

Artículo original de Investigación

Recuperación de cobre y otros metales mediante bacterias acidófilas desde *scraps* de teléfonos móviles

Sandoval Manuel¹, Santibáñez Mauricio², Gallardo Ma. José³, Castro Matías⁴ y González Alex Ricardo^{1*}

¹Laboratorio de Microbiología Ambiental y Extremófilos, Departamento de Ciencias Biológicas y Biodiversidad. Universidad de Los Lagos. Avda Fuchslocher 1305, Osorno, Chile.

²Laboratorio Física Aplicada, Departamento Física, Universidad de Concepción, Chile.

³Centro de Óptica y Fotónica (CEFOP), Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Concepción, Chile.

⁴Fundación Ciencia & Vida. Laboratory of Microbial Ecophysiology, Chile.

* Autor de correspondencia: alex.gonzalez@ulagos.cl

Resumen

La finalidad de esta investigación fue evaluar y caracterizar la capacidad de solubilizar de metales contenidos en las placas de circuitos integrados (*scraps*) de teléfonos móviles en desuso mediante biolixiviación enriquecida con electrolitos de baterías en desuso (EBD). Se evaluó la capacidad catalítica de cultivos puros y mixtos de bacterias acidófilas *A. ferrooxidans* ATCC 23270 (A.f) y *A. thiooxidans* DSM 9463 (A.t). Los resultados obtenidos mostraron que los cultivos mixtos presentan la mejor actividad catalítica para solubilizar Cu y Ni desde *scraps* de teléfonos móviles a 240 horas de incubación. Estos cultivos logran solubilizar Cu, Ni en cantidades de 9.685 y 211,8 mg/L respectivamente, representando al 65 y 58,8 % del contenido metálico presente en las *scrap*. Adicional a esto, se determinó la adhesión bacteriana sobre la superficie de las *scrap* durante el proceso lixiviativo evidenciado que el proceso es realizado por bacterias adheridas y planctónicas. Por lo tanto, se logró establecer la factibilidad de solubilizar el contenido metálico presente en las *scrap* de teléfonos móviles mediante biolixiviación enriquecida con EBD, siendo una posible alternativa para el tratamiento de los desperdicios electrónicos.

Palabras clave: *Biolixiviación, desperdicios electrónicos, metales valiosos, Níquel*

Abstract

The purpose of this research was to evaluate and characterize the ability to solubilize metals contained in the printed circuit boards (*scraps*) of mobile phones by enriched bioleaching with dead batteries electrolyte (DBE). The catalytic ability of pure and mixed cultures of acidophilic bacteria *A. ferrooxidans* ATCC 23270 (Af) and *A. thiooxidans* DSM 9463 (At) was evaluated. The results showed that the mixed cultures have the best catalytic activity for solubilizing Cu and Ni from *scraps* of mobile phones after 240 hours of incubation. These cultures were able to solubilize Cu, Ni in quantities of 9,685 and 211.8 mg/L respectively, representing 65 and 58.8% of the metal content in *scrap*. In addition to this, the bacterial adhesion on the surface of the *scrap* was determined during the leaching process, showing that the process is performed by the adhesion of planktonic bacteria. Therefore, it was established the feasibility of ©The Author(s) 2015. This article is published with open access by Sociedad Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal.

solubilizing the metal content present in the scrap handset enriched by bioleaching DBE, resulting in a possible alternative for treating electronic waste.

Keywords: *Bioleaching, e-waste, valuable metals, Nickel*

1. Introducción

Los teléfonos móviles son considerados uno de los aparatos electrónicos más utilizados, con una vida útil cercana a los 24 meses lo que genera anualmente alrededor de 100 millones de aparatos descartados a nivel mundial (Harue *et al.*, 2011). El diseño de un teléfono móvil contempla una carcasa plástica, placa de circuitos impresos (*scraps*), pantalla de cristal líquido, batería y algunos accesorios como cámara de video y parlantes (Kasper *et al.*, 2011). Debido a su composición presentan una serie de elementos tóxicos como As, Be, Cr, Hg, Pb, Sb y retardantes de llama bromados (ej. pentabromofenol, tetrabromobisfenol-A) que se encuentran distribuidos principalmente en la carcasa, baterías y *scraps* (Ha *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2012).

Las *scraps* son utilizadas ampliamente en la industria electrónica como soporte para conectar los componentes electrónicos en distintos aparatos (ej. T.V, reproductores mp3, cámaras fotográficas, laptop, calculadoras, etc.). La composición de los residuos denominados *scraps* corresponde a un 28% de metales y 72% no-metales (Guo *et al.*, 2009). Los principales metales contenidos son: Cu 10-20%, Pb 1-5% y Ni 1-3%, además de una importante fracción de metales preciosos que alcanza el 0,3 a 0,4% de Ag, Au y Pd (Huang *et al.*, 2009; Wang *et al.*, 2009). Se ha determinado que la pureza de los metales contenidos en las *scraps* es 10 veces superior al encontrado en los minerales sulfurados. Por lo tanto, las *scraps* son consideradas como un “recurso mineral urbano” de gran importancia económica futura, haciendo atractivo su reciclaje para la

recuperación de la fracción metálica (Huang *et al.*, 2009).

Los procesos utilizados en la recuperación de metales desde *scraps* se basan en tecnologías aplicadas principalmente en la industria minera, pirometalurgia, hidrometalurgia y procedimientos mecánicos (Tuncuk *et al.*, 2012). Los métodos pirometalúrgicos han sido los más utilizados en las últimas décadas en la recuperación del contenido metálico, mientras que, las técnicas hidrometalúrgicas han sido en menor escala utilizadas (Tsydenova *et al.*, 2011). Los problemas que presentan estos métodos son sus altos costos de operación y la generación de subproductos peligrosos para la salud y el medio ambiente (ej. dioxinas, furanos, aguas ácidas, sulfuros de hidrogeno, etc.) (Wang *et al.*, 2009; Veit *et al.*, 2006; Huang *et al.*, 2011). Debido a estas complicaciones se han buscado nuevas herramientas tecnológicas que sirvan como alternativa para el tratamiento de los residuos electrónicos. Actualmente se ha propuesto el uso de técnicas biotecnológicas utilizadas en la minería para el tratamiento de los residuos electrónicos, siendo la biolixiviación el método calificado como menos costoso y contaminante (Cui *et al.*, 2008; Tuncuk *et al.*, 2012; Pant *et al.*, 2012).

La biolixiviación es el proceso utilizado para la recuperación de metales por acción biológica (principalmente bacterias y/o archeas) desde minerales sulfurados escasamente solubles. La solubilización es provocada de forma directa por el metabolismo de los microorganismos, o bien indirectamente por algún producto de su metabolismo (Rawlings., 2005). Las bacterias son los

principales microorganismos utilizados, se caracterizan por utilizar los Fe^{+2} o compuestos reducidos de azufre (RISC) como fuente energética, desarrollándose en ambientes ácidos ($\text{pH} < 3$) en presencia de una alta concentración de iones metálicos (Raelings, 1999; Rohwerder, 2003). Las bacterias oxidan de forma aeróbica los Fe^{+2} y RISC para la producción de Fe^{+3} , SO_4^{-2} y H^+ que atacan al mineral sulfurado logrando solubilizar el metal (Rohwerder, 2003; Donati *et al.*, 2007).

La aplicación de esta tecnología para el tratamiento de los residuos electrónicos (*scraps* y baterías) ha sido recientemente estudiada, utilizando para ello bacterias quimiolitotróficas (principalmente *Acidithiobacillus ferrooxidans*). Estas investigaciones han determinado la capacidad que poseen estas bacterias para la solubilización de Co, Cu, Ni, Pb y Zn, destacándose la capacidad de recuperación de Cu que presenta las tasas más elevadas de solubilización (Zhu *et al.*, 2003; Mishra *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2009; Yang *et al.*, 2009; Liang *et al.*, 2010; Xiang *et al.*, 2010).

En esta investigación se presenta una metodología para la recuperación de metales desde *scraps* de teléfonos móviles, utilizando bacterias acidófilas. El objetivo es evaluar la capacidad de solubilización de metales por la acción conjunta de bacterias acidófilas *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans* utilizando electrolito de baterías plomo-ácido en desuso (EBD) como agente enriquecedor del proceso de biolixiviación.

2. Materiales y Métodos

2.1 Recolección de *scraps* y EBD

Las *scraps* se recolectaron de distintos teléfonos móviles desechados, las cuales fueron desmanteladas y separadas extrayendo las *scraps* del resto de la chatarra (plásticos, baterías, conectores, cables y cerámicos). Para el uso experimental, las *scraps* se trituraron y tamizaron obteniendo una fracción homogénea de 0,2-2 mm (Figura 1). Con respecto al EBD, éste se adquirió de baterías plomo-ácido en desuso, posteriormente el EBD fue drenado y filtrado con filtro de 0,45 micras.



Figura. 1. Desmantelamiento y desarme de teléfonos móviles para obtener las *scraps* y finalmente un triturado de particulado tamizado entre 2 – 0,2 mm.

2.2 Cepas bacterianas y condiciones de cultivo

Las cepas utilizadas corresponden a bacterias mesófilas *A. ferrooxidans* ATCC 23270 y *A. thiooxidans* DSM 9463. Para el crecimiento de los microorganismos se utilizó medio Norris a pH 1,7 acidificado con EBD, el medio contiene (g/L): $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0,4; KCl 0,4; KH_2PO_4 0,2 y $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ 0,5. Como fuente energética para cada cepa se utilizó g/L: 10 S^0 *A. thiooxidans* y 6 $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ para *A. ferrooxidans*. Obtenidos los cultivos en fase exponencial, se transfirieron inóculos al 10% v/v a medio fresco con una concentración de *scraps* de 0,75 g/L. El crecimiento se registró diariamente mediante recuento directo en cámara Neubauer.

2.3 Ensayos de biolixiviación

Los ensayos de biolixiviación se realizaron con 15 g/L de *scraps* e inoculados al 10% v/v con cepas crecidas en medio Norris pH 1,7 ajustado con EBD (Figura 2). Los cultivos fueron suplementados con: 6 g/L de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ para los cultivos puros de *A. ferrooxidans*; 10 g/L de S^0 para cultivos puros de *A. thiooxidans* y para los cultivos mixtos de *A. ferrooxidans* y *A. thiooxidans* se adicionaron 6 g/L de $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ y 10 g/L de S^0 . Por otro lado, se realizó un control abiótico que contenía sólo medio Norris. Estos se incubaron aeróbicamente a 28°C con agitación constante de 180 rpm por 240 horas. Todos los cultivos fueron realizados en triplicado los cultivos.



Figura 2. Diagrama del proceso de biolixiviación de *scraps* de teléfonos móviles.

2.4 Determinaciones analíticas

El análisis de la muestras de *scraps* y EBD fue realizado mediante espectroscopía de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). Para las determinaciones diarias de pH y Eh se utilizó un multiparámetros Corning 315 pH/Ion equipado con electrodo Ag/AgCl. De cada matraz se extrajo una alícuota de 1,5 ml a las 240 horas de incubación para la determinación del contenido metálico por Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total (TXRF) (S2 PICO SIFOX Bruker).

Para la observación de la adherencia sobre la superficie de las *scraps*, por microscopía de epifluorescencia se utilizó 4',6'-diamino-2-fenilindol (DAPI) (González *et al.*, 2012), las muestras de *scraps* se extrajeron a las 120 y 240 horas de incubación desde los cultivos de *A. ferrooxidans*, *A. thiooxidans*, mixtos (*A. ferrooxidans* y

A. thiooxidans) y control abiótico. Las muestras extraídas fueron lavadas con agua ácida pH 1,5 y fijadas con formaldehído al 4% y posteriormente teñidas con DAPI al 0,05% para su posterior visualización (Zeiss Axiovert 200 M).

3. Resultados

3.1 Caracterización de metales contenidos en las scraps y EBD

Tabla 1. Análisis químico de los metales contenidos en las muestras de scraps de teléfonos móviles.

| Metal | Concentración (mg/g) | Porcentaje (%) |
|-------|----------------------|----------------|
| Cu | 184,95 | 18,5 |
| Fe | 5,18 | 1,5 |
| Ag | 13,52 | 1,4 |

Tabla 2. Análisis químico de los metales contenidos en las muestras de electrolito de baterías plomo-ácido en desuso.

| Metal | Concentración (mg/L) |
|-------|----------------------|
| Cu | 1,10 |
| Fe | 9,96 |
| Pb | 0,399 |

3.2 Valores de pH y Potencial Redox (Eh) durante el proceso de biolixiviación

Los cambios registrados en los valores de pH y Eh durante el proceso de biolixiviación mostraron un aumento del pH a las 24 horas para los cultivos de *A. thiooxidans* y control abiótico con valores de 5,2 y 5,0 (Figura 3). En los cultivos de *A. ferrooxidans* y mixtos no se registraron variaciones mayores con valores de 1,1 y 1,1. A las 240 horas del

El análisis químico de las scraps y EBD determinaron la presencia y cantidad de algunos metales (Tabla 1 y 2). En el caso de las scraps, se detectó la presencia de Ag (13,52 mg/g), Cu (184,95 mg/g) y Fe (5,18 mg/g). Respecto al contenido de metales en EBD, se detectó Cu, Pb y Fe donde la concentración de Fe alcanza los 9,96 g/L.

ensayo los cultivos de *A. thiooxidans* y control abiótico presentan valores de 5,1 y 5,9 mientras que, los cultivos de *A. ferrooxidans* y mixtos registran valores de 2,5 y 2,1.

Con respecto al Eh, en la Fig. 3b se observa una disminución durante las primeras 24 horas de los valores en los cultivos de *A. thiooxidans* y control abiótico sw 93 y 101,2 mV. Los cultivos de *A. ferrooxidans* y mixtos no presentan mayores variaciones en las primeras 24 horas con valores de 263 y 276 mV. A las 240 h de cultivo se observó que en *A. thiooxidans* y el control abiótico valores de 101 y 67 mV. Para el caso de de *A. ferrooxidans* y cultivos mixtos se observó una disminución en sus valores a 245 y 267 mV respectivamente.

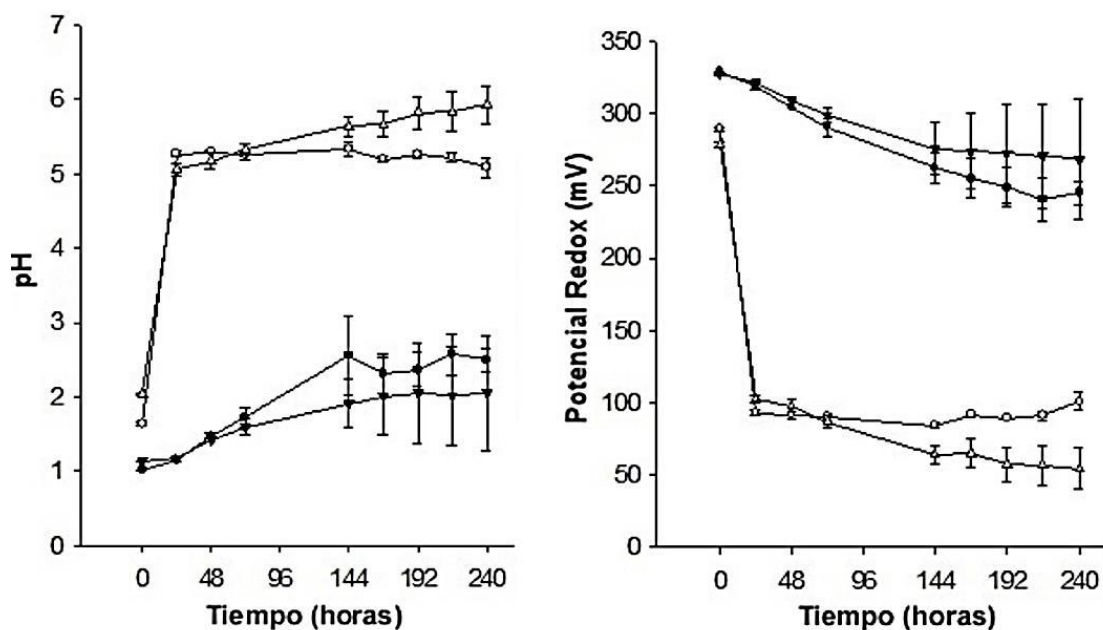


Figura 3. Valores de pH (a) y Potencial Redox (b) durante la biolixiviación de *scrap* de teléfonos móviles, ● *A. ferrooxidans*; ○ *A. thiooxidans*; ▼ Cultivo mixto *A. ferrooxidans* y *A. thiooxidans*; △ Control abiótico.

3.3 Disolución de metales durante el proceso de biolixiviación

El análisis realizado por TXRF determinó la presencia de Cu, Ni, Sn y Pb en el sobrenadante de los cultivos a las 240 horas (Figura 4). Los resultados indican que la concentración de Cu en los cultivos fue de (mg/L): 8.326 *A. ferrooxidans*; 3.816 *A. thiooxidans*; 9.685 mixtos y 474,1 control abiótico. Para Ni (mg/L): 150,4 *A. ferrooxidans*; 109,6 *A. thiooxidans*; 211,8 mixtos y 71,1 control abiótico. En el caso del Sn (mg/L): 87 *A. ferrooxidans*; 50,2 *A. thiooxidans*; 129,1 mixtos y 28 control abiótico. Mientras que, para el Pb (mg/L) fue de: 22,6 *A. ferrooxidans*; 25,3 *A. thiooxidans*; 17,8 mixtos y 4,4 control abiótico.

3.4 Adhesión bacteriana sobre la superficie de scraps

La adhesión bacteriana sobre la las scraps a las 240 horas se observa en la figura 5. En ella se muestra la adhesión de *A. ferrooxidans* y cultivos mixtos. La detección de las bacterias biolixivantes, se realizó mediante tinción con DAPI

reveladas a 423 nm (ultravioleta) observándose de color azul (Figura 5).

4. Discusión

4.1 Contenido metálico de las SCRAP de chatarras de teléfonos móviles

La tabla 1, muestra los metales contenidos en las scraps. El Cu es el metal más abundante que alcanza un 18,5% del peso total, al igual que en otros estudios es el metal que se presenta en mayor cantidad. Además del Cu se detectó la presencia de Ag (1,4%) y Fe (1,5%). Las variaciones en el contenido de estos metales van desde 13 – 30 % Cu, 5 – 8% Fe y 1,3 a 0,06% Ag (Cui *et al.*, 2008; Liang *et al.*, 2010; Xiang *et al.*, 2010; Kasper *et al.*, 2011; Pant *et al.*, 2012). Sin embargo, las diferencias en el contenido metálico se deben principalmente a la naturaleza heterogénea de los teléfonos móviles, especialmente a la diversificación existente entre los materiales, tipos, año y origen de fabricación (Cui *et al.*, 2008; Harue *et al.*, 2011).

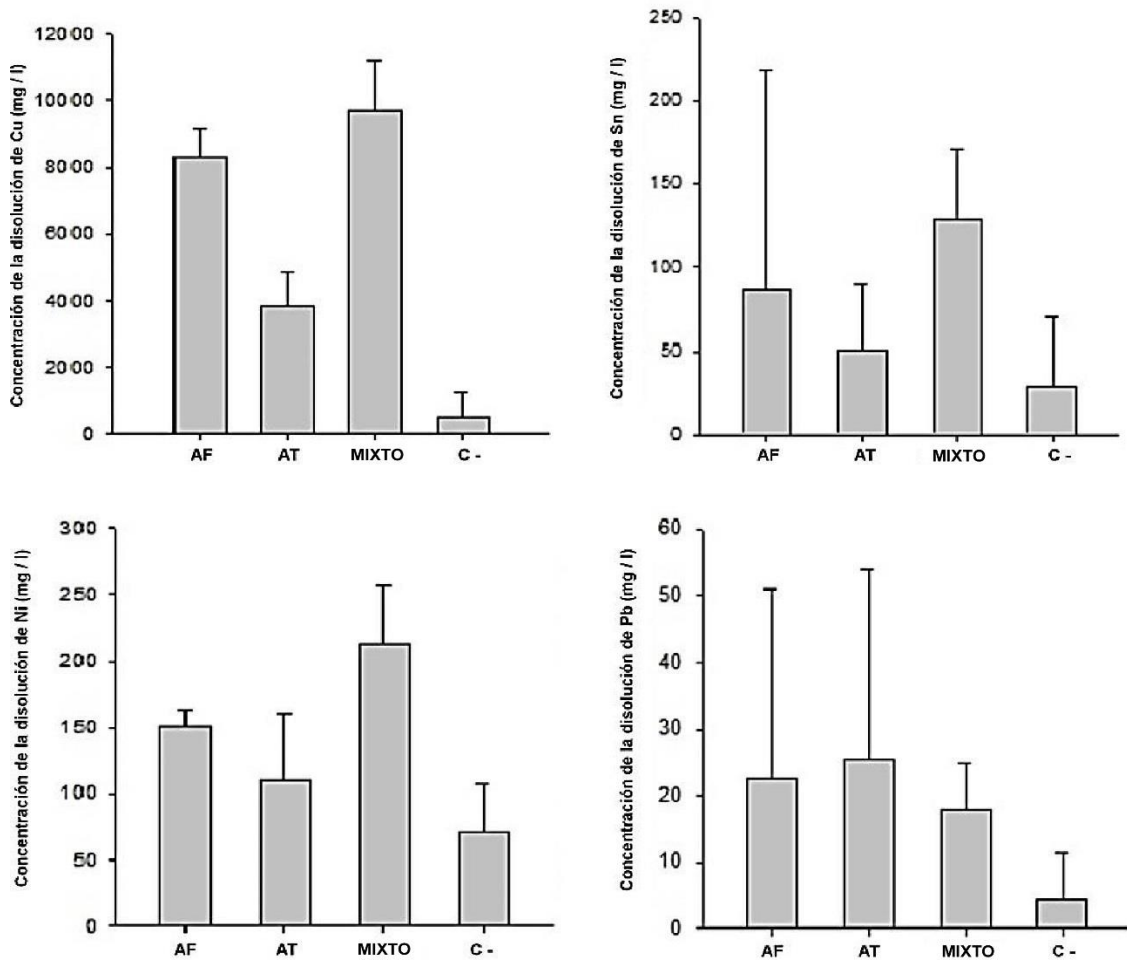


Figura 4. Cobre y Niquel solubilizado durante la biooxidación de *scrap* de telefonos móviles. **AF:** *A. ferrooxidans*; **AT:** *A. thiooxidans*; **MIXTO:** Cultivo Mixto de *A. ferrooxidans* y *A. thiooxidans*; **C-:** control abiotico.

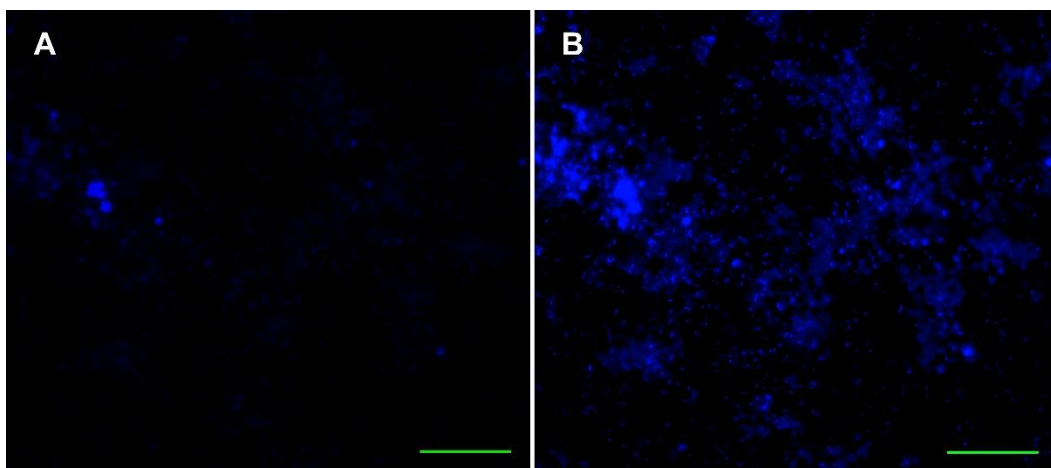


Figura 5. Adherencia bacteriana sobre *scrap* de telefonos móviles después de 240 h de incubación. Las ceulas bacterianas adheridas viualizadas por microscopia de epifluorescencia mediante tinción con DAPI. **A:** control abiotico control; **B:** Cultivo Mixto *A. ferrooxidans* and *A. thiooxidans*. La barra verde indica: 50 μm.

4.2 Cambios en los valores de pH y Potencial Redox (Eh)

El pH y Eh son dos de los principales factores que intervienen en el proceso de biolixiviación de minerales sulfurados y residuos electrónicos, influyendo en el desarrollo y actividad catalítica bacteriana (Liang *et al.*, 2010; Gholami *et al.*, 2011). El pH del medio interviene en el crecimiento y la actividad catalítica de las bacterias acidófilas, debido al efecto que producen en los grupos ionizables presentes en las enzimas situadas en el citoplasma y periplasma, además de afectar el pH interno, interfiriendo en la síntesis de proteínas, actividad enzimática y transcripción del DNA (Das *et al.*, 1999; Baker-Austin *et al.*, 2007; Liang *et al.*, 2010; Xiang *et al.*, 2011). La mantención de la acidez está ligada a los procesos bioenergéticos, resultando del balance de protones entre las reacciones netas de consumo (disolución de óxidos y carbonatos), producción de H_2SO_4 e hidrólisis de Fe en los procesos de biolixiviación de minerales sulfurados mediante la actividad de enzimas extracelulares como ATPasas, proteasas y amilasas (Norris *et al.*, 2001; Baker-Austin *et al.*, 2007; Morin, 2007). Por otro lado, el pH controla la precipitación de algunos metales como el Fe durante el proceso de biolixiviación, manteniéndose en solución en ambientes de pH cercano a 2, evitando la formación, oxidación química y precipitación de $Fe(OH)_3$ (Tuncuk *et al.*, 2012).

Las curvas de pH (Fig. 3a) obtenidas para cada uno de los cultivos utilizados en los ensayos muestran un aumento en los valores de este parámetro. Los resultados obtenidos sugieren que *A. ferrooxidans* y los cultivos mixtos permitirían el desarrollo y crecimiento bacteriano favoreciendo la acción catalítica durante el proceso de biolixiviación. Los factores que podrían influenciar un incremento del pH

durante el proceso han sido descritos por Xiang *et al.*, 2010, los que deberían estar ligados a: a) naturaleza alcalina de las *scraps*; b) consumo de protones por la oxidación del Fe^{+2} por la acción bacteriana en la solución lixivante y c) consumo de protones por metales u óxidos metálicos. Los resultados obtenidos en la Fig. 3a muestra que los cultivos mixtos poseen la menor variación en el pH durante la biolixiviación de *scraps*, lo que ha sido demostrado en estudios previos (Wang *et al.*, 2009; Liang *et al.*, 2010).

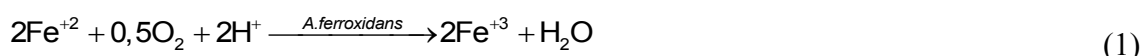
El Potencial Redox (Eh) al igual que el pH permite determinar el estado fisiológico de las bacterias oxidadoras de Fe^{+2} en los procesos de biolixiviación. Principalmente se utiliza para determinar la capacidad oxidación del par iónico Fe^{+3}/Fe^{+2} , debido a esto es posible determinar indirectamente el estado de los sistemas de biolixiviación (Liang *et al.*, 2010; Akcil *et al.*, 2007). La formación de un ciclo de transformación de Fe^{+3} a Fe^{+2} , permite que el proceso siga desarrollándose de manera regular durante la catálisis bacteriana de los minerales sulfurados. En procesos de biolixiviación de calcopirita el Eh alcanza valores entre 600 y 650 mV en condiciones óptimas de solubilización de cobre, pero cuando se logran valores bajos los 400 mV inicia la precipitación del Fe en forma de jarosita, disminuyendo el rendimiento en la extracción de metales (Dast *et al.*, 1999; Akcil *et al.*, 2007; Córdoba *et al.*, 2008). Al igual que en los procesos de biolixiviación de minerales sulfurados, la extracción de metales desde los residuos electrónicos se ve influenciada por este parámetro. Las curvas de Eh (Figura 3b) de cada uno de los cultivos, muestran una disminución en los valores de este parámetro. Durante la disminución del Eh, los cultivos de *A. ferrooxidans*, *A. thiooxidans* y mixtos registraron valores

de iniciales de 330; 289 y 327 mV los cuales decrecen a 245; 101 y 269 mV respectivamente, al finalizar el ensayo a las 240 horas. Estos resultados muestran que los cultivos de *A. ferrooxidans* y mixtos logran transformar el Fe^{+2} utilizándolo como fuente energética, por lo tanto, permiten el crecimiento bacteriano favoreciendo la formación del agente oxidante Fe^{+3} que posteriormente ataca químicamente las *scraps*. Al contrario, los cultivos *A. thiooxidans* no presentan actividad oxidativa provocando la inhibición de las bacterias. Los resultados obtenidos para cultivos de *A. ferrooxidans* y mixtos son similares a los registrados por Wang et al., 2009, donde también experimentan una caída constante en sus valores, con registros que no superan los 300 mV. Estas diferencias se pueden explicar por el tratamiento de dosificación aplicado en los

experimentos, al contrario a lo utilizado en esta investigación que se utilizó un solo período inicial de dosificación.

4.3 Solubilización del contenido metálico por acción bacteriana

La solubilización del contenido metálico contenido en las *scraps* de teléfonos móviles, corresponde al ataque producido por el ión Fe^{+3} , debido a la oxidación del Fe^{+2} (ecuación 1) por parte de la bacteria *A. ferrooxidans*. Al igual que en minerales sulfurados, el Fe^{+3} ataca a las *scraps* liberando los metales que se encuentran en estado Cu^0 , Ni^0 , Pb^0 y Sn^0 . El Fe^{+3} oxida a estos metales transformándolos en sus formas iónicas solubles de Cu^{+2} , Ni^{+2} , Pb^{+2} , Sn^{+2} , regenerando Fe^{+2} , como se muestra en la ecuación 2 (Wang et al., 2009; Tuncuk et al., 2012; Liang et al., 2010).



Los resultados obtenidos Fig. 4, muestra que los cultivos mixtos poseen la mayor capacidad de solubilización, seguidos de los cultivos de *A. ferrooxidans*. Esta acción se debe al rol que juega *A. ferrooxidans* en la oxidación del Fe^{+2} (ecuación 1) y *A. thiooxidans* en la regeneración de H_2SO_4 para la mantención del pH, favoreciendo las condiciones de solubilización de Cu, Ni, Pb y Sn desde las *scraps*. Por el contrario, la solubilización de los cultivos de *A. thiooxidans* es baja, producida por la acción química del H_2SO_4 adicionado en la formulación del cultivo (Figura 3). Akcil et al., 2007 y Xia et al., 2008, demostraron en sus experimentos de lixiviación en concentrados de calcopirita y esferalita, que los cultivos mixtos de *A. ferrooxidans*, *A.*

thiooxidans y *L. ferrooxidans* logran tasas de recuperación de Cu y Zn más altas que los cultivos puros de cada una de estas bacterias. En el caso de los residuos electrónicos, Wang et al., 2009 y Liang et al., 2010, demostraron el mismo efecto para cultivos mixtos de *A. ferrooxidans* y *A. thiooxidans*. Esta actividad catalítica registrada en cultivos mixtos queda demostrada con los valores obtenidos en la solubilización de Cu, Ni, Pb y Sn con porcentajes que alcanzan el 65; 58,8; 3,7 y 45,8%, siendo más bajos que los descritos por Wang et al., 2009; Liang et al., 2010 y Xiang et al., 2010. Esto se debería principalmente a las variaciones del contenido metálico en las *scraps* de los teléfonos móviles utilizados.

4.4 Adhesión sobre la superficie de las scraps

Se conoce que la adhesión a minerales sulfurados es un proceso selectivo, donde este fenómeno favorece el crecimiento bacteriano en minerales como la pirita y aumenta en la velocidad de lixiviación en bacterias mesófilas (Rodríguez *et al.*, 2003; Gonzalez *et al.*, 2012). Esta capacidad se basa principalmente en la fijación mediante la producción de sustancias poliméricas extracelulares (EPS) y formación de biopelículas, que permiten incrementar la actividad lixiviativa por la formación de reacciones entre la superficie del mineral y las células bacterianas (Rohwerder *et al.*, 2003; Gonzalez *et al.*, 2012). Estos antecedentes demuestran que la adhesión en la superficie de las scraps es importante para mejorar el rendimiento en el proceso de biolixiviación. Por lo tanto, la confirmación de esta capacidad, permite sugerir que este fenómeno sería mediado también por los mismos componentes moleculares que se presentan en el proceso de biolixiviación de minerales sulfurados. Además, sugiere que este proceso de biolixiviación, no sólo sería mediado por la acción de bacterias plantónicas en la oxidación del Fe^{+2} a Fe^{+3} según las investigaciones anteriormente realizadas, sino que conjuntamente participarían las bacterias adheridas a la superficie de las scraps (Cui *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2009; Liang *et al.*, 2010; Xiang *et al.*, 2010; Tuncuk *et al.*, 2012).

5. Conclusión

En esta investigación se demuestra la factibilidad de utilizar a las bacterias acidófilas *A. ferrooxidans* y *A. thiooxidans* en cultivos puros y mixtos enriquecidas con electrolito de baterías plomo-ácido usado (EBD) en la

recuperación de metales contenidos en las placas de circuitos impresos (*scraps*) desde teléfonos móviles en desuso. Estas bacterias presentan la capacidad de solubilizar Cu, Ni, Pb y Sn en 240 horas, a partir de 15 g/L de scraps mediante el ataque químico del Fe^{+3} generado por la oxidación bacteriana del Fe^{+2} en cultivos puros y mixtos. Los cultivos mixtos presentan los mejores rendimientos, la acción catalítica de ambas bacterias es fundamental en el proceso lixiviativo con porcentajes de solubilización de 65; 58,8; 3,7 y 45,8% para el Cu, Ni, Pb y Sn. En tanto que, la microscopia de epifluorescencia demuestra la adhesión de las bacterias sobre la superficie de las scraps. Esta colonización bacteriana sugiere la formación EPS y biopelículas, por lo que el proceso de biolixiviación de scraps sería realizado por mecanismos sin contacto y por contacto, siendo el efecto de esta acción aún no completamente determinada. Los resultados obtenidos entregan información que podría ser utilizada en una potencial aplicación industrial para el tratamiento de los residuos sólidos, donde la biolixiviación durante 10 días mediada por la acción combinada de bacterias acidófilas *A. ferrooxidans* y *A. thiooxidans* enriquecidas con EBD es una alternativa para la recuperación del contenido metálico de los residuos electrónicos.

6. Agradecimientos

Dirección de Investigación de la Universidad de los Lagos DI-ULA R10/11 y R 09/14.

Open Access: This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0) which permits any use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author(s) and the source are credited.

7. Referencias

- Akcil A., Ciftci H., Deveci H. 2007. Role and contribution of pure and mixed cultures of mesophiles in bioleaching of a pyritic chalcopyrite concentrate. *Minerals Engineering* 20: 310-318.
- Baker-Austin C., Dopson M. 2007. Life in acid: pH homeostasis in acidophiles. *Trends in Microbiology* 15: 165-171.
- Córdoba E. M., Muñoz J. A., Blázquez M. L., González F., Ballester A. 2008. Leaching of chalcopyrite with ferric ion. Part IV: The role of redox potential in the presence of mesophilic and thermophilic bacteria. *Hydrometallurgy* 93: 106-115.
- Cui J., Zhang L. 2008. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of Hazardous Materials* 158: 228-256.
- Das T., Ayyappan S., Chaudhury G. R. 1999. Factors affecting bioleaching kinetics of sulfide ores using acidophilic micro-organisms. *BioMetals* 12: 1-10.
- Donati E., Sand W. 2007. Processing of Metal Sulfides. Donati and Sand Editors. Springer, Chapter 1: 3-33.
- Gholami R., Borghai S., Mousavi S. 2011. Bacterial leaching of a spent Mo-Co-Ni refinery catalyst using *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans*. *Hydrometallurgy* 106: 26-31.
- González A., Bellenberg S., Mamani S., Ruiz L., Echeverría A., Soulère L., Doutheau A., Demergasso C., Sand W., Queneau Y., Vera M., Guiliani N. 2012. AHL signaling molecules with a large acyl chain enhance biofilm formation on sulfur and metal sulfides by the bioleaching bacterium *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Applied Microbiology and Biotechnology* 97: 3729-3737.
- Guo J., Xu Z. 2009. Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards: A review. *Journal of Hazardous of Materials* 168: 567-590.
- Ha V., Lee J-c., Jeong J., Hai H., Jha M. 2010. Thiosulfate leaching of gold from waste mobile phones. *Journal of Hazardous of Materials* 178: 1115-1119.
- Harue L., Tavares V., Croce D., Tenório J. 2011. Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. *Waste Management* 31: 2553-2558.
- Huang K., Guo J., Xu Z. 2009. Recycling of waste printed circuit boards: A review of current technologies and treatment status in China. *Journal of Hazardous Materials* 164: 399-408.
- Huang K., Li J., Xu Z. 2011. Enhancement of the recycling of waste Ni-Cd and Ni-MH batteries by mechanical treatment. *Waste Management* 31: 1292-1299.
- Kasper A., Berselli G., Freitas B., Tenório J., Bernardes A., Veit H. 2011. Printed wiring boards for mobile phones: Characterization and recycling of copper. *Waste Management* 31: 2536-2545.
- Lee J-c., Pandey B. D. 2012. Bio-processing of solid wastes and secondary resources for metal extraction - A review. *Waste Management* 32: 3-18.
- Liang G., Mo Y., Zhou Q. 2010. Novel strategies of bioleaching metals from printed circuit boards (PCBs) in mixed cultivation of two acidophiles. *Enzyme and Microbial Technology* 47: 322-326.
- Mishra D., Kim D-J., Ralph D., Ahn J-G., Rhee Y-H. 2008. Bioleaching of metals from spent lithium ion secondary batteries using *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Waste Management* 28: 333-338.

- Morin D. Processing of Metal Sulfides 2007. Donati and Sand Editors. Springer, Chapter 7: 133-150.
- Norris P. R. Acidophiles. Encyclopedia of Life Sciences. London, Nature Publishing Group (2001).
- Pant D., Joshi D., Upreti M., Kotnala R. 2012. Chemical and biological extraction of metals present in E-waste: A hybrid technology. *Waste Management* 32: 979-990.
- Rawlings D. E. 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: 1-13.
- Rawlings D. E., Tributsch H., Hansford G. S. 1999. Reasons why 'Leptospirillum'-like species rather than Thiobacillus ferrooxidans are the dominant iron-oxidizing bacteria in many commercial processes for the biooxidation of pyrite and related ores. *Microbiology* 145: 5-13.
- Rodríguez Y., Ballester A., Blázquez M. L., González F., Muñoz J. 2003. A. New information on the pyrite bioleaching mechanism at low and high temperature. *Hydrometallurgy* 71: 37-46.
- Rohwerder T., Gehrke T., Kinzler K., Sand W. 2003. Bioleaching review part A: Progress in bioleaching: fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation. *Applied Microbiological Biotechnology* 63: 239-248.
- Tsydenova O., Bengtsson M. 2011. Chemical hazards associated with treatment of waste electrical and electronic equipment. *Waste Management* 31: 45-58.
- Tuncuk A., Stazi V., Akcil A., Yazici E., Deveci H. 2012. Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering* 25: 28-37.
- Veit H., Diehl T., Salami A., Rodrigues J., Bernardes A., Tenório J. 2006. Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap. *Waste Management* 25: 67-74.
- Wang J., Bai J., Xu J., Liang B. 2009. Bioleaching of metals from printed wire boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* and their mixture. *Journal of Hazardous of Materials* 172: 1100-1105.
- Watling H. R. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides- A review. *Hydrometallurgy* 84 (2006): 81-108.
- Xia L., Liu J., Xiao L., Zeng J., Li B., Geng M., Qiu G. 2008. Single and cooperative bioleaching of sphalerite by two kinds of bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans*. *Transactions Nonferrous Metals. Society of China* 12: 190-195.
- Xiang Y., Wu P., Zhu N., Zhang T., Liu W., Wu J., Li P. 2010. Bioleaching of copper from waste printed circuit boards by bacterial consortium enriched from acid mine drainage. *Journal of Hazardous Materials* 184: 812-818.
- Yang T., Xu Z., Wen J., Yang L. 2009. Factors influencing bioleaching copper from waste printed circuit boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Hydrometallurgy* 97: 29-32.
- Zhu N., Zhang L., Li C., Cai C. 2003. Recycling of spent nickel-cadmium batteries based on bioleaching process. *Waste Management* 23: 703-708.