

BIOLIXIVIACIÓN DE MINERALES SULFURADOS DE COBRE, UTILIZANDO AGUA DE MAR, APLICANDO EL SISTEMA DE COLUMNA INVERSA, ORIENTADO HACIA LA PEQUEÑA Y MEDIANA MINERÍA CHILENA

BIOLIXIVIATION OF COPPER SULFURATED MINERALS, USING SEA WATER, APPLYING THE REVERSE COLUMN SYSTEM, ORIENTED TO THE SMALL AND MEDIUM CHILEAN MINING

Ricardo Zamarreño^{1,3}, Lorgio Aguilera², Camila Cataldo³

Universidad de La Serena, Facultad de Ciencias (1), Departamento de Química, (2) Departamento Biología, Colina el Pino s/n, La Serena - Chile

(3) Universidad Pedro de Valdivia, Facultad de Ingeniería, Av. Cuatro Esquinas S/N, La Serena - Chile
(e-mail: rzamarre@userena.cl).

Recibido: 17/11/2018 - Evaluado: 06/12/2018 - Aceptado: 27/12/2018

RESUMEN

Se estudió la posibilidad del uso de microorganismos extraídos de un yacimiento minero, en el proceso de biolixiviación de minerales sulfurados de cobre, usando una mezcla de agua dulce con agua de mar. Los microorganismos fueron cultivados, adaptados a diversos porcentajes de agua de mar y se usaron para el proceso de biolixiviación. Se realizaron pruebas en reactores con 0%, 30% y 60 % de agua de mar, utilizando minerales sulfurados con granulometría fina. Posteriormente, se realizó la biolixiviación en dos micro columnas inversas con un 60 % agua de mar y un 100% agua dulce, utilizando el mismo mineral con una granulometría de 1/2 pulgada. Los reactores el porcentaje de extracción de cobre fue equivalente en todas las pruebas, en cambio en la biolixiviación en columna, el mejor rendimiento se obtuvo con agua dulce. Se pudo comprobar que es factible realizar la biolixiviación con agua de mar.

ABSTRACT

The possibility of using microorganisms extracted from a mining deposit, in the process of bioleaching of copper sulphide minerals, using a mixture of fresh water with percentages of seawater was studied. The microorganisms were cultivated, adapted to different percentages of seawater and used for the bioleaching process. Reactions were carried out in reactors with 0%, 30% and 60% of sea water, using sulfur minerals with fine granulometry. Subsequently, bioleaching was carried out in two reverse micro columns with 60% sea water and 100% fresh water, using the same mineral with a 1/2 inch granulometry. The reactors the percentage of copper extraction was equivalent in all the tests, however in the column bioleaching, the best performance was obtained with fresh water. It was found that bioleaching with seawater is feasible.

Palabras claves: biolixiviación, agua de mar, minerales sulfurados, biolixiviación con microorganismos nativos
Keywords: bioleaching, seawater, sulfur minerals, bioleaching with native microorganisms

INTRODUCCIÓN

Los procesos de biooxidación y biolixiviación de sulfuros son actualmente utilizados para el pretratamiento de menas refractarias de oro, así como para la recuperación de metales de interés económico como Cu, U, Co y Zn, (Rawlings, 2005). La biolixiviación de metales, utilizando microorganismos acidófilos, han sido ampliamente estudiada, sin embargo, es evidente que aún no existe un acuerdo sobre los mecanismos de biooxidación de alguno de los principales metales (Zapata *et al.*, 2008).

La biolixiviación de minerales es la solubilización oxidativa selectiva por la acción de los microorganismos. También se utilizan diferentes nombres alternativos, como la lixiviación bacteriana, la lixiviación microbiana y la biooxidación, se les conoce como biohidrometalurgia o biominación. Este proceso permite el tratamiento de sulfuros insolubles y óxidos insolubles a través de hidrometalurgia, a diferencia de la tecnología más tradicional de pirometalurgia (Arias *et al.*, 2013). La biolixiviación presenta las siguientes ventajas en comparación con la pirometalurgia: equipos simples y de bajo costo, aptos para el tratamiento de minerales de bajo grado o de desecho, bajo requerimiento de energía y sin contaminación atmosférica (Gentina & Acevedo, 2013).

Según Rodríguez *et al.* (2001a), las principales ventajas que presentan los procesos biohidrometalúrgicos con respecto a los pirometalúrgicos, son que la biolixiviación ocurre en condiciones cercanas a las ambientales. Los compuestos utilizados no son ajenos a los ciclos biogeoquímicos por lo que los productos y subproductos que se obtienen son compatibles con el medio ambiente. Se evita la contaminación ambiental que provoca la lluvia ácida ya que no se producen emisiones de SO₂, también se evita la contaminación por anhídrido sulfuroso. Se reduce el consumo energético, puesto que no es preciso secar los minerales, como ocurre en los procesos pirometalúrgicos.

En Chile existen variadas experiencias en el uso de la biolixiviación, por ejemplo, en 1993 y 1994 en Cerro Colorado y Quebrada Blanca se implementó la biolixiviación en condiciones adversas de altura geográfica y de temperatura ambiente. La planta Cerro Colorado de BHP Billiton, se diseñó para realizar biolixiviación de minerales oxidados y sulfurados, compuestos principalmente por crisocola y calcosina. El proceso de producción es realizado por extracción de mineral a rajo abierto, chancado, aglomeración, lixiviación en pilas dinámicas, extracción por solventes y electro-obtención, así el mineral sulfurado se disuelve por acción bacteriana y el mineral oxidado por la acción de la solución ácida (Cochilco, 2009).

Según las teorías actuales existen tres mecanismos para poder explicar el proceso de biolixiviación, el indirecto, por contacto y el cooperativo (Misari, 2016).

El mecanismo indirecto se da por la interacción del mineral con productos intermedios o finales del metabolismo de las bacterias, no crea reacciones enzimáticas que actúen directamente sobre el sulfuro, y el agente de lixiviación, el Fe⁺³, es regenerado por el microorganismo (Rodríguez *et al.*, 2001b). En el método Directo o por contacto, la bacteria ataca al sulfuro metálico en forma directa mediante su adherencia a la superficie mineral y la posterior oxidación enzimática de este por el transporte de electrones desde la parte reducida del mineral, generalmente un sulfuro al oxígeno disuelto (Rodríguez *et al.*, 2001b).

Es importante mencionar que estos procesos metalúrgicos necesitan una importante cantidad de agua dulce para poder desarrollarlos y un elemento importante a considerar es la escasez del recurso hídrico, ya que diversos organismos y agencias especializadas han señalado que el agua dulce y los recursos hídricos se hacen cada vez más escasos como consecuencia del crecimiento de la población, del desarrollo económico-social y los efectos del cambio climático. Chile no escapa a esta realidad. En el país los recursos hídricos son abundantes: existen 1.251 ríos y más de 15 mil lagos y lagunas; y el agua procedente de las precipitaciones es de 53 mil m³ por persona al año, superando en ocho veces la media mundial. Sin embargo, varias zonas del país ya han sido calificadas con escasez hídrica y los diagnósticos coinciden en que es necesario tomar medidas urgentes para enfrentar esta problemática.

La zona norte de Chile, posee la mayor cantidad de yacimientos mineros y la menor cantidad de agua dulce, es por esto que los conflictos por el acceso y propiedad del agua son reiterados entre la comunidad local y las empresas mineras, conflictos que deben solucionarse a través de la desalinización del agua de mar, para no llegar convertirse en problemas de carácter étnico y fronterizo con los países vecinos (Larraín, 2006).

Por la limitada cantidad de agua, se han desarrollado estudios en reemplazar el dulce por el agua de mar. Zarrarriño *et al.* (2016), realizaron el proceso de flotación de minerales sulfurados de cobre, usando distintas mezclas de agua dulce y salada (de mar), obteniendo resultados equivalentes en los porcentajes de recuperación de cobre con 100% de agua dulce y una mezcla al 50% de agua dulce y salada.

Castellón (2016), menciona que la alta concentración de iones cloruros presentes en el agua de mar (~19 g/L), brinda importantes ventajas en los sistemas de lixiviación sobre los sistemas de sulfato (SO_4^{2-}). Entre estas ventajas se encuentran las siguientes: se incrementa las solubilidades del hierro y de otros metales, las propiedades Redox mejoran debido a la estabilización de los iones cúpricos y cuprosos mediante la formación de cloro-complejos, existe una mayor cinética de lixiviación comparada con los sistemas de sulfato.

Navarro & Mansor (2017), indican que; "*La presencia de iones cloruros tiene un efecto positivo sobre la lixiviación de la calcopirita con iones férricos. La concentración de ion cloruro está relacionado con la disolución de cobre*".

La Fundación Chile en conjunto con el área de Investigación y Desarrollo de la compañía minera Zaldívar dieron inicio al proyecto Halobiolix con miras a explorar el uso de consorcios (grupos de bacterias) biooxidantes capaces de tolerar altas concentraciones de sal. Ellos han podido adaptar consorcios de bacterias, que son ahora capaces de resistir las altas concentraciones salinas presentes en el agua del mar con un alto desempeño, entre un 60% y 80% de efectividad en relación a los utilizados actualmente con agua dulce (Minería Chilena, 2014).

El presente estudio entrega los resultados del comportamiento de los microorganismos utilizados en la biolixiviación de minerales sulfurado de cobre, utilizando mezcla entre agua de mar y agua dulce.

MATERIALES Y MÉTODOS

La solución de microorganismos utilizados fue extraída de un yacimiento minero abandonado ubicado en la quebrada del Arrayan región de Coquimbo. El cultivo presentaba un pH original de 6.0 y se determinó la presencia de los organismos a través del método de reacción en cadena de la polimerasa (PCR), esto se realizó en la Universidad Católica del Norte en su Centro de Investigación Científico Tecnológico para la Minería.

Cultivo de microorganismos y adaptación al agua de mar.

Los microorganismos fueron cultivados en un medio líquido 9K de Silverman y Lundgren, 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, posteriormente los microorganismos se adaptaron a diversos porcentajes de agua de mar 15%, 30%, 45% y 60%. En la Tabla 1, se entregan la composición del medio 9K.

Para la elaboración el medio de cultivo con agua de mar se utilizó el mismo medio 9K compuesto por la solución A y solución B y el porcentaje de agua de mar a utilizar se le resto solo a la solución A. El pH no fue ajustado, se mantuvo a temperatura ambiente y baja luminosidad.

Los cultivos se observaron durante un periodo de 18 días, con el fin ver la variación de pH y determinar el ciclo de crecimiento bacteriano. Los cultivos que mostraron una mejor adaptación fueron seleccionados para realizar la biolixiviación.

Tabla 1: Medio 9K de Silverman y Lundgren.

Solución A	Solución B
Sulfato de amonio 3,00 g/L	Sulfato de hierro heptahidratada 74,674 g/L
Cloruro de potasio 0,100 g/L	Agua destilada 300 mL
Orto fosfato hidrógeno de potasio 0,500g/L	Ácido sulfúrico 2 mL
Sulfato de magnesio heptahidratada 0,500 g/L	
Nitrato de calcio 0,100 g/L	
Agua destilada 700 mL	
Cada 4 ml de solución(A+B) 0,5 ml de microorganismos	

Estudio de biolixiviación en reactores

Se implementaron seis pruebas de biolixiviación en reactores de vidrio con una capacidad 250 mL, se prepararon muestras con un 30% y 60 % de agua de mar y un 100 % de agua dulce, cada una con su respectiva réplica, se utilizó una densidad de pulpa de un 10% (Pérez *et al.*, 2015), el pH se adaptó a 1,7 y el sulfato de hierro heptahidratado de la solución B fue disminuido a la mitad.

Se utilizó una mezcla de minerales sulfurados con un porcentaje de cobre total de 1,39 y de cobre soluble 0,19, y una granulometría obtenida por procesos de conminución de las etapas chancado y molienda. La mineralogía del mineral correspondía a brechas volcánicas con es férulas de calcita con diseminaciones de bornita y calcopirita, y andesita con diseminaciones de magnetita y hematita.

Aparte, se realizaron dos pruebas de biolixiviación en reactores utilizando calcopirita con un porcentaje de cobre total de 3%, y una granulometría obtenida por procesos de conminución de las etapas chancado y molienda. Se prepararon las pruebas con un 100 % de agua dulce y un 60 % de agua de mar.

Cada prueba se monitoreo durante un periodo determinado, con el fin ver la variación de pH, el ciclo de crecimiento bacteriano y determinar la concentración de sulfato de cobre obtenida en cada solución de biolixiviación.

Estudio de biolixiviación en micro columnas inversas

Se desarrollaron pruebas de biolixiviación en micro columnas inversas, fabricadas con un tubo de polietileno, con una altura de 52 cm y un diámetro de 4 cm, su estructura permitía el estudio y regulación del flujo. El trasporte del fluido se generaba por gravedad e inundación

Se implementaron dos pruebas una con 60% agua de mar y la otra con un 100% agua dulce, las columnas fueron rellenas con la misma mezcla de mineral sulfurado con un porcentaje de cobre total de 1,39 y de cobre soluble 0,19, y una granulometría aproximada de ½ pulgada. Cada columna se montó con 5 litros de solución, se adaptó el pH y se fijó un caudal de a 10 cc en 3,45 minutos.

La columna con un 100% agua dulce se relleno con 897,2 gramos de mineral, 1litro de cultivo bacteriano y 4 litros de agua hervida y fría.

La columna con un 60% agua de mar se relleno con 867,2 gramos de mineral, 1 litro de cultivo bacteriano adaptado a un 60 % de agua de mar, 1,6 litros de agua hervida y 2,4 litros de agua de mar previamente filtrada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2, se presentan los organismos encontrados en el yacimiento minero en la Quebrada del Arrayan.

Tabla 2: Microorganismos en la solución identificados por el método PCR

Microorganismos	Celulas/ml
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	2203000
<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	<1,0x10 ²
<i>Leptospirillum ferriphilum</i>	211450
<i>Sulfobacillus sp.</i>	124680
<i>Alicyclobacillus sp. G1.</i>	3436
<i>Acidithiobacillus caldus</i>	11209
<i>Acidiphillum sp.</i>	<1,0x10 ²
Bacterias Totales	4438000
<i>Ferroplasma acidiphillum</i>	<1,00E+02
<i>Sulfolobus metallicus</i>	3020
<i>Thermoplasma sp.</i>	3398
Archaeas Totales	67020

Cultivo en 100% agua dulce

El cultivo de microorganismos en agua dulce, alcanzo la mayor tasa de crecimiento bacteriano el quinto día con una población de $4,24 \times 10^7$ y la variación de pH se observó que este se mantuvo dentro de un rango favorable entre 2,0 y 2.2. Este se muestra en la figura 1.

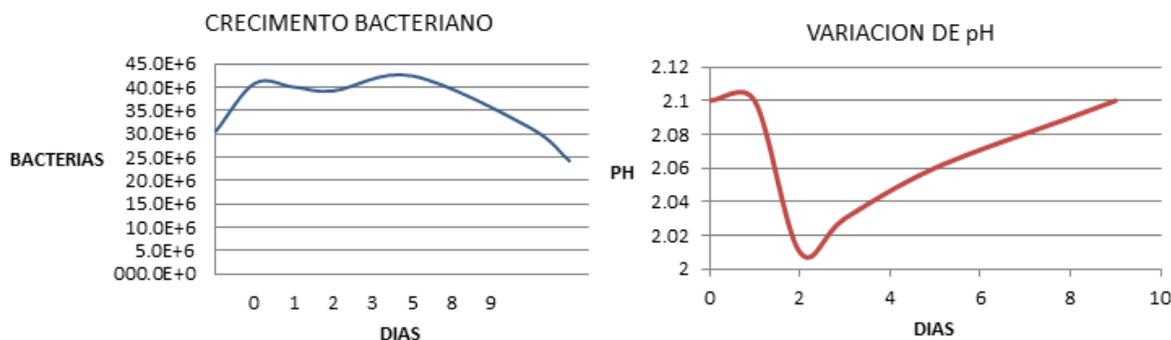


Fig. 1: Crecimiento bacteriano y variación de pH cultivo agua dulce.

Adaptación de los cultivos al agua de mar

La adaptación de los cultivos al agua de mar se realizó en un periodo de 18 días, durante este tiempo se observó que tienen un orden de población similar al cultivo con agua dulce, con un rango de $7,36 \times 10^7$ a $7,92 \times 10^7$. La mayor tasa de crecimiento bacteriano se presentó en el día 11 para los cultivos con un 15% 30% y 45 % agua de mar (figuras 2, 3 y 4) y para los cultivos con un 60% agua de mar la mayor tasa de crecimiento bacteriano se alcanzó el día 10 (figura 5). Al observar las figuras 1 a la 5, se puede ver que el cultivo con un 60% agua de mar, tiene un menor tiempo en alcanzar el máximo crecimiento poblacional, pero a la vez presenta un significativo descenso de la población una vez alcanzado su máximo. Se puede inferir que con una mayor concentración de agua de mar el crecimiento bacteriano desciende más rápidamente.

En las figuras 2, 3, 4 y 5, se representa gráficamente la variación de pH en función del tiempo, durante estos 18 días se registró un descenso constate del grado de acidez en todos los cultivos. Es importante considerar que no

existió consumo de ácido sulfúrico para regular el pH durante este proceso. Los microorganismos se adaptaron exitosamente y no se mostraron cambios significativos en relación con el porcentaje de agua de mar. Debido a estos resultados, se decidió realizar el proceso de biolixiviación con un 30% y un 60% agua de mar.

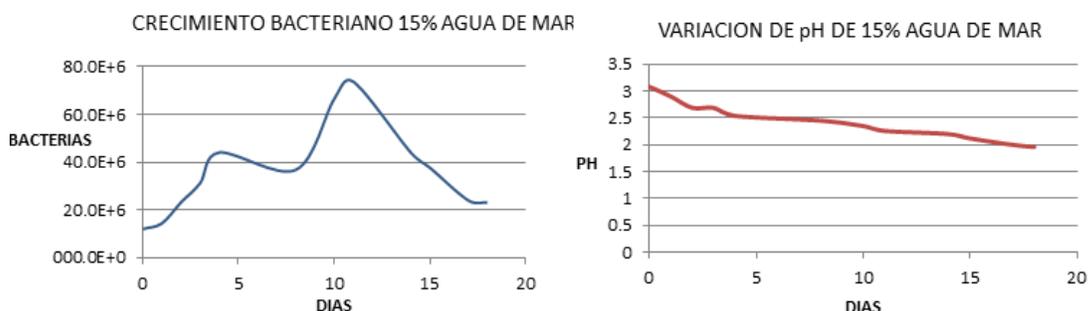


Fig. 2: Crecimiento bacteriano y variación de pH cultivo 15% agua de mar.

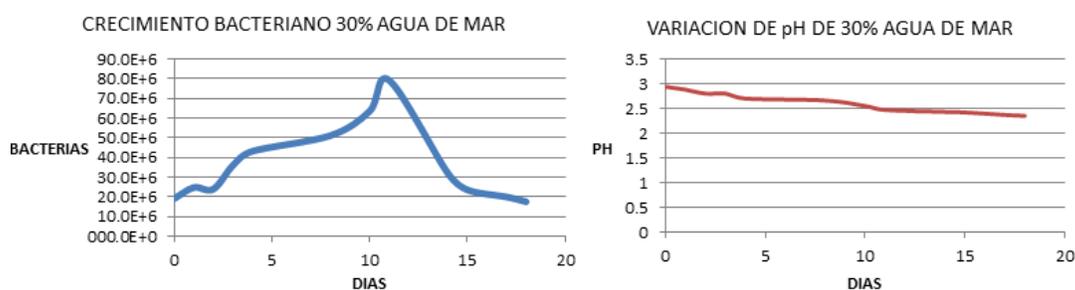


Fig. 3: Crecimiento bacteriano y variación de pH cultivo 30% agua de mar.

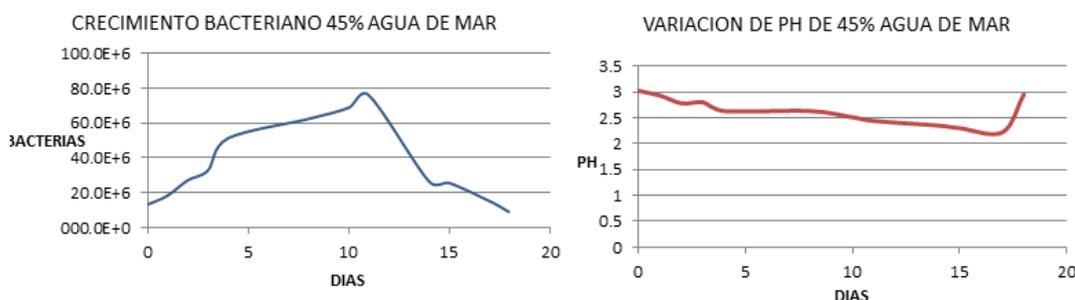


Fig. 4: Crecimiento bacteriano y variación de pH cultivo 45% agua de mar.

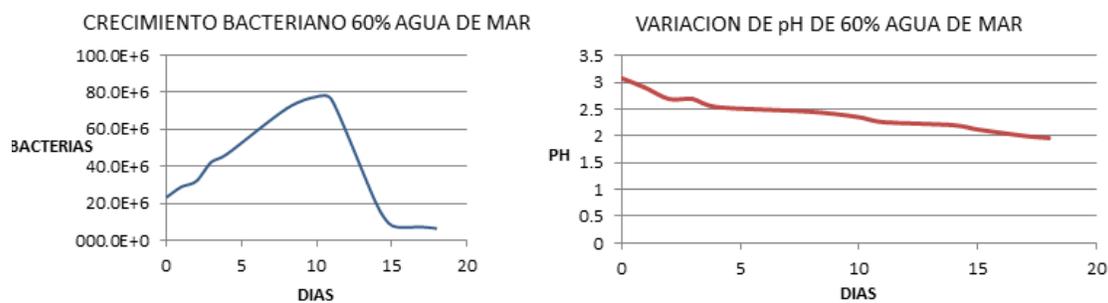


Fig. 5: Crecimiento bacteriano y variación de pH cultivo 60% agua de mar.

Estudio de Biolixiviación en reactores

La biolixiviación en reactores duró 7 días y se realizaron tres pruebas; Una con un 100% de agua dulce y dos con un 30 % y un 60% de agua de mar, cada prueba se realizó en duplicado.

La mayor tasa de crecimiento bacteriano en el reactor con un 100% de agua dulce, se presentó el día 4 con una población de $3,76 \times 10^7$ y la mayor tasa de crecimiento bacteriano de la réplica se alcanzó el día 7 con una población de 4×10^7 . El pH en ambos casos se reguló con ácido sulfúrico durante los tres primeros días, posteriormente se gesta una tendencia a disminuir, alcanzando un valor de 1.4 y 1.52 respectivamente (figura 6).

Para el reactor con un 30% agua de mar y su réplica, la mayor tasa de crecimiento bacteriano se genera en ambas el día 7 con una población de $3,36 \times 10^7$ y $3,92 \times 10^7$ respectivamente. El pH al igual que los reactores con agua dulce se reguló durante los tres primeros días y luego disminuye automáticamente, volviendo a presentar un leve aumento el día 7 (figura 7).

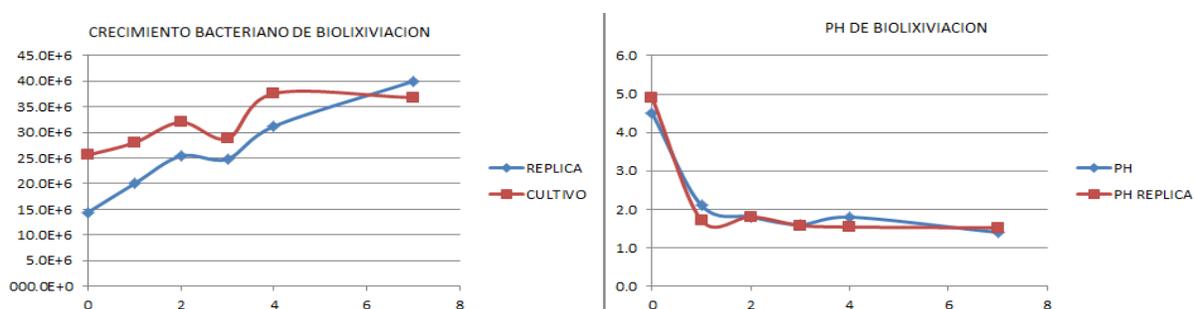


Fig. 6: Crecimiento bacteriano y variación de pH cultivo 100% agua dulce.

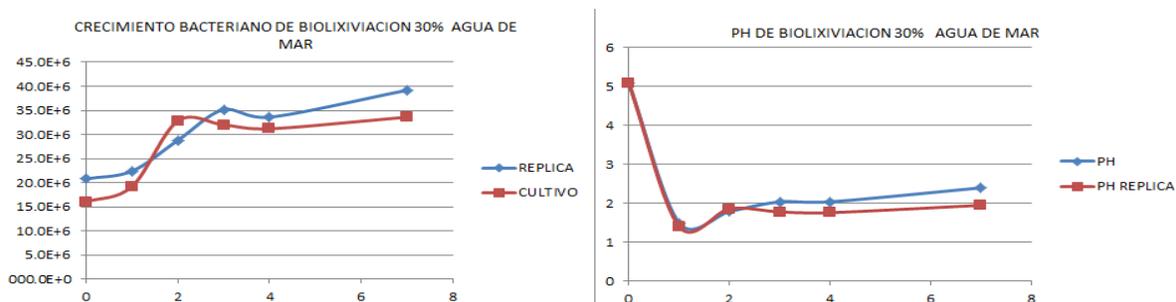


Fig. 7: Crecimiento bacteriano y variación de pH cultivo 30% agua de mar.

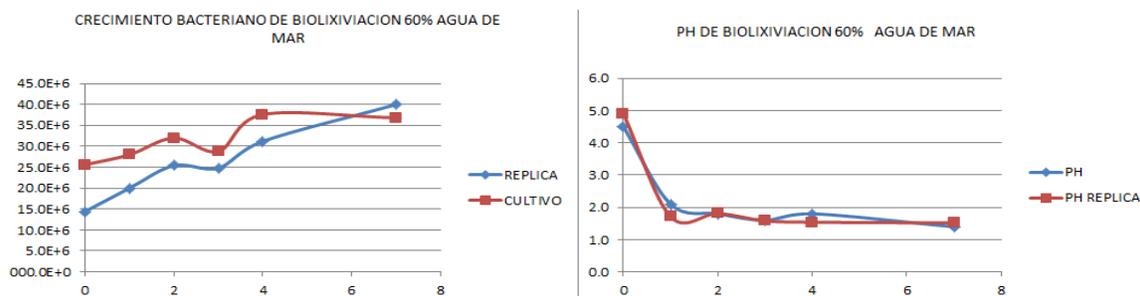


Fig. 8: Crecimiento bacteriano y variación de pH cultivo 60% agua de mar.

Los reactores con un 60% agua de mar, alcanzaron su mayor tasa de crecimiento bacteriano el día 3 con una población de $3,44 \times 10^7$ y $3,04 \times 10^7$ respectivamente. El pH solo se reguló los dos primeros días, a diferencia de las

otras pruebas el tercer y cuarto día no presento un aumento significativo, posteriormente comienza la tendencia disminuir alcanzando un valor de 1.8 y 2.26 (figura 8).

Considerando que cada prueba de biolixiviación en reactor está compuesta por 0,14 litros de solución y 14 gramos de la mezcla de minerales sulfurados con una concentración de cobre de 1,5 %, en cada solución contendría como máximo 1500 mg de Cu/L, si todo el cobre fuera extraído del mineral.

La biolixiviación con un 60 % de agua de mar recupera un 21.19 % promedio de sulfato de cobre en un periodo de 7 días. El resultado de la biolixiviación con un 30% de agua de mar refleja un menor porcentaje de recuperación en los 7 días, extrayendo un 19.82% de promedio, Tabla 3.

La biolixiviación con un 100% de agua dulce se logra una recuperación promedio de un 21,29 % de sulfato de cobre en 7 días (Tabla 3).

Tabla 3: Porcentaje de extracción de cobre, en reactores, con distintos porcentajes de agua de mar.

Muestras con agua de mar	Concentración mg/L	% de extracción de cobre	% Extracción promedio de cobre
60%- 1	315.2	21.01	21.19
60%- 2	320.5	21.37	
30%- 1	280.1	18.67	19.82
30%- 2	314.5	20.97	
Muestras sin agua de mar	Concentración mg/L	% de extracción de cobre	
N-1	324.6	21.64	21.29
N-2	313.9	20.93	

Los resultados de la biolixiviación en reactores muestran una variación no significativa en el uso de agua de dulce o de mar.

Analizando la Tabla 3, se puede observar que las eficiencias de extracción del cobre son equivalentes entre la solución que contiene un 100% de agua dulce, y la solución que contiene un 60% de mezcla agua de mar y dulce, demostrando que estos organismos pueden adaptarse a una concentración elevada de sales disueltas.

En base a los resultados anteriores se seleccionaron los cultivos con un 60% agua de mar y un 100% agua dulce para realizar la biolixiviación en micro columnas de fase inversas.

Estudios de biolixiviación en columnas

La biolixiviación en micro columnas inversas duró un periodo de 9 días y se utilizó la misma mezcla de minerales sulfurado empleada en la biolixiviación en reactores solo varió la granulometría del mineral. En la figura 9, se presentan las micro columnas usadas.

El conteo celular permitió cuantificar la población bacteriana libre en el medio líquido de cada micro columna inversa. La micro columna con un 100% de agua dulce alcanza la mayor tasa de crecimiento bacteriano el día 5 con una población de $2,64 \times 10^7$ el pH se mantuvo dentro del rango de 2.7 a 3.3 (Figura 10).

La micro columna con un 60% agua de mar alcanza la mayor tasa de crecimiento bacteriano el día cuatro con una población de $2,4 \times 10^7$ el pH al igual que la micro columna con un 100% agua dulce se mantuvo dentro del rango, mencionado anteriormente (Figura 11).



Fig. 9: Sistema de biolixiviación por micro columnas en fase inversa, se observa que la solución lixiviante ingresa por la parte inferior de la columna y sale por la parte superior, creando un sistema de inmersión del mineral.

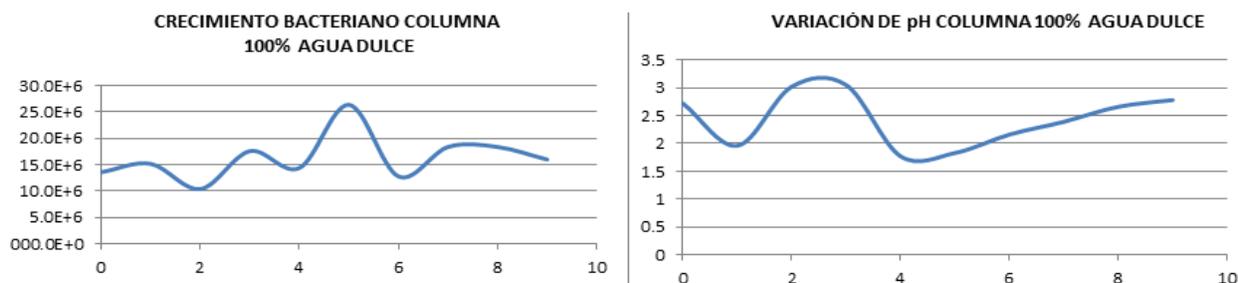


Fig. 10: Crecimiento bacteriano y variación de pH cultivo 100% agua dulce

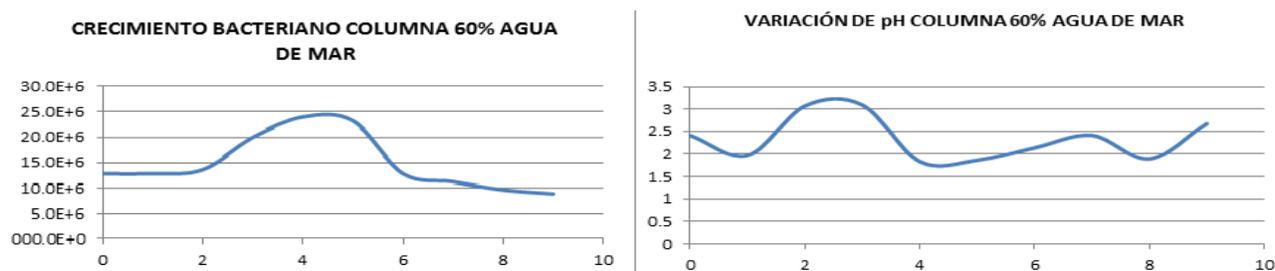


Fig. 11: Crecimiento bacteriano y variación de pH cultivo 60% agua de mar.

En las Tablas 4 y 5, se muestran los resultados extracción de cobre por acción de las soluciones biolixiviantes.

En la figura 12, se muestra como varia la concentración de cobre en las soluciones de agua dulce y en la mezcla al 60% de agua de mar con agua dulce.

Tabla 4: Porcentaje de extracción de cobre en micro columnas inversas, 100% agua dulce

Horas	Muestras sin agua de mar	Concentración mg/L	% de extracción de cobre
5 horas	0	6.74	0.25
20 horas	1	22.7	0.84
51 horas	2	23.38	0.87
69 horas	3	21.49	0.80
94 horas	4	35.15	1.31
119 horas	5	22.34	0.83
140 horas	6	50.38	1.87
166 horas	7	84.38	3.13
213 horas	9	149	5.54
237 horas	10	192.88	7.17

Tabla 5: Porcentaje de extracción de cobre micro columnas inversas, 60% agua de mar.

Horas	Muestras con agua de mar	concentración mg/L	% de extracción de cobre
5 horas	0	8.99	0.35
20 horas	1	21.25	0.82
51 horas	2	23.95	0.92
69 horas	3	24.7	0.95
94 horas	4	36.25	1.39
119 horas	5	42.25	1.62
140 horas	6	59.05	2.27
166 horas	7	71.4	2.74
189 horas	8	78.45	3.02
213 horas	9	71.1	2.77
237 horas	10	88.75	3.41

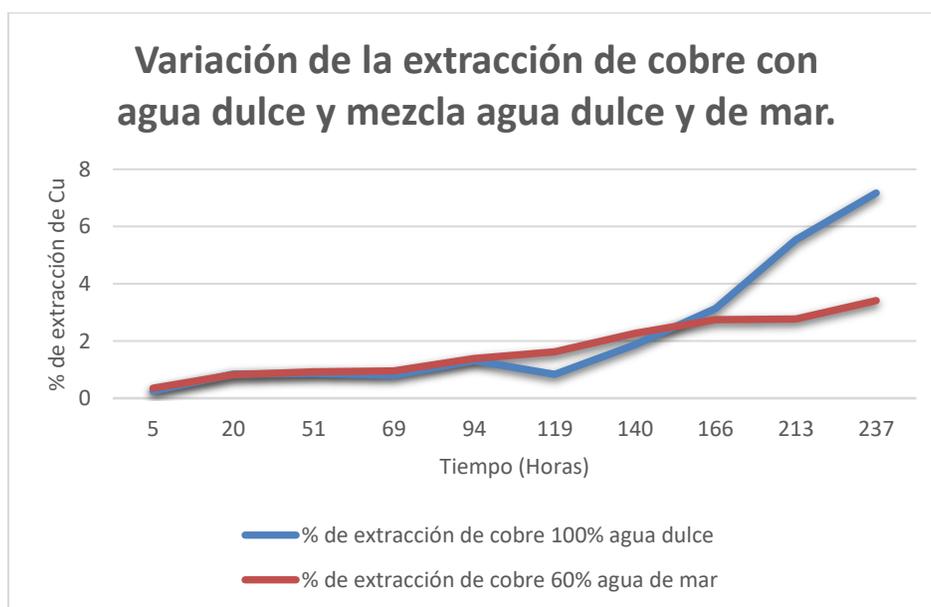


Fig. 12: Variación de la concentración de cobre extraído por las bacterias en agua dulce y en agua al 60% con agua de mar.

Al observar los valores de las tablas 4 y 5, junto con la figura 12, se aprecia que en la micro columna con un 100% de agua dulce se recuperó un 7,16% de sulfato de cobre en 237 horas, y la micro columna con un 60% agua de mar extrajo 3,4% de sulfato de cobre en 237 horas.

Se observa que en las primeras 144 horas el cultivo con un 60% agua de mar logro una recuperación más rápida que el cultivo con agua dulce, pero en las horas restantes decae la velocidad de extracción, esto está en concordancia con los resultados del crecimiento poblacional, que en esta mezcla la población disminuye más rápidamente una vez alcanzado el máximo.

El cultivo que mostró un mayor porcentaje de cobre extraído en función del tiempo fue la micro columna con agua dulce.

CONCLUSIONES

Los microorganismos nativos usados, son tolerantes a los diferentes porcentajes de agua de mar y presentan una mayor tasa crecimiento a diferencia de los cultivos con agua dulce, donde la población bacteriana es menor.

En la biolixiviación en reactores con mineral fino se recuperó cantidades equivalentes de cobre, al usar agua dulce al 100% o una mezcla de agua con 60% de agua de mar, en un periodo de 7 días.

En las micro columnas inversas con mineral sulfurado, se logra una menor recuperación al utilizar un 60% agua de mar, evidenciando una mejor adherencia del microorganismo al mineral en solución dulce.

Al comparar los resultados obtenidos en la biolixiviación en reactores y en columnas se puede concluir que la recuperación es mejor en reactores debido a la granulometría del mineral.

Esta metodología de biolixiviación usando agua de mar con mezcla de agua dulce, se puede aplicar a otros procesos hidrometalúrgicos, no solamente a la minería del cobre.

Se recomienda continuar con la investigación dado que la biolixiviación es una técnica exitosa para tratar los minerales sulfurados de cobre que comprenden la gran mayoría de las menas de minerales de cobre, existentes en Chile.

En esta investigación se logró implementar una metodología experimental que permitió comprobar que se puede realizar biolixiviación con agua de mar utilizando microorganismos nativos, lo que es beneficioso en el ámbito ambiental, porque baja el consumo de agua continental promoviendo el uso de agua de mar y en el ámbito económico, los costos operativos pueden mantenerse ya que el agua de mar utilizada es aplicada sin desalar.

Es necesario seguir en este tipo de investigación, ya que se demostró que la biolixiviación, no es incompatible con el agua con alto contenido de sales, como el agua marina.

REFERENCIAS

Arias, B., Anaya, M., Quiñones, L., Salazar I. & Gi, J. (2013). *Adaptación del Thiobacillus Ferrooxidans a sustratos conformados con especies de minerales piríticos*; *Revista de investigación UNMSM*, 16 (7), 31-40.

Castellón, C. (2016). Lixiviación de minerales de cobre con agua de mar. *Geominet. XLIII*, (324), 21 – 26.

Cochilco (2009). *Recopilación de Estudios 2009. Desarrollo Minero en Chile: Análisis y desafíos*. Gobierno de Chile, pp. 81-108 <https://boletin.cochilco.cl/descargas/estadisticas/recopilacion/2009.pdf>

- Gentina, J. & Acevedo, F. (2013). *Aplicación de la biolixiviación a la minería del cobre en Chile*. *Electrón. J. Biotechnol.*, 16 (3), 1-13.
- Larraín, S. (2006). El agua en Chile: entre los derechos humanos y las reglas del mercado. *POLIS Revista latinoamericana*, 5 (14) 0. <https://journals.openedition.org/polis/5091>
- Minería Chilena (2014). *FCh desarrolla bacterias para recuperar minerales sulfurados con agua salada*. (<http://www.mch.cl/2014/11/05/fch-desarrolla-bacterias-para-recuperar-minerales-sulfurados-con-agua-salada/>). (consultado: diciembre del 2018).
- Misari, F. (2016). *Biolixiviación Tecnología de la Lixiviación Bacteriana de Minerales*. Editado por: Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería, Lina Perú, pp. 105 – 109.
- Navarro, P. & Mansor, R. (2017). *Lixiviación de un concentrado calcopirítico de cobre en medio ácido con presencia de iones cloruro*. *Revista REMETALLICA*, 33 (21), 25-30.
- Pérez, N.J., Vásquez, A. & García-Páez, I. (2015). *Adaptación de las bacteria Acidithiobacillus Ferrooxidans a partir de drenajes ácidos de minas de carbón para uso en la recuperación de oro diseminado en concentrados gravimétricos*. II Semana Internacional y X Sermana de la Ciencia Tecnología e Innovación, 20 al 23 de octubre, San José de Cúcuta - Colombia p. 82. [file:///C:/Users/Carlos%20Rojas/Downloads/11 ADAPTACION%20DE%20LA%20BACTERIA.pdf](file:///C:/Users/Carlos%20Rojas/Downloads/11%20ADAPTACION%20DE%20LA%20BACTERIA.pdf)
- Rawlings, D. (2005). Characteristics and adaptability of iron- and sulfur-oxidizing microorganisms used for the recovery of metals from minerals and their concentrates. *Microbial Cell Factories*, 4 (13), 112-135.
- Rodríguez, Y., Blázquez, M., Ballester, A., Gonzales, F. & Muñoz, J. (2001a). *La biolixiviación al comienzo del siglo XXI*. *Revista de Metalurgia*, 37 (5), 616-627.
- Rodríguez, Y., Blázquez, M., Ballester, A., Gonzales, F. & Muñoz, J. (2001b). *Mecanismo de biolixiviación de sulfuros metálicos*. *Revista de metalurgia*, 37 (5), 655-672.
- Zamarreoño, R., Espinoza, G. & Esquivel, I. (2016). *Factibilidad técnica y económica de utilizar agua de mar en el proceso de flotación en la minería del cobre*. Seminario de Título para obtener el Título de Ingeniería Civil en Minas. Facultad de Ingeniería, Universidad Pedro de Valdivia.
- Zapata, D., Ossa, D. & Márquez, M. (2008). Caracterización mineralógica de los productos de oxidación del sistema piritita-esfalerita por bacterias nativas oxidantes de Fe. *Dyna*, 75 (174), 59-64.