

RECUPERACIÓN DE METALES ECONÓMICAMENTE IMPORTANTES DESDE RELAVES MINEROS ABANDONADOS, USANDO BIOLIXIVIACIÓN EN COLUMNAS DE FASE INVERSA, DE BAJO COSTO Y AMBIENTALMENTE SOSTENIBLE

RECOVERY OF ECONOMICALLY IMPORTANT METALS FROM ABANDONED MINING TAILINGS, USING BIOLEACHING IN REVERSE PHASE COLUMNS, LOW COST AND ENVIRONMENTALLY SUSTAINABLE

Ricardo Zamarreño^{1,2}, Fernanda Díaz¹

(1) Universidad del Alba, Sede La Serena, Escuela de Ingeniería, Av. Cuatro esquinas 060 La Serena
(2) Universidad de La Serena, Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Benavente 980 La Serena
(email: rzamarreno@udalba.cl)

Recibido: 19/08/2021 - Evaluado: 07/09/2021 - Aceptado: 29/09/2021

RESUMEN

Se evaluó la biolixiviación en columnas, por fases inversas, para recuperar el hierro y cobalto, que están presentes en un relave minero urbano, abandonado. En la biolixiviación se utilizaron dos micro columnas de polietileno, usando bacterias *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Chemolithotrophic* nativas aisladas de las aguas del mismo humedal, para comparar su rendimiento frente a bacterias obtenidas en el laboratorio. Se recuperó un 20,7% de Fe, usando bacterias del laboratorio. Con las bacterias autóctonas se logró extraer un 0,06% de Fe. La extracción del Cobalto fue 21 ppm con bacterias de laboratorio y no se extrajo con bacterias nativas del humedal. Es factible extraer el Hierro del relave con biolixiviación, usando bacterias especialistas, con bacterias nativas del humedal la recuperación fue baja. Esta tecnología no permite recuperar el cobalto bajo las condiciones del estudio.

ABSTRACT

Reverse-phase column bioleaching was evaluated to recover iron and cobalt present in an abandoned urban mine tailing. Two polyethylene micro columns were used in the bioleaching process, using native *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Chemolithotrophic* bacteria isolated from the waters of the same wetland, to compare their performance against bacteria obtained in the laboratory. 20.7% Fe was recovered, using bacteria from the laboratory. With the autochthonous bacteria, 0.06% of Fe was extracted. The Cobalt extraction was 21 ppm with laboratory bacteria and it was not extracted with native bacteria from the wetland. It is feasible to extract Iron from the tailing with bioleaching, using specialist bacteria, with native bacteria from the wetland the recovery was low. This technology does not allow the recovery of cobalt under the conditions of the study.

Palabras clave: relave minero, pasivo ambiental, biolixiviación, recuperación de elementos metálicos
Keywords: mining tailings, environmental liabilities, bioleaching, recovery of metal elements

INTRODUCCIÓN

Los relaves mineros están formados por lodos de proceso (roca molida y efluentes) que se generan en una planta de procesamiento de minerales. Los procesos físicos, químicos e industriales que se utilizan para extraer el mineral, generalmente de cobre, oro, plata y/o molibdeno producen desechos conocida como relaves. Las técnicas de extracción que se utilizan en la actualidad no son 100% eficientes, tampoco es posible recuperar los reactivos utilizados. Por lo tanto, metales, minerales, sustancias químicas, sustancias orgánicas y agua de procesos no recuperables y no rentables, se descargan, normalmente en forma de lodo, a un área de almacenamiento final, comúnmente conocida como depósito o almacenamiento de relaves (Valderrama *et al.*, 2019).

La presencia de estos residuos en el ambiente, producen una serie de riesgos al medio ambiente y a la población circundante, (Guadarrama *et al.*, 2021), estableció el riesgo para la salud derivado de la presencia de metales pesados en un pueblo del norte de México. Entre los diversos metales y metaloides encontrados, el antimonio y el cromo superaron los valores de concentración permisibles establecidos por la legislación mexicana, por lo que los residuos mineros en esa región fueron considerados peligrosos y nocivos para la salud.

Estos problemas causados por la presencia de relaves mineros, son conocidos desde hace algún tiempo, es así que Astete *et al.* (2009), entregaban información sobre los niveles de plomo y otros problemas de salud en menores de 10 años residentes en las comunidades de Quiulacocha y Champamarca, Pasco en Perú, por la presencia de relaves mineros. Concluyendo que de cada cinco niños de estas comunidades tiene intoxicación plúmbica, siendo los relaves mineros la fuente de contaminación por plomo para los niños que viven en zonas aledañas.

Es indudable que los relaves producen problemas ambientales y de salud, para la población que vive cerca de estos residuos. Esto genera la necesidad de analizar formas de eliminar, estabilizar estos residuos. Una estrategia que está siendo aplicada para disminuir esta problemática es la aplicación de la economía circular. Usando la economía circular, se produce un cambio en los procesos productivos, económicos y sociales tradicionales. Partiendo de la premisa de sustentabilidad, que tiene por objetivo reducir la entrada de materias primas o iniciales, como la generación de desechos, cerrando los flujos económicos y ecológicos de los recursos (Haas *et al.*, 2015).

Experiencia de aplicación de la economía circular en los residuos mineros, se están desarrollando (Zamora *et al.*, 2019), desarrollo proceso alternativo para extraer complejos de Pb-Ag-Zn en relaves mineros, aplicando la lixiviación cianurante directa por agitación; con pretratamiento en medio ácido y en presencia de H₂O₂ como agente oxidante. Logrando extracciones de estos elementos que varían entre los 58 a 98%.

Estrada (2012), determinó la factibilidad técnica y económica para recuperar oro y plata desde relaves mineros ubicados en la región de Valparaíso, determinando que el procedimiento adecuado para procesar el mineral de relaves consiste en una remolienda del mineral hasta 100% bajo 75 µm y posterior lixiviación con NaCN. Este proceso es idéntico al que se realiza con el mineral nuevo, con la diferencia que este nuevo proceso comienza en la etapa de remolienda del mineral eliminando las etapas de chancado y de molienda.

Otro método muy usado para la estabilización de los relaves es el uso de plantas resistente a metales pesado, (Sepúlveda *et al.*, 2020), realizo experiencias con la especie *Sarcocornia neei*, una planta halófila que crece en las zonas costeras chilenas, es altamente tolerante a los suelos contaminados asociados con los relaves mineros. Según sus resultados la *Sarcocornia neei* creció bien, aunque más lentamente, en suelos experimentales que contenían principalmente Fe, Cu y Mn. En una etapa avanzada de desarrollo vegetativo, las raíces de *S. neei* fueron capaces de estabilizar los suelos experimentales contaminados, aglomerándolos en más del 80 % y extrayendo elementos químicos de ellos. Estas características son potencialmente útiles para la fitorremediación y la reducción de la contaminación por partículas de tamaño fino de relaves mineros y suelos contaminados.

Huerta *et al.* (2021), pudo determinar la relación entre los conceptos de la termodinámica y la economía circular, concluyendo que la termodinámica es una herramienta con el potencial de aplicarse a todos los sistemas, encajando muy bien en el modelo de economía circular, dado que este modelo considera todos los flujos y no solo los del producto.

Experiencias de biolixiviación aplicados a relaves mineros, no hemos podido encontrar en la literatura, indicando que esta técnica no esta muy utilizado o estudiada.

A partir de estos antecedentes presentados, nos fijamos como objetivo, "evaluar la biolixiviación de los elementos de hierro y cobalto presente en el relave ubicado en el humedal el Culebrón", aplicando los conceptos de la economía circular.

MÉTODOS Y MATERIALES

La metodología se desarrolló en cuatro fases. La primera determinando los componentes metálicos presentes en el relave del humedal. Para ello se tomaron tres muestras, de material sólido, simbolizadas como R1, R2 y R3. Además de una muestra de agua presente en el humedal A1, para extraer y caracterizar las bacterias presentes (Ver figura 1).



Fig. 1: Muestra las zonas del humedal el Culebrón, donde se tomaron las muestras; R1 muestra relave, R2 y R3 muestra de suelo del humedal, A1 muestra de agua presente en el humedal, (Fuente: Google Earth, 2020).

Para la toma de muestras del relave y de suelo, se realizaron calicatas de 40x40x40 cm, tomando las muestras de abajo hacia arriba, con palas de polietileno. Las muestras de agua se tomaron en un contenedor plástico, previamente lavado con una solución ácida y enjuagado con agua destilada, almacenándola a 5 °C.

En el laboratorio químico, las muestras sólidas se secaron a 130 °C por 24 horas y se procedieron a tamizar bajo la malla 100 (W.S. Tyler). Posteriormente se trataron con un ataque ácido fuerte, formado por una mezcla de ácido hipocloroso, ácido nítrico y ácido clorhídrico, (todos los reactivos tipo para análisis P.A. marca Merck), en una relación 1:3:5, llevándose a sequedad y aforándose a 100 mL, determinando la concentración de los metales a través del método de espectroscopia de absorción atómica (Workman *et al.*, 2003), utilizando un equipo Shimadzu modelo AA-6880.

Cultivo de microorganismos

Los microorganismos usados, tiene dos fuentes, el primero fueron bacterias que se tenían en el laboratorio de Microbiología, de la Universidad de La Serena y la segunda fuente son bacterias autóctonas, extraídas de cuerpos de agua presentes en el humedal. Los microorganismos fueron cultivados en un medio líquido 9K de Silverman y Lundgren (1959), cuya composición se presenta en la tabla 1, el pH se adaptó a 1,7 con ácido sulfúrico, se mantuvo a temperatura ambiente y baja luminosidad. Los cultivos se monitorearon cada 24 horas para observar el crecimiento bacteriano y la variación de pH, se realizaron pases de cultivo cada 7 días.

Tabla 1: Medio 9K de Silverman y Lundgren. (Fuente: Elaboración propia).

Solución Medio 9K	
0,3 g	(NH ₄) ₂ SO ₄
0,01 g	KCl
0,050 g	K ₂ HPO ₄
0,050 g	MgSO ₄ * 7H ₂ O
0,001 g	Ca(NO ₃) ₂
0,025 g	FeSO ₄
100 ml	Agua destilada

Caracterización de bacterias presentes en el humedal el Culebrón

Para determinar las bacterias presentes en el humedal y que pueden realizar la biolixiviación de los componentes de hierro y cobalto, se utilizó la metodología propuesta por Donovan y Wood (2000), que consiste en exponer a las bacterias a distintos pH y temperaturas, manteniéndolas durante una semana en las condiciones especificadas.

Posteriormente los resultados obtenidos se comparan con tablas entregados por los autores, determinando el organismo presente en el humedal. Estas se muestran en la tabla 2

Biolixiviación en fase inversa.

Para el procedimiento de estudio de la biolixiviación se utilizaron dos columnas de polietileno, con altura de 52 cm y un diámetro de 4 cm, esta estructura permite el estudio y la regulación del flujo, el que es generado por gravedad e inundación (ver figura 2).

A cada columna se añadió 500 gr de muestra del relave. Se le hizo pasar a cada columna, una solución que contenía un coctel de bacterias *Thiobacillus Ferrooxidans*, que habían sido cultivadas en la etapa anterior, en medio ácido, con pH 1,8 utilizando ácido sulfúrico y con un volumen total de 5000 ml. Esto se realizó en duplicado por cada columna.

Para el proceso de biolixiviación, utilizando los organismos autóctonos presentes en el humedal, se realizó el mismo procedimiento descrito anteriormente.

Para ambos estudios se evaluó la población de bacterias presentes, la variación del pH y la concentración del hierro y cobalto extraído por las bacterias, por un periodo de 7 días.

Tabla 2: Características para identificar especies de *Acidithiobacillus*. Fuente: Donovan y Wood (2000).

Especie	Condiciones para el crecimiento quimiolitotrófico (límites entre paréntesis)		Valor de pH más Bajo después de Crecer sobre sulfuros	Crecimiento con Fe ³⁺ como única fuente de energía
	Temperatura (°C)	pH		
<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	28 – 30 (10 – 37)	2,0 – 3,0 (0,5 – 5,5)	0,5	-
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	30 – 35 (10 – 37)	2,5 (1,3 – 4,5)	1,5	+
<i>Acidithiobacillus caldus</i>	45 (32 – 52)	2,0 – 2,5 (1,0 – 3,5)	Sin datos	-
<i>Acidithiobacillus albertis</i>	25 - 30	3,5 – 4,0 (2,0 – 4,5)	2,0	-



Fig. 2: Biolixiviación en micro columnas inversas. (Fuente: Elaboración propia).

Determinación de la concentración de hierro y cobalto en solución de biolixiviación

Para determinar la concentración de hierro y cobalto en las soluciones resultantes del proceso de biolixiviación, se tomaron 16 muestras cada 12 horas, en duplicado en cada columna de biolixiviación. Determinando la concentración promedio de hierro y Cobalto en las soluciones resultantes. Para esto se empleó la técnica de absorción atómica, las muestras fueron leídas en duplicado, en un equipo SpectrAA220 Varian, empleando estándares para construir las curvas de calibración para el Fe y Co.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización química del relave y del suelo del humedal

En la tabla 3 y en las figuras 3 y 4, se muestran los componentes presentes en el relave y en el suelo del humedal el Culebrón.

Tabla 3: Composición de los principales componentes presentes en el relave y en suelo del humedal.

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

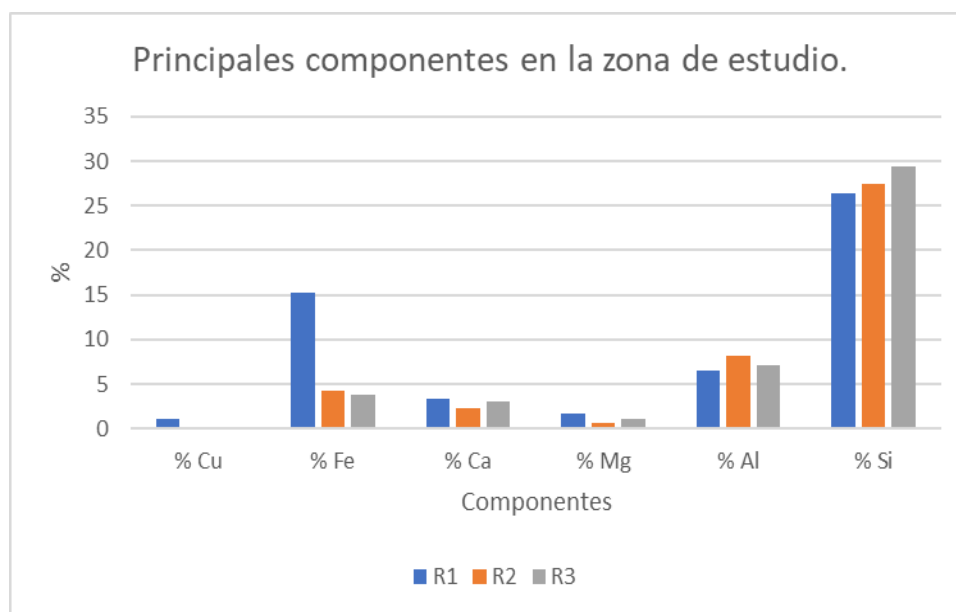


Fig. 3: Componentes en mayor concentración presentes en el relave y suelo del humedal el Culebrón.

Al observar la tabla 3 y las figuras 3 y 4, observamos que los elementos con mayor concentración presentes en el relave (R1) son el Fe, Al y Co. Además, la distribución de los elementos analizados, no son equivalentes en los distintos puntos de muestreo, generando la idea que hay un desplazamiento de estos elementos por acciones naturales. Esto concuerda con los resultados entregados, por Zamarreño *et al.* (2020a), que demostró el desplazamiento de los elementos presentes en el relave en la zona del humedal, por acción del tsunami, ocurrido en el 2015 en esta zona.

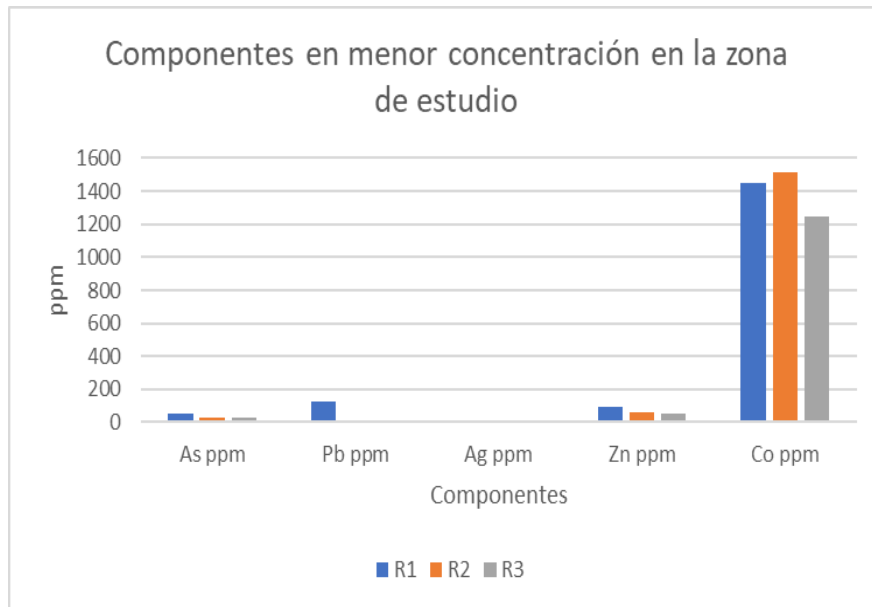


Fig. 4: Componentes en menor concentración presentes en el relave y suelo del humedal el Culebrón.

Caracterización de bacterias presentes en el humedal el Culebrón

De acuerdo a los resultados obtenidos a las muestras analizadas y comparando estos resultados con la tabla 2, se determinó que la bacteria predominante en el agua superficial del humedal, era la *Acidithiobacillus Ferroxidans*.

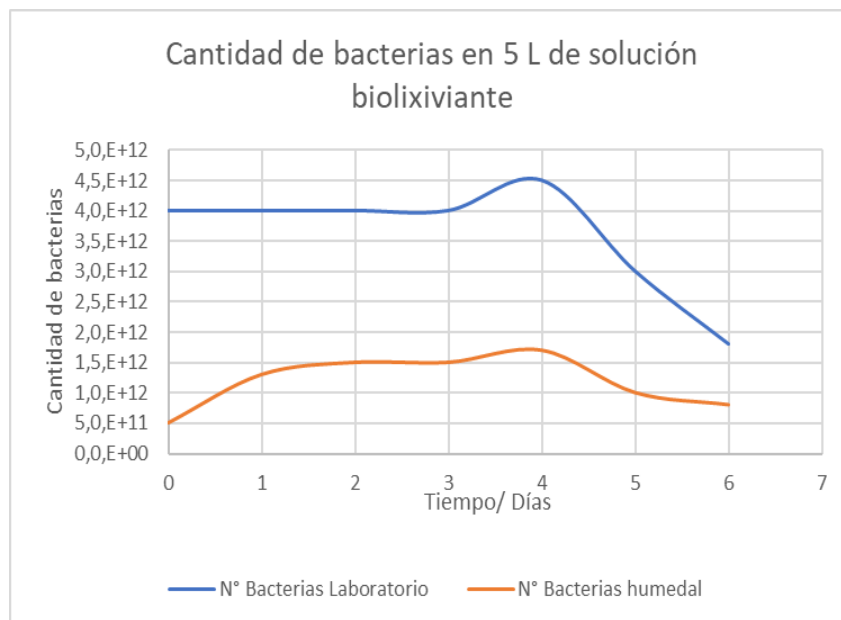


Fig. 5: Crecimiento bacteriano en el proceso de biolixiviación del relave.

Biolixiviación en fase inversa

Para determinar la eficiencia del proceso de biolixiviación, el primer paso es determinar el crecimiento de los organismos en el proceso de biolixiviación, comparando las bacterias que se obtienen del laboratorio y las bacterias autóctonas del humedal, estos se presentan en la figura 5.

En la figura 5, se observa que el máximo crecimiento de la población de las bacterias de laboratorio y del humedal es al cuarto día, la primera con 4.5×10^{12} organismos y la segunda con 1.7×10^{12} organismos. Pasado el quinto día la población comenzó a disminuir en ambos grupos.

Un aspecto importante de mencionar que las bacterias que se obtienen en el laboratorio desarrollo una mayor población que las bacterias autóctonas del humedal, demostrando que este medio no las beneficia para su desarrollo.

La capacidad de extracción que tienen las distintas bacterias, para solubilizar el Fe de las muestras del relave, presente en el humedal se presentan en la tabla 4 y figura 6.

La máxima efectividad de extracción del hierro por las bacterias provenientes del laboratorio, se obtuvo a las 48 horas con 633,43 ppm, a las 60 horas la capacidad de extracción comienza a bajar en forma sostenida desde 629,6 hasta 280,6 a las 192 Horas. Esto implica que al cabo de 196 horas de biolixiviación, se pudieron extraer 7983,9 ppm de Fe. Considerando que la masa de la muestra de relave que se biolixivio fue de 500 g, con un 7,77% de Fe, la masa de hierro presente es de 38,50 g. Al calcular el rendimiento de extracción, este fue de un 20,7%.

Tabla 4: Cantidad de Fe extraído por el proceso de biolixiviación usando las bacterias obtenidas en el laboratorio y en el humedal el Culebrón.

Tiempo/Hrs	Concentración de Fe (ppm) Bacterias Laboratorio	Concentración de Fe (ppm) Bacterias Humedal
12	384,55	0
24	405,35	4,8
36	532	21
48	633,43	0
60	629,57	0
72	620	0
84	600,2	0
96	600	0
108	587	0
120	587	0
132	530	0
144	506,7	0
156	400,5	0
168	387	0
180	300	0
192	280,6	0

En cuanto a las bacterias autóctonas, la máxima extracción, se logra a las 36 horas con 21 ppm de hierro, a las 48 horas y las horas siguientes el porcentaje de extracción fue de 0 ppm obteniendo un 0,06 % de eficiencia de extracción.

Estos resultados, coinciden con los obtenidos por Delgado y Castillo (2019), que estudiaron el efecto de la temperatura en el proceso de biolixiviación en mineral oxidado de hierro, determinando que la temperatura no afecta el proceso de biolixiviación y que las concentraciones de Fe^{2+} , son de 2000 ppm al cabo de 400 horas de lixiviación.

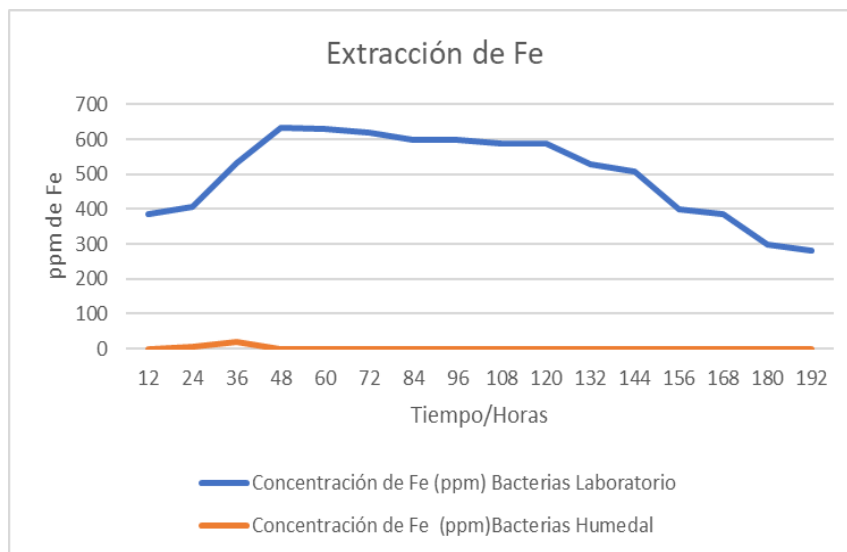


Fig. 6: Extracción de Fe, por el proceso de biolixiviación, usando bacterias del laboratorio y bacterias nativas del humedal.

En la figura 6, se observa claramente que las bacterias presentes en el humedal, no son capaces de extraer el Fe de las muestras del relave, indicando que ellas no están en las condiciones en las cuales se han desarrollado, pudiendo hacer que estos organismos estén estresados.

Al comparar el método de biolixiviación, con un método de lixiviación química de extracción del Fe (Zamarreño *et al.*, 2020b), extrajo el Fe presente en el mismo relave, utilizando una solución de lixiviación con ácido clorhídrico al 25%, logrando extraer aproximadamente un 95% del hierro presente en las muestras del relave y el volumen del relave disminuyó en aproximadamente un 42%, demostrando que este proceso es mucho más eficiente que la biolixiviación. La ventaja de la biolixiviación, que no deja residuos químicos que impacten sobre el humedal.

El proceso de extracción del Cobalto usando la técnica de biolixiviación, tubo resultados poco auspiciosos, según las condiciones de trabajo, en la tabla 5 y figura 7, se presentan los resultados de esta experiencia.

Al observar la tabla 5 y la figura 7, vemos que el proceso de extracción del cobalto realizado por las bacterias del laboratorio fue errático, pudiendo extraer un máximo de 2,1 ppm de Co al cabo de 48 horas de biolixiviación, a las 60 horas no se extrajo cobalto, solamente a las 108 horas se extrajo nuevamente 1,8 ppm de Co. Resultados similares se obtuvieron, al recuperar cobalto de baterías desechadas, Ion Litio-Cobalto, utilizando una mezcla de cepas de bacterias como las *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans*, logrando recuperaciones del 77% de Co, pero a temperaturas de 60 °C, a temperatura ambiente la recuperación fue del 2%, (Estrada, 2020).

Tabla 5: Cantidad de Co extraído por el proceso de biolixiviación usando las bacterias obtenidas en el laboratorio y en el humedal el Culebrón.

Tiempo/Hrs	Concentración de Co (ppm) Bacterias Laboratorio	Concentración de Co (ppm) Bacterias Humedal
12	1,56	0
24	0,37	0
36	0	0
48	2,1	0
60	0	0
72	0	0
84	0	0
96	0	0
108	1,8	0,5
120	1	0
132	0	0
144	0	0
156	0	0
168	0	0
180	0,5	0
192	0,5	0

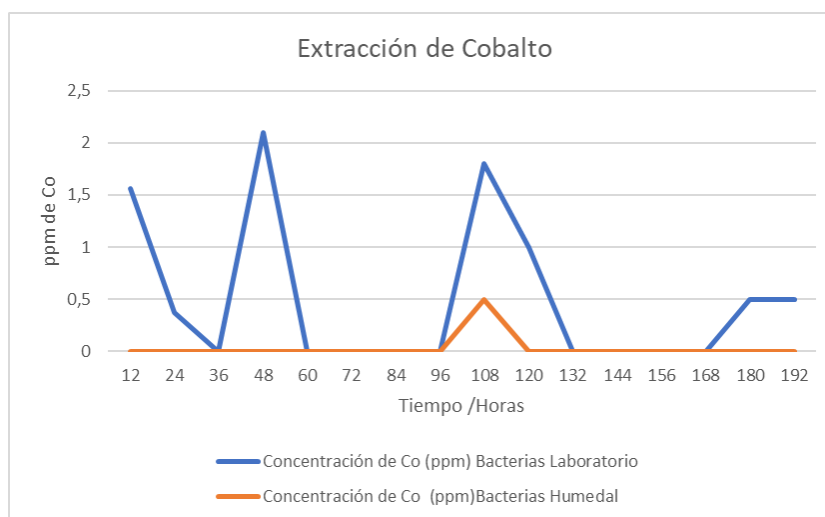


Fig. 7: Extracción de Co, por el proceso de biolixiviación, usando bacterias del laboratorio y bacterias nativas del humedal.

Las bacterias autóctonas del humedal el culebrón, no fueron capaces de extraer el cobalto del relave, ya que a las 108 horas se pudo extraer 0,5 ppm de Co, en el resto de las mediciones no se detectó cobalto en la solución resultante.

Estos resultados indican que los organismos utilizados no extraen el cobalto, esto se puede explicar a la cinética de reacción, que las bacterias utilizadas, prefieren extraer el Fe, ya que se ven favorecidas por la variable de la velocidad y el otro factor podría ser la temperatura de reacción (Hernández *et al.*, 2013), demostró que la cinética de la reacción entre dos metales presentes en residuos mineros depende de la concentración del elemento más afín a ser biolixiviado por las bacterias y que la temperatura juega un rol importante en este proceso.

CONCLUSIONES

Podemos concluir que la técnica de biolixiviación es un método fácil y económico de utilizar para recuperar elementos importantes en los relaves mineros, que puede aplicarse a la pequeña y mediana minería.

La biolixiviación, es aplicable para la recuperación de minerales de Fe en los relaves mineros de mineral sulfurado de cobre. Lamentablemente, su rendimiento en la extracción de Co, no es buena, con las bacterias usadas en esta investigación.

Las bacterias obtenidas en el laboratorio tienen una mejor adaptación para extraer el Fe del relave, en cambio las bacterias autóctonas del humedal, su capacidad de extracción del Fe, es baja, demostrando que no se encuentran en sus condiciones ambientales óptimas.

La recuperación de Co, usando ambas cepas de bacterias, fue muy bajo, demostrando que este tipo de bacterias, no son capaces de extraer el Co.

Se sugiere buscar bacterias que sean especialistas para la extracción del Co y determinar las variables de la cinética de la extracción.

Es importante evaluar y usar otros métodos de extracción del Co, como la técnica de lixiviación, con ácidos más amigables con el ambiente, como los ácidos orgánicos.

Es importante cambiar los paradigmas de los relaves mineros, no como un pasivo ambiental, sino como un activo ambiental, que genere ganancias económicas y ambientales.

REFERENCIAS

Astete, J., Cáceres, W., Gastañaga, M., Lucero, M., Sabastizagal, I., Oblitas, T. *et al.* (2009). Intoxicación por plomo y otros problemas de salud en niños de poblaciones aledañas a relaves mineros. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 26(1), 15-19. Recuperado en 24 de septiembre de 2021, de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342009000100004&lng=es&tlng=es.

Delgado, S. & Castillo, D. (2019). Influencia de la temperatura en el crecimiento de un consorcio microbiano y su capacidad biooxidativa sobre el hierro de la calcopirita. *Ecología Aplicada*, 18 (1), 85-90. <https://dx.doi.org/10.21704/rea.v18i1.1310>

Donovan, P. & Wood, A. (2000). Reclassification of some species of *Thiobacillus* to the newly designated genera *Acidithiobacillus* gen. nov., *Halothiobacillus* gen. nov. and *Thermithiobacillus* gen. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 50, 511-516. <https://doi.org/10.1099/00207713-50-2-511>

Estrada, J. (2012). *Diseño de procesos para recuperar oro y plata desde el depósito de relaves de minera Meridian*. Proyecto para optar al título de Ingeniero Civil en Metalurgia Extractiva. Universidad Católica de Valparaíso. http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-4500/UCF4959_01.pdf. (visto Julio 2020)

Estrada, N. (2020). *Recuperación de cobalto a partir del reciclaje de baterías ion-litio mediante el uso de biolixiviación y electro obtención*. Tesis o trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería de Materiales y Procesos. Universidad Nacional de Colombia. [1128442337.2020.pdf](https://doi.org/10.1128442337.2020.pdf) (unal.edu.co). (Visto Agosto 2021).

Guadarrama, P., Fernández, G. & Alarcón, M. (2021). Assessment of risk to health caused by the exposure to mining waste in Durango, Mexico. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 22 (3) Epub 03 de agosto de 2021. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.3.023>

Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D. & Heinz, M. (2015). How Circular is the Global Economy? An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005. *Journal of Industrial Ecology*, 19 (5), 765-777. <https://dx.doi.org/10.1111/jiec.12244>

Hernández, J., Rivera, I., Patiño, F & Juárez, J. (2013). Estudio Cinético de la Lixiviación de Plata en el Sistema S2O3(2-)-O2-Cu2+ Contenido en Residuos Minero-Metalúrgicos. *Información Tecnológica*, 24 (1), 51-58. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642013000100007>

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. Recuperado en 24 de septiembre de 2021, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522021000100003&lng=es&tlng=es.

Sepúlveda, B., Tapia, M., Tapia, P., Milla, F & Pavez, O. (2020). Heavy metals bioabsorption and soil stabilization by *sarcocornia neri* from experimental soils containing mine tailings. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 36 (3), 567-575. Epub 04 de mayo de 2021. <https://doi.org/10.20937/rica.53027>

Silverman M.P. y Lundgren D.G. (1959). Studies on the chemoautotrophic iron bacterium *Ferrobacillus ferrooxidans*: An improved medium and a harvesting procedure for securing high cell yields. *J. Bacteriol.* 77, 642-647

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>

Workman, J., Koch, M. & Veltkamp, J. (2003). Process analytical Chemistry. *Analytical Chemistry*, 75 (12), 2859-2876

Zamarreño, R., Cabana, R., Vergara, K. & Cortez, S. (2020). Desplazamiento de elementos metálicos en el estero El Culebrón, por la presencia de un relave minero abandonado, Coquimbo – Chile. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.*, 23 (2):e1656. <http://doi.org/10.31910/rudca.v23.n2.2020.1656>

Zamarreño, R., Godoy, C., Ramírez, L., y Abarca, A. (2020). Propuestas de 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://www.executivebs.org/publishing.cl/avances-en-ciencias-e-ingenieria-vol-11-nro-1-ano-2020-articulo-4/>

Zamora, G., 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. Recuperado en 24 de septiembre de 2021, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2519-53522019000200001&lng=es&tlng=es.