

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

MAESTRÍA DE INVESTIGACIÓN EN METALURGIA

**LIXIVIACIÓN DE ZINC Y PLOMO DE UN CONCENTRADO DE
ESFALERITA Y GALENA PROVENIENTE DE LA ZONA MINERA
CHINAPINTZA (ZAMORA CHINCHIPE, ECUADOR), EMPLEANDO
SOLVENTES EUTÉCTICOS PROFUNDOS**

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGISTER EN METALURGIA

KATHERINE JOHANNA MORENO CERÓN
katherinemoreno23@hotmail.com

DIRECTOR: Ing. Ximena de las Mercedes Díaz Reinoso Ph.D.
xdiaz@me.com

Quito, marzo 2024

© Escuela Politécnica Nacional (2024)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, KATHERINE JOHANNA MORENO CERÓN, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 114 del Código Orgánico de la Economía de los Conocimientos, Creatividad e Innovación COESC-, cedo los derechos patrimoniales de este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional.”

KATHERINE JOHANNA MORENO CERÓN

CI: 1719653220

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Katherine Johanna Moreno Cerón, bajo mi supervisión.

Ing. Ximena de las Mercedes Díaz Reinoso Ph.D.

DIRECTORA DE TESIS

DEDICATORIA

A mis padres Marco y Rocío

A mi hijo Martín y a mi sobrino Charly

AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial al Ing. Carlos Aragón Tobar, PhD., porque sin su apoyo, conocimiento y guía no podría haberse realizado esta investigación.

A la Ing. Ximena Díaz Reinoso, PhD., por creer en mí y en mi trabajo.

A toda la familia DEMEX, especialmente a los profesores, porque ha sido un aprendizaje continuo y mutuo. Yo aprendí de Metalurgia y ellos un poco de Geología.

A los chicos DEMEX (pregrado, pasantes, Tics y maestrantes), porque con cada uno de ellos se vivieron momentos buenos.

A Fernando, Luis Andrés y Eddy, por las salidas 100% sanas y por la amistad que se ha formado.

A Cristian Zambrano, por apoyarme y estar ahí en cada paso y cada logro.

A mis papás, porque sin ellos no estaría aquí, por su ayuda, sus consejos y por todo su amor.

A mis queridos profes José Luis Román y Ana Cabero, porque siempre me brindan sus palabras de respaldo y apoyo, y sobre todo su amistad. ¡Ojalá encontremos un amonite piritizado o de oro!

A mis amigos Roxy, Belu y Toño, aunque hemos tomado distintos rumbos siempre les llevo en mi corazón y cada logro de ustedes es un logro mío también.

Lixiviación de Zinc y Plomo de un Concentrado de Esfalerita y Galena proveniente de la Zona Minera Chinapintza (Zamora Chinchipe, Ecuador), empleando Solventes Eutécticos Profundos

Moreno Cerón, Katherine Johanna¹

¹*Departamento de Metalurgia Extractiva – Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador*

Resumen: La solvometalurgia es una técnica dentro de la Metalurgia Extractiva que utiliza solventes orgánicos moleculares, líquidos iónicos o solventes eutécticos profundos (DES) en lugar de soluciones acuosas y tiene numerosas aplicaciones. Actualmente en el Ecuador, los concentrados ricos en zinc y plomo son exportados a otros países para que puedan ser refinados; sin embargo, los solventes eutécticos profundos podrían ser una tecnología alternativa y novedosa para la recuperación de estos metales en el país. En esta investigación, se efectuó la caracterización física, química y mineralógica de un concentrado de esfalerita y galena proveniente de la zona minera Chinapintza (Provincia de Zamora-Chinchipe, Ecuador). La experimentación se inició con ensayos de tostación de los sulfuros presentes en el concentrado, con el fin de oxidar las especies minerales para incrementar su solubilidad en las etapas de lixiviación. Luego, se lixivió el concentrado con 3 tipos de solventes eutécticos profundos (relina, etalina y glicelina) para evaluar la recuperación de zinc y plomo. A la par se realizaron ensayos de lixiviación ácida con ácido sulfúrico y ácido nítrico para comparar la disolución de los metales de interés en los dos medios (orgánico y ácido). Con los resultados obtenidos, se comprobó que los DES son mejores lixiviantes que los medios ácidos y que no necesitan tratamientos previos de la muestra para mejorar su efectividad. Además, se corroboró que son más selectivos para el plomo en cualquiera de sus formas minerales (sulfuros, sulfatos u óxidos). En el concentrado se recuperó alrededor del 99% de plomo y en menor cantidad el zinc usando relina.

Palabras clave: solventes eutécticos profundos, zinc, plomo, lixiviación, concentrado de esfalerita y galena.

Zinc and Lead Leaching of a Sphalerite and Galena Concentrate from the Chinapintza Mining Zone (Zamora Chinchipe, Ecuador), using Deep Eutectic Solvents

Abstract: Solvometallurgy is a technique of the Extractive Metallurgy that uses molecular organic solvents, ionic liquids or deep eutectic solvents (DES) instead of aqueous solutions. This technique has numerous applications. Currently in Ecuador, concentrates rich in zinc and lead are exported to other countries to be refined. However, the use of deep eutectic solvents appears as an alternative and novel technology for the recovery of these metals in the country. The physical, chemical, and mineralogical characterization of sphalerite and galena concentrate from the Chinapintza mining area was carried out. The experimentation started with roasting tests for the sulfides presents in the concentrate, in order to oxidize the mineral species and increase their solubility in the leaching tests. Then, the concentrate was leached with 3 deep eutectic solvents (reline, ethaline, and glycine) for zinc and lead recovery. At the same time, acid leaching tests were carried out with sulfuric acid and nitric acid to compare the dissolution of the metals of interest in the two media (organic and acid). The results obtained showed that DES are better lixivants than acidic media and that they do not require prior treatment of the sample for their effectiveness. In addition, tests showed that they are more selective for lead in any of its mineral forms (sulfides, sulfates, or oxides). In the concentrate, about 99% of lead was recovered, and zinc in smaller quantities using reline.

Keywords: deep eutectic solvents, zinc, lead, leaching, sphalerite, and galena concentrate.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Procesos tradicionales de recuperación de zinc y plomo

El zinc es uno de los metales más usados después del cobre y el aluminio, pues se requiere para diversas aplicaciones, entre las cuales destacan la industria de productos químicos y la industria agrícola. La principal mena de zinc es la esfalerita (ZnS) y es de la que se extrae mayoritariamente; este mineral está ampliamente distribuido en todo el mundo y aparece tanto en rocas metamórficas, ígneas o sedimentarias (Picazo-Rodríguez et al., 2020).

Más del 95% de la producción mundial de zinc se obtiene a través del proceso de tostación, lixiviación ácida y electroobtención. En este proceso, un concentrado de esfalerita se calcina, luego el zinc se lixivia con ácido sulfúrico y se recupera de la solución mediante electrolisis (Rodríguez et al., 2020), es decir, mediante un tratamiento hidrometalúrgico de recuperación.

Por otra parte, el plomo también es un metal con múltiples aplicaciones industriales, principalmente para las baterías de automóviles (Xing et al., 2019). La galena (PbS) es el mineral más importante de plomo, del que se extrae este metal (Anugrah et al., 2017).

El proceso de extracción de plomo de concentrados de galena se realiza comúnmente por vía pirometalúrgica, en un alto horno, mediante los procesos Boliden, Outokumpu, entre otros; sin embargo, estos procesos presentan problemas ambientales asociados con las emisiones de polvos de plomo (Anugrah et al., 2017), un problema que repercute en la salud humana por la alta toxicidad del metal.

También existen métodos hidrometalúrgicos para la recuperación de plomo mediante lixivitaciones ácidas (Peters, 1992)

Tanto la pirometalurgia como la hidrometalurgia poseen importantes huellas ambientales y presentan diferentes problemas (Pateli et al., 2020); por ejemplo, la hidrometalurgia es la piedra angular de muchos procesos de extracción de metales, donde los ácidos acuosos o los álcalis se utilizan predominantemente para disolver óxidos, sulfuros o silicatos metálicos (Abbott et al., 2005, 2006), producen residuos líquidos y también sólidos que, en la mayoría de los casos, son peligrosos y requieren tratamientos antes de su eliminación (Pateli et al., 2020).

La pirometalurgia también presenta limitaciones y varios desafíos por las regulaciones ambientales más estrictas (Anugrah et al., 2017).

La extracción de metales de fuentes geológicas primarias, así como del reciclaje de relaves finales, deben adaptarse para satisfacer una creciente demanda (Sverdrup et al., 2017). Por tal motivo el uso de solventes que no contaminen el medio ambiente, sean seguros, no tóxicos y baratos, es uno de los

retos más importantes que se puede imponer a la industria metalúrgica (Zante & Boltoeva, 2020).

1.2. Solventes Eutécticos Profundos (DES) como alternativa para la extracción de metales

Existe un nuevo enfoque para recuperar selectivamente zinc y plomo, la solvometalurgia, que es una técnica de la Metalurgia Extractiva que utiliza solventes orgánicos moleculares, líquidos iónicos o solventes eutécticos profundos (DES) en lugar de soluciones acuosas (Binnemans & Jones, 2017). La solvometalurgia consume menos energía que la pirometalurgia y ha mostrado mejor selectividad que la hidrometalurgia (Riaño et al., 2017).

Entre los solventes que usa la solvometalurgia, los más prometedores son los solventes eutécticos profundos. Los DES se definen como una mezcla de compuestos puros, generalmente formados por un donante de enlaces de hidrógeno (HBD) y un aceptor de enlaces de hidrógeno (HBA), donde la temperatura del punto eutéctico está por debajo de la de una mezcla líquida ideal (Martins et al., 2019). Son disolventes de interés para extracción de metales, debido a su alta estabilidad térmica y química, menor toxicidad, no son inflamables ni volátiles, entre otras propiedades (Pateli et al., 2020).

Los solventes eutécticos profundos han sido ampliamente estudiados desde hace 20 años y tienen numerosas aplicaciones, pues han sido medios de reacción en síntesis orgánica e inorgánica, solventes en el procesamiento de biomasa y biodiésel, electrolitos en la electrodeposición y electropulido de metales (Abbott et al., 2005), en preparación de metales y aleaciones nanoestructuradas, y en la preparación de electrolitos compuestos sólidos (Marcus, 2019), también en síntesis de polímeros (Liao et al., 2005), procesamiento de óxidos metálicos (Abbott et al., 2007), y se pueden usar para la electrodeposición de zinc, estaño y aleaciones de zinc-estaño (Abbott et al., 2007).

Los solventes eutécticos profundos son productos químicos comunes a granel, tales como la urea y el ácido oxálico; también tienen potencial para aplicaciones a gran escala, ya que muestran alta solubilidad para una amplia gama de solutos, incluidos los óxidos metálicos (Abbott et al., 2005, 2006).

La mayoría de los estudios que usan DES para la disolución de metales, se han basado en el cloruro de colina y la sal de amonio porque no son tóxicos, son biodegradables y se usan como componentes comunes en numerosos productos domésticos e industriales (Abbott et al., 2007).

Entre los solventes eutécticos profundos más documentados, se encuentran: cloruro de colina más urea, denominado relina; cloruro de colina más etilenglicol, conocido como etalina; y cloruro de colina más glicerina, o glicelina. Estos 3 DES se mezclan en una relación molar de 1 mol de cloruro de colina con 2 moles de su combinación (urea, etilenglicol o glicerina) (Abbott et al., 2004). Se preparan bajo calentamiento en un recipiente sellado, en condiciones de

agitación continua a 80°C, hasta que se forme un líquido homogéneo y transparente; luego estos solventes se almacenan a temperatura ambiente (Pateli et al., 2020), puesto que cada una de estas mezclas muestran propiedades distintas de volumen, transporte, electroquímicas, termodinámicas, ópticas, y otras propiedades ambientales como la toxicidad (Marcus, 2019).

Actualmente en el Ecuador, los concentrados ricos en zinc y plomo son exportados a otros países para que sean refinados; sin embargo, los solventes eutécticos profundos aparecen como una tecnología alternativa y novedosa para la recuperación de estos metales en el país (Aragón-Tobar, 2022), por su bajo consumo energético y bajo costo de operación, debido a que usan insumos baratos como el cloruro de colina que es ampliamente utilizado en el sector agroindustrial.

Por otra parte, se conoce que los métodos tradicionales de recuperación de metales consumen gran cantidad de energía y generan un enorme impacto ambiental (Di Maria & Van Acker, 2018), mientras que las características orgánicas de los DES hacen que se presenten como una solución ecológica para el tratamiento de minerales, tanto en la descarga del efluente o del relave en el medio ambiente, reduciendo en gran medida el efecto ambiental negativo de las operaciones de procesamiento de minerales y recuperación de metales (Sinche & Fornasiero, 2021).

La aplicación de los DES como una alternativa para el tratamiento metalúrgico de minerales (fuentes primarias de metales) no ha sido extensamente estudiado y representa un tema novedoso dentro de la minería ecuatoriana a pequeña y gran escala.

1.3. Otras aplicaciones de los DES

Los solventes eutécticos profundos se emplean en el reciclaje de baterías de ión litio, para la recuperación de litio y cobalto con muy buenos resultados (Tran et al., 2019); así como en la recuperación de plomo residual de las escorias de baterías de plomo (Bautista, 2022); y, la recuperación de zinc de polvos de acería. Además, en el ámbito ambiental, los DES han removido metales pesados como el plomo y otros elementos como sodio, potasio, magnesio y calcio (Mukhopadhyay et al., 2016; Petračić et al., 2020) de diversas matrices ambientales. Los DES también se han aplicado en el mismo campo de extracción de metales preciosos como oro, plata y paladio (Cen et al., 2020).

1.4. Selectividad de los DES para la recuperación de metales

Pateli et al. (2020) muestra que varios óxidos metálicos (MnO_2 , MnO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , Co_3O_4 , CoO , NiO , CuO , Cu_2O , ZnO y PbO) son electroquímicamente activos en DES y que podrían solubilizarse en ellos, pudiendo recuperarse metales en forma pura. En ese estudio se utilizaron etilenglicol y ácido láctico en proporción molar 2:1 con cloruro de colina.

Entezari-Zarandi & Larachi (2019), indica la disolución de carbonatos de tierras raras (Y, La, Ce, Nd y Sm) en solventes

eutécticos profundos preparados con cloruro de colina y úrea, ácido malónico y ácido cítrico respectivamente.

En el caso específico de zinc, plomo y hierro provenientes de sulfuros, Spathariotis et al. (2020) demuestra en su estudio la recuperación de estos metales mediante las mezclas de cloruro de colina con etilenglicol y ácido láctico respectivamente, con resultados no alentadores para el zinc, puesto que hay una mayor selectividad para el hierro, en relación con el zinc y el plomo que se recuperaron por co-extracción y en menor cantidad.

1.5. El yodo (I_2) como agente oxidante

Jenkin et al. (2016), en su estudio demuestra como una variedad de metales pueden disolverse a partir de muestras de mineral usando yodo (I_2) como agente oxidante dentro de un DES. El mineral aurífero que utilizó tiene una ganga compuesta principalmente por pirita (Fe_2S) y algunos sulfitos del metal base; y, presenta resultados que muestran una fuerte selectividad de los DES en la disolución rápida de electrum, por lo que esta técnica brinda un alto potencial para separar el oro de la pirita. Basándonos en este estudio, se intentará utilizar el yodo dentro de la composición de un DES para incrementar la disolución de otros metales.

Con todos estos antecedentes, en este estudio se emplearán las mejores condiciones para evaluar la lixiviación de zinc y plomo de un concentrado de esfalerita y galena proveniente de la zona minera Chinapintza, mediante lixivitaciones en tres solventes eutécticos profundos diferentes (relina, etalina y glicelina).

2. METODOLOGÍA

2.1. Caracterización del concentrado

Las muestras de concentrado fueron tomadas directamente de la planta de recuperación de metales preciosos de la Asociación Comunitaria Minera El Cóndor, ubicada en la provincia de Zamora Chinchipe, Cantón Paquisha, en la parroquia Nuevo Quito, asentamiento humano La Herradura – Chinapintza.

La muestra se secó, se homogeneizó y se cuarteó en fracciones de 1 kg, para ensayos posteriores. Se realizó el análisis granulométrico para conocer el tamaño de partícula utilizando un analizador láser de tamaño de partícula Horiba LA-950V2 (Horiba, Seúl, Korea).

El análisis de Fluorescencia de Rayos X con el equipo Bruker S8 Tiger (Bruker, Karlsruhe, Alemania) nos permitió conocer la composición química del concentrado y la difracción de rayos X utilizando el equipo Bruker AXS D8 Advance model (Bruker, Karlsruhe, Alemania) se empleó para determinar la composición mineralógica.

Se determinó la composición elemental de Cu, Zn, Pb, Fe, Au, Ag, As, Si, Ca, Al, entre otros, mediante espectrofotometría de absorción atómica en un equipo Perkin Elmer AA 300 (Perkin Elmer, Shelton, CT, EE. UU.) y

espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente ICP-MS en un equipo ICP-MS Agilent 7500e de la Universidad de Utah (Agilent, Santa Clara, EE. UU.). Previamente se realizó la disgregación de la muestra de concentrado usando ácidos clorhídrico y nítrico en un horno microondas Milestone ETHOS ONE (Milestone Srl, Italy)

2.2. Pretratamiento térmico del concentrado

Considerando que se mejora la recuperación de zinc y plomo cuando estos elementos se encuentran en forma de óxidos en el mineral (Dimitrov & Boyanov, 1983), la muestra fue tostada a varias temperaturas y tiempos, para determinar las mejores condiciones térmicas para el pretratamiento. Se realizaron ensayos de tostación oxidante a varias temperaturas desde 350 a 900°C, durante 2, 4, 6 y 8 horas. El tratamiento térmico se utilizó para transformar los sulfuros de zinc y plomo de la muestra original, en óxidos y sulfatos, con el fin de evaluar, en las etapas de lixiviación, si las recuperaciones de los metales de interés de este trabajo mejoran con una muestra tostada. Se escogió la mejor condición térmica, es decir, la temperatura y tiempo de tostación donde la calcina presente el contenido más elevado de zinc y plomo en la muestra analizada, dado que estos elementos, en especial el zinc, puede volatizarse con el tratamiento térmico.

Se analizó el contenido de zinc, plomo y otros elementos después del tratamiento térmico, mediante un análisis químico de Fluorescencia de Rayos X con el equipo Bruker S8 Tiger (Bruker, Karlsruhe, Alemania) para cada temperatura y tiempo de tostación.

2.3. Ensayos de lixiviación con DES

Zante & Boltoeva (2020) sugieren la preparación de tres solventes eutécticos profundos, en el que cloruro de colina de grado analítico 98% y pureza Sigma Aldrich es la estructura receptora de enlace hidrógeno (HBA), y se combina con estructuras donadoras de enlace de hidrógeno (HBD) como la úrea de grado analítico 99% y pureza Sigma Aldrich, el etilenglicol de grado analítico 99% y pureza Mallinckrod y la glicerina de grado analítico 99,5% y pureza Fischer Scientific. Por lo que se preparó la relina que es el solvente eutéctico formado por cloruro de colina y úrea, con 1 mol de cloruro de colina y 2 moles de úrea, es decir una relación molar 1:2. Esta combinación se mezcló mediante agitación y calentamiento a 80°C hasta que los dos reactivos sólidos formen un líquido transparente (Aragón-Tobar, 2022). De igual forma se prepararon los otros solventes eutécticos, la etalina que es cloruro de colina y etilenglicol y la glicelina que es cloruro de colina y glicerina, los cuales se prepararon en la misma proporción molar 1:2 de cloruro de colina con etilenglicol o glicerol, respectivamente (Marcus, 2019).

Posteriormente, se realizaron otros ensayos en los que se utilizó yodo (I_2), como un agente oxidante dentro la reacción, el cual se empleó inmediatamente antes de empezar los ensayos, en una relación de 100:1 del DES con respecto al I_2 , mediante el procedimiento propuesto en Jenkin et al. (2016).

Los ensayos de lixiviación con los solventes eutécticos profundos (relina, etalina y glicelina) se pusieron en contacto con las muestras de concentrado de esfalerita y galena, con y sin pretratamiento térmico.

Según lo sugerido por Anggara et al. (2019) para cada ensayo de lixiviación con los solventes eutécticos profundos se emplearon 0,2 g del concentrado en 10 g de cada solvente eutéctico profundo en este caso relina, etalina y glicelina, respectivamente, con la adición de la masa de I_2 correspondiente.

Tomando la metodología sugerida por Hartley et al. (2020) para determinar las concentraciones de zinc y plomo en el solvente eutéctico profundo, se tomaron muestras de 100 μ L de solución en los tiempos: 1, 2, 4, 6, 8 y 24 horas. Estas muestras fueron diluidas en un matraz de aforo de 50 mL usando una solución de 2% de HNO_3 , para su posterior lectura en absorción atómica, y cuantificar los metales disueltos en el solvente eutéctico profundo, mediante el análisis de absorción atómica en un equipo Perkin Elmer AA 300 (Perkin Elmer, Shelton, CT, EE. UU.).

2.4. Ensayos de lixiviación ácida

Se prepararon soluciones con 2 tipos de ácido con una concentración de 150 g/L para cada solución. El ácido sulfúrico con grado analítico 98% de pureza marca Fisher, se utilizó para las lixivaciones de zinc, mientras que el ácido nítrico 70% de pureza marca Fisher, se empleó para las lixivaciones de plomo.

Los ensayos de lixiviación se realizaron con las muestras de concentrado de esfalerita y galena, con y sin pretratamiento térmico, con una muestra de 100 g de concentrado al 10% de sólidos por 24 horas con agitación mecánica.

Las concentraciones de zinc y plomo en la solución enriquecida y en la solución de lavado se determinaron mediante absorción atómica en un equipo Perkin Elmer AA 300 (Perkin Elmer, Shelton, CT, EE. UU.).

Las tortas del relave de lixiviación se secaron y homogenizaron, posteriormente se tomaron 0,2g de las mismas para digestión ácida (con ácido nítrico, fluorhídrico y clorhídrico), una vez obtenidas las soluciones ácidas con el relave disgregado se pasó a la lectura de los elementos zinc y plomo mediante absorción atómica en un equipo Perkin Elmer AA 300 (Perkin Elmer, Shelton, CT, EE. UU.).

2.5. Comparación de los resultados obtenidos mediante la lixiviación con DES y con ácidos

Se analizaron los resultados obtenidos de los diferentes ensayos con los 3 solventes DES y se determinó cuál de ellos presenta una mejor recuperación de zinc y plomo. Estas recuperaciones se compararon con los resultados de los ensayos realizados mediante métodos tradicionales de lixiviación ácida, con el fin de determinar las mejores condiciones operativas para el proceso de recuperación de zinc y plomo del concentrado de esfalerita y galena.

Las concentraciones de zinc y plomo en cada solvente eutéctico profundo probado (relina, etalina y glicelina) y en cada ácido (sulfúrico y nítrico), usados como agentes lixiviantes, se determinaron mediante absorción atómica en un equipo Perkin Elmer AA 300 (Perkin Elmer, Shelton, CT, EE. UU.) de acuerdo con los procedimientos explicados anteriormente.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización física, química y mineralógica del concentrado proveniente de la zona minera Chinapintza

El concentrado proveniente de la zona minera Chinapintza, es el relave de un proceso previo de cianuración para la recuperación de oro y plata.

La caracterización química del material utilizado en esta investigación se presenta en la tabla 1, resultado del análisis de Fluorescencia de Rayos X (FRX).

Como se puede observar en la tabla 1, la muestra estudiada posee un alto contenido de zinc con 20,39% y azufre con 12,1%, lo que denota la presencia de una mena de zinc, principalmente esfalerita y otros sulfuros asociados tanto de hierro como de plomo; también se puede observar la presencia de silicatos y aluminosilicatos que conformarían una ganga compuesta de cuarzo y plagioclasas. Además, se observa un considerable contenido de Mn y Ca, que indicaría la existencia de carbonatos compuestos de estos elementos.

En la tabla 2, se muestra la caracterización mineralógica del concentrado mediante el análisis de Difracción de Rayos X (DRX).

Con los resultados obtenidos de la muestra de cabeza podemos corroborar, en conjunto con el análisis de FRX, que existe la presencia de esfalerita, galena y piritita como principales sulfuros. Sin embargo, el análisis no indica cuanto hierro contiene la especie mineral esfalerita, además de otros elementos trazas. Es importante mencionar que los depósitos minerales ricos en esfalerita, como es el caso de Chinapintza, presentan metales como Fe, Pb, Ga, Ge, entre otros que están asociados a este mineral, pues numerosos estudios indican que este enriquecimiento ocurre porque estos depósitos de zinc se formaron en ambientes magmáticos hidrotermales (Chen et al., 2023), que corresponde a la configuración geológica del sector (Egüez et al., 2019).

Tabla 1. Caracterización química del concentrado

| Elemento | Contenido (%) |
|----------|---------------|
| Zn | 20,4 |
| S | 12,1 |
| Pb | 7,6 |
| Fe | 7,2 |
| Si | 5,5 |
| Al | 2,1 |
| Mn | 1,1 |
| K | 0,7 |
| Ca | 0,5 |
| Cu | 0,5 |
| Na | 0,3 |
| Mg | 0,2 |

Tabla 2. Caracterización mineralógica del concentrado

| Mineral | Fórmula | Contenido (%) |
|--------------------|--|---------------|
| Esfalerita | ZnS | 63 |
| Galena | PbS | 9 |
| Piritita | FeS ₂ | 8 |
| Anglesita | PbSO ₄ | 7 |
| Cuarzo | SiO ₂ | 6 |
| Moscovita | KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂ | 4 |
| Calcita | CaCO ₃ | 2 |
| Grupo plagioclasas | (Na,Ca)Al(Si,Al)Si ₂ O ₈ | 1 |

En muestras de mano se pudieron observar sulfuros de hierro, plomo y zinc, formando una solución sólida casi imperceptible a la vista, además de vetillas de cuarzo y carbonatos.

En particular se podría diferenciar que el carbonato de calcio (calcita), mostrado en la tabla 2, se refiere a rodocrosita (MnCO₃), puesto que se detectó manganeso en el análisis de FRX.

El análisis de granulometría láser permitió conocer el tamaño de partícula del material en estudio, determinándose un d₈₀ de 82 μm, como se observa en la figura 1.

Como la muestra analizada es el relave de cianuración de una planta de beneficio, se puede inferir que el tamaño de 82 μm, es el tamaño de partícula obtenido en el proceso de recuperación de oro y plata.

3.2. Tratamientos térmicos del concentrado rico en sulfuros previo a los ensayos de lixiviación

Establecer las mejores condiciones de tostación del concentrado es uno de los principales requisitos para los procesos posteriores de recuperación de metales. Varios estudios como el de Abbott et al. (2003) y Pateli et al. (2020), indican que los DES muestran una mejor disolución cuando la especie es un óxido o sulfato, en comparación con sulfuros que presentan menor solubilidad.

El reto de esta investigación es lograr la temperatura y el tiempo de residencia para una tostación que garantice la oxidación de los sulfuros presentes en el concentrado. En el caso de la esfalerita, se busca que no se llegue a volatilizar el zinc, mientras que, en el caso de la galena, puesto que es un compuesto más estable, se trataría con temperatura y tiempo propuestos para la esfalerita.

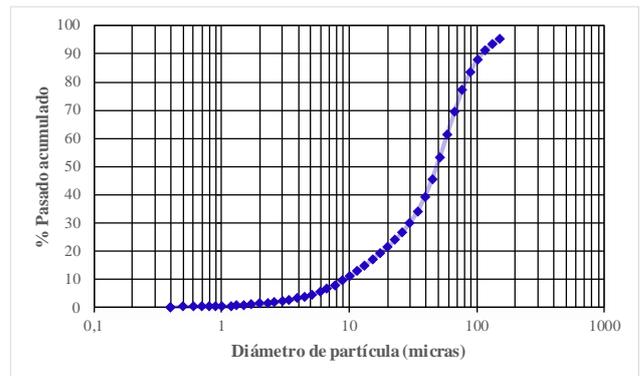


Figura 1. Distribución granulométrica del concentrado de esfalerita y galena usando granulometría láser.

Prabhu et al. (1984), indica que en varias formas de ZnS, incluidas formas naturales como la esfalerita y materiales altamente cristalinos, se han realizado experimentos de oxidación en una amplia gama de temperaturas de 500 a 1440°C, y el punto en el que se documenta que la difusión adquiere importancia, varía entre 600 a 830°C. Los resultados más interesantes de este estudio se presentaron al utilizar volúmenes bajos de oxígeno a temperaturas entre 480 a 600°C, con buenas recuperaciones.

Con base a lo expuesto anteriormente, en la figura 2 se indican los resultados del contenido de Fe, Pb y Zn por FRX de las muestras tostadas a diferentes temperaturas durante 8 horas, con el fin de oxidar todos los sulfuros contenidos en el concentrado estudiado y poder determinar las mejores condiciones del tratamiento térmico aplicado.

Con los datos expuestos en la figura 2 se determina que la mejor temperatura de tostación es de 600°C, que se corrobora con Prabhu et al. (1984). Esta temperatura se eligió porque el contenido de zinc y de plomo fueron los más altos obtenidos (5,3% Zn y 12,2% Pb) en comparación con el resto de temperaturas. Con estos resultados se realiza un análisis de DRX de la muestra calcinada a 600°C para determinar que especies se formaron luego de las reacciones de oxidación en el mineral de cabeza, como se muestra en la tabla 3.

En la tabla 3 se puede observar que el contenido de esfalerita ha disminuido en gran proporción del 63% a 6% y la pirita de 8% al 6%, el contenido de hematita aumentó en la muestra con tostación al 66% por lo que se puede decir que la pirita se oxidó y parte del hierro contenido en la esfalerita también lo hizo. Esto puede explicarse debido a que la pirita es un sulfuro de hierro más estable, en comparación con otros sulfuros que contienen hierro como la esfalerita, pirrotina y calcopirita, que reaccionan rápidamente formando otros compuestos (Deer et al., 1992).

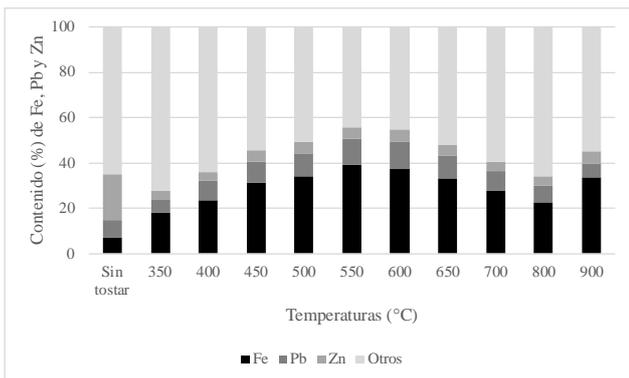


Figura 2. Contenido de hierro, plomo y zinc (%) en el concentrado de esfalerita y galena, en la muestra de cabeza y en todas muestras de las temperaturas empleadas

Tabla 3. Caracterización mineralógica del concentrado tostado a 600°C

| Mineral | Contenido (%) |
|---|---------------|
| Hematita Fe ₂ O ₃ | 66 |
| Anglesita PbSO ₄ | 12 |
| Galena PbS | 8 |
| Esfalerita ZnS | 6 |
| Pirita FeS ₂ | 4 |
| Cuarzo SiO ₂ | 3 |
| Rodonita MnSiO ₃ | 1 |

Esto representa un gran desafío con respecto a los procesos posteriores de lixiviación, puesto que los DES son altamente selectivos con óxidos de hierro, y este tiene alta solubilidad en ellos. Por otra parte, la galena puede oxidarse a anglesita, con esto se podría obtener recuperaciones importantes de plomo.

3.3. Evaluación de la recuperación de zinc y plomo mediante ensayos de lixiviación utilizando solventes eutécticos profundos

Se emplearon 3 solventes eutécticos profundos (relina, etalina y glicelina) para la recuperación de zinc y plomo del concentrado rico en esfalerita y galena proveniente de Chinapintza.

Se utilizaron muestras del concentrado tostadas a 600°C durante 8 horas y muestras del mineral de cabeza.

En la figura 3 se muestra la recuperación de la lixiviación de zinc del concentrado sin tostar con los 3 solventes eutécticos profundos y sin la aplicación del agente oxidante I₂.

Como se puede observar en la figura 3, la lixiviación de zinc directamente del concentrado sin ningún tratamiento previo no es buena, pues incluso con los 3 solventes eutécticos, el porcentaje de recuperación no supera el 2%, después de 24 horas.

Estos resultados indican que tanto la relina, etalina y glicelina, no son selectivos para el zinc en su especie como sulfuro, probablemente tienen una mayor afinidad con el hierro que se encuentra dentro de la misma esfalerita. La etalina logra solubilizar mayor cantidad de zinc en comparación con la relina y glicelina, por lo que este DES es más eficiente en la disolución del metal en su forma como sulfuro.

En cuanto al plomo, éste es más afín a los DES probados, con recuperaciones de hasta el 12%, como se muestra en la figura 4.

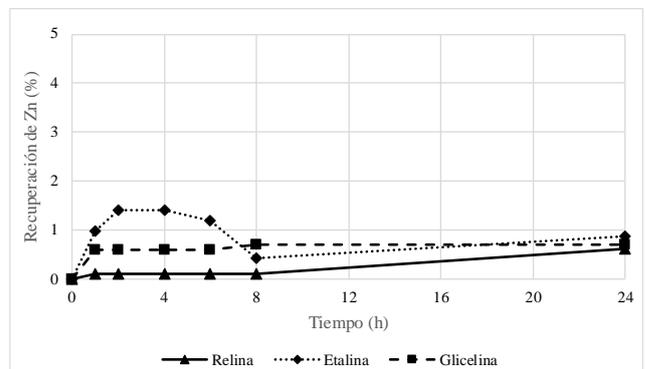


Figura 3. Recuperación de zinc mediante lixiviación del concentrado de esfalerita y galena utilizando relina, etalina y glicelina, sin tratamiento térmico previo.

Se ha visto en estudios previos, como el de Pateli et al. (2020), que se recuperaba plomo de un óxido de este metal con etalina, lo que se corrobora en esta investigación, ya que

el DES más afín con el concentrado estudiado es la etalina. De la misma manera que el zinc, la presencia de plomo en forma de anglesita incrementa la recuperación de este metal.

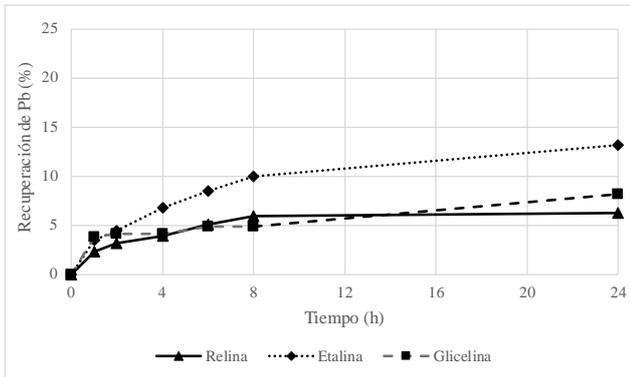


Figura 4. Recuperación de plomo mediante lixiviación del concentrado de esfalerita y galena utilizando relina, etalina y glicelina, sin tratamiento térmico previo.

Las figuras 5 y 6 muestran las recuperaciones de zinc y plomo con la aplicación del yodo como agente oxidante disuelto en los solventes eutécticos profundos.

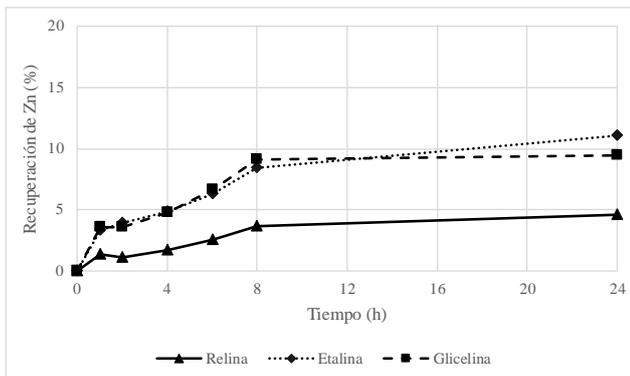


Figura 5. Recuperación de zinc mediante lixiviación del concentrado de esfalerita y galena utilizando relina, etalina y glicelina con I_2 como agente oxidante, sin tratamiento térmico previo.

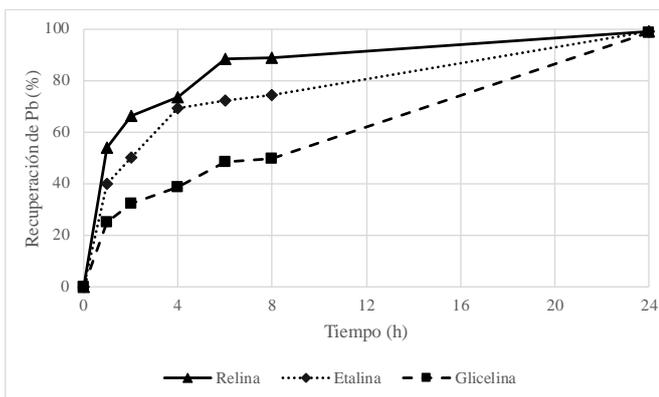


Figura 6. Recuperación de plomo mediante lixiviación del concentrado de esfalerita y galena utilizando relina, etalina y glicelina con I_2 como agente oxidante, sin tratamiento térmico previo.

En ambas figuras se observa como las recuperaciones tanto de zinc como de plomo mejoran o son más eficientes. En el caso del zinc, las recuperaciones aumentan al 5% para la relina, 11% para la etalina y 9% para la glicelina, hablando netamente de un concentrado sin tratamientos previos, es

decir, un concentrado de sulfuros. Con esto, claramente se ve que la etalina es el DES que mejor funciona para la disolución de especies sulfuradas y más aún si actúa el yodo como oxidante en la reacción que ocurre entre el DES y el metal, probablemente oxidando al metal.

Analizando la solubilidad del plomo en estos solventes eutécticos, se puede observar en la figura 6 que las recuperaciones llegan casi al 100% en todos los DES en un tiempo de 24 horas, pero en este caso, la relina con yodo es el mejor lixiviante, ya que a la primera hora de lixiviación supera el 50% de recuperación de plomo disuelto en la muestra. Sin embargo, el plomo en la muestra no se encuentra solamente como sulfuro, sino se encuentra también en forma de sulfato, lo que indicaría que los 3 solventes poseen una selectividad preferencial por las menas de plomo.

Las figuras 7, 8, 9 y 10 muestran la cinética de disolución del concentrado rico en esfalerita y galena con un tratamiento térmico previo, es decir, una muestra del concentrado se oxidó mediante tostación a 600°C por 8 horas, para que las especies que se presentan como sulfuros puedan convertirse en óxidos y mejorar las recuperaciones de zinc y plomo, como se reporta en bibliografía.

Las figuras 7 y 8 representan las recuperaciones de las lixiviaciones del concentrado con los 3 DES, sin la adición de ningún agente oxidante; mientras que las figuras 9 y 10 muestran las recuperaciones de las lixiviaciones del concentrado con los 3 DES, pero con la aplicación del yodo como agente oxidante.

Las recuperaciones de zinc mejoran con el tratamiento térmico previo. Sin embargo, es importante mencionar que la muestra deja de ser un concentrado rico en esfalerita y galena, convirtiéndose en un concentrado de hematita (Fe_2O_3), y es así que las concentraciones de zinc disminuyen a tal punto de ser extremadamente soluble en los DES, obteniendo altos porcentajes de recuperación de este metal (Figura 7).

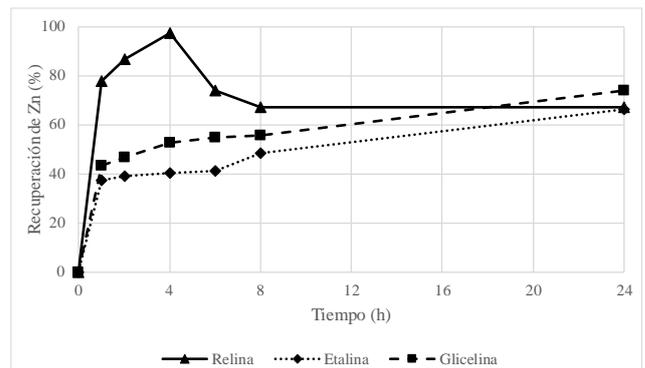


Figura 7. Recuperación de zinc mediante lixiviación del concentrado de esfalerita y galena utilizando relina, etalina y glicelina con previa tostación oxidante a 600°C durante 8 horas.

Para el plomo sucede todo lo contrario, este metal aumenta su concentración y es muy afín con etalina, como ya se ha mencionado anteriormente. La disolución con relina también

presenta excelentes resultados de recuperación de plomo, con porcentajes de hasta el 90%, como se observa en la figura 8.

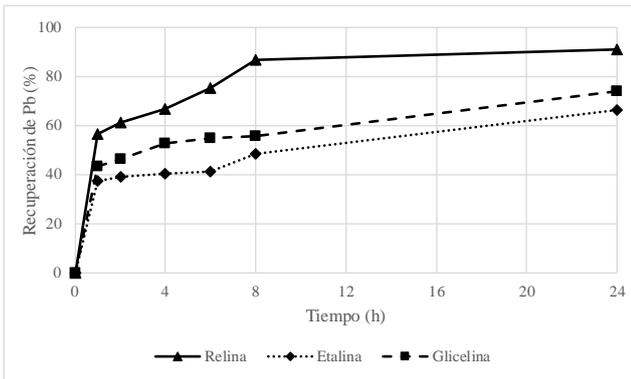


Figura 8. Recuperación de plomo mediante lixiviación del concentrado de esfalerita y galena utilizando relina, etalina y glicelina con previa tostación oxidante a 600°C durante 8 horas.

En la figura 9 se puede observar nuevamente, que la relina presenta buenos resultados en la recuperación de zinc del concentrado tostado, cercana al 100% a las 24 horas de agitación; además, en este ensayo, el yodo actuó como agente oxidante en la reacción del DES con el metal. Los otros dos solventes, etalina y glicelina, no se quedan atrás en las recuperaciones de zinc alcanzando hasta el 80%.

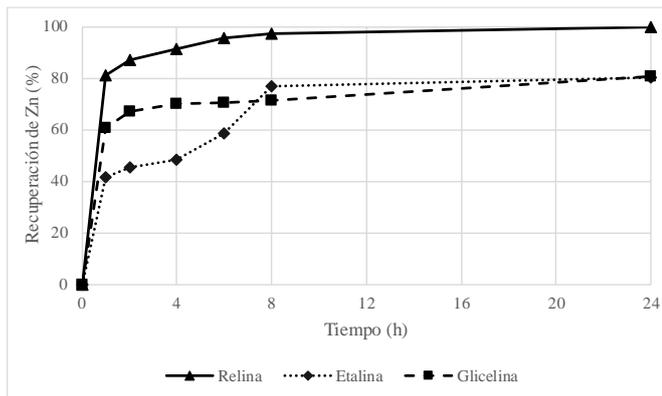


Figura 9. Lixiviación de zinc del concentrado de esfalerita y galena utilizando relina, etalina y glicelina previa tostación oxidante y con la acción de I₂ como agente oxidante

En la figura 10 se muestra recuperación de plomo de la lixiviación del concentrado de esfalerita y galena. Los resultados de recuperación de este metal con la relina, alcanzan valores cercanos al 100% a las 24 horas de agitación. En cuanto a la glicelina, se tiene una recuperación superior al 90%. Por último, con la etalina se ha recuperado casi el 70% del plomo del concentrado. Todos estos ensayos se realizaron con la adición de yodo como agente oxidante.

En la figura 11 se pueden observar las recuperaciones de zinc y plomo empleando relina como agente lixivante, en la muestra sin tratamiento térmico previo con y sin adición del yodo como agente oxidante.

En la figura 11 se muestra claramente que la relina presenta una mayor afinidad para la disolución de plomo. Es importante mencionar que el plomo no se encuentra totalmente en forma de sulfuro, sino también de sulfato,

contrariamente a lo que ocurre con el zinc que se disuelve menos del 1%, y que solo se encuentra como sulfuro. De la misma manera sucede con los otros dos solventes eutécticos (mostrados en información suplementaria), que denotan una preferencia por el plomo. También se presentan los resultados usando la relina que actúa en conjunto con el yodo, y pese a que mejora la recuperación de ambos metales, se sigue mostrando una selectividad específica por el plomo que lo disuelve en casi un 100%, mientras que para el zinc se alcanza un poco más del 5%.

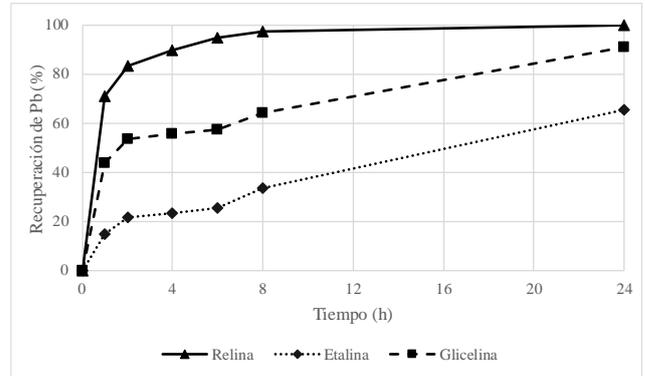


Figura 10. Lixiviación de plomo del concentrado de esfalerita y galena utilizando relina, etalina y glicelina previa tostación oxidante a 600°C durante 8 horas y con la acción de I₂ como agente oxidante.

La menor recuperación del zinc con respecto al plomo sugiere que la forma mineral en la que se encuentra en el concentrado, juega un papel importante en la disolución de este metal en este medio orgánico. Por otra parte, también se puede notar que la etalina prefiere al zinc en su forma de sulfuro para disolverlo, mientras que la relina lo hace cuando se ha lixiviado por completo el hierro contenido en la esfalerita y se encuentra como otra especie mineral dentro del concentrado.

La recuperación de zinc y plomo de un concentrado sulfurado, con este tipo de solventes, depende principalmente de la especie mineral en que se presentan estos metales, lo que indica que la selectividad de los DES está influenciada por la mineralogía del material; si bien el yodo mejora notoriamente la recuperación de los metales, todo depende de la matriz que se va a tratar y procesar.

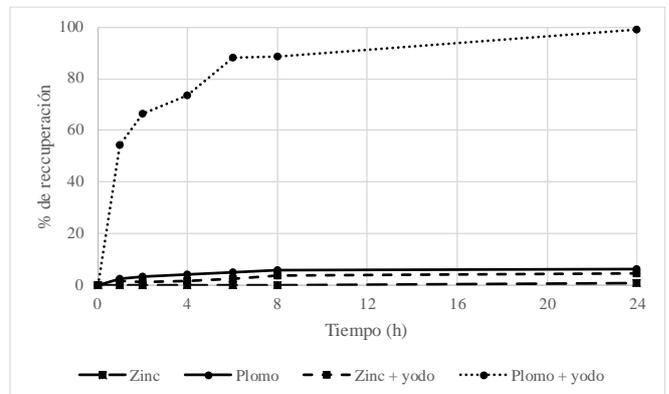


Figura 11. Recuperación de zinc y plomo mediante lixiviación del concentrado de esfalerita y galena utilizando relina sin tratamiento térmico previo con o sin adición del agente oxidante I₂.

3.4. Evaluación de la recuperación de zinc y plomo mediante ensayos de lixiviación utilizando ácidos

Se emplearon dos métodos hidrometalúrgicos tradicionales para la recuperación de zinc y plomo del concentrado de esfalerita y galena. En primer lugar, se realizaron ensayos de lixiviación ácida con ácido sulfúrico para la recuperación de zinc, y en otros ensayos se utilizó ácido nítrico para recuperar plomo.

3.4.1. Lixiviación con ácido sulfúrico para el zinc

En el proceso tradicional, la esfalerita concentrada se tuesta en hornos de lecho fluidizado para la obtención de óxido de zinc, que posteriormente pasará a una etapa de lixiviación con ácido sulfúrico débil, seguido de la purificación de la solución con métodos apropiados y finalmente el zinc metálico se recuperará mediante electrólisis (Copa, 2021).

La etapa de tostación causa diversos inconvenientes cuando no se tiene a disposición un horno de lecho fluidizado, puesto que el zinc es un metal que tiende a volatilizarse conforme aumenta la temperatura. Por otro lado, si este proceso no es controlado, se corre el riesgo de convertir el ZnS en ferrita de zinc ($ZnFe_2O_4$), que no se lixivia en una solución ácida débil (Copa, 2021).

Las recuperaciones de zinc del concentrado de esfalerita y galena, con y sin el tratamiento térmico empleado, se muestra en la figura 12.

La concentración del ácido sulfúrico es muy importante en la recuperación de este tipo de metales mediante la vía hidrometalúrgica. Compuestos como los sulfuros tienden a ser poco solubles en muchos medios, y como se había mencionado, si el concentrado no fue tostado bajo condiciones específicas, los procesos posteriores se verán afectados. En la figura 12 se observa una recuperación de zinc del 96% en una muestra tostada a 600°C por 8 horas; por su parte, la muestra de cabeza, sin ningún tratamiento térmico, apenas alcanzó una recuperación de zinc del 11%.

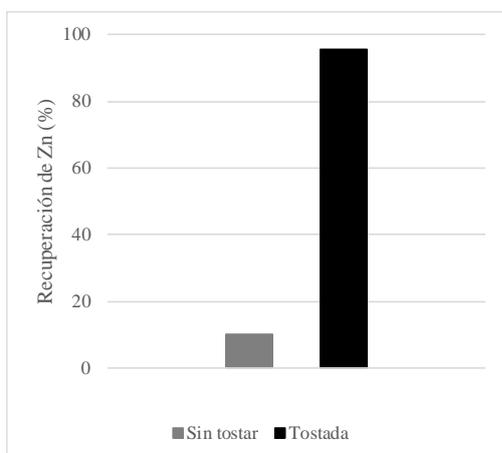


Figura 12. Recuperación de zinc mediante lixiviación del concentrado de esfalerita y galena utilizando lixiviación con ácido sulfúrico 1.5M durante 24 horas.

En concentraciones bajas de ácido sulfúrico (menores al 1M) la disolución de zinc es prácticamente insignificante, y las impurezas de la esfalerita como el hierro, precipitan generando un efecto pasivamente en la superficie de las partículas de esfalerita pura, impidiendo su disolución (Copa, 2021).

De la misma forma, si se aumenta la concentración de ácido sulfúrico, esto no supone un aumento en la tasa de disolución de la esfalerita.

Se tiene que tomar en cuenta que la muestra con tratamiento térmico de tostación redujo su contenido de zinc y aumentó el contenido de hierro, lo que hace a la esfalerita fácilmente soluble en este medio ácido, generando así una recuperación elevada de alrededor del 96%.

3.4.2. Lixiviación con ácido nítrico para el plomo

La pirometalurgia es el método tradicional para la recuperación de plomo. El concentrado de plomo se obtiene a partir de la flotación de sulfuros, especialmente la galena, que luego pasa por una tostación-sinterización, fusión reductora y finalmente por refinación.

Este proceso es altamente contaminante puesto que se genera gran cantidad de SO_2 y se necesitan enormes plantas de tratamientos de gases para la transformación de este gas tóxico en ácido sulfúrico.

Sin embargo, existe la recuperación de plomo mediante la vía hidrometalúrgica empleando solventes ácidos como el ácido nítrico y el ácido clorhídrico, entre otros.

En esta investigación se utilizó ácido nítrico, que tiene un efecto favorable en la disolución de plomo. Por lo general se emplean autoclaves y temperaturas sobre los 120°C para lograr una solubilidad de más del 60% de plomo (Zárate, 2010).

Con estas premisas se realizaron los ensayos y se obtuvieron los resultados que se muestran en la figura 13.

En la figura 13 se observa que la recuperación de plomo para una muestra sin ningún tratamiento térmico previo, alcanzó valores de 21%; mientras que en la muestra tostada a 600°C durante 8 horas, se obtienen valores de hasta el 80%. Con estos valores se puede decir con certeza, que se alcanzaron recuperaciones reportadas en el trabajo de (Pashkov et al., 2002).

El ácido nítrico tiene un buen efecto en la disolución de plomo, siempre y cuando también tenga una concentración apropiada (1-2M). Cuando la concentración es superior a 2M el mismo ácido oxida a los sulfuros a azufre elemental o sulfato, puesto que es un fuerte oxidante. Esto ocasiona que aumente el consumo del reactivo, al igual que el costo del tratamiento de lixiviación y la regeneración del propio ácido (Pashkov et al., 2002).

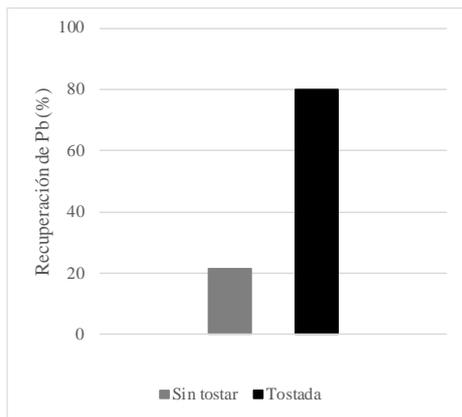


Figura 13. Recuperación de plomo mediante lixiviación del concentrado de esfalerita y galena utilizando ácido nítrico 2M durante 24 horas.

3.5. Comparación de las recuperaciones de zinc y plomo mediante lixiviación con DES y lixiviación ácida

En los apartados anteriores se observaron las recuperaciones del zinc y del plomo, tanto en la solvometalurgia como en la hidrometalurgia ácida. En este apartado se va a comparar los dos tipos de procesos empleados, tomando en consideración que la solvometalurgia posee una fuerte ventaja ambiental, dado que los solventes utilizados son orgánicos y están lejos de ser contaminantes. Sin embargo, los ensayos se trataron con fracciones en peso muy pequeñas, lo que implicaría que un escalamiento mayor no pueda ser posible a priori.

3.5.1. Zinc

El mejor método de recuperación de zinc ocurrió mediante el uso del solvente eutéctico etalina, siempre y cuando este metal se encuentre como sulfuro. Si no es así, el solvente por excelencia es la relina. En la figura 14 se observa la recuperación de zinc en etalina y en ácido sulfúrico concentrado, sin previo tratamiento térmico.

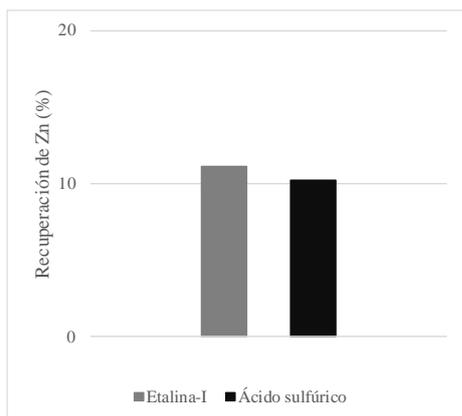


Figura 14. Recuperación de zinc mediante lixiviación del concentrado de esfalerita y galena sin tratamiento térmico previo utilizando tanto etalina-I como ácido sulfúrico.

Se observa que la etalina tiene una ligera ventaja sobre el ácido sulfúrico pues presenta una mejor recuperación de zinc, la etalina disuelve al zinc en casi 12%, mientras que el ácido sulfúrico llega al 11%. Sin embargo, las bajas recuperaciones para un mineral sin tratamientos previos, sugiere la complejidad de la matriz de este concentrado.

En la figura 15 se presenta la recuperación de zinc de una muestra tostada previamente a 600°C por 8 horas, mediante lixiviación con DES y ácido sulfúrico.

Estos resultados son más alentadores que el análisis previo; sin embargo, hay que recordar que la concentración de zinc en la muestra luego del tratamiento térmico es muy baja (5%). Este metal no llegó a oxidarse, pero probablemente la esfalerita presente en el concentrado pudo sufrir una ligera purificación al momento que se oxidó el hierro que está presente como impureza.

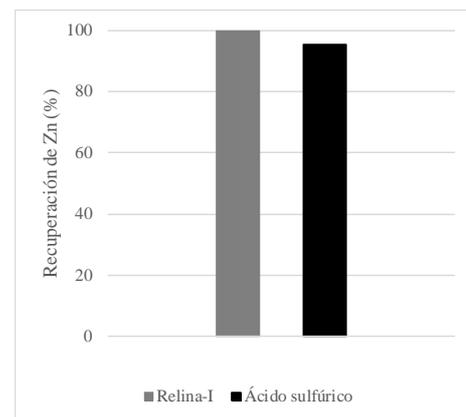


Figura 15. Recuperación de zinc mediante lixiviación del concentrado de esfalerita y galena con tratamiento térmico previo (600°C durante 8 horas) utilizando tanto etalina-I como ácido sulfúrico.

3.5.2. Plomo

En la recuperación de plomo, los resultados son parecidos a los del zinc. Se tiene casi el 100% de recuperación en la muestra sin ningún tratamiento térmico previo, al usar el solvente eutéctico relina y el agente oxidante yodo, lo que indica que este DES es altamente selectivo con el plomo, habiéndolo disuelto prácticamente en su totalidad (Figura 16). De hecho, los 3 DES son muy selectivos para el plomo, habiéndose obtenido excelentes recuperaciones (relina 100%, etalina 99%, glicelina 99%); mientras que, al compararlo con la lixiviación en medio ácido de esta muestra en las mismas condiciones, la recuperación alcanza solo el 20%. Por esta razón, la solvometalurgia del plomo podría considerarse como una alternativa rentable y ambientalmente adecuada.

En la figura 17, se observa la recuperación de plomo mediante DES y ácido nítrico, de una muestra de concentrado tostada a 600°C por 8 horas.

En ambas lixivaciones se obtienen altos valores de recuperación de plomo para la muestra tostada. El plomo se encuentra en su forma de sulfato (anglesita) producto de la alteración de la galena (PbS), que al parecer favorece las recuperaciones, que tienden a ser mayores.

Del mismo modo que en el caso anterior, la relina con yodo como agente oxidante, logra la disolución de casi el 100% del plomo presente en la muestra. En cuanto a la lixiviación ácida con ácido nítrico el resultado obtenido presentó recuperaciones del 80%.

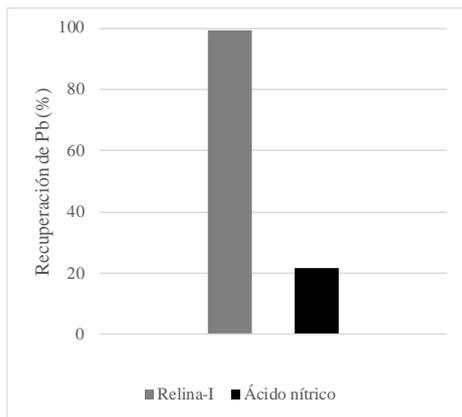


Figura 16. Recuperación de plomo mediante lixiviación del concentrado de esfalerita y galena sin tratamiento térmico previo utilizando tanto relina-I como ácido nítrico.

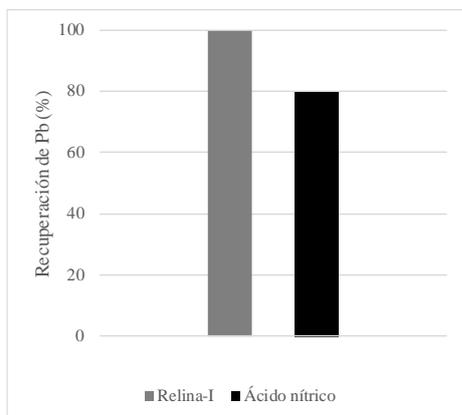


Figura 17. Recuperación de plomo mediante lixiviación del concentrado de esfalerita y galena con tratamiento térmico previo (600°C durante 8 horas) utilizando tanto relina-I como ácido nítrico.

4. CONCLUSIONES

Se caracterizó el concentrado rico en esfalerita y galena proveniente de la zona minera Chinapintza, obtenido del relave de cianuración de una planta de beneficio ubicada en el mismo sector. El análisis químico de la muestra mediante FRX reflejó la presencia de zinc (20%), plomo (7%), hierro (7%), azufre (12%), y otros elementos menores como el manganeso (1%), aluminio (2%) y silicio (5%). Esto supone que existe la presencia de varios sulfuros, silicatos y aluminosilicatos. El análisis mineralógico del material comprueba la existencia de los sulfuros, ya que reporta esfalerita (63%) que es mineral portador de zinc; galena (9%) y anglesita (7%) minerales portadores de plomo; pirita (8%) que es uno de los minerales portadores de hierro. Además, reporta la presencia de silicatos como el cuarzo, aluminosilicatos como la moscovita y las plagioclasas, y carbonatos. En cuanto al análisis granulométrico del material, se puede determinar que el tamaño de partícula del concentrado es de 82 μm , y es el tamaño obtenido en los procesos de trituración de la planta de beneficio de donde procede el concentrado.

El tratamiento térmico del material es importante porque los procesos de tostación de sulfuros los transforma a especies más susceptibles a la disolución. Es el caso de la esfalerita, en donde el zinc no es soluble en medios ácidos débiles,

mientras que si se oxida a otra forma como sulfato u óxido tiende a mejorar su solubilidad y por lo tanto la extracción de este metal es más eficiente. También es necesario acotar que sucede lo mismo con el plomo, la galena es un sulfuro mucho más estable que la esfalerita y por consecuencia menos soluble. En ambos casos, la tostación previa a los procesos lixiviantes, es indispensable para mejorar la recuperación de estos metales que proceden de una matriz sulfurada. Para el caso de este estudio la temperatura de tostación adecuada resultó ser 600°C que se corrobora con la literatura (Prabhu et al., 1984), donde el sulfuro de zinc o esfalerita tiende a descomponerse. Y a esta temperatura se ha podido transformar a sulfato gran parte de la galena presente en el concentrado.

Se utilizaron tres solventes eutécticos profundos en este estudio: relina, etalina y glicelina, para disolver el zinc y el plomo presentes en el concentrado. Después de analizar la disolución del concentrado usando los tres DES, se pudo determinar que los solventes son muy selectivos para el plomo en sus especies como sulfuro y sulfato. La relina y la glicelina tienen una mayor afinidad para el plomo en su forma como sulfato mientras que la etalina lo hace con su forma como sulfuro. Con el zinc sucede algo similar y se observa una mayor preferencia de la etalina en la disolución de este metal en su especie sulfurada; sin embargo, las recuperaciones no son tan buenas en comparación con las recuperaciones cuando se aplica el agente oxidante (yodo), que mejoran la disolución de estos metales en los solventes eutécticos, aumentando los valores de recuperación del zinc del 1% al 5% en el caso de la relina, del 1% al 11% en el caso de la etalina, y del 1% al 10% para la glicelina con una muestra de concentrado sin ningún tratamiento térmico previo. Y el plomo del 6% al 99% en la relina, del 13% al 99% en la etalina, y del 8% al 99% en la glicelina.

La recuperación de zinc y plomo es mayor usando solventes eutécticos profundos con la adición de agentes oxidantes como el yodo, que mejora la separación del metal de su especie mineral. Pero no todo está determinado por la selectividad de los DES sino también de la forma mineral en la que se presenta el metal y de las impurezas que posee. En el caso de la esfalerita, se conoce que en la naturaleza no se presenta una esfalerita pura de zinc, cuando se trata de yacimientos minerales tipo vetas polimetálicas, como las que dieron lugar al concentrado de Chinapintza. Esta esfalerita contiene un alto contenido de hierro y por lo general está en solución sólida con la galena, pudiendo tener trazas de plomo y otros elementos. De los resultados obtenidos se puede concluir que la disolución de la esfalerita y la separación del metal de su mineral, estaría influenciada primero por la mineralogía y luego por la selectividad de los DES. Esto también puede probarse con los resultados obtenidos en las lixivitaciones ácidas, puesto que, al tratarse de una matriz de sulfuros, tenderán a lixivarse las especies minerales menos complejas.

5. RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos durante este estudio corroboran la información documentada en investigaciones anteriores, y

aunque los solventes eutécticos profundos están siendo muy estudiados y aplicados a diversas ramas, todavía poseen grandes limitaciones, como para realizar un escalamiento a nivel industrial, para la extracción de metales de interés.

Se podrían utilizar otros solventes eutécticos profundos para la recuperación de plomo y zinc, como el cloruro de colina con ácido láctico o el cloruro de colina con el ácido oxálico.

En esta investigación solo se utilizó el yodo metálico como agente oxidante, se podría explorar la posibilidad de usar otros agentes oxidantes como el permanganato de sodio o agua oxigenada y comparar los porcentajes de recuperación al utilizar estos compuestos.

Se sugiere estudiar la recuperación electroquímica del plomo disuelto en el DES relina con yodo, lo que completaría el proceso metalúrgico hasta la recuperación del metal.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no podía haberse realizado sin el apoyo del Proyecto PIGR-2102, y sin la guía y el conocimiento del Ing. Carlos Aragon Tobar, PhD.

REFERENCIAS

- Abbott, A., Capper, G., Davies, D., McKenzie, K., & Obi, S. (2006). Solubility of Metal Oxides in Deep Eutectic Solvents Based on Choline Chloride. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 51(4), 1280–1282. <https://doi.org/10.1021/jc060038c>
- Abbott, A., Capper, G., Davies, D., Rasheed, R., & Shikotra, P. (2005). Selective extraction of metals from mixed oxide matrixes using choline-based ionic liquids. *Inorganic Chemistry*, 44(19), 6497–6499. <https://doi.org/10.1021/ic0505450>
- Abbott, A., Capper, G., Mckenzie, K., & Ryder, K. (2007). Electrodeposition of Zinc-Tin Alloys From Deep Eutectic Solvents Based on Choline Chloride. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 599. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2006.04.024>
- Abbott, A. P., Boothby, D., Capper, G., Davies, D. L., & Rasheed, R. K. (2004). Deep Eutectic Solvents Formed between Choline Chloride and Carboxylic Acids: Versatile Alternatives to Ionic Liquids. *Journal of the American Chemical Society*, 126(29), 9142–9147. <https://doi.org/10.1021/ja048266j>
- Abbott, A. P., Capper, G., Davies, D. L., Rasheed, R. K., & Tambyrajah, V. (2003). Novel solvent properties of choline chloride/urea mixtures. *Chemical Communications*, 1, 70–71. <https://doi.org/10.1039/B210714G>
- Anggara, S., Bevan, F., Harris, R. C., Hartley, J. M., Frisch, G., Jenkin, G. R. T., & Abbott, A. P. (2019). Direct extraction of copper from copper sulfide minerals using deep eutectic solvents. *Green Chem.*, 21(23), 6502–6512. <https://doi.org/10.1039/C9GC03213D>
- Anugrah, R. I., Mubarok, M. Z., & Amalia, D. (2017). Study on the leaching behavior of galena concentrate in fluosilicic acid solution using hydrogen peroxide as oxidant. *AIP Conference Proceedings*, 1805. <https://doi.org/10.1063/1.4974417>
- Aragon-Tobar, C. (2022). *EVALUACIÓN DE LA APLICACIÓN DE DISOLVENTES EUTÉCTICOS PROFUNDOS BASADOS EN CLORURO DE COLINA PARA LA LIXIVIACIÓN DE METALES (Cu, Pb, Fe y Zn) PROVENIENTES DE UN CONCENTRADO POLIMETÁLICO* [Maestría]. Escuela Politécnica Nacional.
- Bautista, M. F. (2022). *Evaluación del lixiviante glicelina (Glicerina + Cloruro de colina) en la lixiviación de plomo de escorias obtenidas del proceso de reciclaje de baterías automotrices* [Trabajo de integración curricular]. Escuela Politécnica Nacional.
- Binnemans, K., & Jones, P. (2017). Solvometallurgy: An Emerging Branch of Extractive Metallurgy. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3(3), 570–600. <https://doi.org/10.1007/s40831-017-0128-2>
- Cen, P., Spahiu, K., Tyumentsev, M. S., & Foreman, M. R. St. J. (2020). Metal extraction from a deep eutectic solvent, an insight into activities. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 22(19), 11012–11024. <https://doi.org/10.1039/C9CP05982B>
- Chen, C., Meng, L., Xu, J., Zhan, Q., & Zhao, T. (2023). Texture and geochemistry of sphalerite from the Chitudian Pb-Zn-Ag deposit, southern margin of the North China Craton: Implications for the enrichments of Cd, Ga, and In. *Ore Geology Reviews*, 156, 105392. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2023.105392>
- Copa, M. (2021). *CINÉTICA DE LA LIXIVIACIÓN DE UN CONCENTRADO DE ESFALERITA EN MEDIO H2SO4-NaCl-Fe+3-O2* [Posgrado en Metalurgia]. Universidad de Concepción.
- Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (1992). *An Introduction to the Rock-Forming Minerals* (2 edition, Vol. 1). Harlow.
- Di Maria, A., & Van Acker, K. (2018). Turning Industrial Residues into Resources: An Environmental Impact Assessment of Goethite Valorization. *Engineering*, 4(3), 421–429. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.008>
- Dimitrov, R., & Boyanov, B. (1983). Investigation of the oxidation of metal sulphides and sulphide concentrates. *Thermochimica Acta*, 64(1), 27–37. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-6031\(83\)80125-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0040-6031(83)80125-7)
- Egüez, A., Alban, A. V., & Gallardo, E. (2019). *MAPA METALOGENETICO ECUADOR IM 2019*.
- Entezari-Zarandi, A., & Larachi, F. (2019). Selective dissolution of rare-earth element carbonates in deep eutectic solvents. *Journal of Rare Earths*, 37(5), 528–533. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jre.2018.07.015>
- Hartley, J. M., Al-Bassam, A. Z. M., Harris, R. C., Frisch, G., Jenkin, G. R. T., & Abbott, A. P. (2020). Investigating the dissolution of iron sulfide and arsenide minerals in deep eutectic solvents. *Hydrometallurgy*, 198, 105511. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105511>

- Jenkin, G. R. T., Al-Bassam, A. Z. M., Harris, R. C., Abbott, A. P., Smith, D. J., Holwell, D. A., Chapman, R. J., & Stanley, C. J. (2016). The application of deep eutectic solvent ionic liquids for environmentally-friendly dissolution and recovery of precious metals. *Minerals Engineering*, 87, 18–24. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.09.026>
- Liao, J.-H., Wu, P.-C., & Bai, Y.-H. (2005). Eutectic mixture of choline chloride/urea as a green solvent in synthesis of a coordination polymer: $[Zn(O3PCH2CO2)] \cdot NH_4$. *Inorganic Chemistry Communications*, 8, 390–392. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2005.01.025>
- Marcus, Y. (2019). *Deep Eutectic Solvents* (1st ed.). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-00608-2>
- Martins, M., Pinho, S., & Coutinho, J. (2019). Insights into the Nature of Eutectic and Deep Eutectic Mixtures. *Journal of Solution Chemistry*, 48. <https://doi.org/10.1007/s10953-018-0793-1>
- Mukhopadhyay, S., Mukherjee, S., Adnan, N. F., Hayyan, A., Hayyan, M., Hashim, M. A., & Sen Gupta, B. (2016). Ammonium-based deep eutectic solvents as novel soil washing agent for lead removal. *Chemical Engineering Journal*, 294, 316–322. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.02.030>
- Pashkov, G. L., Mikhlina, E. V., Kholmogorov, A. G., & Mikhlin, Y. L. (n.d.). *Effect of potential and ferric ions on lead sulfide dissolution in nitric acid*. www.elsevier.com/locate/hydromet
- Pateli, I. M., Abbott, A. P., Jenkin, G. R. T., & Hartley, J. M. (2020). Electrochemical oxidation as alternative for dissolution of metal oxides in deep eutectic solvents. *Green Chemistry*, 22(23), 8360–8368. <https://doi.org/10.1039/d0gc03491f>
- Peters, E. (1992). Hydrometallurgical process innovation. In *Hydrometallurgy* (Vol. 29).
- Petračić, A., Sander, A., & Cvetnić, M. (2020). A novel approach for the removal of trace elements from waste fats and oils. *Separation Science and Technology*, 55(18), 3487–3501. <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1706575>
- Picazo-Rodríguez, N. G., Soria-Aguilar, M. D. J., Martínez-Luévanos, A., Almaguer-Guzmán, I., Chaidez-Félix, J., & Carrillo-Pedroza, F. R. (2020). Direct acid leaching of sphalerite: An approach comparative and kinetics analysis. *Minerals*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/min10040359>
- Prabhu, G. M., Ulrichson, D. L., & Pulsher, A. H. (1904). Kinetics of the Oxidation of Zinc Sulfide. In *Ind. Eng. Chem. Fundam* (Vol. 23).
- Riaño, S., Petranikova, M., Onghena, B., Vander Hoogerstraete, T., Banerjee, D., Foreman, M. R. StJ., Ekberg, C., & Binnemans, K. (2017). Separation of rare earths and other valuable metals from deep-eutectic solvents: a new alternative for the recycling of used NdFeB magnets. *RSC Advances*, 7(51), 32100–32113. <https://doi.org/10.1039/C7RA06540J>
- Rodríguez, N., Machiels, L., Onghena, B., Spooen, J., & Binnemans, K. (2020). Selective recovery of zinc from goethite residue in the zinc industry using deep-eutectic solvents. *RSC Advances*, 10(12), 7328–7335. <https://doi.org/10.1039/D0RA00277A>
- Sinche, M., & Fornasiero, D. (2021). Understanding the effect of sulphate in mining-process water on sulphide flotation. *Minerals Engineering*, 165, 106865. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.10.6865>
- Spathariotis, S., Peeters, N., Ryder, K. S., Abbott, A. P., Binnemans, K., & Riaño, S. (2020). Separation of iron(III), zinc(II) and lead(II) from a choline chloride-ethylene glycol deep eutectic solvent by solvent extraction. *RSC Advances*, 10(55), 33161–33170. <https://doi.org/10.1039/d0ra06091g>
- Sverdrup, H. U., Ragnarsdóttir, K. V., & Koca, D. (2017). An assessment of metal supply sustainability as an input to policy: security of supply extraction rates, stocks-in-use, recycling, and risk of scarcity. *Journal of Cleaner Production*, 140, 359–372. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.085>
- Tran, M. K., Rodrigues, M.-T. F., Kato, K., Babu, G., & Ajayan, P. M. (2019). Deep eutectic solvents for cathode recycling of Li-ion batteries. *Nature Energy*, 4(4), 339–345. <https://doi.org/10.1038/s41560-019-0368-4>
- Xing, P., Wang, C., Wang, L., Ma, B., & Chen, Y. (2019). Hydrometallurgical recovery of lead from spent lead-acid battery paste via leaching and electrowinning in chloride solution. *Hydrometallurgy*, 189. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.105134>
- Zante, G., & Boltoeva, M. (2020). Review on Hydrometallurgical Recovery of Metals with Deep Eutectic Solvents. *Sustainable Chemistry*, 1(3), 238–255. <https://doi.org/10.3390/suschem1030016>
- Zárate, R. (2010). *Lixiviación de un concentrado de plata-plomo usando como agente oxidante NaNO₃ a 130°C*. Instituto Politécnico Nacional.

BIOGRAFÍA



Katherine Moreno es Ingeniera geóloga (2018) por la Escuela Politécnica Nacional (EPN) de Quito (Ecuador). Sus actividades de investigación actuales se centran en el reciclaje de residuos electrónicos, el reciclaje de baterías de iones de litio y la aplicación de disolventes verdes para la recuperación de metales a partir de fuentes primarias y secundarias.

Actualmente trabaja como asistente de investigación en el Departamento de Metalurgia Extractiva de EPN desde 2021. Obtuvo subvención económica para investigación de la Embajada de Francia con el proyecto titulado "Recuperación de metales de interés de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos en una planta piloto ambiental y socialmente sostenible".

INFORMACIÓN SUPLEMENTARIA

PARTE I
CARACTERIZACIÓN DEL CONCENTRADO



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA**



Resultados Análisis de Difracción de Rayos X

Solicitante : Ing. Katherine Moreno.
No. Referencia : RM - 10227
Fecha : 17 - 02 - 2022
Muestras recibidas : Una muestra sólida denominada:
Muestra 1 : 02-ch-2022 (Código registrado según cliente).

La determinación de los compuestos con cristalización definida presentes en la muestra se realizó empleando el Difractómetro D8 ADVANCE y el programa Diffrac plus (EVA Y TOPAS) para cualificación y semi-cuantificación. A continuación, se detallan los resultados obtenidos del análisis.

| Mineral | Fórmula | Muestra 1 Contenido (%) |
|--------------------|--|-------------------------------|
| Esfalerita | ZnS | 63 |
| Galena | PbS | 9 |
| Pirita | FeS ₂ | 8 |
| Anglesita | PbSO ₄ | 7 |
| Cuarzo | SiO ₂ | 6 |
| Moscovita | KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂ | 4 |
| Calcita | CaCO ₃ | 2 |
| Grupo plagioclasas | (Na,Ca)Al(Si,Al)Si ₂ O ₈ | 1 |

NOTA: El límite de detección del equipo empleado es del 1% para compuestos con cristalización definida.

ERNESTO HALE DE LA TORRE CHAUVIN
Firmado digitalmente por ERNESTO HALE DE LA TORRE CHAUVIN
Fecha: 2022.02.18 11:21:20 -05'00'

Ing. Ernesto de la Torre PhD.
Jefe de Departamento



Firmado electrónicamente por:
EVELYN PAMELA CRIOLLO TIRADO

MSc. Evelyn Criollo
Jefa de Laboratorio



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA

Resultados de Análisis

Solicitante: Ing. Katherine Moreno.

Referencia: RM - 10227

Fecha: 02/03/2022

Muestras recibidas: Una muestra sólida denominada:

Muestra 1: 02 - Ch - 2022 (Código registrado según cliente).

Resultados Análisis Fluorescencia de Rayos X

El análisis químico de la muestra se determinó en el equipo de Fluorescencia de rayos X S8 Tiger, con el programa Spectra Pluss. A continuación, se detallan los resultados obtenidos del análisis:

| Elemento | Muestra 1 |
|----------|---------------|
| | Contenido (%) |
| Zn | 20,39 |
| S | 12,10 |
| Pb | 7,59 |
| Fe | 7,22 |
| Si | 5,47 |
| Al | 2,07 |
| Mn | 1,10 |
| K | 0,68 |
| Ca | 0,47 |
| Cu | 0,45 |
| Na | 0,26 |
| Mg | 0,20 |
| Cd | 0,12 |
| Cl | 0,04 |
| Ti | 0,03 |

Nota: La muestra fue analizada mediante pastilla prensada, por lo cual los resultados son semi-cuantitativos.

ERNESTO HALE
DE LA TORRE
CHAUVIN

Firmado digitalmente
por ERNESTO HALE DE
LA TORRE CHAUVIN
Fecha: 2022.03.03
17:38:30 -05'00'

Ing. Ernesto de la Torre PhD.
Jefe de Departamento



Firmado electrónicamente por:
EVELYN PAMELA
CRIOLLO TIRADO

MSc. Evelyn Criollo
Jefa de Laboratorio

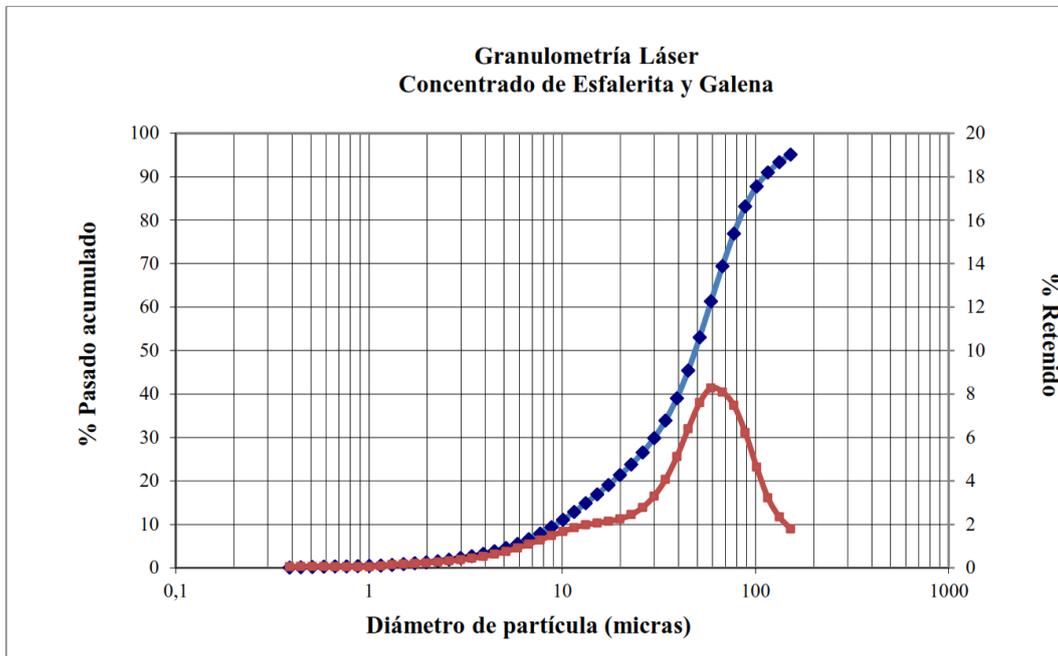


Resultado de Análisis

Solicitante : Ing. Katherine Moreno.
No. Referencia : RM - 10227
Fecha : 18 - 05 - 2023
Muestras recibidas : Una muestra sólida denominada:
Muestra 1 : Concentrado de Esfalerita y Galena (Código registrado según cliente).

Resultados Análisis de Granulometría Láser

El análisis de granulometría láser se lo realizó empleando el equipo LASER SCATTERING PARTICLE SIZE DISTRIBUTION ANALYZER LA-950V2, marca HORIBA. El equipo utiliza la teoría de Mie para evaluar las mediciones, (dispersión de ondas electromagnéticas en partículas esféricas). A continuación, se detallan los resultados obtenidos del análisis.





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA



| Concentrado de Esfalerita y Galena | |
|------------------------------------|---|
| Parámetros | Diámetro de Partícula (μm) |
| d10 | 9,3 |
| d50 | 48,7 |
| d60 | 57,7 |
| d80 | 82,7 |
| d90 | 111,4 |

El análisis se realizó utilizando el índice de refracción para la esfalerita: 2,369

Nota: Esta técnica de análisis es adecuada para partículas esféricas inferiores a 38 micras, que no se pueden determinar su tamaño por tamizado. *Se recomienda realizar el análisis granulométrico mediante tamizado.*



Escaneado electrónicamente por:
DIANA ENDARA
DRANICHNIKOVA

Ing. Diana Endara PhD.
Jefa de Departamento



Escaneado electrónicamente por:
EVELYN PAMELA
CRIOLLO TIRADO

MSc. Evelyn Criollo
Jefa de Laboratorio



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA



ANEXO 1: Tabla de resultados de granulometría láser.

| Concentrado de Esfalerita y Galena | | | | | | | |
|------------------------------------|----------------------------|--------------|----------------------|------------|----------------------------|--------------|----------------------|
| Número (#) | Diámetro de Partícula (µm) | Retenido (%) | Pasado Acumulado (%) | Número (#) | Diámetro de Partícula (µm) | Retenido (%) | Pasado Acumulado (%) |
| 1 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 27 | 13,2 | 2,0 | 14,9 |
| 2 | 0,4 | 0,1 | 0,1 | 28 | 15,2 | 2,1 | 16,9 |
| 3 | 0,5 | 0,1 | 0,2 | 29 | 17,4 | 2,1 | 19,1 |
| 4 | 0,6 | 0,1 | 0,2 | 30 | 19,9 | 2,3 | 21,3 |
| 5 | 0,7 | 0,1 | 0,3 | 31 | 22,8 | 2,4 | 23,8 |
| 6 | 0,8 | 0,1 | 0,4 | 32 | 26,1 | 2,8 | 26,6 |
| 7 | 0,9 | 0,0 | 0,4 | 33 | 29,9 | 3,3 | 29,9 |
| 8 | 1,0 | 0,0 | 0,4 | 34 | 34,3 | 4,1 | 33,9 |
| 9 | 1,2 | 0,1 | 0,5 | 35 | 39,2 | 5,1 | 39,1 |
| 10 | 1,3 | 0,1 | 0,7 | 36 | 44,9 | 6,4 | 45,5 |
| 11 | 1,5 | 0,2 | 0,9 | 37 | 51,5 | 7,6 | 53,1 |
| 12 | 1,7 | 0,2 | 1,1 | 38 | 59,0 | 8,3 | 61,3 |
| 13 | 2,0 | 0,2 | 1,3 | 39 | 67,5 | 8,1 | 69,4 |
| 14 | 2,3 | 0,3 | 1,6 | 40 | 77,3 | 7,5 | 76,9 |
| 15 | 2,6 | 0,3 | 1,9 | 41 | 88,6 | 6,2 | 83,2 |
| 16 | 3,0 | 0,4 | 2,3 | 42 | 101,5 | 4,6 | 87,8 |
| 17 | 3,4 | 0,4 | 2,7 | 43 | 116,2 | 3,2 | 91,0 |
| 18 | 3,9 | 0,5 | 3,2 | 44 | 133,1 | 2,3 | 93,4 |
| 19 | 4,5 | 0,6 | 3,8 | 45 | 152,5 | 1,8 | 95,1 |
| 20 | 5,1 | 0,8 | 4,6 | 46 | 174,6 | 1,4 | 96,6 |
| 21 | 5,9 | 0,9 | 5,5 | 47 | 200,0 | 1,2 | 97,8 |
| 22 | 6,7 | 1,1 | 6,6 | 48 | 229,1 | 0,9 | 98,7 |
| 23 | 7,7 | 1,3 | 7,9 | 49 | 262,4 | 0,7 | 99,4 |
| 24 | 8,8 | 1,5 | 9,4 | 50 | 300,5 | 0,4 | 99,8 |
| 25 | 10,1 | 1,7 | 11,0 | 51 | 344,2 | 0,2 | 100,0 |
| 26 | 11,6 | 1,8 | 12,9 | 52 | --- | --- | --- |

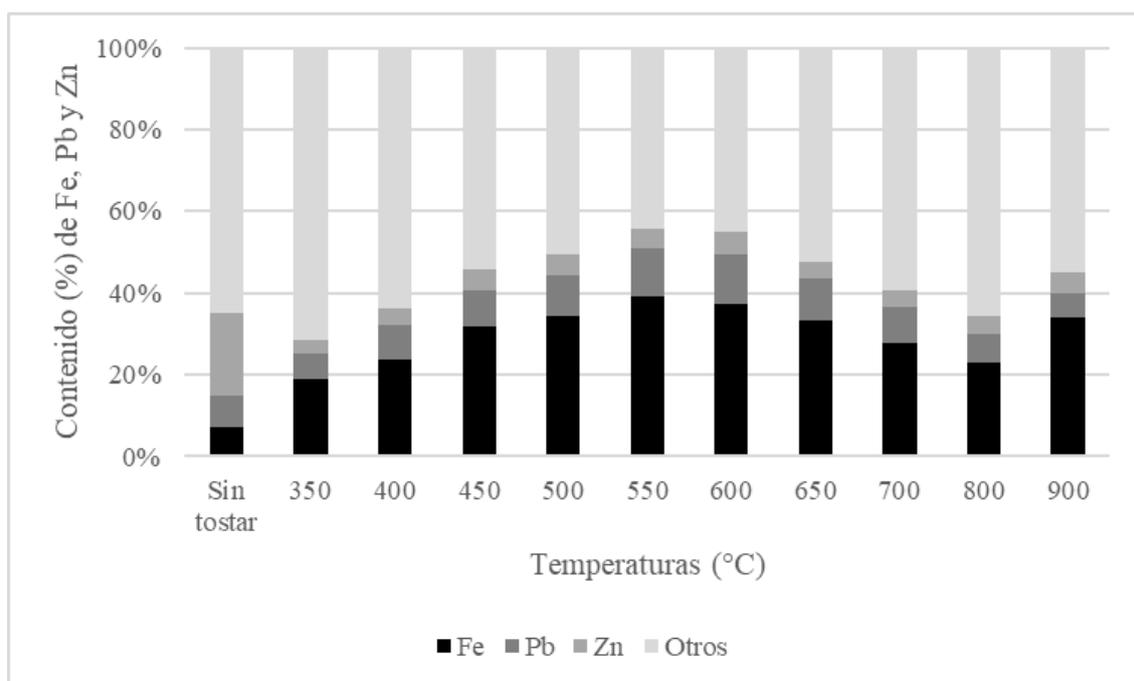
PARTE II

**TRATAMIENTOS TÉRMICOS PARA EL
CONCENTRADO RICO EN ESFALERITA Y
GALENA**

FICHA TÉCNICA N°1

TOSTACIÓN OXIDANTE

| Muestra | Tiempo de tostación | Temperaturas de tostación (°C) |
|---|---------------------|--------------------------------|
| Concentrado mineral rico en esfalerita y galena | 8 horas | 350 |
| Concentrado mineral rico en esfalerita y galena | 8 horas | 400 |
| Concentrado mineral rico en esfalerita y galena | 8 horas | 450 |
| Concentrado mineral rico en esfalerita y galena | 8 horas | 500 |
| Concentrado mineral rico en esfalerita y galena | 8 horas | 550 |
| Concentrado mineral rico en esfalerita y galena | 8 horas | 600 |
| Concentrado mineral rico en esfalerita y galena | 8 horas | 650 |
| Concentrado mineral rico en esfalerita y galena | 8 horas | 700 |
| Concentrado mineral rico en esfalerita y galena | 8 horas | 800 |
| Concentrado mineral rico en esfalerita y galena | 8 horas | 900 |





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA

Resultados de Análisis

Solicitante: Ing. Katherine Moreno.

Referencia: RM - 10227

Fecha: 15/11/2022

Muestras recibidas: Doce muestras sólidas denominadas:

Muestra 1: 1-350 (*Código registrado según cliente*).

Muestra 2: 1-350-B (*Código registrado según cliente*).

Muestra 3: 2-400 (*Código registrado según cliente*).

Muestra 4: 2-400-B (*Código registrado según cliente*).

Muestra 5: 3-450 (*Código registrado según cliente*).

Muestra 6: 3-450-B (*Código registrado según cliente*).

Muestra 7: 4-500 (*Código registrado según cliente*).

Muestra 8: 4-500-B (*Código registrado según cliente*).

Muestra 9: 5-550 (*Código registrado según cliente*).

Muestra 10: 5-550-B (*Código registrado según cliente*).

Muestra 11: 6-600 (*Código registrado según cliente*).

Muestra 12: 6-600-B (*Código registrado según cliente*).

Resultados Análisis Fluorescencia de Rayos X

El análisis químico de la muestra se determinó en el equipo de Fluorescencia de rayos X S8 Tiger, con el programa Spectra Pluss. A continuación, se detallan los resultados obtenidos del análisis:

| Elemento | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 | Muestra 4 |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Contenido (%) | Contenido (%) | Contenido (%) | Contenido (%) |
| Fe | 19,00 | 18,80 | 23,70 | 23,77 |
| S | 17,75 | 18,05 | 12,55 | 12,79 |
| Pb | 6,04 | 6,18 | 8,40 | 8,39 |
| Zn | 3,33 | 3,44 | 4,04 | 4,03 |
| Si | 2,39 | 2,41 | 2,37 | 2,43 |
| Mn | 1,31 | 1,32 | 1,52 | 1,53 |
| Na | 0,52 | 0,60 | 0,33 | 0,34 |
| Al | 0,49 | 0,46 | 0,46 | 0,46 |
| Ca | 0,29 | 0,31 | 0,32 | 0,30 |
| K | 0,15 | 0,14 | 0,18 | 0,16 |
| Mg | 0,13 | 0,15 | 0,12 | 0,14 |
| Ba | 0,13 | 0,03 | --- | --- |
| Cu | 0,10 | 0,10 | 0,11 | 0,12 |
| As | 0,06 | 0,10 | --- | --- |
| Ti | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,04 |
| Ce | --- | 0,02 | --- | --- |
| Cd | --- | 0,02 | 0,02 | 0,03 |
| P | --- | 0,02 | 0,02 | --- |
| Cr | 0,01 | 0,02 | --- | --- |

Nota: Las muestras fueron analizadas mediante pastilla prensada, por lo cual los resultados son semi-cuantitativos.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA

| Elemento | Muestra 5 | Muestra 6 | Muestra 7 | Muestra 8 |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Contenido (%) | Contenido (%) | Contenido (%) | Contenido (%) |
| Fe | 31,62 | 31,57 | 34,63 | 34,01 |
| Pb | 9,22 | 8,88 | 9,97 | 9,87 |
| S | 7,48 | 7,58 | 5,96 | 5,89 |
| Zn | 5,18 | 5,05 | 5,00 | 5,05 |
| Si | 2,88 | 2,88 | 2,41 | 2,30 |
| Mn | 1,92 | 1,88 | 1,78 | 1,81 |
| Al | 0,57 | 0,56 | 0,46 | 0,43 |
| Ca | 0,40 | 0,36 | 0,34 | 0,31 |
| Na | 0,21 | 0,18 | --- | --- |
| K | 0,19 | 0,20 | 0,18 | 0,16 |
| Mg | 0,15 | --- | --- | --- |
| Cu | 0,15 | 0,15 | 0,14 | 0,15 |
| As | 0,09 | 0,17 | --- | --- |
| Ti | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| Cd | 0,02 | 0,03 | 0,03 | --- |
| P | 0,01 | 0,02 | 0,03 | --- |
| Cl | --- | --- | 0,02 | --- |

Nota: Las muestras fueron analizadas mediante pastilla prensada, por lo cual los resultados son semi-cuantitativos.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA

| Elemento | Muestra 9 | Muestra 10 | Muestra 11 | Muestra 12 |
|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Contenido (%) | Contenido (%) | Contenido (%) | Contenido (%) |
| Fe | 38,74 | 39,30 | 33,32 | 32,95 |
| Pb | 11,74 | 11,88 | 10,35 | 10,10 |
| Zn | 4,86 | 4,80 | 4,36 | 4,44 |
| S | 3,96 | 3,95 | 7,65 | 7,65 |
| Si | 2,02 | 1,97 | 2,14 | 2,06 |
| Mn | 1,61 | 1,59 | 1,50 | 1,46 |
| Al | 0,33 | 0,32 | 0,33 | 0,38 |
| Ca | 0,25 | 0,27 | 0,25 | 0,24 |
| Cu | 0,14 | 0,15 | 0,13 | 0,13 |
| K | 0,11 | 0,13 | 0,16 | 0,15 |
| Mg | 0,07 | --- | 0,07 | 0,09 |
| Ti | 0,04 | 0,04 | 0,04 | 0,04 |
| Cd | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,03 |
| P | 0,02 | 0,01 | 0,02 | 0,02 |
| Na | --- | --- | 0,02 | --- |

Nota: Las muestras fueron analizadas mediante pastilla prensada, por lo cual los resultados son semi-cuantitativos.



Firmado electrónicamente por:
**DIANA ENDARA
DRANICHNIKOVA**

Ing. Diana Endara PhD.
Jefa de Departamento



Firmado electrónicamente por:
**EVELYN PAMELA
CRIOLLO TIRADO**

MSc. Evelyn Criollo
Jefa de Laboratorio



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA



Resultados Análisis de Difracción de Rayos X

Solicitante : Ing. Katherine Moreno.
No. Referencia : RM - 10227
Fecha : 15 - 11 - 2022
Muestras recibidas : Doce muestras sólidas denominadas:
Muestra 1 : 1-350 (Código registrado según cliente).
Muestra 2 : 1-350-B (Código registrado según cliente).
Muestra 3 : 2-400 (Código registrado según cliente).
Muestra 4 : 2-400-B (Código registrado según cliente).
Muestra 5 : 3-450 (Código registrado según cliente).
Muestra 6 : 3-450-B (Código registrado según cliente).
Muestra 7 : 4-500 (Código registrado según cliente).
Muestra 8 : 4-500-B (Código registrado según cliente).
Muestra 9 : 5-550 (Código registrado según cliente).
Muestra 10 : 5-550-B (Código registrado según cliente).
Muestra 11 : 6-600 (Código registrado según cliente).
Muestra 12 : 6-600-B (Código registrado según cliente).

La determinación de los compuestos con cristalización definida presentes en las muestras se realizó empleando el Difractómetro D8 ADVANCE y el programa Diffrac plus (EVA Y TOPAS) para cualificación y semi-cuantificación. A continuación, se detallan los resultados obtenidos del análisis.

| Mineral | Fórmula | Muestra 1 Contenido (%) | Muestra 2 Contenido (%) |
|------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Pirita | FeS ₂ | 73 | 73 |
| Galena | PbS | 15 | 15 |
| Esfalerita | ZnS | 5 | 5 |
| Hematita | Fe ₂ O ₃ | 3 | 3 |
| Cuarzo | SiO ₂ | 3 | 3 |
| Rodonita | MnSiO ₃ | 1 | 1 |

| Mineral | Fórmula | Muestra 3 Contenido (%) | Muestra 4 Contenido (%) |
|------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Pirita | FeS ₂ | 74 | 74 |
| Galena | PbS | 12 | 12 |
| Esfalerita | ZnS | 6 | 6 |
| Hematita | Fe ₂ O ₃ | 4 | 4 |
| Cuarzo | SiO ₂ | 3 | 3 |
| Rodonita | MnSiO ₃ | 1 | 1 |



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA



| Mineral | Fórmula | Muestra 5 Contenido (%) | Muestra 6 Contenido (%) |
|------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Hematita | Fe_2O_3 | 62 | 62 |
| Galena | PbS | 12 | 12 |
| Esfalerita | ZnS | 8 | 8 |
| Pirita | FeS_2 | 7 | 7 |
| Anglesita | PbSO_4 | 5 | 5 |
| Cuarzo | SiO_2 | 5 | 5 |
| Rodonita | MnSiO_3 | 1 | 1 |

| Mineral | Fórmula | Muestra 7 Contenido (%) | Muestra 8 Contenido (%) |
|------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Hematita | Fe_2O_3 | 64 | 64 |
| Anglesita | PbSO_4 | 9 | 9 |
| Pirita | FeS_2 | 8 | 8 |
| Galena | PbS | 7 | 7 |
| Esfalerita | ZnS | 7 | 7 |
| Cuarzo | SiO_2 | 4 | 4 |
| Rodonita | MnSiO_3 | 1 | 1 |

| Mineral | Fórmula | Muestra 9 Contenido (%) | Muestra 10 Contenido (%) |
|------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Hematita | Fe_2O_3 | 68 | 68 |
| Anglesita | PbSO_4 | 11 | 11 |
| Galena | PbS | 7 | 7 |
| Esfalerita | ZnS | 7 | 7 |
| Pirita | FeS_2 | 3 | 3 |
| Cuarzo | SiO_2 | 3 | 3 |
| Rodonita | MnSiO_3 | 1 | 1 |



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA



| Mineral | Fórmula | Muestra 11 Contenido (%) | Muestra 12 Contenido (%) |
|------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Hematita | Fe_2O_3 | 66 | 66 |
| Anglesita | PbSO_4 | 12 | 12 |
| Galena | PbS | 8 | 8 |
| Esfalerita | ZnS | 6 | 6 |
| Pirita | FeS_2 | 4 | 4 |
| Cuarzo | SiO_2 | 3 | 3 |
| Rodonita | MnSiO_3 | 1 | 1 |

NOTA: El límite de detección del equipo empleado es del 1% para compuestos con cristalización definida. Las muestras presentan material amorfo no cuantificado por esta técnica de análisis.



Firmado electrónicamente por:
DIANA ENDARA
DRANICHNIKOVA

Ing. Diana Endara PhD.
Jefe de Departamento



Firmado electrónicamente por:
EVELYN PAMELA
CRIOLLO TIRADO

MSc. Evelyn Criollo
Jefa de Laboratorio

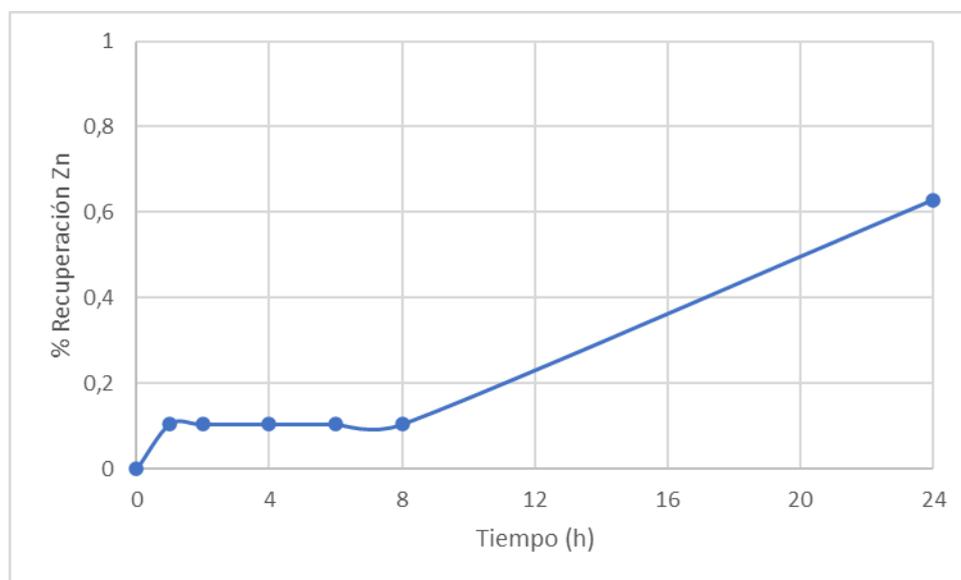
PARTE III

**ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN CON
SOLVENTES EUTÉCTICOS PROFUNDOS
(RELINA, ETALINA Y GLICELINA) DEL
CONCENTRADO DE ESFALERITA Y
GALENA**

FICHA TÉCNICA N°2

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|--------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena sin tratamiento térmico | SOLVENTE EUTÉCTICO | Relina |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de relina (g) | 10,14 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 199,6 | | |
| % Zn en el concentrado | 20,39 | | |
| Zn en el concentrado (mg) | 40,7 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

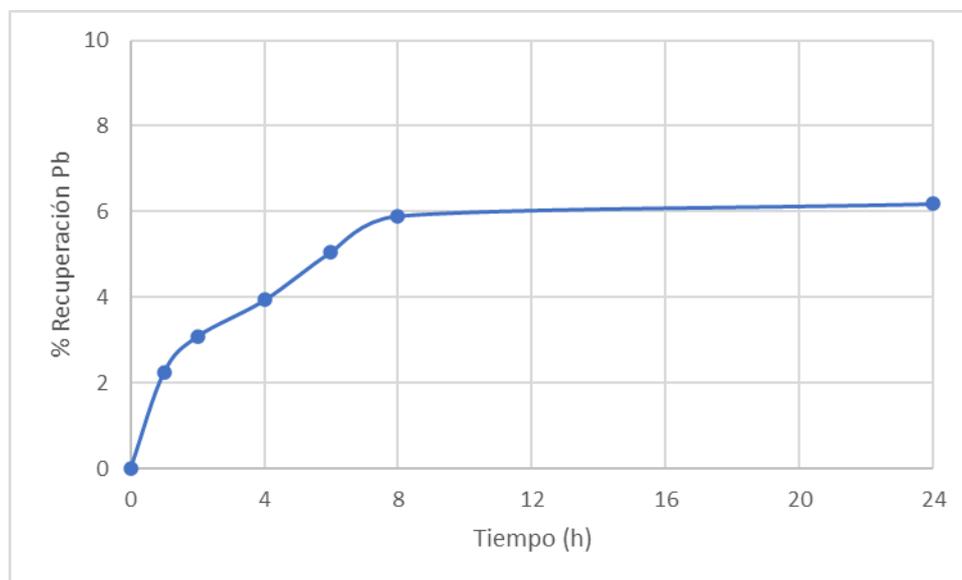
| t (h) | Zn (mg/L) | Zn (mg) | Zn en DES (mg/L) | Zn total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,010 | 0,001 | 5 | 0,043 | 0,1047 |
| 2 | 0,010 | 0,001 | 5 | 0,043 | 0,1047 |
| 4 | 0,010 | 0,001 | 5 | 0,043 | 0,1047 |
| 6 | 0,010 | 0,001 | 5 | 0,043 | 0,1047 |
| 8 | 0,010 | 0,001 | 5 | 0,043 | 0,1047 |
| 24 | 0,060 | 0,003 | 30 | 0,256 | 0,6281 |



FICHA TÉCNICA N°3

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|--------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena sin tratamiento térmico | SOLVENTE EUTÉCTICO | Relina |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de relina (g) | 10,14 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 199,6 | | |
| % Pb en el concentrado | 7,59 | | |
| Pb en el concentrado (mg) | 15,15 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

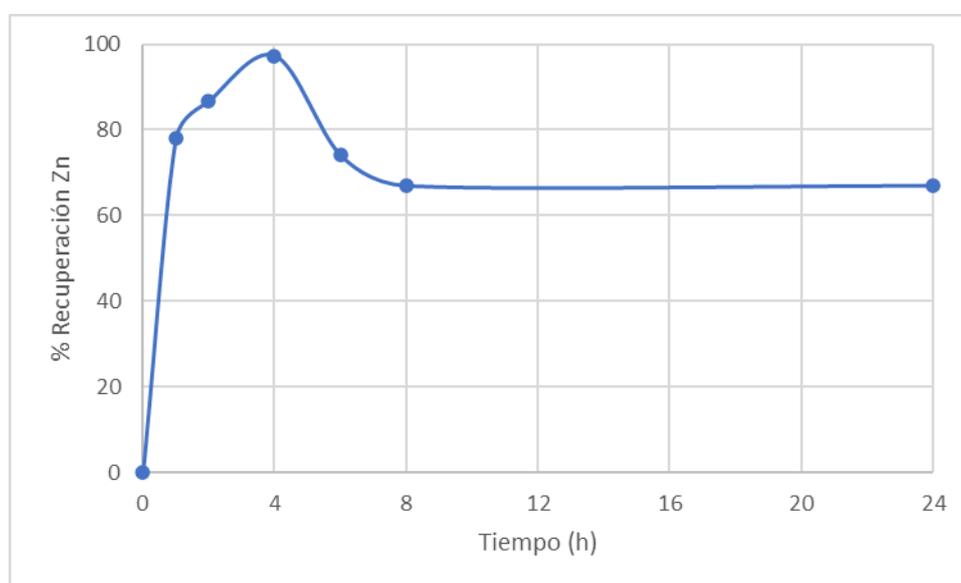
| t (h) | Pb (mg/L) | Pb (mg) | Pb en DES (mg/L) | Pb total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,080 | 0,004 | 40 | 0,341 | 2,2498 |
| 2 | 0,110 | 0,006 | 55 | 0,469 | 3,0935 |
| 4 | 0,140 | 0,007 | 70 | 0,596 | 3,9372 |
| 6 | 0,180 | 0,009 | 90 | 0,767 | 5,0621 |
| 8 | 0,210 | 0,011 | 105 | 0,895 | 5,9058 |
| 24 | 0,220 | 0,011 | 110 | 0,937 | 6,1870 |



FICHA TÉCNICA N°4

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|--------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena con tratamiento térmico a 600°C durante 8 horas | SOLVENTE EUTÉCTICO | Relina |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de relina (g) | 10,02 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 204,1 | | |
| % Zn en el concentrado | 5,3 | | |
| Zn en el concentrado (mg) | 10,82 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

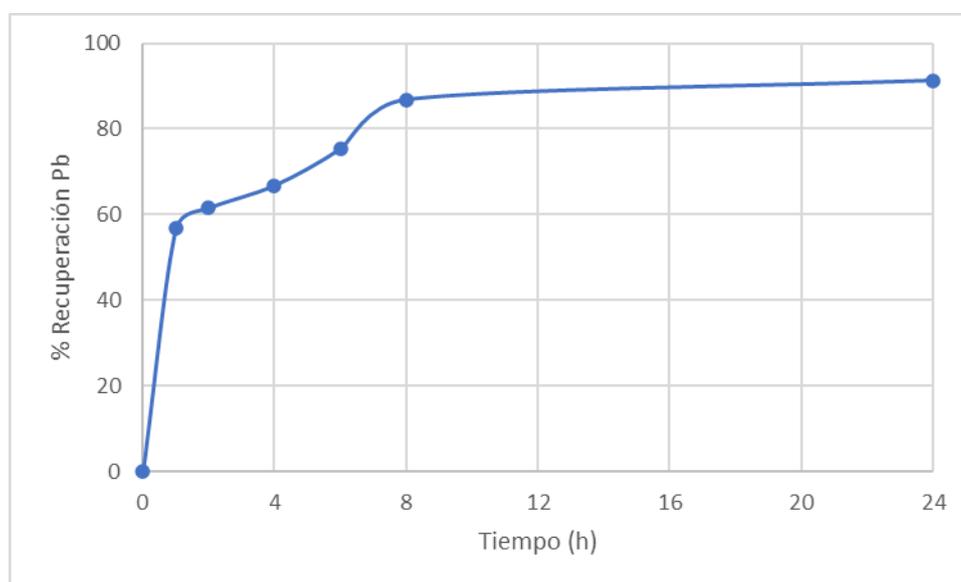
| t (h) | Zn (mg/L) | Zn (mg) | Zn en DES (mg/L) | Zn total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1,980 | 0,099 | 990 | 8,436 | 77,9843 |
| 2 | 2,200 | 0,110 | 1100 | 9,373 | 86,6492 |
| 4 | 2,470 | 0,124 | 1235 | 10,523 | 97,2835 |
| 6 | 1,880 | 0,094 | 940 | 8,010 | 74,0457 |
| 8 | 1,700 | 0,085 | 850 | 7,243 | 66,9562 |
| 24 | 1,700 | 0,085 | 850 | 7,243 | 66,9562 |



FICHA TÉCNICA N°5

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|--------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena con tratamiento térmico a 600°C durante 8 horas | SOLVENTE EUTÉCTICO | Relina |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de relina (g) | 10,02 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 204,1 | | |
| % Pb en el concentrado | 12,19 | | |
| Pb en el concentrado (mg) | 24,88 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

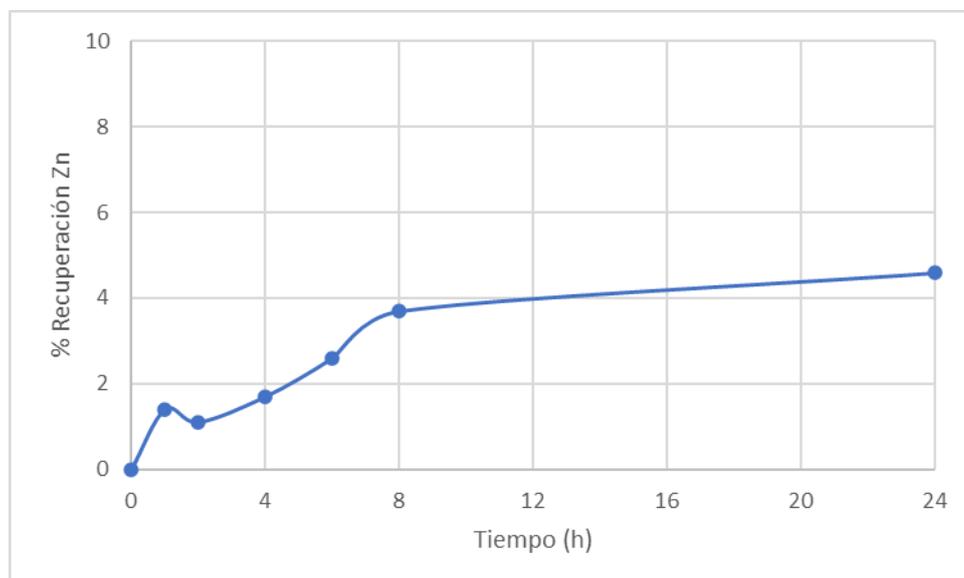
| t (h) | Pb (mg/L) | Pb (mg) | Pb en DES (mg/L) | Pb total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 3,350 | 0,168 | 1675 | 14,104 | 56,6877 |
| 2 | 3,590 | 0,180 | 1795 | 15,295 | 61,4764 |
| 4 | 3,900 | 0,195 | 1950 | 16,616 | 66,7850 |
| 6 | 4,400 | 0,220 | 2200 | 18,746 | 75,3472 |
| 8 | 5,070 | 0,254 | 2535 | 21,601 | 86,8205 |
| 24 | 5,330 | 0,267 | 2665 | 22,708 | 91,2728 |



FICHA TÉCNICA N°6

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|-----------------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena sin tratamiento térmico | SOLVENTE EUTÉCTICO | Relina más yodo |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de relina (g) | 10,02 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 207,1 | | |
| % Zn en el concentrado | 20,39 | | |
| Zn en el concentrado (mg) | 42,22 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

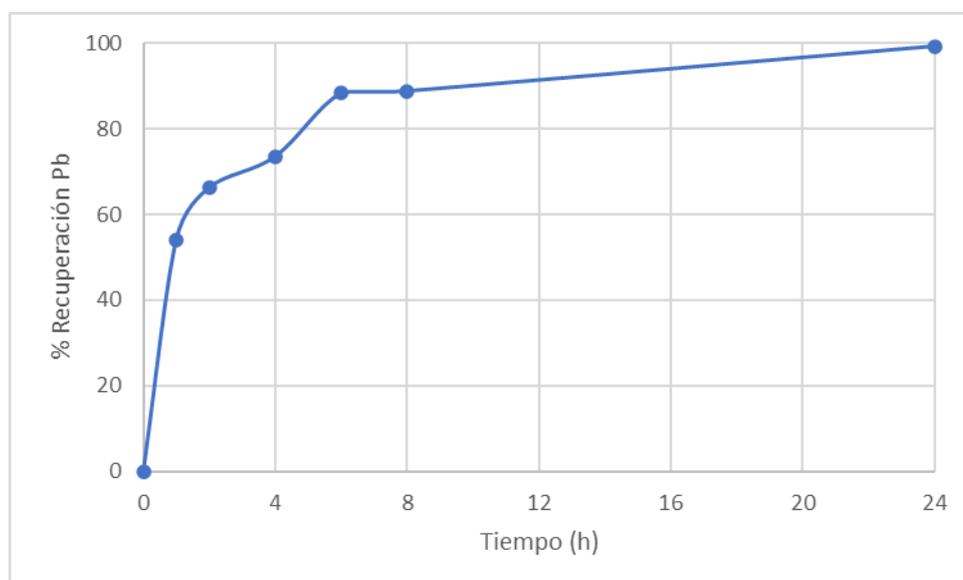
| t (h) | Zn (mg/L) | Zn (mg) | Zn en DES (mg/L) | Zn total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,140 | 0,007 | 70 | 0,590 | 1,3979 |
| 2 | 0,110 | 0,006 | 55 | 0,464 | 1,0983 |
| 4 | 0,170 | 0,009 | 85 | 0,717 | 1,6974 |
| 6 | 0,260 | 0,013 | 130 | 1,096 | 2,5961 |
| 8 | 0,370 | 0,019 | 185 | 1,560 | 3,6944 |
| 24 | 0,460 | 0,023 | 230 | 1,940 | 4,5930 |



FICHA TÉCNICA N°7

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|-----------------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena sin tratamiento térmico | SOLVENTE EUTÉCTICO | Relina más yodo |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de relina (g) | 10,02 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 207,1 | | |
| % Pb en el concentrado | 7,59 | | |
| Pb en el concentrado (mg) | 15,71 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

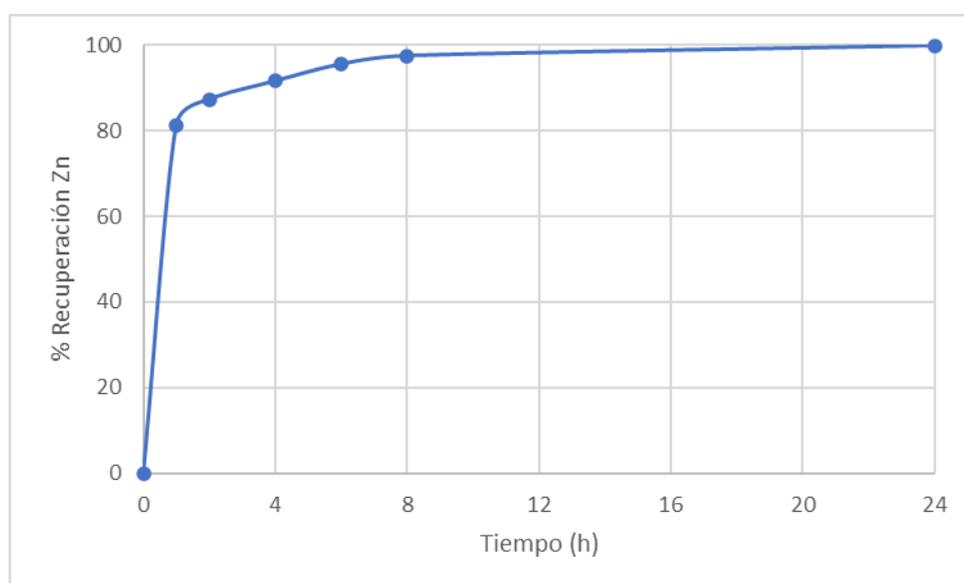
| t (h) | Pb (mg/L) | Pb (mg) | Pb en DES (mg/L) | Pb total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 2,320 | 0,116 | 1009 | 8,506 | 54,1139 |
| 2 | 2,470 | 0,124 | 1235 | 10,414 | 66,2545 |
| 4 | 2,740 | 0,137 | 1370 | 11,553 | 73,4969 |
| 6 | 3,290 | 0,165 | 1645 | 13,872 | 88,2499 |
| 8 | 3,310 | 0,166 | 1655 | 13,956 | 88,7864 |
| 24 | 3,700 | 0,185 | 1850 | 15,601 | 99,2477 |



FICHA TÉCNICA N°8

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|-----------------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena con tratamiento térmico a 600°C durante 8 horas | SOLVENTE EUTÉCTICO | Relina más yodo |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de relina (g) | 10,02 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 207,1 | | |
| % Zn en el concentrado | 5,3 | | |
| Zn en el concentrado (mg) | 10,73 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

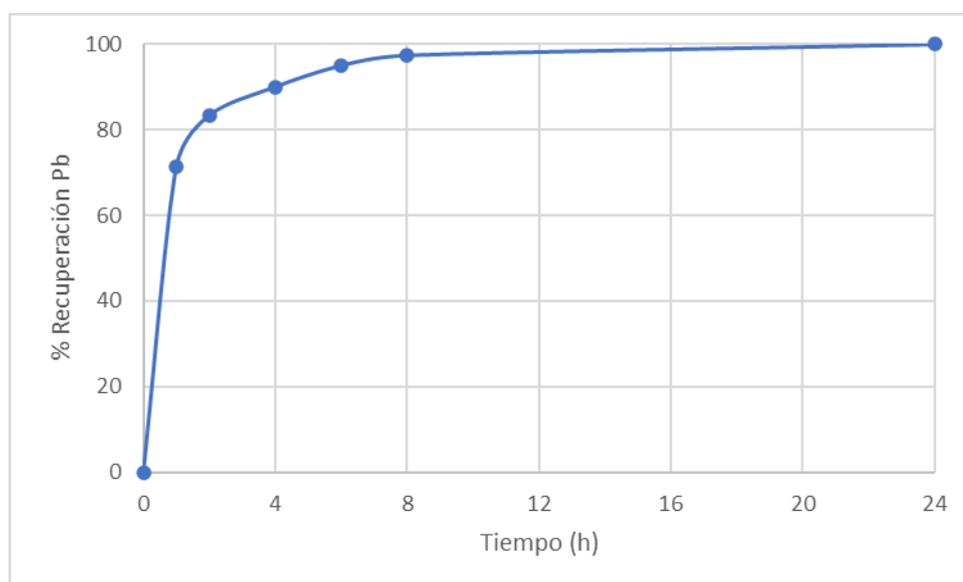
| t (h) | Zn (mg/L) | Zn (mg) | Zn en DES (mg/L) | Zn total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 2,070 | 0,104 | 1035 | 8,728 | 81,3223 |
| 2 | 2,220 | 0,111 | 1110 | 9,360 | 87,2153 |
| 4 | 2,330 | 0,117 | 1165 | 9,824 | 91,5367 |
| 6 | 2,430 | 0,122 | 1215 | 10,246 | 95,4654 |
| 8 | 2,480 | 0,124 | 1240 | 10,457 | 97,4297 |
| 24 | 2,540 | 0,127 | 1270 | 10,710 | 99,7868 |



FICHA TÉCNICA N°9

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|-----------------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena con tratamiento térmico a 600°C durante 8 horas | SOLVENTE EUTÉCTICO | Relina más yodo |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de relina (g) | 10,02 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 207,1 | | |
| % Pb en el concentrado | 12,19 | | |
| Pb en el concentrado (mg) | 24,68 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

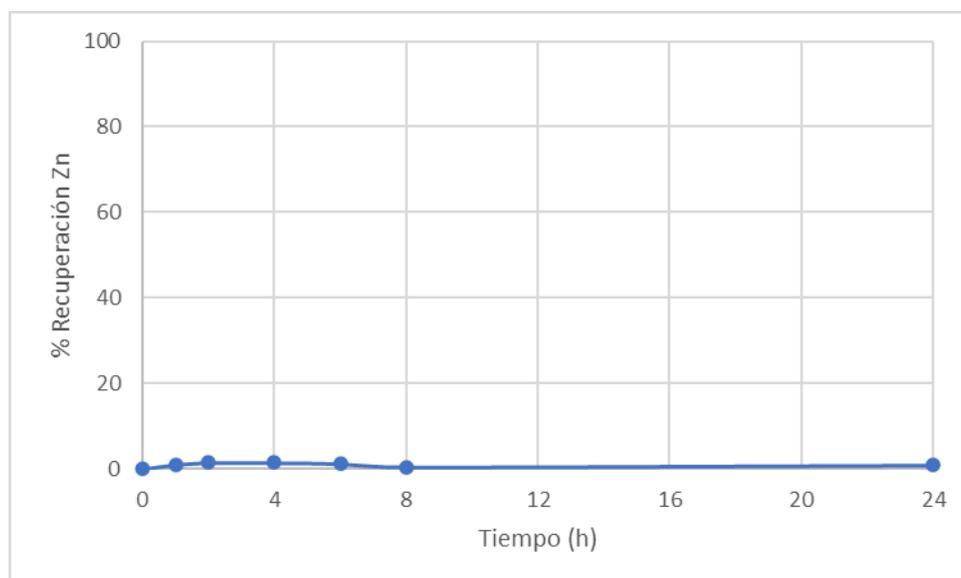
| t (h) | Pb (mg/L) | Pb (mg) | Pb en DES (mg/L) | Pb total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 4,800 | 0,240 | 2087 | 17,599 | 71,2943 |
| 2 | 4,880 | 0,244 | 2440 | 20,576 | 83,3550 |
| 4 | 5,270 | 0,264 | 2635 | 22,220 | 90,0165 |
| 6 | 5,560 | 0,278 | 2780 | 23,443 | 94,9700 |
| 8 | 5,700 | 0,285 | 2850 | 24,033 | 97,3613 |
| 24 | 5,850 | 0,293 | 2925 | 24,666 | 99,9235 |



FICHA TÉCNICA N°10

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|---------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena sin tratamiento térmico | SOLVENTE EUTÉCTICO | Etalina |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de etalina (g) | 10,01 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 201,5 | | |
| % Zn en el concentrado | 20,39 | | |
| Zn en el concentrado (mg) | 41,09 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

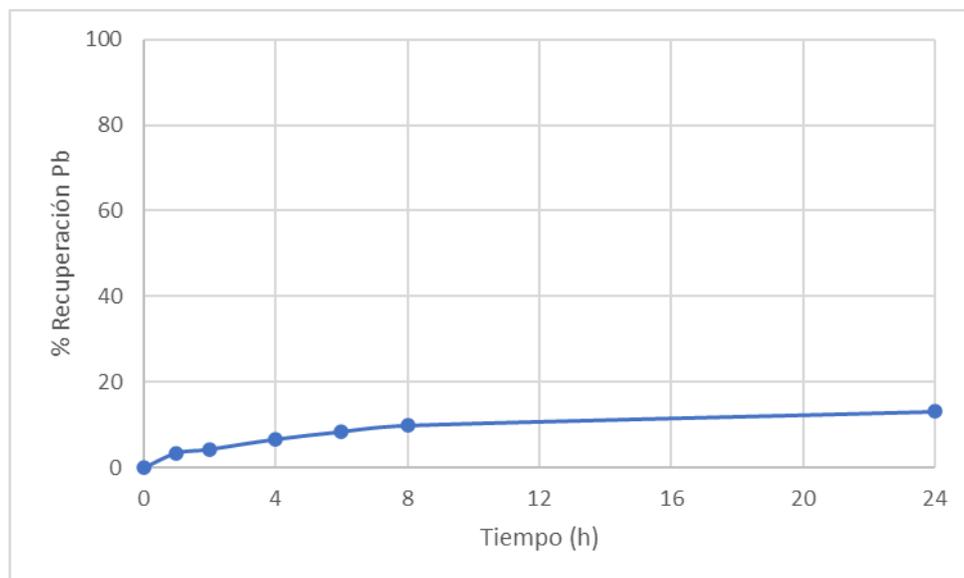
| t (h) | Zn (mg/L) | Zn (mg) | Zn en DES (mg/L) | Zn total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,090 | 0,005 | 45 | 0,402 | 0,9789 |
| 2 | 0,130 | 0,007 | 65 | 0,581 | 1,4140 |
| 4 | 0,130 | 0,007 | 65 | 0,581 | 1,4140 |
| 6 | 0,110 | 0,006 | 55 | 0,492 | 1,1964 |
| 8 | 0,040 | 0,002 | 20 | 0,179 | 0,4351 |
| 24 | 0,080 | 0,004 | 40 | 0,358 | 0,8701 |



FICHA TÉCNICA N°11

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|---------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena sin tratamiento térmico | SOLVENTE EUTÉCTICO | Etalina |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de etalina (g) | 10,01 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 201,5 | | |
| % Pb en el concentrado | 7,59 | | |
| Pb en el concentrado (mg) | 15,29 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

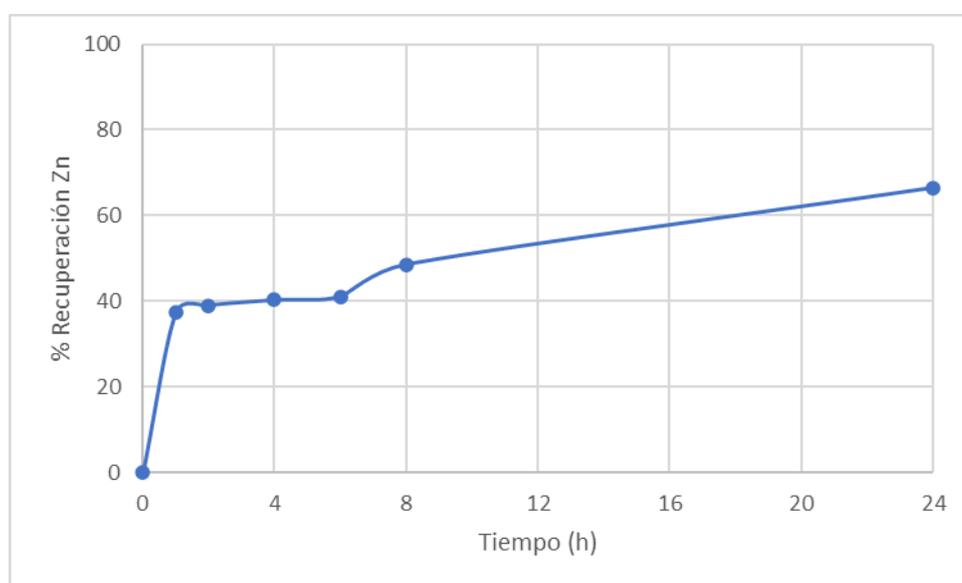
| t (h) | Pb (mg/L) | Pb (mg) | Pb en DES (mg/L) | Pb total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,120 | 0,006 | 60 | 0,536 | 3,5063 |
| 2 | 0,150 | 0,008 | 75 | 0,670 | 4,3829 |
| 4 | 0,230 | 0,012 | 115 | 1,028 | 6,7204 |
| 6 | 0,290 | 0,015 | 145 | 1,296 | 8,4736 |
| 8 | 0,340 | 0,017 | 170 | 1,519 | 9,9345 |
| 24 | 0,450 | 0,023 | 225 | 2,011 | 13,1487 |



FICHA TÉCNICA N°12

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|---------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena con tratamiento térmico a 600°C durante 8 horas | SOLVENTE EUTÉCTICO | Etalina |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de etalina (g) | 10,03 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 203,1 | | |
| % Zn en el concentrado | 5,3 | | |
| Zn en el concentrado (mg) | 10,76 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

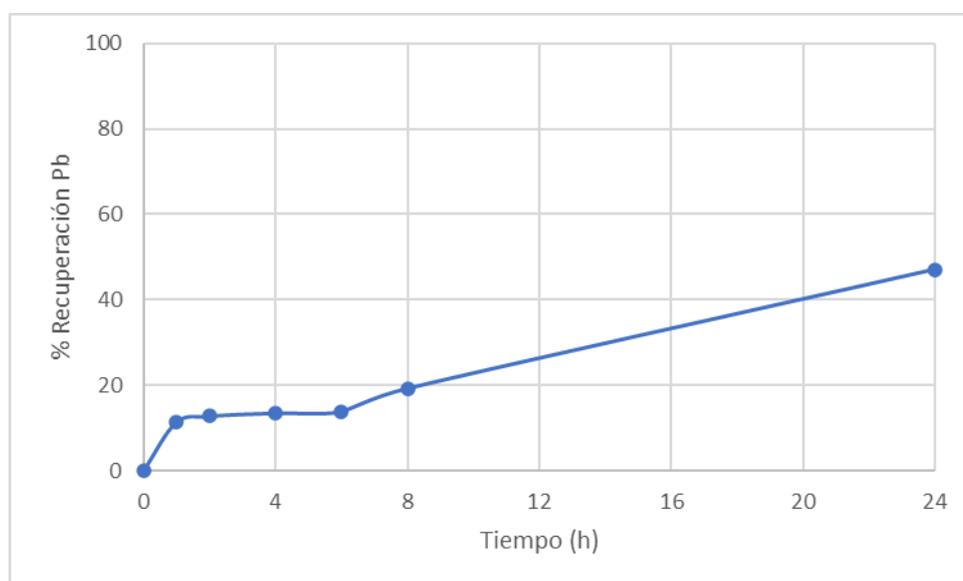
| t (h) | Zn (mg/L) | Zn (mg) | Zn en DES (mg/L) | Zn total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,900 | 0,045 | 450 | 4,022 | 37,3631 |
| 2 | 0,940 | 0,047 | 470 | 4,201 | 39,0237 |
| 4 | 0,970 | 0,049 | 485 | 4,335 | 40,2691 |
| 6 | 0,990 | 0,050 | 495 | 4,424 | 41,0994 |
| 8 | 1,170 | 0,059 | 585 | 5,228 | 48,5720 |
| 24 | 1,600 | 0,080 | 800 | 7,150 | 66,4233 |



FICHA TÉCNICA N°13

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|---------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena con tratamiento térmico a 600°C durante 8 horas | SOLVENTE EUTÉCTICO | Etalina |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de etalina (g) | 10,03 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 203,1 | | |
| % Pb en el concentrado | 12,19 | | |
| Pb en el concentrado (mg) | 24,76 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

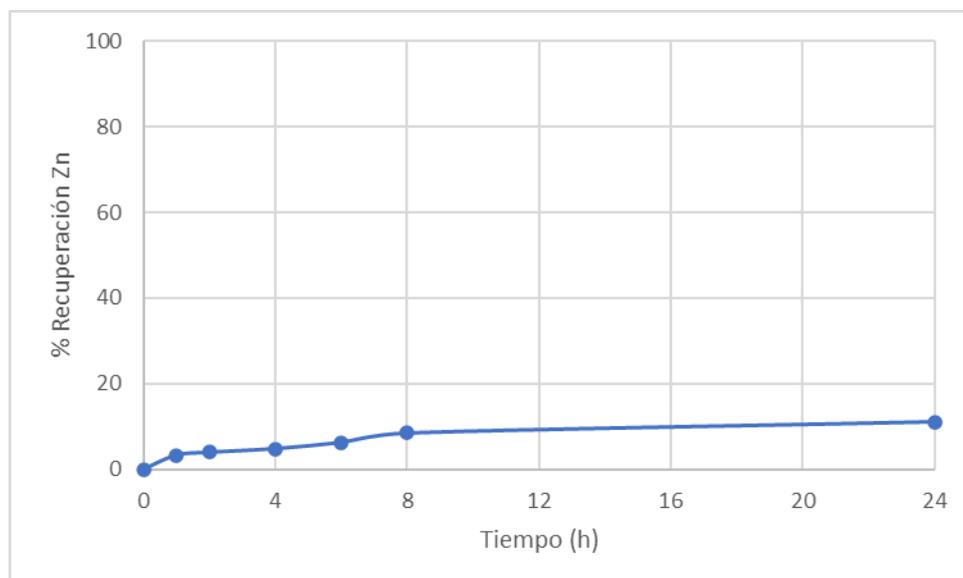
| t (h) | Pb (mg/L) | Pb (mg) | Pb en DES (mg/L) | Pb total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,630 | 0,032 | 315 | 2,815 | 11,3714 |
| 2 | 0,710 | 0,036 | 355 | 3,173 | 12,8154 |
| 4 | 0,750 | 0,038 | 375 | 3,352 | 13,5374 |
| 6 | 0,770 | 0,039 | 385 | 3,441 | 13,8983 |
| 8 | 1,070 | 0,054 | 535 | 4,782 | 19,3133 |
| 24 | 2,610 | 0,131 | 1305 | 11,663 | 47,1100 |



FICHA TÉCNICA N°14

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|------------------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena sin tratamiento térmico | SOLVENTE EUTÉCTICO | Etalina más yodo |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de etalina (g) | 10,07 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 200,2 | | |
| % Zn en el concentrado | 20,39 | | |
| Zn en el concentrado (mg) | 40,82 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

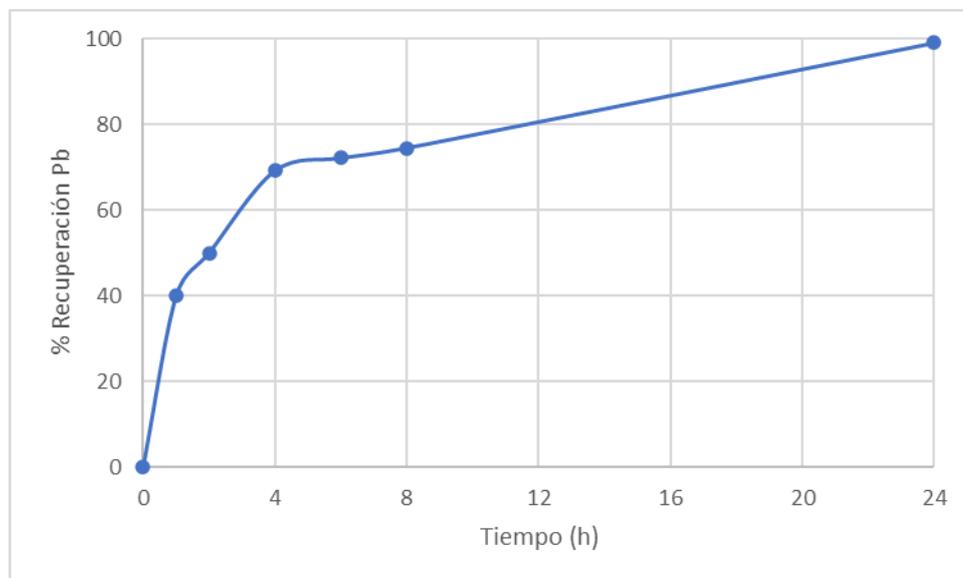
| t (h) | Zn (mg/L) | Zn (mg) | Zn en DES (mg/L) | Zn total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,300 | 0,015 | 150 | 1,349 | 3,3039 |
| 2 | 0,360 | 0,018 | 180 | 1,618 | 3,9646 |
| 4 | 0,440 | 0,022 | 220 | 1,978 | 4,8457 |
| 6 | 0,570 | 0,029 | 285 | 2,562 | 6,2773 |
| 8 | 0,770 | 0,039 | 385 | 3,462 | 8,4799 |
| 24 | 1,010 | 0,051 | 505 | 4,540 | 11,1230 |



FICHA TÉCNICA N°15

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|------------------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena sin tratamiento térmico | SOLVENTE EUTÉCTICO | Etalina más yodo |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de etalina (g) | 10,07 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 200,2 | | |
| % Pb en el concentrado | 7,59 | | |
| Pb en el concentrado (mg) | 15,2 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

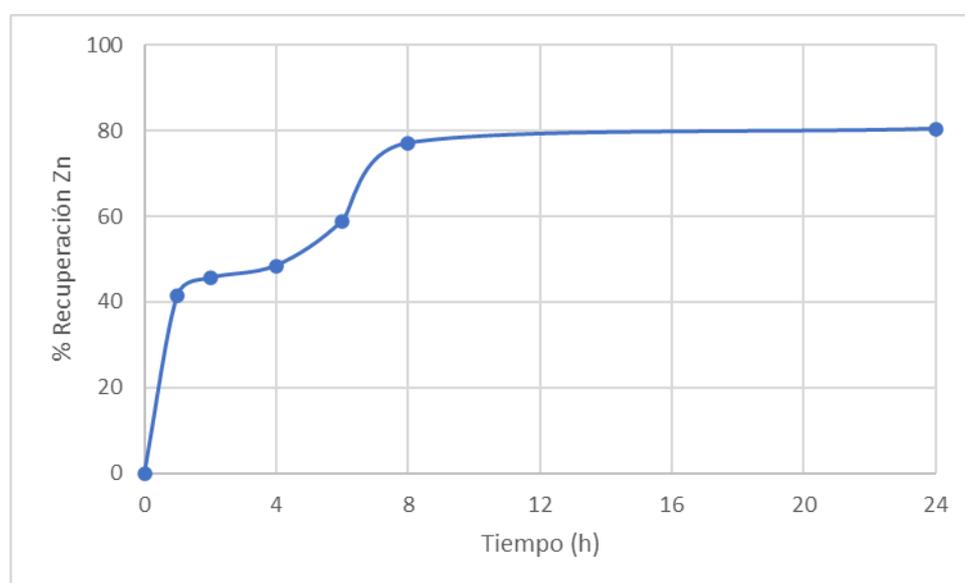
| t (h) | Pb (mg/L) | Pb (mg) | Pb en DES (mg/L) | Pb total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1,350 | 0,068 | 675 | 6,069 | 39,9401 |
| 2 | 1,690 | 0,085 | 845 | 7,597 | 49,9991 |
| 4 | 2,340 | 0,117 | 1170 | 10,520 | 69,2295 |
| 6 | 2,440 | 0,122 | 1220 | 10,969 | 72,1881 |
| 8 | 2,520 | 0,126 | 1260 | 11,329 | 74,5549 |
| 24 | 3,350 | 0,168 | 1675 | 15,060 | 99,1107 |



FICHA TÉCNICA N°16

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|------------------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena con tratamiento térmico a 600°C durante 8 horas | SOLVENTE EUTÉCTICO | Etalina más yodo |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de etalina (g) | 10,21 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 204,8 | | |
| % Zn en el concentrado | 5,3 | | |
| Zn en el concentrado (mg) | 10,85 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

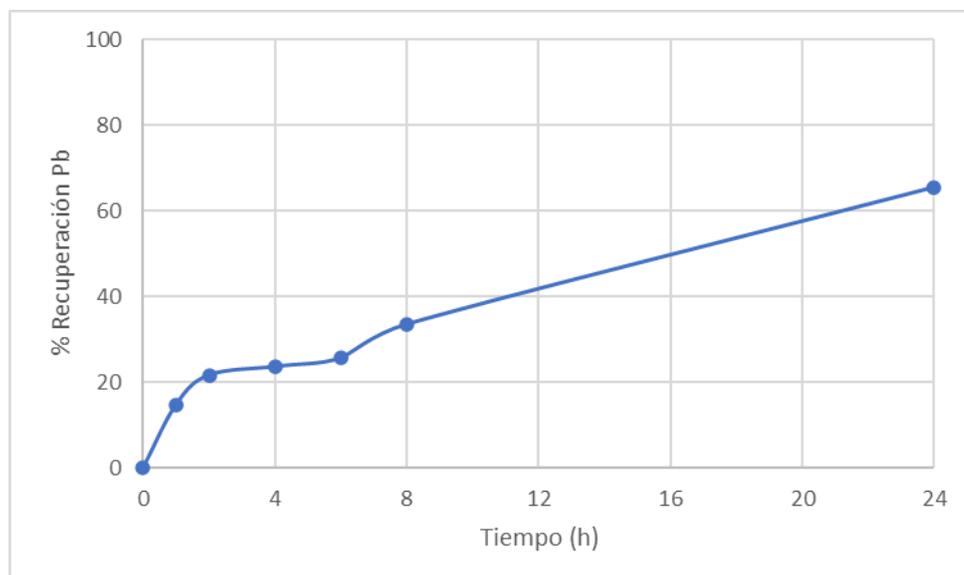
| t (h) | Zn (mg/L) | Zn (mg) | Zn en DES (mg/L) | Zn total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1,000 | 0,050 | 500 | 4,496 | 41,4167 |
| 2 | 1,100 | 0,055 | 550 | 4,945 | 45,5584 |
| 4 | 1,170 | 0,059 | 585 | 5,260 | 48,4576 |
| 6 | 1,420 | 0,071 | 710 | 6,384 | 58,8117 |
| 8 | 1,860 | 0,093 | 930 | 8,362 | 77,0351 |
| 24 | 1,940 | 0,097 | 970 | 8,721 | 80,3484 |



FICHA TÉCNICA N°17

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|------------------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena con tratamiento térmico a 600°C durante 8 horas | SOLVENTE EUTÉCTICO | Etalina más yodo |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de etalina (g) | 10,21 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 204,8 | | |
| % Pb en el concentrado | 12,19 | | |
| Pb en el concentrado (mg) | 24,97 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

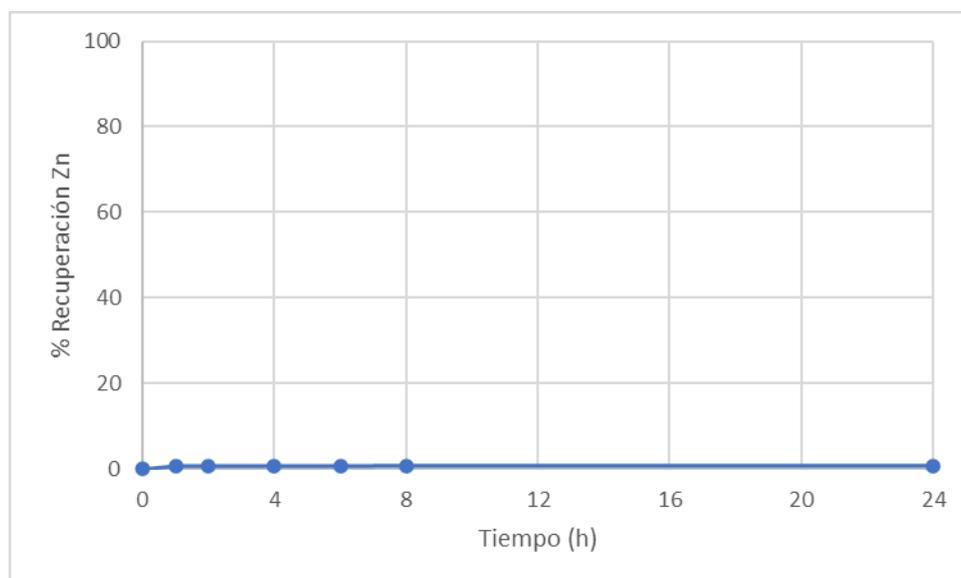
| t (h) | Pb (mg/L) | Pb (mg) | Pb en DES (mg/L) | Pb total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,820 | 0,041 | 410 | 3,686 | 14,7660 |
| 2 | 1,200 | 0,060 | 600 | 5,395 | 21,6087 |
| 4 | 1,310 | 0,066 | 655 | 5,889 | 23,5895 |
| 6 | 1,420 | 0,071 | 710 | 6,384 | 25,5703 |
| 8 | 1,860 | 0,093 | 930 | 8,362 | 33,4935 |
| 24 | 3,640 | 0,182 | 1820 | 16,364 | 65,5465 |



FICHA TÉCNICA N°18

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|-----------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena sin tratamiento térmico | SOLVENTE EUTÉCTICO | Glicelina |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de glicelina (g) | 10,01 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 218,5 | | |
| % Zn en el concentrado | 20,39 | | |
| Zn en el concentrado (mg) | 44,47 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

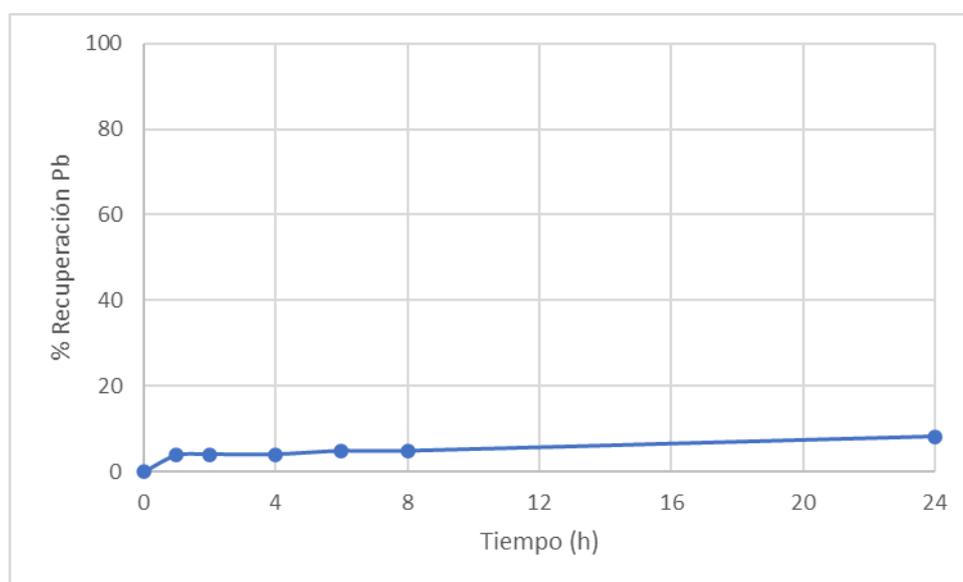
| t (h) | Zn (mg/L) | Zn (mg) | Zn en DES (mg/L) | Zn total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,060 | 0,003 | 30 | 0,271 | 0,6084 |
| 2 | 0,060 | 0,003 | 30 | 0,271 | 0,6084 |
| 4 | 0,060 | 0,003 | 30 | 0,271 | 0,6084 |
| 6 | 0,060 | 0,003 | 30 | 0,271 | 0,6084 |
| 8 | 0,070 | 0,004 | 35 | 0,316 | 0,7098 |
| 24 | 0,070 | 0,004 | 35 | 0,316 | 0,7098 |



FICHA TÉCNICA N°19

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|-----------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena sin tratamiento térmico | SOLVENTE EUTÉCTICO | Glicelina |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de glicelina (g) | 10,01 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 218,5 | | |
| % Pb en el concentrado | 7,59 | | |
| Pb en el concentrado (mg) | 16,55 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

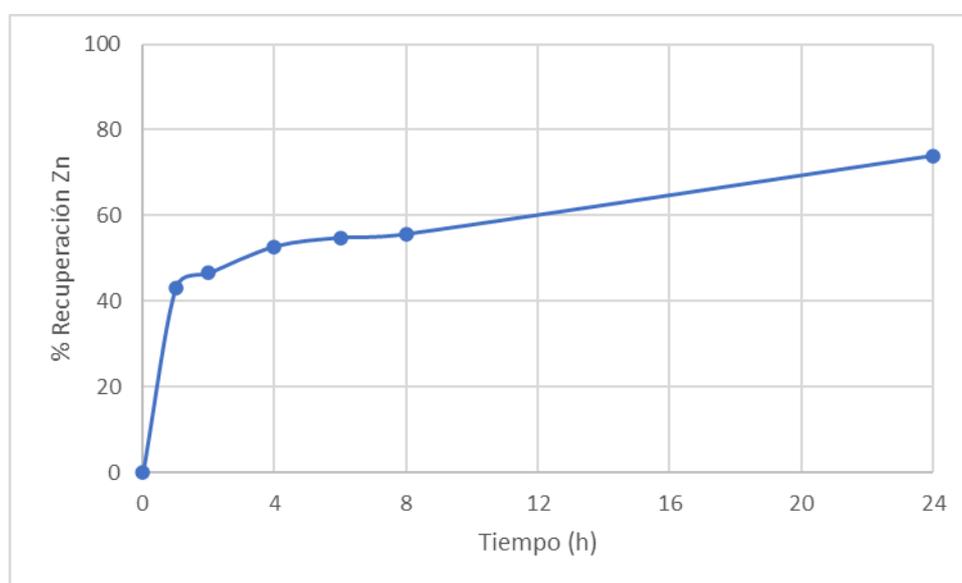
| t (h) | Pb (mg/L) | Pb (mg) | Pb en DES (mg/L) | Pb total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,140 | 0,007 | 70 | 0,631 | 3,8134 |
| 2 | 0,150 | 0,008 | 75 | 0,676 | 4,0858 |
| 4 | 0,150 | 0,008 | 75 | 0,676 | 4,0858 |
| 6 | 0,180 | 0,009 | 90 | 0,812 | 4,9029 |
| 8 | 0,180 | 0,009 | 90 | 0,812 | 4,9029 |
| 24 | 0,300 | 0,015 | 150 | 1,353 | 8,1716 |



FICHA TÉCNICA N°20

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|-----------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena con tratamiento térmico a 600°C durante 8 horas | SOLVENTE EUTÉCTICO | Glicelina |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de glicelina (g) | 10,21 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 204,8 | | |
| % Zn en el concentrado | 5,3 | | |
| Zn en el concentrado (mg) | 10,85 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

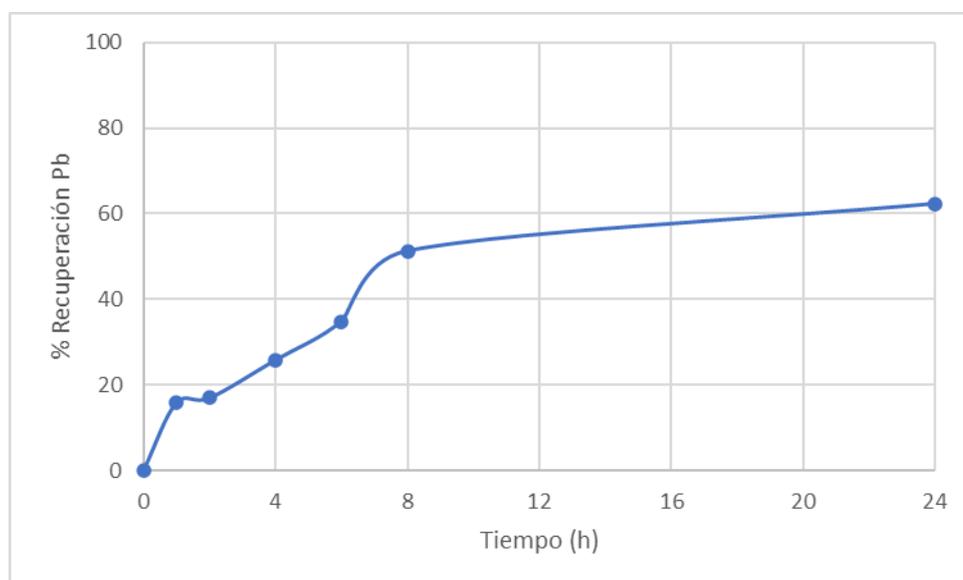
| t (h) | Zn (mg/L) | Zn (mg) | Zn en DES (mg/L) | Zn total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1,040 | 0,052 | 520 | 4,689 | 43,2025 |
| 2 | 1,120 | 0,056 | 560 | 5,050 | 46,5257 |
| 4 | 1,270 | 0,064 | 635 | 5,726 | 52,7569 |
| 6 | 1,320 | 0,066 | 660 | 5,952 | 54,8339 |
| 8 | 1,340 | 0,067 | 670 | 6,042 | 55,6647 |
| 24 | 1,780 | 0,089 | 890 | 8,026 | 73,9427 |



FICHA TÉCNICA N°21

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|-----------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena con tratamiento térmico a 600°C durante 8 horas | SOLVENTE EUTÉCTICO | Glicelina |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de glicelina (g) | 10,21 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 204,8 | | |
| % Pb en el concentrado | 12,19 | | |
| Pb en el concentrado (mg) | 24,97 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

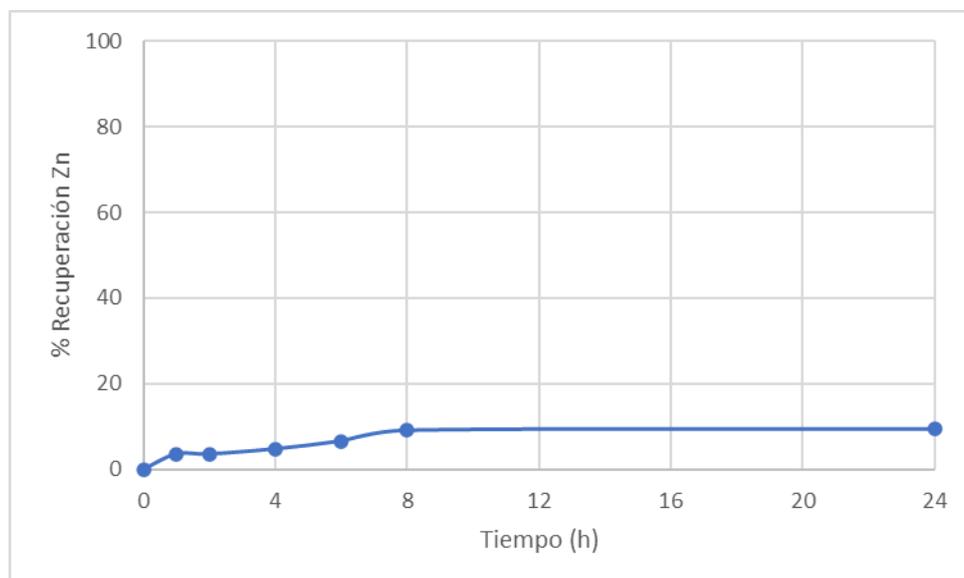
| t (h) | Pb (mg/L) | Pb (mg) | Pb en DES (mg/L) | Pb total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,880 | 0,044 | 440 | 3,968 | 15,8939 |
| 2 | 0,940 | 0,047 | 470 | 4,238 | 16,9776 |
| 4 | 1,430 | 0,072 | 715 | 6,448 | 25,8276 |
| 6 | 1,930 | 0,097 | 965 | 8,702 | 34,8582 |
| 8 | 2,840 | 0,142 | 1420 | 12,806 | 51,2939 |
| 24 | 3,450 | 0,173 | 1725 | 15,556 | 62,3113 |



FICHA TÉCNICA N°22

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|--------------------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena sin tratamiento térmico | SOLVENTE EUTÉCTICO | Glicelina más yodo |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de glicelina (g) | 10,03 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 204,2 | | |
| % Zn en el concentrado | 20,39 | | |
| Zn en el concentrado (mg) | 41,64 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

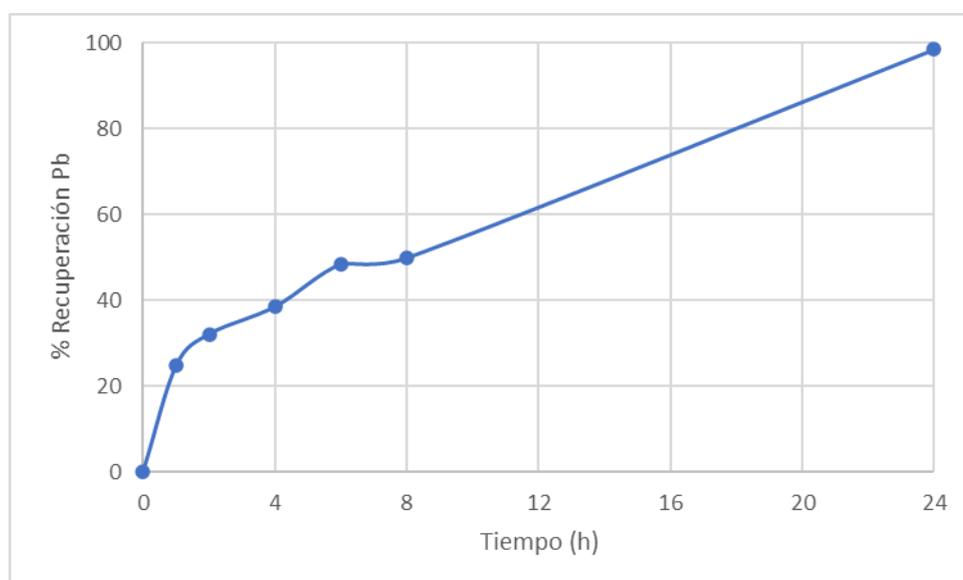
| t (h) | Zn (mg/L) | Zn (mg) | Zn en DES (mg/L) | Zn total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,330 | 0,017 | 165 | 1,491 | 3,5809 |
| 2 | 0,330 | 0,017 | 165 | 1,491 | 3,5809 |
| 4 | 0,440 | 0,022 | 220 | 1,988 | 4,7745 |
| 6 | 0,610 | 0,031 | 305 | 2,756 | 6,6192 |
| 8 | 0,840 | 0,042 | 420 | 3,795 | 9,1149 |
| 24 | 0,870 | 0,044 | 435 | 3,931 | 9,4405 |



FICHA TÉCNICA N°23

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|--------------------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena sin tratamiento térmico | SOLVENTE EUTÉCTICO | Glicelina más yodo |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de glicelina (g) | 10,03 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 204,2 | | |
| % Pb en el concentrado | 7,59 | | |
| Pb en el concentrado (mg) | 15,5 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

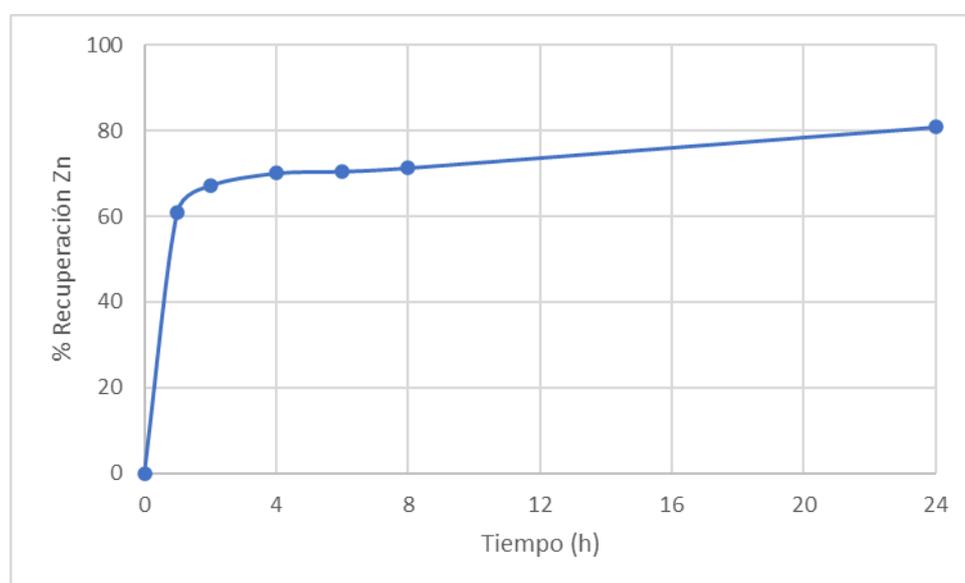
| t (h) | Pb (mg/L) | Pb (mg) | Pb en DES (mg/L) | Pb total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0,850 | 0,043 | 425 | 3,840 | 24,7782 |
| 2 | 1,100 | 0,055 | 550 | 4,970 | 32,0659 |
| 4 | 1,320 | 0,066 | 660 | 5,964 | 38,4791 |
| 6 | 1,660 | 0,083 | 830 | 7,500 | 48,3903 |
| 8 | 1,710 | 0,086 | 855 | 7,726 | 49,8479 |
| 24 | 3,380 | 0,169 | 1690 | 15,271 | 98,5297 |



FICHA TÉCNICA N°24

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|--------------------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena con tratamiento térmico a 600°C durante 8 horas | SOLVENTE EUTÉCTICO | Glicelina más yodo |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de glicelina (g) | 10,07 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 205,7 | | |
| % Zn en el concentrado | 5,3 | | |
| Zn en el concentrado (mg) | 10,9 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

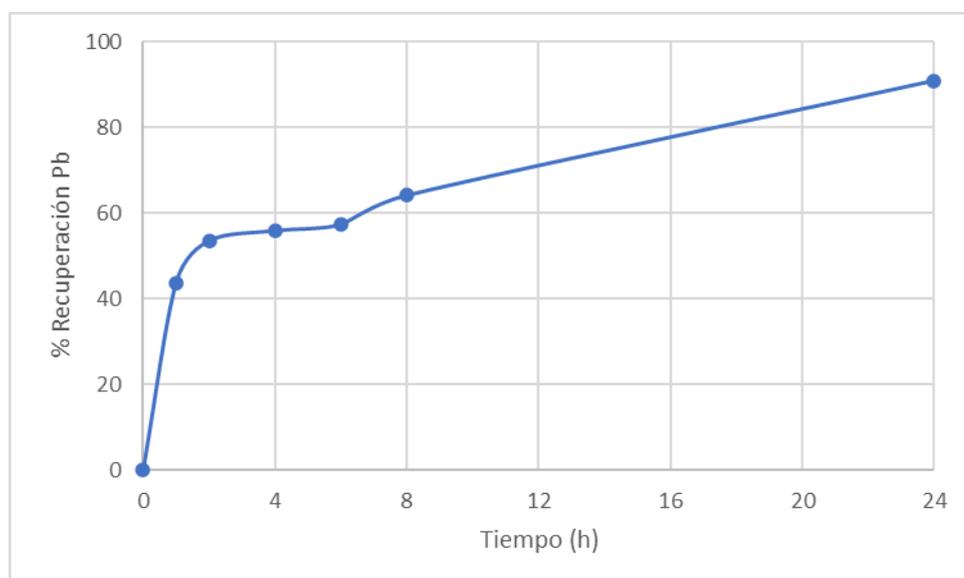
| t (h) | Zn (mg/L) | Zn (mg) | Zn en DES (mg/L) | Zn total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1,470 | 0,074 | 735 | 6,641 | 60,9193 |
| 2 | 1,620 | 0,081 | 810 | 7,319 | 67,1356 |
| 4 | 1,690 | 0,085 | 845 | 7,635 | 70,0365 |
| 6 | 1,700 | 0,085 | 850 | 7,681 | 70,4509 |
| 8 | 1,720 | 0,086 | 860 | 7,771 | 71,2798 |
| 24 | 1,950 | 0,098 | 975 | 8,810 | 80,8114 |



FICHA TÉCNICA N°25

| | | | |
|--------------------------------|--|---------------------------|--------------------|
| MUESTRA | Concentrado de esfalerita y galena con tratamiento térmico a 600°C durante 8 horas | SOLVENTE EUTÉCTICO | Glicelina más yodo |
| Condiciones del ensayo | | | |
| Temperatura(°C) | 30 | | |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 | | |
| Agitación (RPM) | 100 | | |
| Masa de glicelina (g) | 10,07 | | |
| Masa de concentrado (mg) | 205,7 | | |
| % Pb en el concentrado | 12,19 | | |
| Pb en el concentrado (mg) | 25,07 | | |
| Condiciones de muestreo | | | |
| Volumen de alícuota (µL) | 100 (100-150) | | |
| Volumen de aforo (mL) | 50 | | |
| Solución de aforo | Solución al 2% de HNO ₃ | | |

| t (h) | Pb (mg/L) | Pb (mg) | Pb en DES (mg/L) | Pb total DES (mg) | %recuperación |
|-------|-----------|---------|------------------|-------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 2,430 | 0,122 | 1215 | 10,979 | 43,7841 |
| 2 | 2,970 | 0,149 | 1485 | 13,419 | 53,5139 |
| 4 | 3,100 | 0,155 | 1550 | 14,006 | 55,8562 |
| 6 | 3,180 | 0,159 | 1590 | 14,367 | 57,2977 |
| 8 | 3,560 | 0,178 | 1780 | 16,084 | 64,1446 |
| 24 | 5,050 | 0,253 | 2525 | 22,816 | 90,9916 |



PARTE IV
ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN CON ÁCIDOS
(SULFÚRICO Y NÍTRICO) DEL
CONCENTRADO DE ESFALERITA Y
GALENA

FICHA TÉCNICA N°26

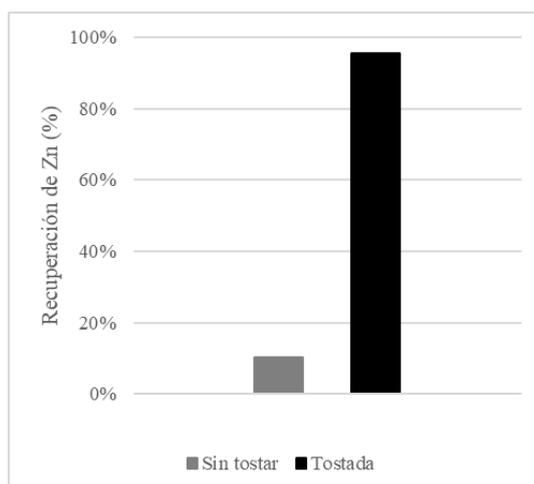
| Condiciones del ensayo Concentrado sin tostar | |
|--|--------------------------------|
| Temperatura (°C) | 22 |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 |
| Agitación (RPM) | 300 |
| Masa de muestra (g) | 50 |
| % Zn en la muestra | 20,39 |
| Zn en la muestra (mg) | 5097,5 |
| Agente lixivante | H ₂ SO ₄ |
| Concentración de ácido (g/L) | 150 |
| % sólidos (%) | 10 |

| t (h) | Zn (mg L ⁻¹) | % Recuperación |
|-------|--------------------------|----------------|
| 24h | 380 | 10 |

FICHA TÉCNICA N°27

| Condiciones del ensayo Concentrado con tratamiento térmico | |
|---|--------------------------------|
| Temperatura (°C) | 22 |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 |
| Agitación (RPM) | 300 |
| Masa de muestra (g) | 50 |
| % Zn en la muestra | 5,3 |
| Zn en la muestra (mg) | 1325 |
| Agente lixivante | H ₂ SO ₄ |
| Concentración de ácido (g/L) | 150 |
| % sólidos (%) | 10 |

| t (h) | Zn (mg L ⁻¹) | % Recuperación |
|-------|--------------------------|----------------|
| 24h | 5420 | 96 |



FICHA TÉCNICA N°28

| Condiciones del ensayo Concentrado sin tostar | |
|--|------------------|
| Temperatura (°C) | 22 |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 |
| Agitación (RPM) | 300 |
| Masa de muestra (g) | 50 |
| % Pb en la muestra | 7,59 |
| Pb en la muestra (mg) | 1897,5 |
| Agente lixivante | HNO ₃ |
| Concentración de ácido (g/L) | 150 |
| % sólidos (%) | 10 |

| t (h) | Zn (mg L ⁻¹) | % Recuperación |
|-------|--------------------------|----------------|
| 24h | 2354 | 22 |

FICHA TÉCNICA N°29

| Condiciones del ensayo Concentrado con tratamiento térmico | |
|---|------------------|
| Temperatura (°C) | 22 |
| Tiempo total del ensayo (h) | 24 |
| Agitación (RPM) | 300 |
| Masa de muestra (g) | 50 |
| % Pb en la muestra | 12,19 |
| Pb en la muestra (mg) | 3047,5 |
| Agente lixivante | HNO ₃ |
| Concentración de ácido (g/L) | 150 |
| % sólidos (%) | 10 |

| t (h) | Zn (mg L ⁻¹) | % Recuperación |
|-------|--------------------------|----------------|
| 24h | 37767 | 80 |

