



RECUPERACIÓN DE COMPUESTOS DE HIERRO Y SOLUCIONES DE COBALTO DESDE RELAVES MINEROS

Recovery of iron compounds and cobalt solutions from mining tailings

RICARDO ZAMARREÑO-BASTÍAS^{1,2}, ADRIANA C. MERA¹

¹Universidad de La Serena, Chile

²Universidad del Alba, Chile

KEYWORDS

Mining tailings
Wetland
Circular economy
Cobalt
Iron
Environmental residue
Environmental asset

ABSTRACT

This work present a low-cost, non-traditional and environmentally sustainable process for the recovery of iron and cobalt from mining tailings is presented. The iron is recovered with a 20% hydrochloric acid leaching, recovering the iron as ferric chloride in solution or solid ferric hydroxide, both compounds widely used in industry. Cobalt is extracted with a solution formed by tartaric acid and hydrogen peroxide, extracting an average of 97.66% at the pre-metallurgical laboratory level and with zero order kinetics.

PALABRAS CLAVE

Relave minero
Humedal
Economía circular
Cobalto
Hierro
Residuo ambiental
Activo ambiental

RESUMEN

Este trabajo presenta un proceso de bajo costo, no tradicional y ambientalmente sustentable para recuperar hierro y cobalto de relaves mineros. El hierro se extrae con ácido clorhídrico al 20%, recuperando el hierro como cloruro férrico en solución o hidróxido férrico sólido, ambos compuestos muy utilizados a nivel industrial. Además, el cobalto se obtuvo del relave usando una solución que contiene ácido tartárico y peróxido de hidrógeno, logrando extraer un promedio de cobalto del 97.66% a nivel de laboratorio pre metalúrgico y con una cinética de orden cero.

Recibido: 09/ 08 / 2022

Aceptado: 16/ 10 / 2022

1. Introducción

En la minería moderna, uno de los principales residuos que se generan, son los relaves, según Valderrama y colaboradores (2019), estos están formados por lodos del proceso de la molienda de las rocas y los efluentes que se generan del procesamiento de minerales, donde se aplican procesos físicos y químicos para extraer los minerales generalmente de cobre, oro, plata y/o molibdeno generando una serie de residuos, que se denominan relaves.

Los procesos de extracción de los minerales de interés, no son 100% eficientes, tampoco se pueden recuperar los reactivos y químicos usados en el proceso de extracción. Por lo que se forma una mezcla compleja de metales, minerales, sustancias químicas y agua que no se pueden recuperar y se desechan en forma de lodo, en la actualidad el área de almacenamiento debe de cumplir con una serie de especificaciones técnicas, que se denomina depósito o almacenamiento de relaves (Zamarreño *et al.*, 2020).

La presencia de estos relaves genera una serie de problemas ambientales, sociales y económicos en las zonas donde se localizan. En el continente americano, existen varios registros de problemas ambientales generados por causa de los relaves. Un estudio realizado por La Rotta, & Torres (2017) en la ciudad de Potosí en Bogotá, determina que existe una relación entre los problemas ambientales, sociales y de salud, que se producen con el actual sistema industrial que prima en esa localidad. El estudio reporta que los residuos mineros son parte importante en la generación de estos problemas ambientales.

En la localidad de Andacollo, región de Coquimbo-Chile, se encuentra una gran cantidad de pequeñas y medianas industrias mineras de metales de oro y cobre. Existiendo relaves mineros dentro de la localidad, con elevado contenido de mercurio, el cual por procesos geoquímicos puede entrar en contacto con la población, provocando problemas a la salud (Zamarreño *et al.*, 2013).

Al norte de la ciudad de La Serena, Chile, se ubicada una industria minera, que obtiene concentrado de hierro y en la zona tiene sus relaves producto de esta actividad. Zamarreño, & Díaz (2010), cuantificaron la cantidad de material particulado respirable (P.M. 2.5), determinando que la concentración promedio anual de P.M. 2.5 es de 38,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y que los componentes mayoritarios eran de tipo metálico, obteniéndose un mayor porcentaje de hierro. El análisis de la ubicación de la empresa, sus relaves, la dirección del viento predominante, se pudo determinar que parte del material P.M 2.5 que se encuentra en los relaves de esta empresa era transportado por el viento hacia la ciudad de La Serena.

Considerando que Chile, es un país eminentemente minero, posee las mayores reservas de cobre, y una industria minera de gran liderazgo. Sin embargo, genera importantes cantidades de relaves, según el último catastro del Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN), publicado en abril de 2018, en Chile existen 740 relaves mineros. Del total, 170 relaves se encuentran abandonados, 101 activos y 469 inactivos. La mayor concentración de relaves inactivos y abandonados se distribuye entre las regiones de Atacama (131) y Coquimbo (356). La menor cantidad de estos relaves se localizan en las regiones de Tarapacá (6), Maule (2), mientras que Arica y Parinacota solo cuenta con un relave en estado activo, (SERNAGEOMIN, 2018). De esta manera, la cantidad de relaves que existe en Chile, se concentra en dos regiones, Atacama y Coquimbo con 487 relaves, equivalente al 65,8% del total actual.

Esta concentración de relaves presentes en las regiones anteriormente mencionadas, obliga a considerar estos pasivos ambientales, como activos ambientales, para ello se aplica el concepto de economía circular en la minería. Según Zamora, & Hinojosa (2019), la economía circular aplicada a la minería permite desarrollar procesos generando un menor impacto ambiental, especialmente en los procesos unitarios de extracción del mineral, además de crear soluciones innovadoras que permiten disminuir el consumo del recurso hídrico, de energía, tratando los residuos generados, ya que pueden ser reutilizados en otras operaciones industriales; generándose con esto un beneficio económico, social y ambiental para la industria minera.

La recuperación de elementos importantes presentes en relaves mineros, se ha desarrollado en distintos países, aplicando diversos métodos de recuperación, entre ellos se encuentra el estudio que realizaron Zhang y sus colaboradores (2020), en el cual se recuperó cobre y cobalto de relaves mineros aplicando un consorcio microbiano de bacterias arqueas mesófilas y acidófilas, en estanques de agitación.

Una experiencia equivalente lo desarrolló Zamarreño, & Díaz (2021), al tratar de recuperar hierro y cobalto desde un relave urbano presente en la ciudad de Coquimbo, Chile, usando la técnica de biolixiviación, obteniendo buenos resultados en la extracción del hierro, pero la extracción de cobalto no fue exitosa.

Se han probado varios métodos novedosos para extraer cobalto de minerales. Un estudio muestra el efecto del pretratamiento de activación de minerales de laterita limonítica utilizando fluoruro de sodio y ácido sulfúrico sobre lixiviación en agua de níquel (Ni) y cobalto (Co) a presión atmosférica, obteniendo 94% de recuperación de estos metales (Baozhong *et al.*, 2017).

Mahdi y sus colaboradores (2020) desarrollaron un proceso de lixiviación con tiosulfato de sodio, para recuperar cobalto y manganeso de relaves de la minería del zinc, logrando recuperar el 90.7% de cobalto y 87,6% de manganeso. Un proceso equivalente lo desarrolló Zamora *et al.* (2019), al tratar relaves mineros con distintos contenidos de sulfuros, y con concentraciones que varían entre 68 a 53 g/t de Ag, estos fueron sometidos a

condiciones normales de cianuración por agitación, obteniéndose extracciones que variaron entre 74 % a 31 %, respectivamente. Sin embargo, después del pretratamiento ácido-oxidante, las extracciones en la etapa posterior de cianuración, subieron de entre 81% y 63%, respectivamente, logrando una mayor eficiencia en el tratamiento de los relaves, recuperando la plata presente y disminuyendo su volumen.

La aplicación de la economía circular en los residuos mineros, se puede realizar en distintos ámbitos. Un estudio desarrolló un proceso para el aprovechamiento de los relaves generados por el proceso de cianuración para la recuperación de oro, utilizándolos como materia prima para la obtención de ladrillos de construcción; atendiendo aspectos de sumo interés para la industria minera como el desarrollo sostenible (Valdez *et al.*, 2020).

La economía circular, es un concepto económico vinculado al desarrollo sustentable y a la economía verde, pero esta se puede ampliar aplicando consideraciones termodinámicas, es así que Huerta *et al.*, (2021), mencionan que la termodinámica es una potencial herramienta que se puede aplicar a todos los sistemas, pero encaja particularmente bien en el modelo de economía circular, dado que este modelo considera todos los flujos y no solo los del producto. Esta situación favorece un análisis basado en flujos sistemas y no sólo se enfoca en costos y beneficios para el productor.

En el norte de Chile, el Estero el Culebrón, se ubica en la ciudad de Coquimbo, al extremo sur-oeste de la bahía del mismo nombre y formaba parte de un ecosistema húmedo de vegas existente en toda la línea costera de la bahía. Debido al progreso de las ciudades de Coquimbo y La Serena, este estero fue desecado durante la década de los cincuenta, para la construcción de obras civiles, que drenaron estas zonas y permitieron poblar y construir en estos lugares (CONAMA, 2009).

El humedal El Culebrón presenta una importante diversidad biológica, tanto de especies autóctonas como introducidas, lamentablemente tiene un alto grado de actividades antrópicas, ya que es usado como lugar de almacenamiento de escombros, venta de productos agrícola, a nivel de ferias y la presencia de un relave minero desde la década de los 80 (Figuroa *et al.*, 2009).

La composición del relave presente en el humedal el Culebrón, están reportados en la Tabla 1. En ella se aprecia que los principales componentes metálicos en este relave son el hierro, aluminio y cobalto (Zamarreño, 2021).

Tabla 1. Composición química del relave ubicado en el humedal el Culebrón.

| Muestra N° | % Cu | % Fe | % Ca | % Mg | % Al | % Si | As ppm | Pb ppm | Ag ppm | Zn ppm | Co ppm |
|--------------|------|------|------|------|------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|
| R1 | 1,1 | 15,3 | 3,3 | 1,7 | 6,5 | 26,41 | 49 | 124 | 14 | 95 | 1452 |
| R2 | 0,13 | 4,2 | 2,3 | 0,7 | 8,2 | 27,4 | 30 | 2 | 3 | 60 | 1517 |
| R3 | 0,02 | 3,8 | 3,1 | 1,1 | 7,2 | 29,4 | 29,4 | 8 | 7 | 56 | 1244 |
| Promedio | 0,42 | 7,77 | 2,90 | 1,17 | 7,30 | 27,74 | 36,13 | 44,67 | 8,00 | 70,33 | 1404,33 |
| Desv. Promed | 0,46 | 5,02 | 0,40 | 0,36 | 0,60 | 1,11 | 8,58 | 52,89 | 4,00 | 16,44 | 116,44 |

Fuente: Zamarreño(2021).

Con el fin de reutilizar estos residuos mineros, esta investigación utilizará conceptos de economía circular, para extraer los elementos hierro y cobalto mediante un método no tradicional del relave ubicado en el humedal el Culebrón. La extracción de hierro se realiza utilizando ácido clorhídrico para generar una solución concentrada de hierro. En el caso del cobalto, para su extracción de los relaves se utilizó un ácido orgánico débil generando soluciones de cobalto. Esta metodología genera un menor impacto ambiental porque no se eliminan residuos en el proceso y las soluciones resultantes se podrían comercializar.

Objetivo del estudio

A partir de los antecedentes anteriormente mencionados, el objetivo de esta investigación aplicada es “Recuperar el hierro y cobalto presente en relaves mineros abandonados en la Región de Coquimbo, utilizando para la extracción de hierro ácido clorhídrico y una mezcla de ácido tartárico y peróxido de hidrógeno para la extracción de cobalto”.

Transformando de esta manera los relaves mineros de un pasivo ambiental a un activo ambiental, de los cuales se pueden obtener ganancias económicas y ambientales.

2. Métodos y materiales

Para realizar esta investigación, se utilizaron distintos procedimientos metodológicos, los cuales se describen a continuación:

2.1. Toma de muestras del relave

Las muestras, se tomaron del relave ubicado en el humedal el Culebrón, ubicado en la zona urbana de la ciudad de Coquimbo, como se muestra en la figura 1. En la figura 2 se puede observar el proceso de toma de muestras en el relave.

Figura 1. Vista del humedal el Culebrón, con la presencia del relave, línea azul límite físico del relave, línea amarilla, desplazamiento de material del relave por factores geo ambientales, X puntos de toma de muestra.



Fuente: Google Earth, 2021.

Se tomaron muestras en distintos sectores del relave, con una espátula metálica recubierta con polietileno, para evitar la posible contaminación de la muestra. Las muestras recolectadas, se depositaron en un contenedor de polietileno, la muestra total se homogenizó y se tamizó bajo la malla de 150 μm (en un tamiz W.S. Tyler).

Se eliminó la humedad de la muestra a 120°C, en una estufa, marca Binder, modelo FD 23, de fabricación alemana, cuyo rango de temperatura es de temperatura ambiente a 350°C, con convección natural.

Figura 2. Toma de muestra del relave minero ubicado en el humedal el Culebrón.



Fuente: Elaboración propia.

2.2. Medición del pH y separación de material magnético

A un vaso precipitado de 100 mL se agregaron 20,00 g de muestra del relave a temperatura ambiente, los gramos fueron pesados en balanza analítica. Luego, se agregaron 20 mL de agua destilada medidos con probeta, se dejó agitando por 1 hora para homogeneizar la mezcla en un agitador magnético, después la mezcla se filtró y se midió el pH, usando un pH-himetro marca Hanna.

Para determinar el porcentaje de material magnético se pesaron 100,00 g de muestra del relave sin tamizar y otra tamizada. Luego, las muestras se depositaron en bandejas plásticas y con un imán de 3000 gauss, envuelto en polietileno se acercó a 1 cm para extraer todo el material magnético. Luego, la muestra magnética recuperada, se peso y se calculó el porcentaje de este material en cada muestra (Zamarreño, 2021).

2.3 Extracción del hierro y cobalto

Para la extracción de hierro del relave, se prepararon soluciones de ácido clorhídrico (HCl) al 20% y 25% en peso. Se tomaron 4 muestras de 50,00 g aproximadamente de relave y se llevaron cada una por separado a un vaso precipitado de 250 mL. A dos muestras, se le adicionaron 100 mL de HCl 20% y a las otras dos se le adicionaron 100 mL de HCl al 25%, se dejaron reposar durante 60 horas, tomando muestras de la solución resultante cada 12 horas.

La determinación del hierro extraído del relave, se realizó a través de un método gravimétrico, para ello se tomaron alícuotas de 3 mL de las muestras de la lixiviación y se llevó a un tubo de centrifuga, al cual se le añadió 3 mL de una solución de hidróxido de sodio al 20% en peso. El sólido formado en esta reacción, se separa usando centrifugación a 4500 rpm por 20 minutos, para luego desechar la solución sobrenadante. El precipitado obtenido fue secado en una estufa de vacío a 80°C por 24 horas. Posteriormente, la muestra se deja en un desecador, para que se enfríe, luego se pesa y se calcula la masa de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y el porcentaje de Fe extraído (Vergara, 2019).

Para extraer el cobalto del relave, se usa una solución de lixiviación, formada por ácido tartárico 0,5 M y peróxido de hidrógeno 5 M. Para determinar el contenido de cobalto, se pesaron ocho muestras de relave de aproximadamente 10,00 g cada una, se depositaron por separado, en un vaso precipitado de 250 mL y se les agregó 200 mL de la solución lixivante a cada muestra, se mantuvieron las mismas en constante agitación y se midió la temperatura de reacción de manera continua, debido a que la reacción puede en algunos casos ser exotérmica. Luego, las 8 muestras se dejaron en contacto por 48 horas y posteriormente la solución resultante se filtró y se determinó la concentración de cobalto extraído, con espectroscopia de absorción atómica a 346 nm, con un equipo marca AA-6880 Shimadzu.

Además, en una segunda etapa se determina el orden de reacción del proceso de lixiviación del cobalto, para ello se toman dos muestras por triplicado, en un grupo de muestras se utilizó material tamizado y en el otro grupo de muestras se usó material sin tamizar. Se pesaron aproximadamente 30 g del material y se pusieron en contacto con 150 mL de solución lixivante de ácido tartárico 0,5 M y peróxido de hidrógeno al 5 M. El tiempo de lixiviación fue de 5 días y se tomaron muestras de la solución resultante cada 24 horas, determinando la concentración de cobalto mediante el método de espectroscopia de absorción atómica. La determinación del orden de reacción, se realizó a través del método gráfico (Imanbayev *et al.*, 2017).

Finalmente, con los resultados obtenidos en los procesos anteriores, se realizó una prueba de lixiviación a nivel de laboratorio de pre metalurgia, utilizando dos muestras una muestra con material de relave tamizado y otra muestra con material sin tamizar. Para ello, se tomaron aproximadamente 600 g del relave y dejándolos en contacto con 2 L de la solución lixivante por 5 horas en constante agitación, para posteriormente, filtrar la solución resultante y determinar la eficiencia de extracción del cobalto presente en el relave por espectroscopia de absorción atómica

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en cada etapa de esta investigación, se presentan a continuación:

3.1 Medición del pH y separación de material magnético

Los pH obtenidos en las muestras de relave se presentan en la tabla 2, donde se observa que este tiene un valor de 7,11, indicando este valor que el relave analizado es prácticamente neutro. Este valor del pH, llama la atención, ya que los relaves tienen por lo general un pH ácido o ligeramente ácido, esto se puede explicar considerando que, en septiembre del 2015, esta zona fue afectada por un tsunami, ingresando la ola y cubriendo todo el relave, provocando una reacción ácido base entre el relave y el agua de mar que es ligeramente básica (Guzman, 2015). Otra consideración para explicar este valor de pH, es que el humedal el Culebrón es costero y el pH de estos ambientes varía entre 7,10 y 9,40 (Figueroa *et al.*, 2009).

Tabla 2. Variación del pH en las muestras de relave.

| N° de muestra | pH |
|---------------|------|
| 1 | 7,54 |
| 2 | 6,94 |
| 3 | 6,85 |
| Promedio | 7,11 |

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la cuantificación del material magnético presente en el relave analizado se presentan en la Tabla 3. En esta tabla se aprecia que la mayor cantidad de material magnético se concentra en el material fino del relave, este dato es importante ya que indica que los metales de interés, como el hierro y el cobalto que forman minerales magnéticos, se concentran en la material fino del relave. La presencia de estos materiales magnéticos, se han usado como señales de estudios en la aplicación de los cambios palio climáticos (Fereshteh *et al.*, 2022).

Tabla 3. Porcentaje de material magnético presente en muestras de relave tamizadas y sin tamizar.

| Muestra | Muestra inicial (g) | Muestra recuperada con imán (g) | % Material magnético | Promedio % material magnético. |
|-------------|---------------------|---------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| sin tamiz 1 | 100,12 | 78,85 | 78,75 | 84,78 |
| sin tamiz 2 | 100,02 | 90,82 | 90,79 | |
| tamizada 1 | 100,12 | 96,53 | 96,41 | 97,66 |
| tamizada 2 | 100,02 | 98,93 | 98,91 | |

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Extracción del hierro

La extracción del hierro a través de una solución lixivante de HCl al 20 y 25% en peso se presentan en la tabla 4. Los resultados de la tabla 4, muestran que se obtuvo un mayor rendimiento en las muestras tratadas con el ácido al 20%, obteniéndose promedios de porcentaje de hierro de: 21,81%±3.78%Fe y 22,06%±6.6, en comparación con

las muestras tratadas con HCl al 25% donde los promedios obtenidos fueron: 14,92%±6,97% y 14,38%±9,08%, respectivamente.

Las diferencias se pueden producir ya que el ácido clorhídrico al 25% reacciona con otros metales contenidos en el relave como, el aluminio, el cobalto, el cobre, calcio y magnesio, que cinéticamente son más lábiles que el hierro, generando que su extracción sea menor.

Al observar la Tabla 4, se aprecia que el tiempo de extracción sería hasta las 24 horas, ya que pasado ese tiempo las concentraciones no presentan una variación muy importante.

Tabla 4. Porcentaje de extracción de hierro al lixiviar el relave con soluciones de HCl al 20% (M1 y M2) y al 25% en peso, (M1D y M2D).

| Muestra | Tiempo extracción (horas) | %Fe | %Fe | %Fe | %Fe |
|---------------------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | M1 | M2 | M1D | M2D |
| 1 | 12 | 15,07 | 12,77 | 19,00 | 18,91 |
| 2 | 24 | 22,82 | 18,24 | 19,53 | 28,90 |
| 3 | 36 | 20,77 | 19,91 | 4,14 | 4,58 |
| 4 | 48 | 24,63 | 30,66 | 9,39 | 14,35 |
| 5 | 60 | 25,78 | 28,71 | 22,56 | 5,15 |
| Promedio | | 21,81 | 22,06 | 14,92 | 14,38 |
| Desviación Estándar | | 3,78 | 6,69 | 6,97 | 9,08 |

Fuente: Elaboración propia.

Las variaciones que se producen, se explican porque el relave estudiado no es homogéneo, en su origen, ya que recibió residuos de varias actividades mineras de la zona de la Región de Coquimbo. Generando variaciones al tomar distintas muestras y aun que estas sean uniformemente mezcladas.

Además, se puede mencionar que el compuesto obtenido (hidróxido férrico) es un compuesto importante desde el punto de vista económico, ya que, al analizar los precios de este compuesto en el mercado, estos varían entre US\$ 830-900 la tonelada al 95% de pureza (Alibaba.com, 2022).

Por otra parte, se puede mencionar que el porcentaje de hierro (%Fe) obtenido, es un porcentaje más elevado, respecto del % Fe promedio, que se muestra en la tabla 1, que es 7,77+/-5,02. Esto se explica porque esta lixiviación no es selectiva y puede disolver a otros elementos presentes, como los óxidos de aluminio. Sin embargo, esta mezcla es importante desde el punto de vista económico, ya que la mezcla de cloruro férrico/cloruro de aluminio, se emplean como trampas para sedimentos en piscinas, con un valor entre los US\$200-300 la tonelada (Alibaba.com, 2022).

Los productos de hierro obtenidos, por procesos físicos (separación magnética) y químicos (lixiviación y precipitación de hidróxido férrico) en el relave analizado, generan una ganancia económica ya que estos productos son ampliamente utilizados en actividades industriales. Considerando, el concepto de economía circular a la minería, en este estudio se está transformando los desechos mineros en oportunidades de desarrollo (Miranda *et al.*, 2020).

3.3 Extracción del cobalto

Los resultados de la primera lixiviación de cobalto en la tabla 5, muestran que el porcentaje de extracción promedio del cobalto en las muestras analizadas es de 58,14 +/- 26,27 %, esto sugiere que el proceso de extracción de cobalto de los relaves mineros fue efectivo usando una solución que es menos contaminante y dañina para el ambiente. Sin embargo, un problema que se genera en este proceso, es que la reacción es exotérmica, generando temperaturas hasta los 70 °C.

Según Stuurman (2014), un aumento en la temperatura proporciona como resultado una mayor disociación del ácido tartárico, incrementando el número de iones de hidrógeno y ligándolo en el ácido y, por lo tanto, mejorando la extracción.

Tabla 5. Porcentaje de extracción de cobalto al usar una solución de lixiviación de ácido tartárico 0,5 M/peróxido de hidrógeno 5 M

| Masa relave (g) | Masa Co en la muestra (mg) | masa de Co extraído (mg) | % de recuperación de Co |
|---------------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 10,0168 | 140,24 | 99,392 | 70,87 |
| 10,0383 | 140,54 | 113,107 | 80,48 |
| 10,0031 | 140,04 | 111,549 | 79,65 |
| 10,0428 | 140,60 | 18,5865 | 13,22 |
| 10,0850 | 141,19 | 26,5681 | 18,82 |
| 10,0168 | 140,24 | 99,0136 | 70,61 |
| 10,0383 | 140,54 | 68,8069 | 48,96 |
| 10,0031 | 140,04 | 115,5805 | 82,53 |
| Promedio | | | 58,14 |
| Desviación promedio | | | 26,27 |

Fuente: Elaboración propia.

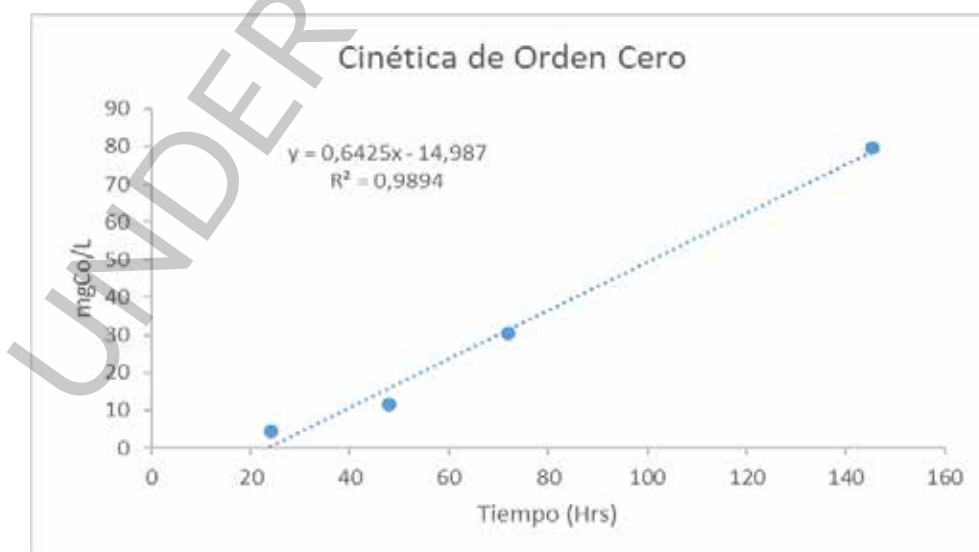
Para determinar la cinética de reacción de la extracción del cobalto que se encuentra en el relave analizado, usando la mezcla del ácido orgánico y el peróxido de hidrógeno, se realizó este proceso a través del método gráfico, en la tabla 6 y Figura 3 se presenta la extracción de cobalto de material tamizado y en la tabla 7 y figura 4, la extracción del cobalto en el material sin tamizar.

Tabla 6. Extracción de cobalto en material tamizado en distintos periodos de tiempo.

| Tiempo (Hrs) | Concentración Co [mg /kg] |
|--------------|---------------------------|
| 24 | 4,42 |
| 48 | 11,58 |
| 72 | 30,34 |
| 145,29 | 79,57 |

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Variación de la concentración de cobalto en distintos periodos de tiempo en material tamizado.



Fuente: Elaboración propia.

Al observar los resultados de las tablas y figuras estas corresponden a un orden de reacción cinética de cero, ya que el coeficiente de correlación (R2) obtenido para ambas mediciones dio muy cercano a 1, indicando la linealidad de la tendencia de las mediciones.

Al realizar la misma operación, usando las ecuaciones para órdenes superiores 1, 2 y 3, los valores del coeficiente de correlación obtenidos, fueron 0,8869, 0,8081 y 0,7756. Confirmando que estas órdenes de velocidad, no siguen una linealidad.

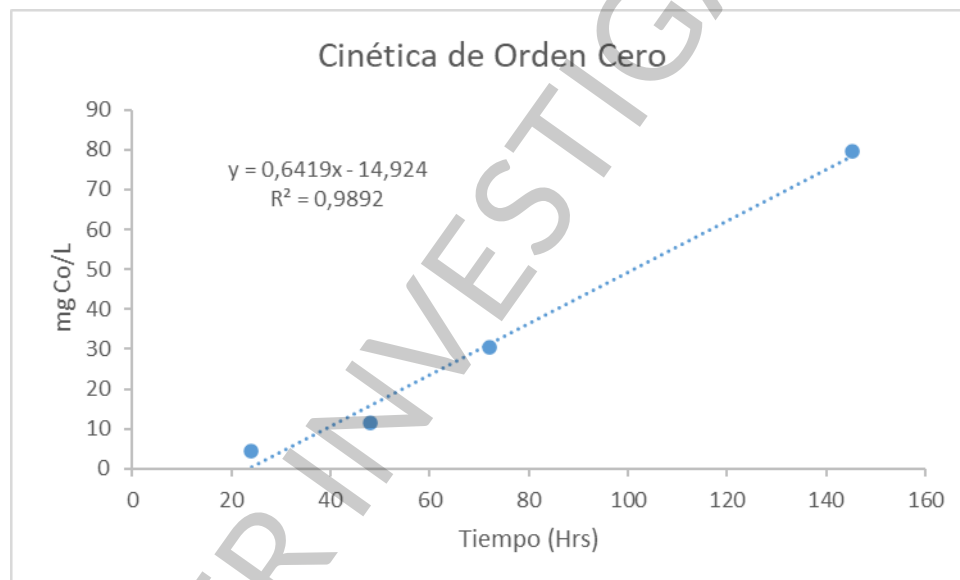
Es importante mencionar que el tamaño de la partícula no altera el proceso de extracción del cobalto, presente en el relave, ya que sigue la misma ley de velocidad, con orden cero.

Tabla 7. Extracción de cobalto en material no tamizado en distintos periodos de tiempo.

| Tiempo (Hrs) | Concentración Co [mg /kg] |
|--------------|---------------------------|
| 24 | 4,5 |
| 48 | 11,6 |
| 72 | 30,34 |
| 145,29 | 79,57 |

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Variación de la concentración de cobalto en distintos periodos de tiempo en material no tamizado



Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados anteriormente reportados, como la última etapa de esta investigación fue realizar una prueba a nivel de laboratorio de pre metalurgia, los resultados obtenidos en esta parte del trabajo se presentan en la Tabla 8.

Los resultados de la Tabla 8 muestran que el proceso de lixiviación utilizado para extraer cobalto presente en las muestras del relave del humedal el Culebrón, es muy eficiente, debido a que se logra extraer el 91,5% del cobalto en la muestra sin tamizar y el 95% en la muestra tamizada.

Tabla 8. Porcentaje de extracción de cobalto a nivel de laboratorio de pre metalurgia.

| Muestra | Masa relave (g) | Masa Co en la muestra de relave (mg) | Masa Co extraído (mg) | Rendimiento extracción (%) |
|-----------------|-----------------|--------------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| A (sin tamizar) | 600,4 | 842,6 | 772 | 91,6 |
| B (Tamizada) | 603 | 846,81 | 804,5 | 95 |

Fuente: Elaboración propia.

3. Conclusiones

Con el desarrollo de esta investigación fue posible recuperar cobalto y hierro de un relave minero abandonado, utilizando procesos químicos no tradicionales, permitiendo con su implementación en el futuro una ganancia económica y especialmente ambiental.

Se determinaron parámetros fisicoquímicos para el proceso de lixiviación de cobalto del relave en estudio, usando una mezcla de ácido tartárico y peróxido de hidrógeno. Además, se determinó la cinética de reacción de extracción del cobalto, la cual fue orden de velocidad de cero.

Las lixiviaciones a nivel de laboratorio para extraer el cobalto del relave analizado fueron exitosas, ya que se logró recuperar un promedio un 58,14 +/- 26,27 % del cobalto presente en este residuo minero.

Con las pruebas a nivel de laboratorio de pre metalurgia, se logró extraer un 95,0% del cobalto presente en el material fino del relave y un 91,6% del cobalto en el material grueso, teniendo un mayor rendimiento en el primero, ya que existe mayor contenido entre la partícula y la solución lixivante.

Para, la extracción de hierro del relave analizado, se utilizaron dos métodos, uno físico, utilizando un imán, logrando separar el 97,66% del material magnético presente en la porción fina del relave y un 87,78% de la muestra de relave sin tamizar. Estos resultados obtenidos muestran que los compuestos magnéticos se concentran mayoritariamente en el material más fino del relave.

En la extracción de hierro por lixiviación con HCl, se logró una mayor eficiencia con ácido al 20% en peso, obteniendo un porcentaje de extracción de este elemento del 21,87%, muy superior del valor determinado de hierro presente en el relave que es 7,77 +/-5,02 %. Esto es debido a la poca selectividad que tiene el HCl, lo que permite al usar este ácido lixiviar a otros metales presentes en el relave, como el cobalto, aluminio y otros.

Se recomienda realizar más estudios para determinar parámetros fisicoquímicos relacionados con el agente reductor, peróxido de hidrógeno, para extraer el cobalto, tales como: constantes cinéticas de reacción, influencia de la velocidad de agitación, concentraciones óptimas del agente reductor y temperatura. Además, de implementar mecanismos que permitan controlar la liberación de calor, porque la reacción que se presenta es muy exotérmica. El conocimiento de estos parámetros ayudará a mejorar el procedimiento de extracción de cobalto, a nivel de laboratorio metalúrgico. Generando una ganancia económica y una disminución del volumen de los depósitos de relaves mineros en el medio ambiente.

4. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad de La Serena, Chile, por financiar el proyecto, N° PR2121513, "Recuperación de Cobalto en relaves mineros abandonados en la Región de Coquimbo, utilizando ácidos orgánicos de bajo impacto ambiental." Por el cual nace este documento.

Referencias

- Alibaba.com. (2022). <https://spanish.alibaba.com/g/ferric-chloride-price.html>
- Baozhong, M., Weijiao, Y., Yanlin, P., Chengyan, W., & Bingjie, J. (2017). Effect of activation pretreatment of limonitic laterite ores using sodium fluoride and sulfuric acid on water leaching of nickel and cobalt. *Hydrometallurgy*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.02.026>
- CONAMA (2009). "Propuesta de Plan Integral de Restauración del Humedal El Culebrón, Región de Coquimbo". Informe final. http://bdrnap.mma.gob.cl/recursos/SINIA/Biblio%20SP-64/070316BIBLIORNAP_049.pdf#
- Fereshteh M., Alimohammadian, H., & Sabouri, J. (2021). Magnetic parameters and paleoclimate: A case study of loess deposits of North-East of Iran. *Geofísica internacional*, 60(4), 280-293. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2021.60.4.1949>
- Figueroa, R., Suarez, M., Andreu, A., Ruiz, V., & Vidal-Abarca, M. (2009). Caracterización ecológica de humedales de la zona semiárida en Chile central. *Gayana*, 73(1), 76-94. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-65382009000100011>
- Guzmán, N. (2015). Tsunami en Coquimbo. *Revista de marina*, 6, 64-67. <https://revistamarina.cl/revistas/2015/6/nguzman.pdf>
- Huerta, J., Cayumil, R., & Sánchez, M. (2021). Una aproximación termodinámica para la comprensión de la economía circular aplicada al ámbito minero - metalúrgico. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 6(1), 26-32. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522021000100003&lng=es&tln=es.
- Imanbayev, Y., Ongarbayev, Y., Tileuberdi, Y., Krivtsov, E., Golovko, A., & Mansurov, Z. (2017). Thermogravimetric Study of Cracking Products of Natural Bitumens. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 61(4), 342-348. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-249X2017000400342&lng=es&tln=en.
- Mahdi, M., Fereshteh, B., Ghaderb, S., & Abkhosh, E. (2020). An improved process methodology for extracting cobalt from zinc plant residues. *Hydrometallurgy*, 191. 1 - 53. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.105163>
- Miranda, J., Fernando, M., Hernani, Borges, V., & Spinelli, S. (2020). La importancia de la minería para nuestro preto, bajo la vista de la economía circular. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 5(2), 28-36. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522020000200004&lng=es&tln=pt.
- La Rotta, A. M., & Torres, M. H. (2017). Explotación minera y sus impactos ambientales y en salud. El caso de Potosí en Bogotá. *Saúde em Debate*, 41 (112), 77-91. <https://dx.doi.org/10.1590/0103-110420171120>
- SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA. SERNAGEOMIN. (2018). *Geoquímica de Superficie de Depósitos de Relaves de Chile*. https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/06/P%c3%9aBLICA_Geoquimica-de-Depositos-de-Relaves-de-Chile25062018.pdf
- Sibanda, V., Ndlovu, S & Stuurman, S. (2014). Comparing the Dissolution of Copper-Cobalt Ores from the DRC Region. *Journal- South African Institute of Mining and Metallurgy*. 114. 347 - 353. https://www.researchgate.net/publication/265597794_Comparing_the_Dissolution_of_Copper-Cobalt_Ores_from_the_DRC_Region
- Valderrama, J.O., Campusano, R., & Espíndola, C. (2019). Minería Chilena: Captura, Transporte, y Almacenamiento de Dióxido de Carbono en Relaves mediante Líquidos Iónicos y Carbonatación Mineral. *Información tecnológica*, 30 (5), 357-372. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000500357>
- Valdez Loaiza, J., Aguilar Franco, J., Sánchez Vargas, L., Alatrística Góngora, G., & Figueroa Dianderas, A. P.(2020). Design and implementation of an alternative process for the manufacture of bricks from gold mine tailings. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 28(2), 268-276. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052020000200268>
- Vergara, K. (2019). *Caracterización química de un relave minero abandonado en el humedal "El Culebrón" de la Ciudad de Coquimbo*. Tesis de Titulación, Para obtener el Título de Químico Laboratorista. Universidad de La Serena. Chile, 20 -25 pp.
- Zhang, R, Hedrich, S., Romer, F, Goldmann, D., & Schippers, A. (2020). Biobleaching of cobalt from Cu/Co-rich sulfidic mine tailings from the polymetallic Rammelsberg mine, Germany. *Hydrometallurgy*, 197, 1 - 8. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2020.105443>
- Zamarreño, R. (2021). Aplicación de la economía circular en un relave minero abandonado en el humedal el Culebrón, Coquimbo, Chile. Publicación: Responsabilidad social y Sostenibilidad: disrupción e innovación ante el cambio de época. En: L. Miranda Navarro & M. Santinelli Ramos <http://pegaso.anahuac.mx/accesoabierto/publicaciones.php?Accion=Informacion&Pub=153> Universidad Anáhuac México. pp. 658 - 673.

- Zamarreño, R., & Díaz, F. (2021). Recuperación de metales económicamente importantes desde relaves mineros abandonados, usando biolixiviación en columnas de fase inversa, de bajo costo y ambientalmente sostenible. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 12(4), 31-42. <https://doi.org/WOS:000753713200004>
- Zamarreño, R., Godoy, C., Ramírez, L., & Abarca, A. (2020). Recuperación de compuestos de hierro presentes en el relave inactivo del humedal el culebrón. generando una ganancia económica y ambiental. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 11(1), 31-40. <https://doi.org/000613087200004>
- Zamarreño, R., Gonzalez, P., Hanshing, E., Amar, A., & Pizarro, C. (2013). Evaluación del riesgo ambiental por la presencia de mercurio en relaves mineros dentro de la ciudad de Andacollo, Chile. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 4 (4), 75-83.
- Zamarreño, R., & Díaz, C. (2010). Cuantificación de elementos metálicos presentes en el material particulado PM 2,5 en la atmósfera de la Ciudad de La Serena. Chile. *Avances en Ciencia e Ingeniería*, 1(1), 27-33.
- Zamora, E., & Hinojosa C. (2019). Economía circular en minería - caso de estudio: producción minera de Concentrados de Pb-Ag-Zn en Bolivia. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 4(1), 3-17. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522019000100001&lng=es&tlng=es
- Zamora, E., Blanco, W., & Hinojosa, O. (2019). Economía circular en minería: procesamiento de desmontes como alternativa de remediación ambiental. *Revista de Medio Ambiente y Minería*, 4(2), 3-18. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522019000200001&lng=es&tlng=es

UNDER INVESTIGATION