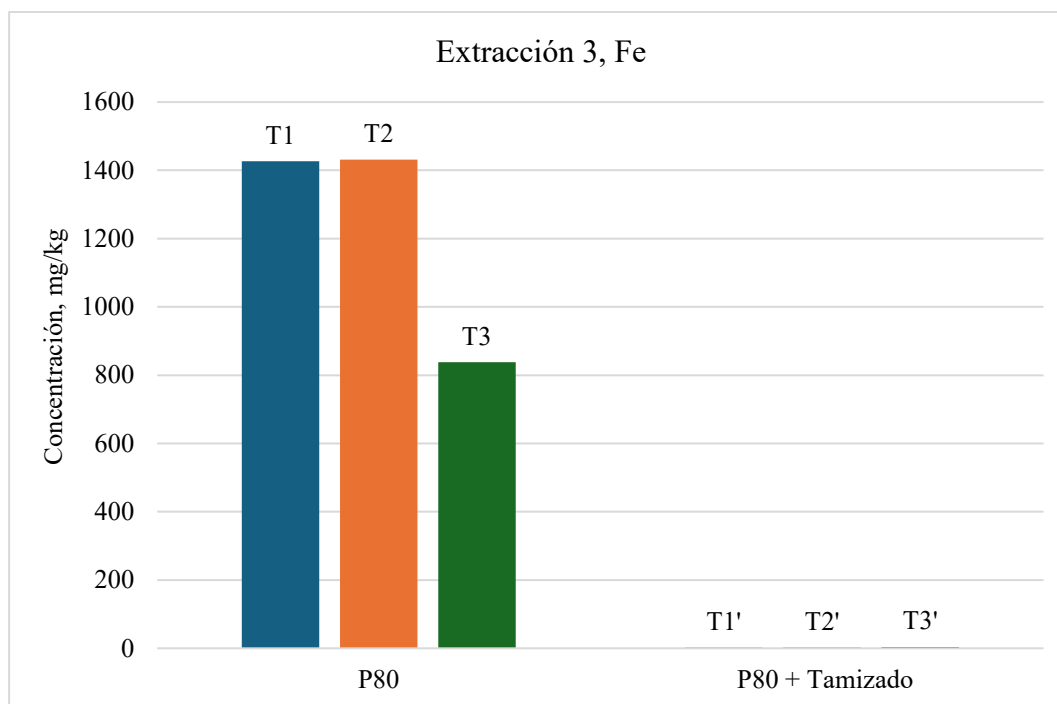


Figura 9. Concentración mg/kg de las muestras de P80 (T1, T2 y T3) y P80 + tamizado (T1', T2' y T3') bajo 75 μ m, para la E3 del Fe

d. Fracción residual (E4)

La fracción residual concentra la mayor participación del hierro en el sistema fino, siendo de un 55.7% (34.2 mg/kg) en T1', 56.5% (35.3 mg/kg) en T2' y 61.3% (45.8 mg/kg) para T3'. Mediante estos resultados se evidencia la alta predominancia del hierro en estructuras de mayor estabilidad geoquímica, ligadas principalmente a redes cristalinas de silicatos y otras fases minerales.

De manera comparativa con las muestras originales de los relaves, se identifica una tendencia similar con lo obtenido en la fracción fina, se reportan un 81,4% para T1, 87,0% para T2 y 89,1% en T3, para las muestras originales. Además, tanto en muestras finas como en gruesas se evidencia un incremento hacia T2 y T3, permitiendo concluir que el hierro permanece predominantemente incorporado en minerales estructuralmente estables tanto en las muestras originales como en la fracción fina (bajo 75 μ m).

Por otra parte, al examinar el comportamiento másico, la Figura 10 ilustra el drástico impacto del tamizado sobre la concentración absoluta de hierro en la fracción residual. En el relave bruto (P80), la fase residual constituye la mayor parte del hierro, albergando concentraciones

masivas que fluctúan entre los 9467.3 mg/kg a 13870.7 mg/kg (con 12107.3 mg/kg en T3). Por otro lado, las fracciones finas registran valores marginales que oscilan entre 34.2 mg/kg y 45.8 mg/kg. Esta disminución demuestra que la mayor parte del hierro retenido en fases minerales de elevada estabilidad permanece asociada a las partículas de mayor tamaño, las cuales fueron separadas durante el tamizado. En consecuencia, la fracción menor a 75 μm contiene sólo una cantidad muy reducida de hierro residual.

Desde una perspectiva geoquímica ambiental, aunque el hierro presenta una baja movilidad propia que, desde una perspectiva ambiental, la estabilidad constituye un factor favorable, su comportamiento controla en gran medida la evolución geoquímica del depósito y la disponibilidad de otros elementos traza potencialmente contaminantes.

En conjunto, los resultados obtenidos para el hierro evidencian un comportamiento significativamente distinto al observado para el cobre. Mientras el cobre permanece concentrado en la fracción fina y el tamizado modifica su distribución operacional dentro del procedimiento BCR, el hierro se encuentra mayoritariamente asociado a partículas de mayor tamaño, las cuales son eliminadas durante el tamizado. Como consecuencia, la fracción menor a 75 μm presenta concentraciones muy reducidas de hierro en todas las etapas del fraccionamiento secuencial, manteniéndose únicamente el predominio relativo de la fracción residual. Este comportamiento confirma que la influencia de la granulometría sobre la extracción secuencial depende de la forma de ocurrencia mineralógica de cada metal dentro del relave

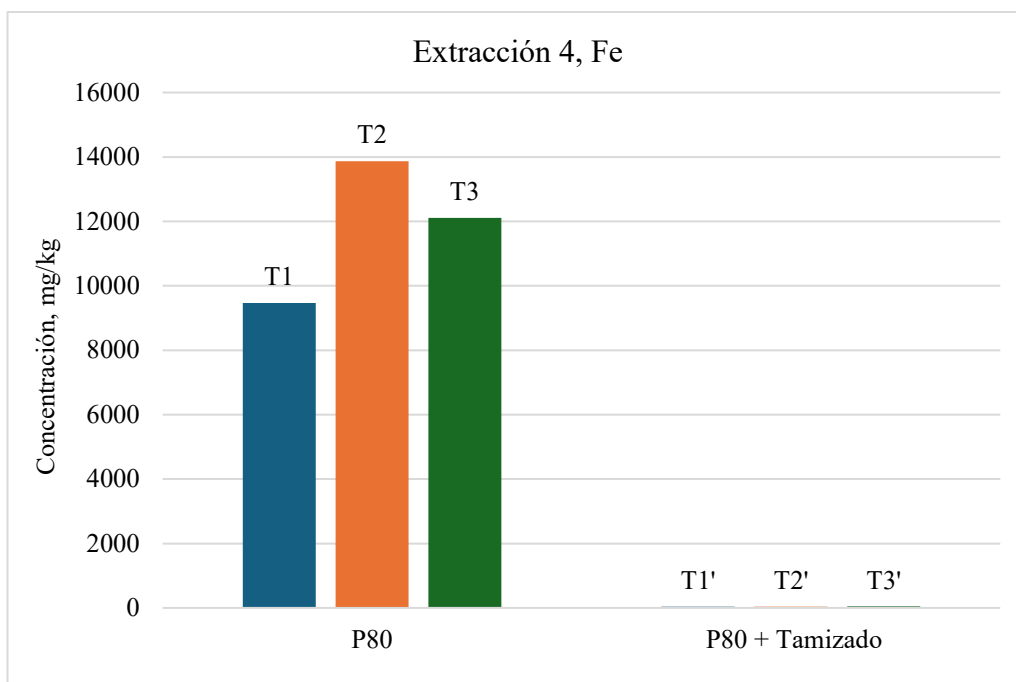


Figura 10. Concentración mg/kg de las muestras P80 (T1, T2 y T3) y P80 + Tamizado (T1', T2' y T3') bajo 75 μ m, para la E4 del Fe

5.1.3. Distribución del zinc (Zn)

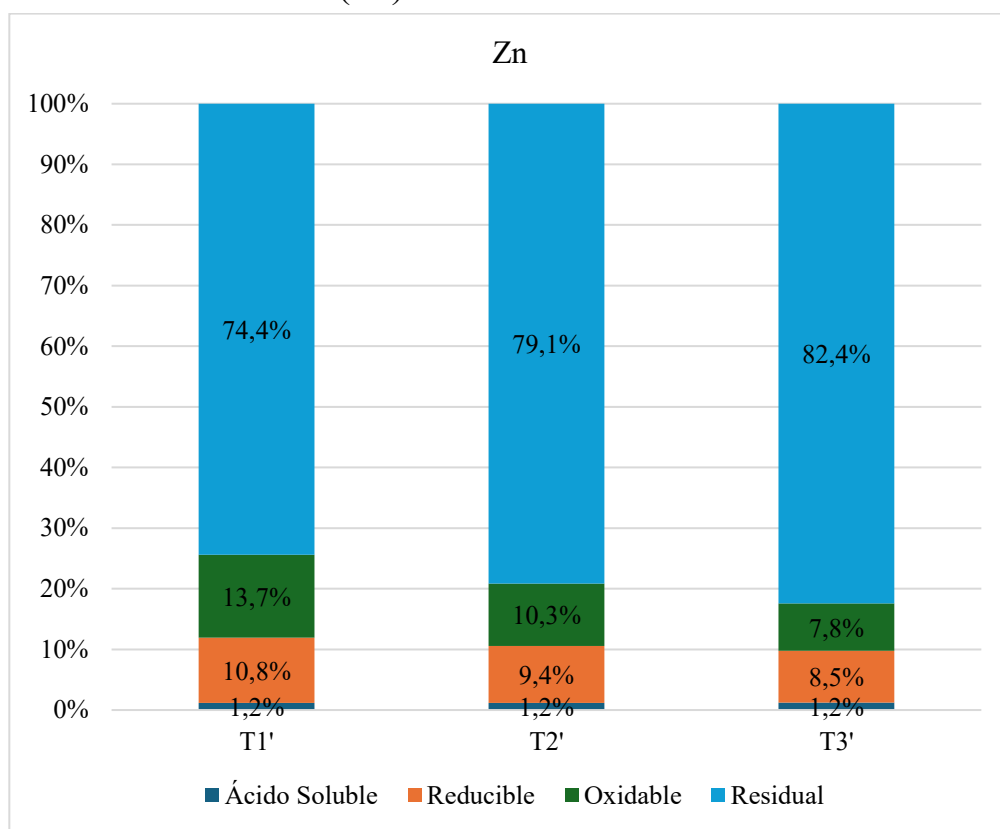


Figura 11. Distribución porcentual del zinc en cada fracción operacional del BCR y Residual

En la Figura 11, se presentan las distribuciones porcentuales para el zinc, obtenidas en el procedimiento de extracción BCR, y para la fase residual mediante el método EPA 3050B.

Se observa una alta presencia del zinc en la fracción residual (E4), con participaciones de 74,4 %, 79,1 % y 82,4 % para T1', T2' y T3', respectivamente. En segundo lugar, se encuentra la fracción oxidable (E3), cuyos porcentajes disminuyen desde 13,7 % en T1' hasta 7,8 % en T3'. Observándose una disminución progresiva de la fracción oxidable acompañada por un incremento de la fracción residual desde T1' hasta T3', lo que sugiere que las muestras derivadas de materiales más gruesos presentan una mayor proporción de zinc asociado a minerales estructuralmente estables. La fracción reducible (E2) presenta una participación relativamente constante entre 8,5 % y 10,8 %, mientras que la fracción ácido soluble (E1) registra únicamente un 1,2 % en las tres muestras. Esta distribución indica que el zinc se encuentra en minerales con mayor estabilidad química, limitando su disponibilidad inmediata frente a condiciones fisicoquímicas, este comportamiento es consistente con relaves sulfurados, donde el zinc suele encontrarse asociado a minerales como la esfalerita (ZnS)

cuya oxidación ocurre más lentamente que la de otros sulfuros. En consecuencia, la mayor parte del metal permanecería inmovilizada mientras no ocurran procesos intensos de meteorización o alteración mineralógica capaces de afectar las fases cristalinas que lo contienen.

a. Fracción ácido soluble (E1)

La primera fase correspondiente al ácido soluble registra una participación idéntica del 1,2% en las tres granulometrías finas. Estos porcentajes de participación indican que el metal no es propenso a liberarse de forma inmediata, indicando que sólo una pequeña proporción del zinc total se encuentra operacionalmente asociada a esta fase. Por otro lado, al contrastar los datos con los perfiles originales sin tamizar, se observa una diferencia importante entre los resultados, siendo de 30,1% para T1, 26,9% para T2 y 32,6% para T3. Para comprender estas diferencias la Figura 12 expone las concentraciones de las muestras, evidenciando una lógica similar al hierro, en este caso se posee una cantidad másica significativamente mayor en la fracción tamizada que en la bruta. Las muestras originales registran valores bajos entre 5.7 mg/kg y 6.8 mg/kg, mientras que para las fracciones finas se obtiene un aumento muy importante en las concentraciones que van desde 106.5 mg/kg a 118.3 mg/kg. Este comportamiento permite concluir que el tamizado genera un efecto de una mayor extracción del Zn durante la primera etapa, que corresponde a una fracción lábil, gracias al incremento del área superficial específica. De este modo, aunque represente únicamente el 1.2% de la distribución, esto se debe a que la masa de zinc total se concentra de forma mayoritaria en otras fases operacionales.

Este resultado pone de manifiesto la importancia de interpretar conjuntamente las distribuciones porcentuales y las concentraciones absolutas. Mientras los porcentajes reflejan la participación relativa de cada fracción dentro del contenido total del metal, las concentraciones permiten evaluar la cantidad efectivamente extraída en cada etapa del procedimiento BCR. El análisis combinado de ambos parámetros evita interpretaciones erróneas sobre la movilidad potencial y el efecto de la granulometría.

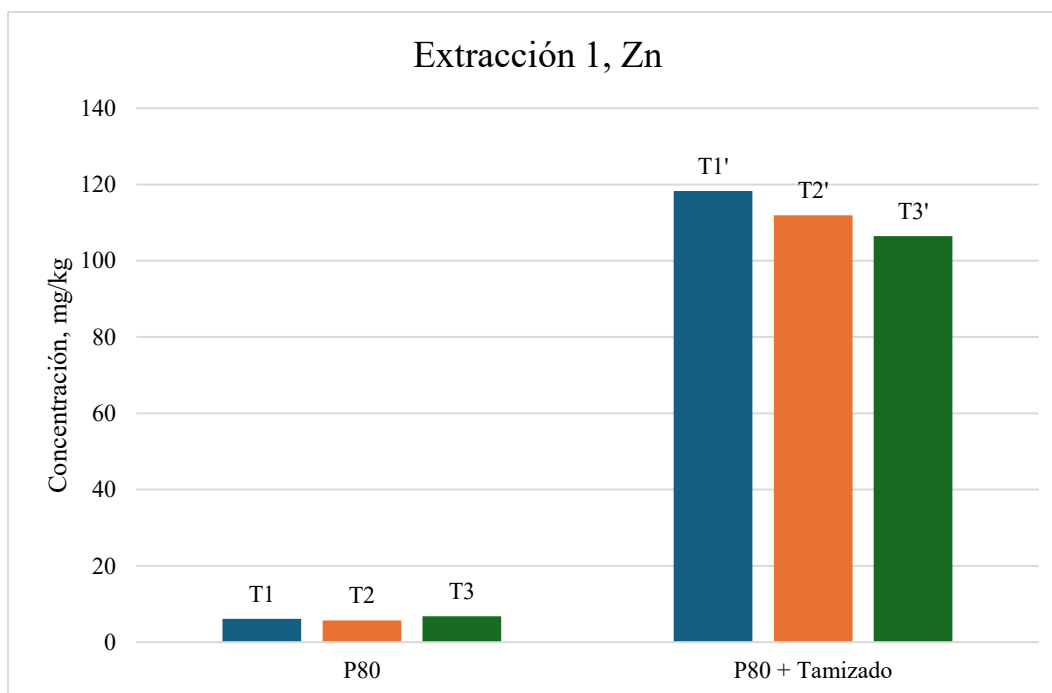


Figura 12. Concentración mg/kg de las muestras de P80 (T1, T2 y T3) y P80 + tamizado (T1', T2' y T3') bajo 75 μ m, para la E1 del Zn

b. Fracción reducible (E2)

La fase reducible presenta valores de 10.8% para T1', 9.4% para T2' y 8.5% para T3'. Es la tercera fase con mayor participación en las distribuciones, lo que indica que sólo una fracción limitada del zinc fue extraída en la fase reducible del procedimiento BCR, asociada operacionalmente a óxidos e hidróxidos de Fe y Mn. Estas asociaciones pueden adquirir relevancia ambiental cuando se producen procesos de reducción que favorecen la disolución de dichas fases.

En una comparativa con las muestras originales, se tienen 7,1% para T1, 5,4% para T2 y 7,0% para T3, observándose una tendencia similar en cuanto a bajos porcentajes, aunque en muestras finas resulta un poco más elevada debido al aumento del área superficial; sin embargo, su participación relativa continúa siendo baja, por lo que la contribución de esta fracción a la movilidad potencial del zinc bajo condiciones reductoras sigue siendo limitada.

Asimismo, para comprender este comportamiento, la Figura 13 ilustra un incremento muy importante en la magnitud de la masa. Mientras que las muestras originales brutas (P80) oscilan entre 1.4 mg/kg a 1.7 mg/kg, las fracciones finas incrementan sus valores hacia un

rango de 731.2 mg/kg a 1095.5 mg/kg. Este fenómeno corrobora el efecto del tamizado bajo 75 μm , incrementando significativamente la cantidad de zinc recuperada durante la extracción reducible, probablemente debido al aumento del área superficial específica y a la mayor accesibilidad del reactivo a las superficies minerales expuestas tras el tamizado. A pesar de este importante incremento en la concentración absoluta, su bajo porcentaje sobre el total del sistema (inferior al 11 %) confirma la baja participación ante escenarios de reducción, tal como se menciona anteriormente.

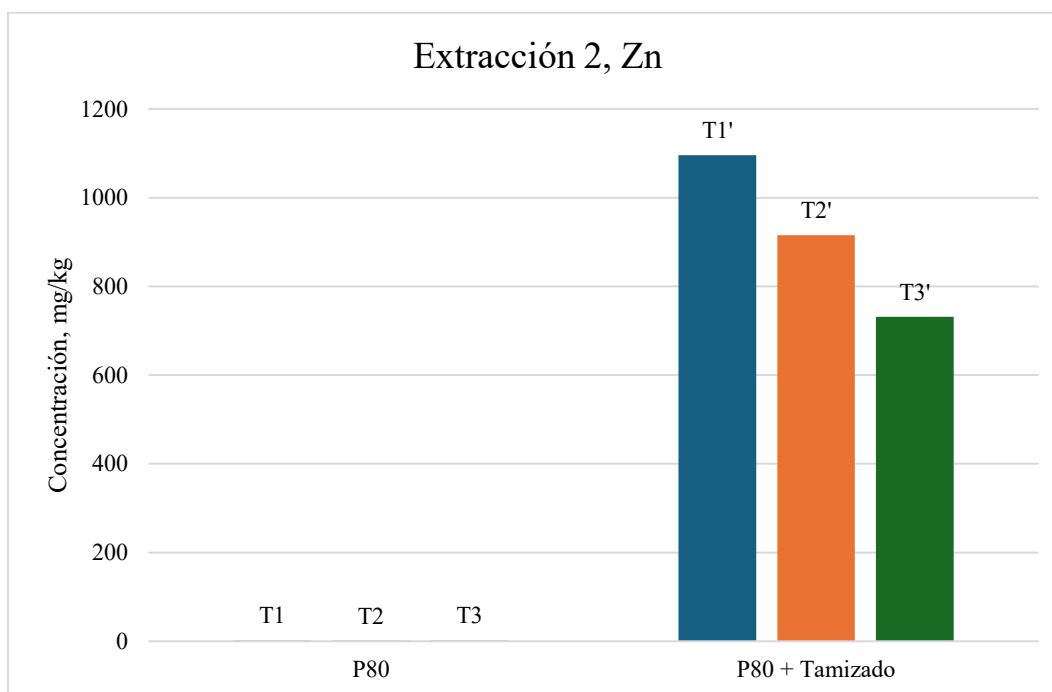


Figura 13. Concentración mg/kg de las muestras de P80 (T1, T2 y T3) y P80 + tamizado (T1', T2' y T3') bajo 75 μm , para la E2 del Zn

c. Fracción oxidable (E3)

En la fracción oxidable se obtuvieron resultados de 13.7% para T1', 10.3% para T2' y 7.8% para T3'. Al igual que en la fase reducible, estos valores demuestran que sólo una fracción limitada del zinc se encuentra operacionalmente asociada a materia orgánica y sulfuros susceptibles de oxidación. Sin embargo, en el ámbito ambiental se debe tomar en consideración ante potenciales cambios de oxidación prolongada en los relaves, ya que esta fracción podría contribuir a la liberación gradual de zinc hacia el medio.

Comparativamente, las muestras originales sin tamizar se muestran tendencias bajas similares en cuanto a su porcentaje de participación, registrando valores de 6,6% en T1, 7,5% en T2 y 12,8% en T3. A su vez, la Figura 14 expone un análisis de masa para esta fase, con valores marginales en las muestras originales (P80) que oscilan entre 1.7 mg/kg y 2.9 mg/kg, mientras que las fracciones finas se disparan a rangos entre 671.8 mg/kg y 1200.2 mg/kg. De esta manera se observa que el efecto del tamizado bajo 75 μ m incrementa la cantidad de zinc extraída durante la tercera etapa del procedimiento BCR. Se concluye que el zinc, aunque presenta una baja participación porcentual ante escenarios de oxidación, una porción puede ser movilizada, ya que la oxidación progresiva de minerales sulfurados o procesos intensos de meteorización pueden favorecer su liberación a largo plazo.

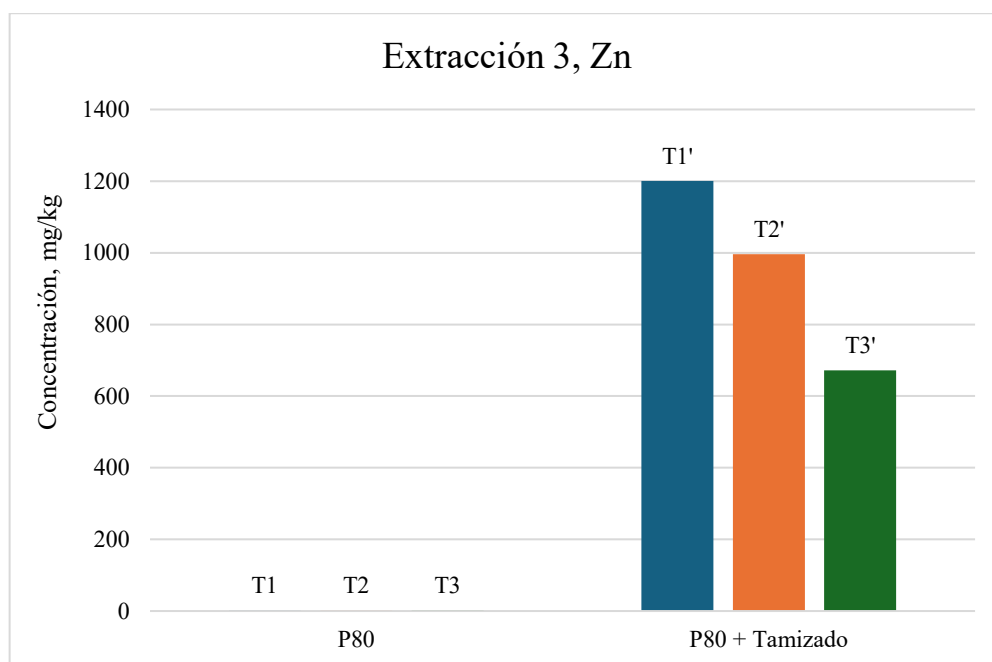


Figura 14. Concentración mg/kg de las muestras de P80 (T1, T2 y T3) y P80 + tamizado (T1', T2' y T3') bajo 75 μ m, para la E3 del Zn

d. Fracción residual

La fracción residual evaluada mediante la digestión ácida fuerte EPA 3050B, representa el zinc retenido principalmente en minerales de elevada estabilidad geoquímica, asociados a redes cristalinas de silicatos y otras fases minerales resistentes. En esta fase se presenta el mayor porcentaje de participación de todo el sistema aproximadamente el 80% de la distribución total, los resultados indican un 74.4% para T1', 79.1% para T2' y un 82.4% para T3'. Desde una perspectiva ambiental positiva, se demuestra una baja movilidad inmediata del Zn dado que la mayor parte se encuentra encapsulada.

Comparativamente, en las muestras originales sin tamizar se observan tendencia equitativa en cuanto a las granulometrías, con un 56,3% para T1, 60,2% para T2, y 47,6% para T3. Aunque las proporciones porcentuales parecen mantener un orden de magnitud similar entre ambos escenarios granulométricos, la diferencia se observa en la Figura 15, que expone con mayor profundidad como el metal se concentra mayoritariamente en esta fase. El relave original presenta concentraciones que oscilan entre 8.9 mg/kg y 11.2 mg/kg en esta etapa, evidenciando una recuperación muy baja de zinc durante la digestión residual en comparación con las muestras tamizadas.

Por otra parte, el zinc presente en las fracciones finas aumenta drásticamente su concentración hacia un rango entre 7070.7 mg/kg y 7543.3 mg/kg (con un máximo alcanzado de 7680 mg/kg en T2). Este comportamiento puede atribuirse a la acumulación preferencial de minerales portadores de Zn en partículas finas y a una mayor exposición de las superficies minerales durante la digestión residual, ya que las muestras menores a 75 μm presentan concentraciones muy superiores de zinc en la fracción residual. No obstante, dado que en este escenario el zinc se encuentra encapsulado en la matriz de silicatos, lo que indica que el zinc permanece predominantemente asociado a fases minerales de elevada estabilidad, desde una perspectiva ambiental, su movilización sólo sería esperable bajo procesos intensos de alteración mineralógica o meteorización prolongada.

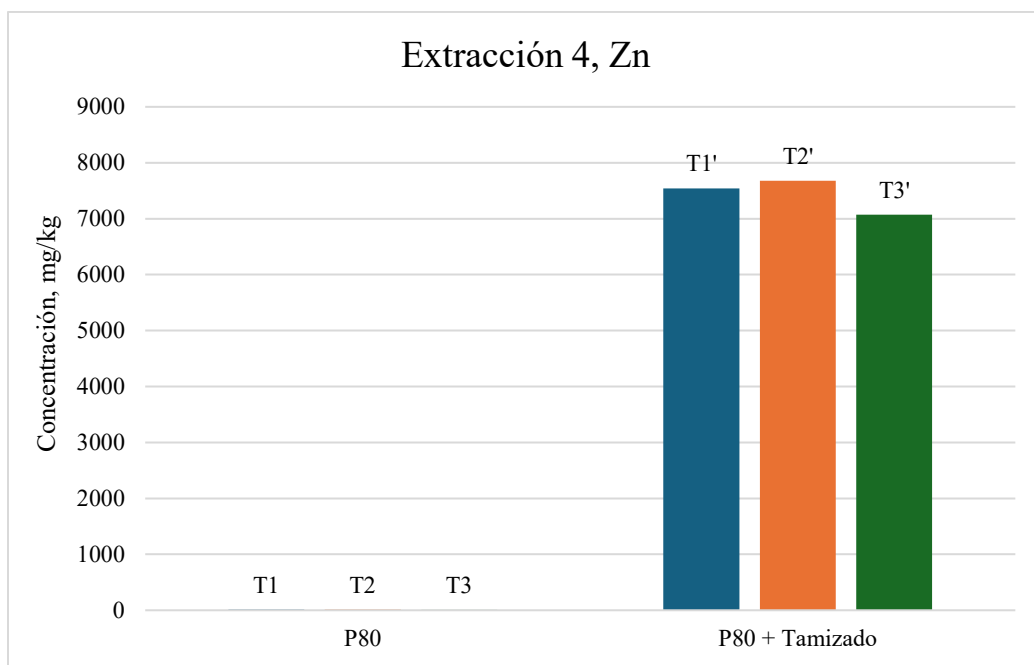


Figura 15. Concentración mg/kg de las muestras de P80 (T1, T2 y T3) y P80 + tamizado (T1', T2' y T3') bajo 75 μ m, para la E4 del Zn

5.2. Síntesis de la discusión

En función de lo discutido para los tres metales (Cu, Fe y Zn), el análisis comparativo evidencia cómo cada elemento presenta un comportamiento diferenciado al proceso de reducción de tamaño. El cobre es el metal que presenta el mayor incremento en la extracción de las fracciones operacionales más lábiles, evidenciando una mayor accesibilidad del reactivo extractante tras la reducción granulométrica, impulsado por su sensibilidad al aumento del área superficial específica. Por otro lado, el hierro muestra una reducción significativa en masa absoluta, manteniéndose predominantemente asociado a la fracción residual y presentando una mayor participación relativa de la fracción ácido soluble en las muestras finas, lo que refleja tanto su predominio en minerales de alta estabilidad química como su sensibilidad ante escenarios de disminución de pH. Finalmente, el zinc exhibe la mayor estabilidad geoquímica al concentrarse principalmente en la fase residual, lo que confirma su retención en matrices minerales estructuradas y poco alteradas. No obstante, la reducción granulométrica incrementó significativamente las concentraciones extraídas durante todas las etapas del procedimiento BCR. En conjunto, los resultados indican que el efecto principal no radica únicamente en la reducción granulométrica por sí misma, sino

también de la forma de ocurrencia y de la distribución operacional característica de cada metal dentro de la matriz del relave.

5.3. Concentración total mediante Método EPA 3050B

Con el propósito de verificar la consistencia del procedimiento de extracción secuencial BCR, y evaluar la existencia de posibles pérdidas de masa significativas o contaminación cruzada durante las etapas sucesivas del método, se realiza un balance de los tres metales Cu, Fe, y Zn. La concentración total recuperada se obtiene mediante la suma del esquema secuencial, fracción ácido soluble, reducible y oxidable, más la fracción residual realizada por el método EPA 3050B, para las tres muestras de relaves, según la Ecuación (1).

5.3.1. Discusión de recuperación y consistencia analítica

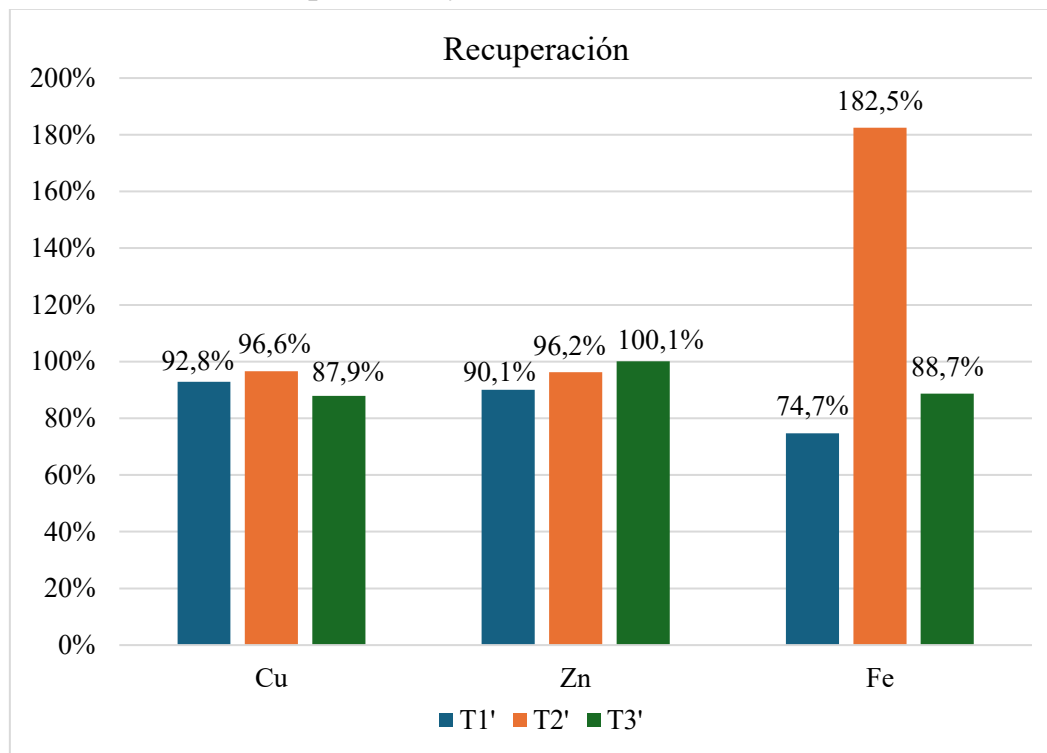


Figura 16. Recuperación (%) del Cu, Fe y Zn, para T1', T2' y T3', de las fracciones BCR y residual entre las concentraciones totales por digestión ácida

A partir de los resultados presentados en la Figura 16, se observa que la recuperación total de los metales evaluados (Cu, Fe y Zn) se sitúa en un rango de 74.7% a 182.5%. Si bien idealmente la recuperación debería aproximarse al 100%, valores superiores o inferiores pueden atribuirse a la incertidumbre analítica acumulada durante las etapas de extracción, digestión y cuantificación instrumental. En términos generales, el cobre y zinc muestran una

consistencia robusta con tendencias estables, mientras que en el caso del Fe se observa una marcada anomalía en T2'. Al evaluar esto, es fundamental considerar que el método BCR contempla extracciones operacionales sucesivas, mientras que el protocolo EPA 3050B constituye una digestión ácida de carácter pseudo-total ya que, según lo indicado en el procedimiento, no logra una disolución absoluta de la matriz de silicatos.

Para el Cu, se registra una recuperación promedio de 92.4% entre las moliendas tamizadas bajo 75 μm . La recuperación más baja se presenta en T3' con un 87.9%, el más alto con un 96.6% en T2' y un valor intermedio para T1' con un 92.8%. Estas leves fluctuaciones se pueden asociar a las pequeñas pérdidas de muestra durante la manipulación experimental de las extracciones y en la digestión ácida fuerte; no obstante, no representan desviaciones críticas y validan la consistencia en este metal de mayor interés económico dentro del relave.

Por otro lado, el Fe presenta recuperaciones de 74.7% para T1', 182.5% en T2' y 88.7% para T3', con un promedio de 115.3%. Este promedio se encuentra fuertemente sesgado por lo obtenido en T2', el cual evidencia una desviación significativa respecto del valor teórico esperado. Esta anomalía se puede atribuir a una variabilidad analítica en los resultados de las concentraciones totales, debido a las bajas concentraciones determinadas para este metal en la digestión ácida. Además, es importante destacar que el tamizado provocó una disminución sustancial del Fe en todas las fases operacionales, así como en la residual, que es donde se encuentra mayoritariamente este metal. Al encontrarse en concentraciones muy bajas provoca que cualquier mínima variación en la lectura afecte la recuperación porcentual. Debido a esto, se debe tener presente la necesidad de un aumento en las réplicas, dado que las concentraciones totales representan únicamente a duplicados, limitando una robustez analítica.

En el caso del Zn, se obtuvo una recuperación promedio de 95.5% con un mínimo para T1' de 90.1%, una recuperación intermedia de 96.2% para T2' y una recuperación máxima de 100,1% para T3'. En este último caso, se observa un buen cierre del balance que indica una excelente concordancia entre la suma de las fracciones operacionales y la concentración total determinada mediante EPA 3050B.

En términos generales, las recuperaciones obtenidas para Cu y Zn, cercanas al 100 %, evidencian una adecuada consistencia del procedimiento de extracción secuencial y del

balance de masa realizado. La desviación observada para el Fe corresponde a un caso puntual, asociado probablemente a la elevada incertidumbre analítica derivada de las bajas concentraciones determinadas en la fracción fina, por lo que no compromete la validez general de la metodología aplicada.

5.3.2. Discusión comparativa de recuperación de T1 para P80 (T1) y P80 + tamizado (T1') bajo 75 μm

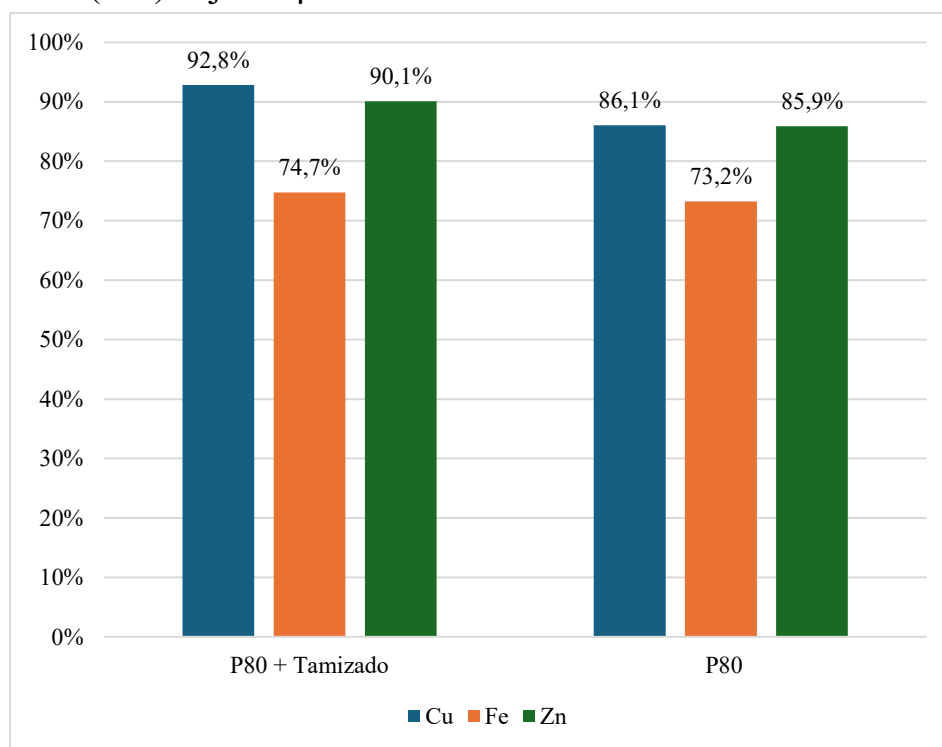


Figura 17. Comparativa de recuperación de T1, entre los P80 ($T1 = 147 \mu\text{m}$) de las muestras originales y P80 + tamizado ($T1'$) bajo $75 \mu\text{m}$

La Figura 17 compara la recuperación global de la muestra T1, contrastando la muestra original bruta (P80 $T1 = 147 \mu\text{m}$) y la fracción tamizada ($T1'$) bajo $75 \mu\text{m}$. Para el caso de la muestra tamizada, se observa una recuperación promedio de 85.9%, mientras que para las muestras originales se registra un promedio de 81.7%. En ambos casos se observa un comportamiento consistente entre los tres metales analizados.

En términos generales, se evidencia un incremento de la recuperación analítica para todos los metales analizados, al aplicar el tamizado. Para el Cu se registra un aumento de un 6%, para el Fe de un 2% y para el Zn un aumento del 4%, aproximadamente. En consecuencia, el

tamizado bajo 75 μm contribuye a mejorar la consistencia del balance de masa para los tres metales evaluados.

5.3.3. Discusión comparativa de concentraciones totales de T1 para P80 (T1) y P80 + tamizado (T1') bajo 75 μm

Tabla 6. Concentraciones totales de T1 para el relave original del P80 ($T1 = 147 \mu\text{m}$) y para la fracción fina ($T1'$) bajo 75 μm

Muestras	Cu promedio, mg/Kg	Zn promedio, mg/Kg	Fe promedio, mg/Kg
P80 + tamizado (T1')	1122,5	11053,0	82,15
P80 (T1)	1893,2	23,0	15895,8

La Tabla 6 se presentan los resultados de las concentraciones pseudo-totales de T1 mediante la digestión ácida, para las muestras originales (P80 = 147 μm) frente a las fracciones finas ($T1' < 75 \mu\text{m}$). De manera comparativa se evidencia como el proceso de segregación física por tamizado modifica drásticamente la geoquímica y la concentración absoluta del residuo respecto al relave original. Los metales que experimentan mayor modificación son el hierro y zinc, mientras que el cobre presenta una variación minoritaria.

Para el primer metal se observa como el tamizado removió prácticamente en su totalidad la cantidad de hierro, provocando un desplome desde 15895.8 mg/kg en el relave original hasta un valor marginal de 82.15 mg/kg en la fracción fina. Debido a esto y lo analizado anteriormente, se corrobora que el hierro posee una alta afinidad en estados estables y blindados en la matriz de silicatos, demostrando la alta eficiencia del tamizado para descartar esta ganga. Por otra parte, en el caso del zinc se registra un enriquecimiento, en el relave original se presentan valores marginales de 23.0 mg/kg, mientras que en la fracción fina tamizada su concentración total se dispara de forma masiva hasta alcanzar los 11053.0 mg/kg, a consecuencia de la mineralogía de las especies portadoras del zinc, las cuales al fracturarse el metal se concentran en la fracción fina concentrando la masa neta. Por otro lado, el cobre es el metal que modifica en menor medida la concentración total, disminuyendo de 1893.2 mg/kg en la muestra bruta a 1122.5 mg/kg en la porción tamizada,

lo que demuestra que el tamizado no genera un enriquecimiento para este metal, concluyendo que la reducción minoritaria que ocurre se debe por un incremento en la labilidad del metal, provocando la distribución hacia otras fases operacionales. Asimismo, este descenso responde a la eliminación de una porción de la masa que se encontraba confinada en la fracción residual de las muestras originales, la cual disminuye sustancialmente en la fracción fina por efecto del tamizado.

6. Conclusiones

6.1. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en esta investigación, es posible concluir la efectividad de la aplicación del tamizado bajo los 75 micrones como un mecanismo de segregación selectiva, asociada a la eliminación sustancial de la cantidad del hierro presente en la fracción residual, y a un aumento de la extracción del cobre en las fracciones operacionales más lábiles, lo cual abre caminos viables para su recuperación como metal de valor. A su vez, la aplicación del método de extracción secuencial BCR entrega información relevante y robusta para determinar y analizar la movilidad potencial de los metales pesados en los relaves. Este fraccionamiento operacional distribuye los metales en las fases ácido soluble, reducible, oxidable y residual. Considerando tanto la naturaleza de los metales como las condiciones fisicoquímicas empleadas durante el procedimiento experimental.

En términos de la distribución y comportamiento geoquímico, los resultados para el cobre muestran asociaciones mayores en la fracción ácido soluble y fracción oxidable, relacionada a descensos de pH y a fases sulfuradas, respectivamente; y en menor medida hacia las fracciones reducible y residual. Esto evidencia una mayor disponibilidad del cobre para su potencial recuperación desde los relaves. Por otra parte, el hierro se concentra en la fracción ácido soluble y fracción residual, asociada a estructuras de carácter estable; aun así, en un ámbito ambiental remarca su relevancia debido a su posible liberación en los descensos de pH en la primera fase, así como las fracciones reducible y oxidable, dado que se presentan como fases reguladoras en la movilización de otros metales debido a su vinculación a los oxihidróxidos y las fases sulfuradas, respectivamente. Por último, el zinc se distribuye de manera dominante en la fase residual, lo cual en un ámbito ambiental es positivo debido al carácter estable del metal en esta etapa y su baja posibilidad de movilizarse; no obstante, se debe tener en consideración las fases ácido soluble, reducible y oxidable, dado que presentan porcentajes de distribución ligados a la sensibilidad de liberación en condiciones tanto tempranas como prolongadas hacia el medio.

El análisis comparativo de las concentraciones absolutas (mg/kg) entre las muestras originales (P80 147 μm , 218 μm y 298 μm) y las fracciones tamizadas (<75 μm) permite corroborar el efecto del tamizado. El cobre en la molienda original muestra una participación marcada en la fase oxidable, mismo comportamiento en las muestras tamizadas, pero con una disminución de más del 50% de la concentración en las muestras finas, y un incremento en la fracción ácido soluble, evidenciando una mayor accesibilidad del metal durante la extracción secuencial.

En el hierro, se tiene una predominancia en la fracción residual tanto para las muestras originales como para las muestras tamizadas, pero ocurriendo una masiva reducción de concentración de este metal en esta fase, demostrando la alta efectividad del tamizado para eliminar la matriz gruesa rica en este metal.

En el caso del zinc, las fracciones finas presentaron un marcado aumento de concentración, predominando ampliamente la fracción residual, donde aproximadamente el 80 % del metal permanece asociado a estructuras minerales estables, reduciendo su movilidad potencial y favoreciendo la gestión ambiental del depósito.

Finalmente, el análisis de consistencia y recuperación analítica de los metales evidencia resultados satisfactorios para el procedimiento aplicado. Para el cobre se alcanza una recuperación promedio de 92.4%, mientras que para el Zn se registra un promedio de 95.5%, confirmando la robustez del método. En el caso del hierro se observa una anomalía para la muestra tamizada T2' (< 75 μm), presentando valores inconsistentes en la concentración total determinada mediante el método EPA 3050B, debido a esto resulta relevante una interpretación cuidadosa debido al número limitado de réplicas. Por otro lado, al comparar la muestra original T1 (P80 147 μm) frente a la tamizada (T1' < 75 μm), se obtienen recuperaciones sutilmente mayores para las muestras analizadas en esta investigación, con un incremento promedio de la recuperación analítica cercano al 6 %, lo que ratifica positivamente este mecanismo de aislamiento para las partículas finas.

En síntesis, se evidencia que el método de extracción secuencial BCR y de digestión ácida fuerte por el método EPA 3050B permite obtener resultados y análisis robustos para caracterizar e interpretar el comportamiento móvil de los metales, contribuyendo a la gestión

ambiental de los relaves, así como la posibilidad de recuperación de los metales de valor comercial, como es en el caso del cobre.

6.2. Recomendaciones

- Implementar técnicas analíticas complementarias de alta precisión para contrastar las mediciones de concentración total y robustecer las líneas base de los balances de masa.
- Ampliar el esquema de fraccionamiento geoquímico hacia otros metales pesados o metaloides de interés ambiental (como As o Pb) para caracterizar de forma global la dinámica de contaminación y las interacciones regulatorias entre elementos en el depósito.
- Profundizar en la caracterización del hierro mediante un mayor número de réplicas experimentales, con el fin de mitigar y resolver las inconsistencias analíticas detectadas en sus balances de masa.
- Realizar pruebas de lixiviación a escala laboratorio para la fracción fina, como pruebas de agitación en reactores usando soluciones ácidas débiles. Para permitir cuantificar la recuperación real del cobre y ver si se comporta tan bien en la práctica como dice el método BCR.

Referencias

- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2004). *Resúmenes de Salud Pública - Cobre (Copper) [ToxFAQ]*. Retrieved from ATSDR: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts132.pdf
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2005, Agosto). *Agency for Toxic Substances and Disease Registry*. Retrieved from Resumen de Salud Pública: Zinc: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs60.pdf
- Akcil, A., & Koldas, S. (2006). Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies. *Acid Mine Drainage (AMD): causes, treatment and case studies*, 14(12-13), 1139-1145. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.006>
- Akhtar, S., Luqman, M., Awan, M. U., Saba, I., Khan, Z. I., Ahmad, K., . . . Mu, R. (2022). Health risk implications of iron in wastewater soil-food crops grown in the vicinity of peri urban areas of the District Sargodha. *PLOS ONE*. doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275497>
- ATSDR. (2020, Agosto). *Agency for Toxic Substances and Disease Registry*. Retrieved from Plomo - ToxFAQs: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts13.pdf
- Codelco Educa. (n.d.). Retrieved from Proceso de Flotación: <https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/flotacion.html>
- Codelco. (s.f.). *Codelco*. Retrieved from Gestión de relaves: Conceptos de interperes: <https://www.codelco.com/gestion-de-relaves/conceptos-de-interes>
- Consejo Minero & International Council on Mining & Metals (ICMM). (2016, Diciembre). *Consejo Minero*. Retrieved from Declaración de posición sobre la prevención de fallas catastróficas de depósitos de relaves: https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2019/06/2016_icmm-ps_tailings-governance_SPAN_VF.pdf
- Consejo Minero. (2023, Abril). *Consejo Minero*. Retrieved from Minería en más de 280 caracteres: Capítulo Relaves: <https://www.consejominero.cl/wp-content/uploads/2023/04/Capitulo-Relaves-Mineria-en-mas-de-280-caracteres.pdf>

- Consejo Minero. (2025, Mayo). *Consejo Minero*. Retrieved from Reporte Anual CM 2024: La industria minera en 2024: <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2025/05/Reporte-Anual-CM-2024-La-industria-minera-en-2024.pdf>
- Consejo Minero. (2026, Mayo). *Consejo Minero*. Retrieved from Reporte Anual 2025: La industria minera en cifras: <https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2026/05/CONSEJO-MINERO-REPORTE-ANUAL-2025.pdf>
- Consejo Minero. (n.d.). *Aprende de minería*. Retrieved from Minería Metálica: <https://consejominero.cl/chile-pais-minero/aprende-de-mineria/mineria-metalica/>
- Corriveau, M., Jamieson, H., Parsons, M., Campbell, J., & Lanzirotti, A. (2011). Direct characterization of airborne particles associated with arsenic-rich mine tailings: Particle size, mineralogy and texture. *Applied Geochemistry*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.04.021>
- Dold, B. (2010, Marzo 01). *IntechOpen*. doi:10.5772/8458
- EPA, U. (1996). *United States Environmental Protection Agency*. Retrieved from <https://www.epa.gov/esam/epa-method-3050b-acid-digestion-sediments-sludges-and-soils>
- Fuentealba, M. (2026). *ANÁLISIS DE LA MOVILIDAD POTENCIAL DE METALES PESADOS EN RELAVES MINEROS MEDIANTE EXTRACCIÓN SECUENCIAL BCR EN DIFERENTES FRACCIONES GRANULOMÉTRICAS*.
- InduAmbiente. (2025, Enero-Febrero). Medidas para los Relaves. *Revista InduAmbiente*(192), 26. Retrieved from Revista InduAmbiente: https://issuu.com/induambiente1/docs/revista_induambiente_n_192
- International Council on Mining & Metals. (2025). Retrieved from Tool for Acid Rock Drainage and Metal Leaching Prevention and Management: https://www.icmm.com/website/publications/pdfs/environmental-stewardship/2025/guidance_ardml.pdf?cb=93102

- Kim, C., Wilson, K., & Rytuba, J. (2011). Particle-size dependence on metal(loid) distributions in mine wastes: Implications for water contamination and human exposure. *Applied Geochemistry*, 484-495. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2011.01.007>
- Ministerio de Minería. (2007, Abril 11). *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN)*. Retrieved from Decreto 248: Aprueba reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=259901>
- Ministerio de Minería. (2011, Noviembre 11). *biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN)*. Retrieved from Ley 20551: Regula el cierre de faenas e instalaciones mineras: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1032158>
- Ministerio de Salud. (2004, Junio 16). *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN)*. Retrieved from Decreto 148: Aprueba reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos: <https://santiagorecicla.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/08/DS-148-2003-Reglamento-Sanitario-Manejo-RESPEL.pdf>
- Ministerio del Medio Ambiente. (1994, Marzo 09). *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN)*. Retrieved from Ley 19.300: Aprueba Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>
- Ptistišek, N., Milačič, R., & Veber, M. (2001). Use of the BCR three-step sequential extraction procedure for the study of the partitioning of Cd, Pb and Zn in various soil samples. *Journal of Soils and Sediments*, 25-29. doi:<https://doi.org/10.1007/BF02986466>
- Rauret, G., López-Sánchez, J., Sahuquillo, A., Rubio, R., Davidson, C., Ure, A., & Quevauviller, P. (1999). Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials. *Journal of Environmental Monitoring*, 57-61. doi:<https://doi.org/10.1039/A807854H>
- Rodríguez, V. D., Pedroza, F. R., Aguilar, M. J., & Aguilera-González, E. N. (2025). Extracción de zinc: procesos para obtener este metal esencial. *EPISTEMUS*. doi:<https://doi.org/10.36790/epistemus.v19i38.409>

- Servicio Nacional de Geología y Minería. (2026). *SERNAGEOMIN*. Retrieved from Visor de Catastro de Depósitos de Relaves en Chile (Plataforma ArcGIS): Plataforma Pública de Relaves: <https://sernageomin.maps.arcgis.com/apps/dashboards/d1914078b496482c845c19c512276da0>
- Shi, M., Min, X., Ke, Y., Lin, Z., Yang, Z., Wang, S., . . . Wei, Y. (2021). Recent progress in understanding the mechanism of heavy metals retention by iron (oxyhydr)oxides. *ScienceDirect*, 752. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141930>
- Sociedad Nacional de Minería (SONAMI). (2026). *SONAMI*. Retrieved from Minería de Chile en Cifras: <https://www.sonami.cl/v2/minerias-de-chile-en-cifras/>
- U.S. Geological Survey (USGS). (2023, Noviembre). *U.S. Geological Survey*. Retrieved from The Mineral Industry of Chile (2019): <https://pubs.usgs.gov/myb/vol3/2019/myb3-2019-chile.pdf>
- Violante, A., Cozzolino, V., Perelomov, L., Caporale, A., & Piña, M. (2010). MOBILITY AND BIOAVAILABILITY OF HEAVY METALS AND METALLOIDS IN SOIL ENVIRONMENTS. *SciELO*. doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162010000100005>