

VARIABLES INFLUYENTES EN EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DE METALES CONTENIDOS EN LODOS GALVÁNICOS

INFLUENTIAL VARIABLES IN THE LEACHING PROCESS FOR METALS RECOVERY CONTAINED IN GALVANIC SLUDGES

Laura Milena Lombana Torres*
Angie Daniela Saavedra Morales**
Felipe Correa Mahecha***

Recibido: 15 de agosto de 2018

Aceptado: 11 de septiembre de 2018

Resumen

En artículo presenta una revisión bibliográfica referente a las variables de operación involucradas en del proceso de lixiviación, lo cual permitió identificar los efectos que tienen estas variables sobre el porcentaje de recuperación de metales contenidos en residuos galvánicos. El estudio identificó siete variables determinantes: método de lixiviación, agentes lixiviantes (y su concentración), uso de un agente oxidante, granulometría del sólido, concentración del mineral, temperatura y velocidad de agitación. Adicionalmente, tal como lo demuestra la revisión bibliográfica, la mayoría de los resultados obtenidos en las investigaciones conducen a una recuperación superior al 90 % del metal de interés.

Palabras clave: lixiviación, metales pesados, recuperación, residuos peligrosos, variables influyentes.

Abstract

In the present article present a bibliographic review concerning the operation variables involved in the leaching process is developed, which allows to identify the effects that they have on the recovery percentage of metals contained in galvanic residues, consequently, the leaching method, leaching agents and their concentration, use of an oxidizing agent, granulometry of the solid, mineral concentration, temperature and stirring speed were identified as influential variables, additionally, it was found that for most of the authors like Jha, Kim, Ranitovic, Yang, among others , the results obtained lead, generally, to a recovery of more than 90% of the metal of interest.

Keywords: leaching, heavy metals, recovery, dangerous wastes, influential variables.

* Ingeniera química. Grupo de investigación Procesos de Separación no Convencionales (GPS), Fundación Universidad de América, Bogotá D. C., Colombia. laura.lombana@estudiantes.uamerica.edu.co

** Ingeniera química. Grupo de Investigación Procesos de Separación no Convencionales (GPS), Fundación Universidad de América, Bogotá D. C., Colombia. angie.saavedra@estudiantes.uamerica.edu.co

***Ingeniero Químico. Docente Investigador, Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá D. C., Colombia. felipe.correa@profesores.uamerica.edu.co

INTRODUCCIÓN

Los procesos realizados en la industria galvánica consisten en la deposición de metales sobre otra superficie mediante la aplicación de corriente eléctrica, de esta manera se confieren propiedades específicas de acabado a la pieza recubierta (Muhye, 2018). Para llevar a cabo estos procesos se hace uso principalmente de metales pesados, los que generan una gran cantidad de residuos sólidos, los cuales están constituidos principalmente por lodos. La contaminación causada por la presencia de estos metales es en la actualidad uno de los problemas ambientales más importantes (Litter, Domenech y Mansilla, 2004). Los metales pesados más usados en esta industria son plata, cobre, zinc, cromo, estaño, entre otros, que forman parte de las listas de contaminantes primarios, según los establecen la Agencia de Protección Ambiental (Environment Protection Agency, 2014) y la Organización Mundial de la Salud (OMS, Pereira y Nefussi, 1986).

La industria galvánica genera residuos sólidos constituidos por lodos, resultantes principalmente de los baños de proceso y enjuague. La composición de estos lodos es variada y depende de los procesos llevados a cabo en cada empresa (Acosta, Cristancho, Ospina y Morales, 2008). Según cifras de la Secretaría Distrital de Ambiente, entre 2008 y 2010, en el Distrito Capital se reportaron en promedio 819 Ton/año de lodos galvánicos generados por este sector industrial (Secretaría Distrital de Ambiente, 2010). Estudios recientes se han ocupado de la repercusión de los metales pesados en el ecosistema y la salud del ser humano. Hoy día se conoce mucho más sobre los efectos de estos elementos, cuya exposición está relacionada con problemas como retrasos en el desarrollo, varios tipos de cáncer, daños en el riñón e, incluso, la muerte (“Metales pesados”, 2001).

Por lo general, el proceso de recubrimiento metálico es muy poco efectivo, ya que solo una pequeña cantidad de las sustancias utilizadas se depositan en la pieza y hasta un 90 % de estas terminan en los residuos generados por el proceso (Acosta et ál., 2008), lo que representa una pérdida significativa de materias primas. La disposición final de estos residuos se realiza en celdas de seguridad, debido a que muchos de los tratamientos realizados involucran la destrucción del contaminante o metal de interés, lo cual no representa un ingreso potencial para la empresa.

Sin embargo, los metales dispuestos en las celdas de seguridad tienen un gran potencial de recuperación, por lo que se busca realizar un proceso que permita recuperar los metales contenidos en el residuo. El proceso de lixiviación, que es considerado un tratamiento no convencional, consiste en poner el residuo en contacto íntimo con un disolvente líquido, que puede ser de carácter ácido o básico (Treybal, 1988). En este proceso, el metal se disuelve desde el sólido a la fase líquida, lo que produce una separación de los componentes originales del sólido, y el metal contenido en el lodo se recupera en forma de sales de metal (Geankoplis, 1998).

Este artículo presenta una revisión bibliográfica sobre las variables de operación involucradas en el proceso de lixiviación más estudiadas para la recuperación de metales (teniendo en cuenta las que hacen más eficiente la recuperación). Según la revisión, las variables más analizadas son: tamaño de partícula del componente sólido, tiempo de lixiviación, concentración del producto de interés en el mineral, concentración del agente lixivante, velocidad de agitación y temperatura de lixiviación. A continuación se realiza una breve descripción de cada una de ellas, junto con el análisis correspondiente.

RESULTADOS

Métodos de lixiviación

En la industria existen diferentes métodos para la extracción de metales contenidos en minerales por medio de disoluciones lixiviantes acuosas selectivas; disoluciones que permiten la purificación

o concentración de estos metales (Treybal, 1988). Entre estos métodos se encuentran: en *in situ* (o botaderos), en pilas, por percolación, por agitación, microbiana o biolixiviación. Aunque cada método tiene ventajas y desventajas, la agitación y la biolixiviación ofrecen un porcentaje de recuperación superior a los otros métodos, lo que disminuye los tiempos de operación. Respecto al agente lixivante, es importante tener en cuenta su afinidad con el metal a recuperar y su solubilidad, para así determinar la proporción en que se debe poner en contacto (Cáceres y Joly, 2007). A continuación, se hace una breve descripción de los métodos de lixiviación por agitación y biolixiviación.

LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN

En este método de lixiviación se agita un mineral finamente molido, lo que aumenta el área de contacto entre la superficie y la solución lixivante. Este método se utiliza con minerales de alto valor comercial, por ejemplo, en la extracción de cobre, oro, plata, entre otros. El objetivo de este proceso es obtener recuperaciones más altas en tiempos más cortos (Domínica, 2001). La agitación se puede llevar a cabo mediante:

- *Agitación mecánica.* Agitación mediante rotores (hélices o paletas planas) en el fondo del tanque, lo que permite una rotación continua (Ramírez y Martínez, 2014).
- *Agitación neumática.* Se realiza en tanques cilíndricos verticales con un fondo cónico, por el cual se inyecta aire comprimido (Boni, 2018).

Ambos mecanismos mantienen el mineral en suspensión hasta lograr una disolución completa. El sistema de lixiviación por agitación favorece las cinéticas de reacción, ya que aquí actúan factores como temperatura y agitación y permite el uso de reactivos oxidantes altamente agresivos (Dominic, 2001).

Tabla 1. Ventajas y desventajas del proceso de lixiviación por agitación

Ventajas	Desventajas
Altas recuperaciones del elemento de interés	Altos costos de inversión y operación
Cinética de extracción más rápida	Algunos materiales pueden necesitar tratamientos previos de reducción de tamaño
Proceso continuo con posibilidades de automatización	

Fuente: basada en Dominic (2001).

Lixiviación microbiana o biolixiviación

La lixiviación microbiana o biolixiviación usa microorganismos para extraer metales como uranio, cobre, zinc, níquel, cobalto, entre otros (Domic, 2001). Consiste en un proceso natural de disolución que resulta de la acción de un grupo de bacterias (principalmente, *Thiobacillus ferrooxidans*) que oxidan minerales sulfurados, lo que permite la liberación de los valores metálicos contenidos en ellos. Este proceso se lleva a cabo por contacto directo o indirecto. El producto final de la biolixiviación es una solución ácida que contiene el metal en forma soluble (Domic, 2001).

Las comunidades microbianas tienen diferentes aspectos microbiológicos que pueden aumentar o disminuir su eficacia; al respecto, se debe tener en cuenta: a) capacidad para oxidar el tipo de contaminante a tratar; b) pH y temperatura en la que crecen, y c) posibilidad de estar en contacto o no con el oxígeno.

Tabla 2. Ventajas y desventajas del proceso biolixiviación

Ventajas	Desventajas
Posibilidad de obtener recuperaciones superiores al 95 %	Tiempos de operación más prolongados en comparación con la lixiviación por agitación
Procesos con bajo impacto ambiental	

Fuente: basada en Dominic (2001).

Agente lixiviante

Los agentes lixiviantes son sustancias químicas que pueden disolver selectivamente uno o más elementos presentes en un sólido o líquido. La selección de estos agentes depende de varios factores, como su disponibilidad, costo, estabilidad química, características corrosivas o selectividad; el último factor es el más importante, pues de este depende que el agente sea efectivo en la disolución de los metales a tratar (Vásquez, 1985).

Los agentes lixiviantes se pueden clasificar entre ácidos y básicos y se seleccionan dependiendo del contaminante a tratar.

Ácidos

Los agentes lixiviantes ácidos se aplican principalmente a los óxidos metálicos presentes en la naturaleza, como óxido de zinc, óxido de cobre, óxido de estaño, entre otros. Los lixiviantes ácidos más utilizados son:

- *Ácido sulfúrico* (H₂SO₄). Es el agente lixiviante más utilizado en los procesos de lixiviación por su bajo costo, disponibilidad, fácil manipulación y características químicas (Simpson, 2003). Es utilizado principalmente para la recuperación de cobre, níquel, cromo, zinc, entre otros.
- *Ácido clorhídrico* (HCl). Es el segundo agente lixiviante más utilizado. Se caracteriza por su alta solubilidad, bajo costo, disponibilidad, entre otras ventajas. También se identifica por ser un ácido muy fuerte que se disocia completamente en una disolución acuosa. Es utilizado comúnmente para la recuperación de níquel, cadmio y zinc (Instituto de Hidrología Metrología y Estudios Ambientales, s. f.).
- *Ácido nítrico* (HNO₃). Es utilizado comúnmente como reactivo en los procesos de metalurgia, ya que reacciona con la mayoría de los metales como agente oxidante. Es utilizado usualmente para la obtención de oro y plata (EcuRed, s.f.).

Otros agentes ácidos utilizados son: ácido acético, ácido perclórico, ácido cítrico, ácido férrico, ácido carbónico, cloruro férrico, entre otros.

Básicos

Los agentes lixiviantes básicos son comúnmente utilizados en los procesos de lixiviación extractiva de cobre, oro y plata. Entre los más utilizados se encuentran:

- *Amoniaco* (NH_3). Este agente es altamente soluble en agua. Se destaca en la lixiviación de metales por la formación de compuestos y capacidad para ceder electrones de hidrógeno (Instituto Tecnológico Geominero de España, 1991).
- *Cianuro* (CN^-). Se considera como un lixivante básico para la disolución de minerales de cobre. Es conocido en la industria como un agente extractivo de oro y plata (proceso conocido como cianuración de oro y plata); no obstante, es altamente tóxico y dañino para la salud humana (ITGE, 1991).

La figura 1 muestra la recuperación de estaño a partir de residuos electrónicos, en la que se usó tres agentes lixiviantes ácidos: clorhídrico (HCl), sulfúrico (H_2SO_4) y nítrico (HNO_3) (Jha et ál., 2012). Aquí se evidencia la importancia de la selectividad del agente lixivante para solubilizar el metal de interés, pues el único que logró remover el contaminante fue el ácido clorhídrico (Jha et ál., 2012).

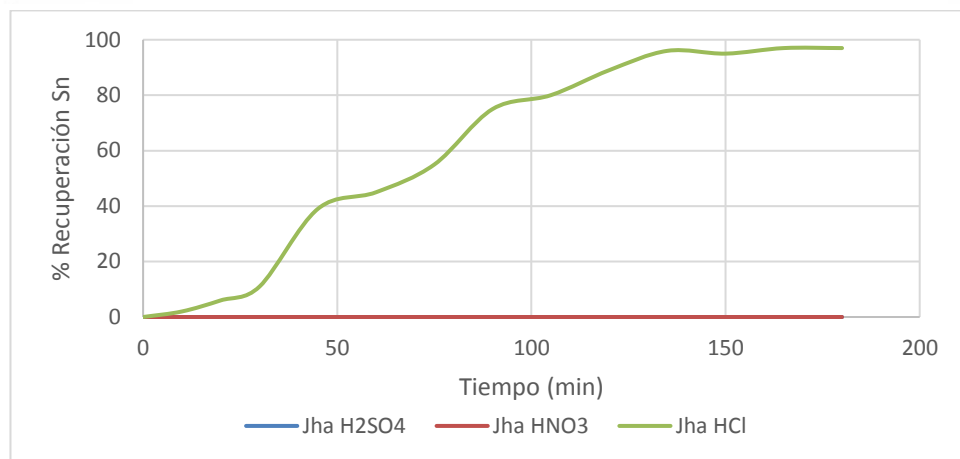


Figura 1. Comparación de la recuperación obtenida mediante tres agentes lixiviantes en función del tiempo.

Fuente: Jha et ál. (2012).

Concentración del agente lixivante

La concentración del agente lixivante es una de las variables más analizadas en la lixiviación de metales. Kim, Lee y Yoo (2016) y Yang Zhu, Liu, Chen y Zhang (2017) evaluaron diferentes concentraciones de agente lixivante para la recuperación de estaño a partir de residuos electrónicos.

En la figura 2 se pueden observar las concentraciones obtenidas para cuatro diferentes concentraciones, tal como se evidencia en Kim et ál. (2016); según esta investigación, una mayor concentración del agente lixivante aumenta la concentración y el porcentaje de recuperación.

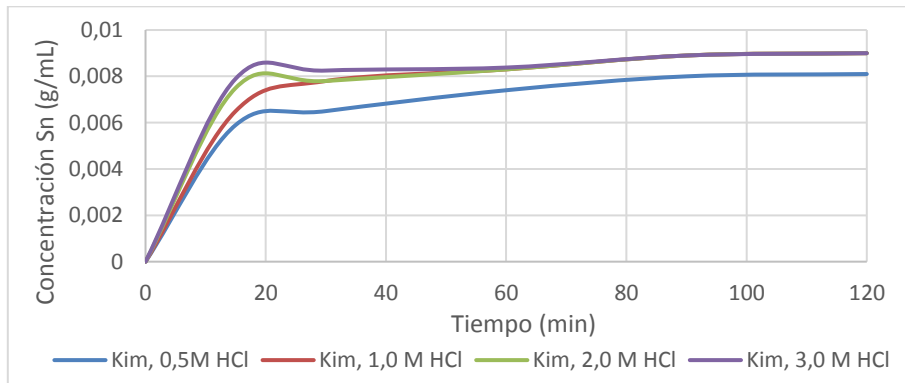


Figura 2. Efecto de la concentración de HCl como agente lixiviante sobre la concentración del metal de interés (Sn) obtenida en el lixiviado.

Fuente: Kim et ál. (2016).

En la figura 3 se muestran los porcentajes de recuperación obtenidos por Yang et ál. (2017) usando tres diferentes concentraciones. Se observa que después de determinado tiempo no hay variación entre las concentraciones del lixiviado obtenidas a 1, 2 y 3 M, es decir, el sistema es estable en tiempos superiores a los 40 min para cualquiera de las tres concentraciones.

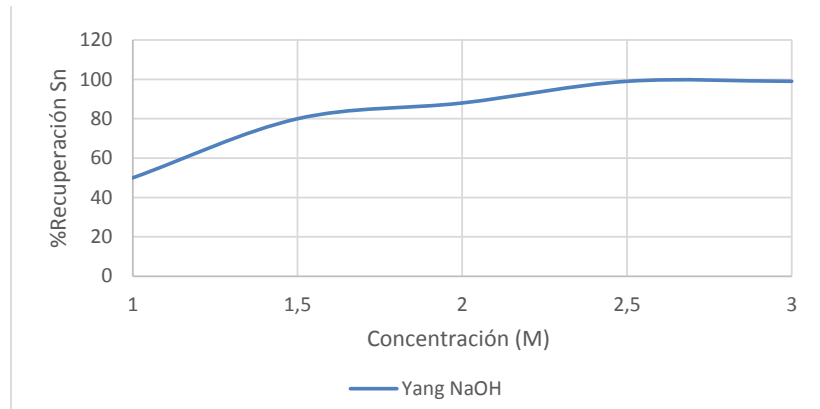


Figura 3. Efecto de la concentración del agente lixiviante sobre el porcentaje de recuperación del metal de interés.

Fuente: Yang et ál. (2017).

Agente oxidante

Los agentes oxidantes son sustancias químicas que pueden oxidar iones metálicos y disolver selectivamente uno o más elementos presentes en un sólido o líquido, de manera que la adición de un agente oxidante aumenta el grado de extracción (Orduño, 1999). La selección de estos agentes depende de varios factores, como su disponibilidad, costo, estabilidad química, selectividad y, el más importante, efectividad para la disolución de los metales a tratar (Vásquez, 1985; Perez, 1970). Los agentes oxidantes más empleados son peróxido de sodio (Na_2O_2), clorato de potasio (KClO_3), peróxido de hidrógeno (H_2O_2), dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) y permanganato de potasio (KMnO_4).

Algunos autores han demostrado que, por lo general, la adición del agente oxidante favorece la recuperación del metal. En la figura 4 se muestra la recuperación de estaño obtenida por Ranitović, Kamberović, Korać, Jovanović y Mihjalović (2016), en la que se utilizó como agente oxidante orgánico el ácido metanitrobenzoico (MNB). En la figura se observa que al aumentar la concentración del oxidante de 1 a 2 % la recuperación aumenta de manera significativa; sin embargo, al cabo de cierto tiempo, la recuperación es ligeramente mayor al 2 % en comparación con la concentración de 3 %, por lo tanto, sería conveniente realizar una evaluación para tiempos más prolongados. Al respecto, la investigación realizada por Du, Vijayakumar y Desai (2004) evaluó la concentración del agente oxidante; se observó que para concentraciones superiores al 3 % la recuperación disminuye; por su parte, Ranitović et ál. (2016) indican que en algunos casos la adición de estos puede favorecer la formación de algunos compuestos indeseados.

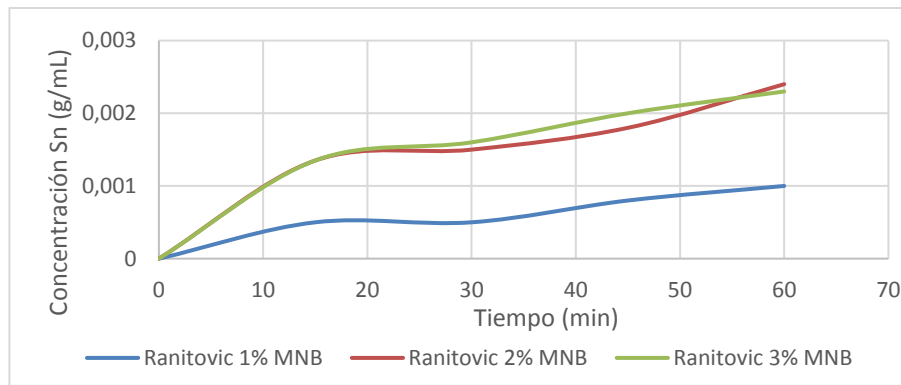


Figura 4. Efecto de la concentración del agente oxidante sobre la concentración del metal de interés obtenida en el lixiviado.

Fuente: Ranitović et ál. (2016).

Granulometría del sólido

Una partícula de mayor tamaño requiere de una menor cantidad de solución lixivante de conformidad con el área que entra en contacto; mientras mayor sea la granulometría del sólido, más lenta será la penetración de la solución sobre el mineral para disolver el metal. En el caso opuesto, cuando el tamaño de la partícula es menor, se requiere de una mayor cantidad de solución lixivante, puesto que la superficie es mayor, y al tener una menor granulometría, mayor será el contacto de la solución lixivante con el sólido, lo que mejora la cinética de la lixiviación y, por ende, la recuperación del metal (Rodríguez, 2003). Es por esta razón que en los procesos realizados a partir de un residuo en estado sólido se realiza una disminución del tamaño de partícula, por lo que se obtiene una muestra con mayor grado de uniformidad y se mejora la extracción del metal deseado; sin embargo, los lodos galvánicos se encuentran generalmente en estado semisólido, así que no se hace indispensable analizar la granulometría del sólido, a menos que se realice inicialmente un proceso de secado.

Concentración del mineral

La concentración del mineral se puede evaluar de dos maneras, ya sea mediante el porcentaje de sólidos, o mediante la densidad de la pulpa; para ambos casos, el valor debe ser lo más alto posible para alcanzar una alta concentración del ion metálico en la solución de lixiviación, lo que ayuda a minimizar los costos de inversión (Cáceres y Joly, 2007).

En la figura 5 se puede observar que a mayor densidad de pulpa se obtienen mayores concentraciones de estaño, así como lo establece la investigación de Kim et ál. (2016), la cual evaluó diferentes concentraciones del mineral para la recuperación de estaño y obtuvo concentraciones superiores a 0.01 g/mL.

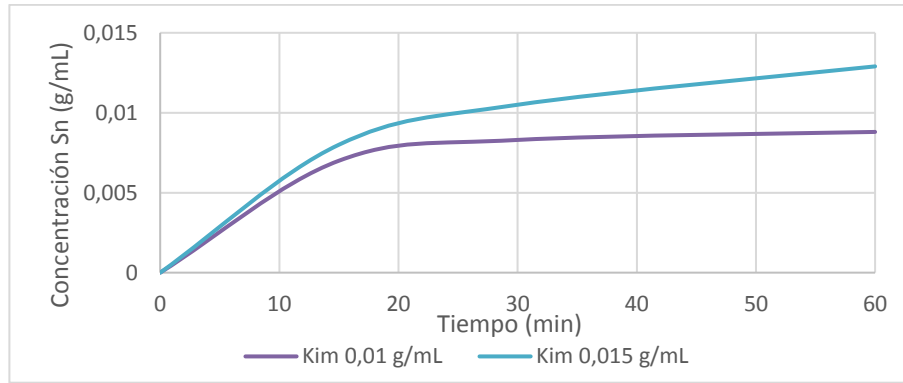


Figura 5. Efecto de la concentración del mineral sobre la concentración del metal de interés obtenida en el lixiviado.

Fuente: Kim et ál. (2016).

Sin embargo, Jha et ál. (2012) y de la Torre, Guevara y Espinoza (2013), en estudios para la recuperación de estaño y zinc, respectivamente, demostraron que entre menor sea el porcentaje del sólido o la densidad de pulpa, mayor será el porcentaje de extracción del metal a recuperar. Estas investigaciones obtuvieron recuperaciones superiores al 86 %. La figura 6 evidencia los resultados obtenidos por Jha et ál. (2012) para la variación de densidad de pulpa:

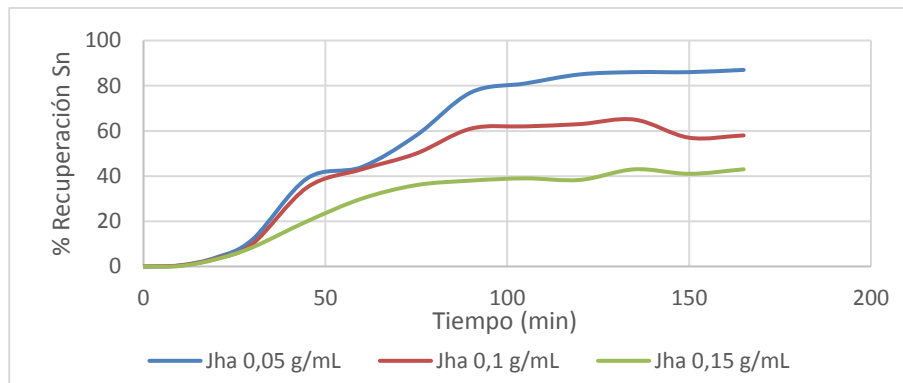


Figura 6. Efecto de la concentración del mineral sobre el porcentaje de recuperación del metal de interés.

Fuente: Jha et ál. (2012).

Temperatura

La temperatura es una variable crítica durante el proceso de lixiviación, debido a que si aumenta la temperatura, aumenta velocidad de lixiviación, lo que a su vez implica mayores porcentajes de

recuperación en menor tiempo; esto debido a que la temperatura se encuentra directamente relacionada con la cinética del proceso mediante la ecuación de Arrhenius; adicionalmente, debido al aumento de temperatura, la viscosidad del lodo disminuye y esto permite un mayor contacto del agente lixivante con el mineral (Rodríguez , 2003). Según autores como Kim et ál. (2016) y Yang et ál. (2017), entre más altas sean las temperaturas a las que se lleve el proceso, mayor es la recuperación del metal. La figura 7 evidencia que mayores concentraciones y porcentajes de recuperación son resultado de temperaturas por encima de 70 °C.

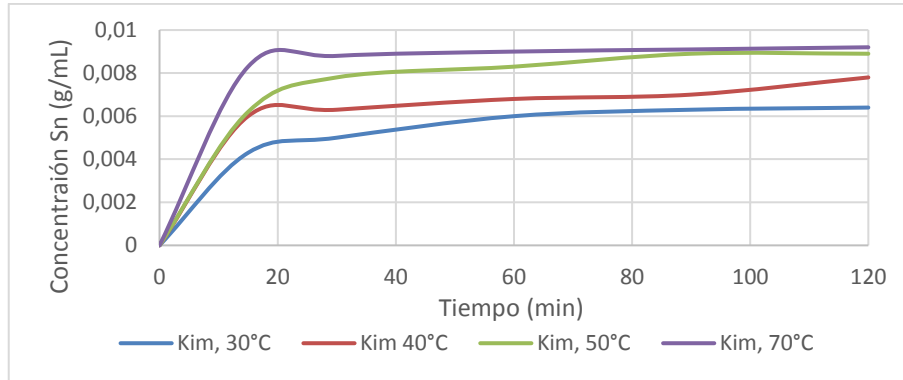


Figura 7. Efecto de la temperatura sobre la concentración del metal de interés obtenida en el lixiviado.

Fuente: Kim et ál. (2016).

Sin embargo, en la figura 8 se observa que luego de 150 °C la recuperación de estaño disminuye; esto puede deberse a que esta temperatura favorece la recuperación de otros metales no deseados contenidos en el residuo.

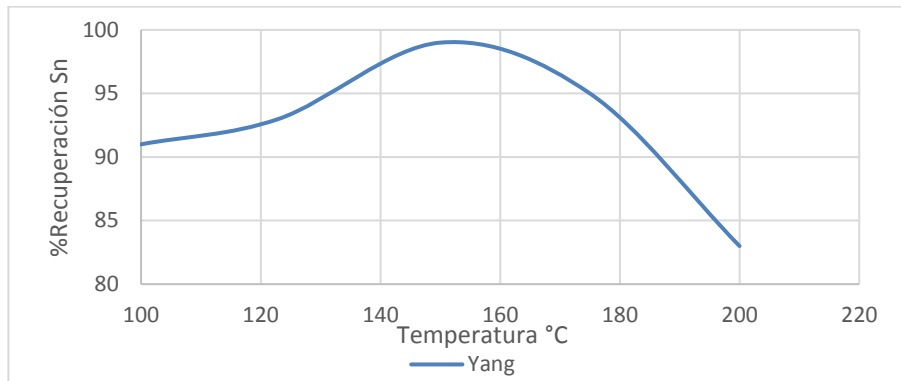


Figura 8. Efecto de temperaturas altas en el proceso de lixiviación sobre el porcentaje de recuperación del metal de interés.

Fuente: Yang et ál. (2017).

Velocidad de agitación

La velocidad de agitación debe ser lo suficientemente alta para mantener los sólidos en suspensión sin que se decanten, lo que favorece la cinética de extracción; sin embargo, el consumo energético es mayor

y, por tanto, los costos de operación aumentan (Cáceres y Joly, 2007). Algunos autores mantienen fijas las velocidades de agitación dentro de un rango de 300-750 rpm para todos los ensayos realizados. Por su parte, Kim et ál. (2016) y Yang et ál. (2017) evaluaron el efecto de la velocidad de agitación en el proceso de lixiviación de estaño. Los resultados de estos dos estudios para tiempos superiores a los 80 min se muestran en la figura 9. La figura evidencia que la variación en la concentración de estaño obtenida en el lixiviado no es significativa a velocidades superiores de 600 y 1100 rpm.

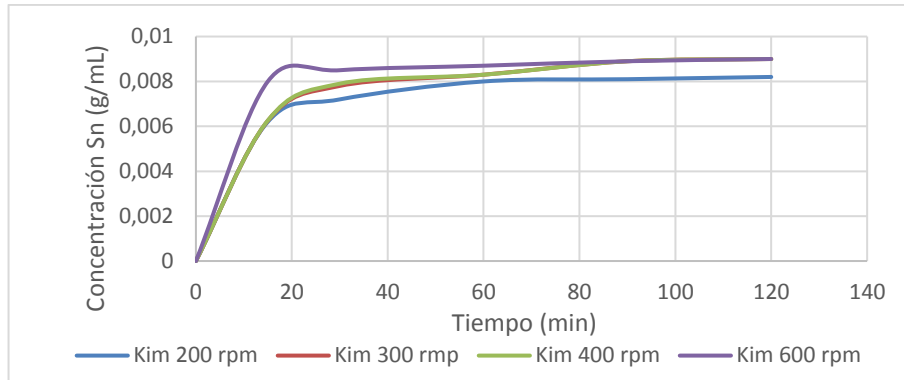


Figura 9. Efecto de la velocidad de agitación sobre la concentración del metal de interés obtenida en el lixiviado.

Fuente: Kim et ál. (2016).

Sin embargo, en la figura 10 se puede observar que luego de 1100 rpm la recuperación de estaño es constante; por lo tanto, las velocidades de agitación muy altas tienen una variación insignificante en el proceso de lixiviación.

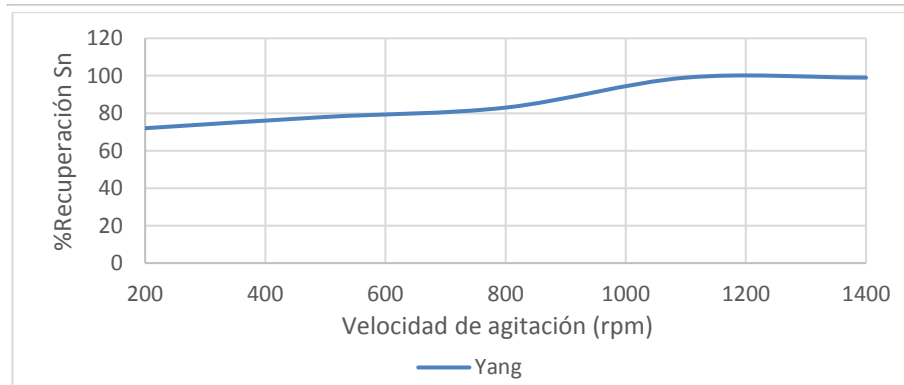


Figura 10. Efecto de la velocidad de agitación sobre el porcentaje de recuperación del metal de interés.

Fuente: Yang et ál. (2017).

CONCLUSIONES

Según la revisión bibliográfica, el método de lixiviación, el tipo de agente lixivante y su concentración, el uso de agentes oxidantes, la granulometría del sólido, la concentración del mineral, la temperatura y la

velocidad de agitación son variables determinantes del proceso de lixiviación. Los autores consultados obtuvieron altas recuperaciones en tiempos que no superaron las 24 horas a partir del método de agitación; adicionalmente, como se observa en la figura 1, la selección de un agente lixiviante es uno de los factores que más afectan el proceso, puesto que no todas las soluciones tienen la capacidad de solubilizar el compuesto de interés. Algunos autores han demostrado que, por lo general, la adición del agente oxidante favorece la recuperación del metal; sin embargo, es necesario estudiar el efecto de la concentración del mismo, puesto que su adición también puede favorecer la solubilidad de compuestos indeseados.

Los lodos galvánicos se encuentran generalmente en estado semisólido, por lo que no es indispensable realizar un análisis granulométrico, a menos que se realice un proceso de secado previo a la lixiviación. Sin embargo, la concentración del mineral puede influir significativamente, así como lo demostraron Kim et ál. (2016) y Jha et ál. (2012), puesto que al aumentar la concentración del mineral en el proceso, aumenta la concentración del mismo en el lixiviado, aunque disminuirá su grado de recuperación, es decir, será más difícil retirar el contaminante del residuo, si bien se obtendrá una solución más pura.

Al aumentar la temperatura de operación se puede observar un efecto favorable en el proceso de lixiviación; no obstante, temperaturas elevadas (superiores a los 150 °C) pueden favorecer la solubilización de otros metales no deseados, así como lo demostró el estudio de Yanget ál. (2017). Por otra parte, mantener una adecuada velocidad de agitación permite mantener los sólidos en suspensión, lo que es determinante para la transferencia de masa; no obstante, la investigación realizada por de Kim et ál. (2016) determinó que a partir de velocidades superiores a 110 rpm la variación en la recuperación del metal es mínima.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su gratitud al grupo de investigación en Procesos Separaciones no Convencionales (GPS), por el apoyo a la investigación.

REFERENCIAS

- Acosta, G., Cristancho, D., Ospina, E., y Morales, N. (2008). Identificación del manejo de metales en vertimientos de la industria galvánica. *Revista Gestión Integral en Ingeniería Neogranadina*, 1(1), 1-11.
- Boni, M. (2018). Método de lixiviación [presentación PowerPoint]. Recuperado de http://www.academia.edu/9586024/METODO_DE_LIXIVIACION
- Caceres, G., y Joly, P. (2007). *Hidrometalurgia y electrometalurgia*. Chile: Universidad de Atacama, Chile.
- De la Torre, E., Guevara, A., y Espinoza, C. (2013). Valoración de polos de aceria, mediante recuperación de zinc por lixiviación y electrólisis. *Revista Politécnica*, 32(1), 51-56.
- Domic, E. (2001). *Hidrometalurgia: fundamentos, procesos y aplicaciones*. Chile: Andros Impresos.
- Du, T., Vijayakumar, A., y Desai, V. (2004). Effect of hydrogen peroxide on oxidation of copper in CMP slurries containing glycine and Cu ions. *Electrochimica Acta*, 49(25), 4505-4512. doi: 10.1016/j.electacta.2004.05.008
- EcuRed. (s.f.). Ácido nítrico. Recuperado de https://www.ecured.cu/%C3%81cido_n%C3%adtrico
- Environment Protection Agency. (2014). Toxic and priority pollutants under the clean water act. Recuperado de https://19january2017snapshot.epa.gov/eg/toxic-and-priority-pollutants-under-clean-water-act_.html

- Geankoplis, C. (1998). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*. México: Compañía Editorial Continental.
- Instituto de Hidrología Metrología y Estudios Ambientales. (s.f.). Ácido clorhídrico. Recuperado de: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/018903/Links/Guia2.pdf>
- Instituto Tecnológico Geominero de España. (1991). *Minería química*. España: ITGE.
- Jha, M., Choubey, P., Jha, A., Lee, J., Kumar, V., y Jeong, J. (2012). Leaching studies for tin recovery from waste e-scrap. *Waste Management*, 32(10), 1919-1925. doi: 10.1016/j.wasman.2012.05.006
- Kim, S., Lee, J., y Yoo, K. (2016). Leaching of tin from waste Pb-free solder in hydrochloric acid solution with stannic chloride. *Hydrometallurgy*, 165, 143-147. doi: 10.1016/j.hydromet.2015.09.018
- Litter, M., Domenech, X., y Mansilla, H. (2004). Remoción de contaminantes metálicos. En M. Blesa (Ed.), *Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea* (pp. 189-202). Argentina: CYTEC
- Metales pesados: toda una amenaza. (2001, 1 de marzo). *Eroski Consumer*. Recuperado de <http://revista.consumer.es/web/es/20010301/medioambiente/27009.php>
- Muhye, A. (2018). Galvanoplastia: en qué consiste, procesos, aplicaciones y ejemplos. Lifereder. *Lifereder*. Recuperado de <https://www.lifereder.com/galvanoplastia/>
- OMS, Pereira, M., y Nefussi, N. (1986). *Aspectos toxicológicos de agentes químicos de interés para el programa internacional de seguridad de las sustancias químicas*. México: Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud
- Orduño, O. (1999). *Absorción del complejo tiourea-plata en la resina de intercambio iónico diphonix*. Hermosillo, México: Universidad de Sonora, Departamento de Ingeniería Química y Metalurgia.
- Pérez, E. (1970). Estudio de la lixiviación ácida a escala laboratorio del mineral cupro-uranífero luz del cobre. Recuperado de <http://www.bidi.uson.mx/tesisindice.aspx?Tesis=3191>
- Ramírez, P., y Martínez, A. (2014). *Lixiviación de minerales por agitación y percolación* (tesis de pregrado). Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Ranitović, M., Kamberović, Ž., Korać, M., Jovanović, N., y Mihjalović, A. (2016). Hydrometallurgical recovery of tin and lead from waste printed circuit boards (WPCBS): limitations and opportunities. *Metalurgija*, 55(2), 153-156.
- Rodríguez, J. (2003). *Curso de capacitación. Fundamentos generales de la lixiviación y variables que influyen en la operación*. Chile: Facultad de Ingenierías, Universidad de Antofagasta. Chile.
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2010). Diagnóstico de la situación actual de los residuos peligrosos generados en el Distrito Capital. Recuperado de http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?Uuid=375a3fee-6f7f-4fa5-842f-10bf15dfe6c5&groupid=10157
- Simpson, J., y Schulz, B. (2003). *Introducción a la metalurgia*. Chile: Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Santiago de Chile.
- Treybal, R. (1988). *Operaciones básicas de transferencia de masa*. México: McGraw Hill.
- Vásquez, B. (1985). II Procesos de Lixiviación en Hidrometalurgia. Recuperado de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/6716/Capitulo2.pdf>
- Wang, Z., Guo, S., y Ye, C. (2016). Leaching of copper from metal powders mechanically separated from waste printed circuit boards in chloride media using hydrogen peroxide as oxidant. *Procedia Environmental Sciences*, 31, 917-924. doi: 10.1016/j.proenv.2016.02.110
- Yang, T., Zhu, P., Liu, W., Chen, L., y Zhang, D. (2017). Recovery of tin from metal powders of waste printed circuit boards. *Waste Management*, 68, 449-457. doi: 10.1016/j.wasman.2017.06.019