

Recuperación hidrometalúrgica de cobre a partir placas de circuitos impresos (PCI) desechadas

Hydrometallurgical recovery of copper from discarded printed circuit boards (PCBs)

**Juanita del Carmen Sánchez-González^a, Zeferino Gamiño-Arroyo*^a,
Fernando Israel Gómez-Castro^a, Beatriz Eugenia Rubio-Campos^b, Lorena
Eugenia Sánchez-Cadena^c, Agustín Ramón Uribe-Ramírez^a**

* Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n, Guanajuato, Gto., 36050, México. Tel. 4737320006 ext. 1427, 8139. Correo electrónico: gaminoz@ugto.mx

^aDepartamento de Ingeniería Química, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n, 36050 Guanajuato, Gto., México

^bEscuela de Nivel Medio Superior de Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Alameda s/n, 36000 Guanajuato, Gto., México

^cDepartamento de Ingeniería Civil, Universidad de Guanajuato, Juárez 77, 36000 Guanajuato, Gto., México

*Autor a quien debe dirigirse la correspondencia

Recibido: Junio 10, 2021

Aceptado: Junio 30, 2021

Resumen

Se presenta un estudio sobre la recuperación de cobre a partir de placas de circuitos impresos desechadas. Inicia con la recolección de las placas, continuando con la reducción de tamaño del material y su clasificación. Después se realiza la etapa de lixiviación en condiciones ácidas a temperatura de 60 a 80°C, lo que permite obtener el metal en solución, en concentraciones de cobre de 9.7 a 12.2 g/L. Para separar el cobre de la solución, se utiliza la extracción líquido-líquido con el agente extractante (AcorgaM5774®) diluido en queroseno, que es altamente selectivo para cobre. La etapa siguiente es la reextracción (*stripping*), que consiste en poner en contacto la fase orgánica cargada con el metal y una solución de ácido sulfúrico, con la finalidad de regenerar el agente extractante por intercambio iónico y obtener en solución acuosa el metal, para enviarlo a la etapa de electrodeposición, en la que se obtiene el cobre metálico con excelentes valores de eficiencia.

Palabras clave: Cobre, reciclado, tratamiento hidrometalúrgico, placas circuitos impresos (PCI)

Abstract

A study on the recovery of copper from discarded printed circuit boards is presented. The procedure starts with the collection of the plates, continuing with the reduction of the size of the material and its classification, which allows obtaining different granulometries. In the second step leaching is carried out with sulfuric acid and hydrogen peroxide at a controlled temperature, 60 to 80°C, registering concentrations of copper in solution of 9.7 and 12.2 g/L, respectively. In the third stage to separate copper from the solution, liquid-liquid extraction with a specific extracting agent for copper is used. Finally, in the fourth stage, electrodeposition is performed to obtain metallic copper with excellent extraction efficiency values.

Keywords: Copper, recycling, hydrometallurgical treatment, printed circuitsboards (PCBs)

Introducción

El desarrollo de los aparatos eléctricos y electrónicos ha aumentado rápidamente y en las últimas décadas ha contribuido a su vez al incremento de los denominados Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) o WEEE por sus siglas en inglés (*Waste Electrical and Electronic Equipment*). Se

estima que en el 2016 se generaron: 44.7 millones de toneladas de RAEE a nivel mundial, con un incremento de 3-5% anual. En América, México es el tercer país generador de basura electrónica con aproximadamente 1.0 millón de toneladas por año, sólo después de Estados Unidos y Brasil que generan 6.3 y 1.5 millones de toneladas, respectivamente (Baldé et al., 2017). Se ha encontrado que estos residuos pueden contener alrededor del 20% en masa de cobre (Harue-Yamane et al., 2011), que es mucho más que la cantidad de cobre presente en sus minerales para explotación minera (Concha-M., 2017), hay reportes que indican que puede llegar hasta el 30% en masa de cobre (Cui y Anderson, 2016), por lo que los RAEE pueden considerarse como una fuente secundaria para este metal, fomentándose la preservación de los recursos naturales, además de que puede ser económicamente rentable.

En México, estos residuos no se consideran peligrosos y solamente se debe presentar un plan de manejo (Diario Oficial de la Federación, 2013). El no disponer de una adecuada disposición o manejo de estos residuos puede generar un problema ambiental importante y un desafío en cuanto al desarrollo de tecnologías de proceso sostenibles y que sean capaces de hacer frente al volumen y complejidad de estos RAEE, con métodos de bajo costo y de menor impacto ambiental (Perkins et al., 2014).

La mayoría de los procesos inician con el desmantelamiento, retirando compuestos plásticos y materiales tóxicos y para la disminución de tamaño se utilizan molinos y pulverizadores. Se han propuesto procesos de alta temperatura, pero estos tienen el inconveniente de la emisión de contaminantes y la formación de escorias con contenido múltiple de metales donde es complicada la recuperación final (Chaverra y Restrepo, 2013). En los últimos años la atención se ha centrado en procesos hidrometalúrgicos, los cuales son una opción con posibilidad de aplicación industrial debido a los relativos bajos costos de capital, menor impacto ambiental y altas recuperaciones de metales (Tuncuk et al., 2012). Estos procesos consisten en una primera etapa en la que los metales son lixiviados en medio ácido o alcalino y luego un segundo paso que consiste en la purificación de la solución para separar los elementos de interés. Entre los métodos de purificación se ha reportado la precipitación (Saidan et al., 2012), las sales fundidas (Flandinet et al., 2012), la absorción por membranas (Valdés et al., 2013), los líquidos iónicos (Zhu et al., 2012), la electrodeposición (Guimarães et al., 2014), la extracción líquido-líquido entre otros.

En esta investigación se propone utilizar la extracción líquido-líquido para separar al cobre de la solución lixiviada. La extracción líquido-líquido es un proceso en que se separan uno o más solutos de un líquido transfiriéndolo(s) a otra fase líquida y que son parcial o completamente inmiscibles (Treybal, 2003) y ha mostrado excelentes resultados para recuperar el cobre de licores de lixiviación (Hernández-Pacheco y Noyola, 2007). Para la obtención final del metal se utiliza una electrodeposición a las condiciones adecuadas (Alguacil, 1998).

Metodología

Recolección, preparación y molienda de muestras

El material se obtuvo de la recolección de placas de circuito impresas provenientes de centros de recolección de residuos. Se desmantelaron retirando los componentes plásticos y electrónicos como: Capacitores, resistencias, diodos, entre otros. Después se cortaron transversalmente y se trituraron en un molino de martillos.

Lixiviación

Se determinaron las condiciones a las que se obtenía un mayor porcentaje de disolución del cobre utilizando una mezcla de ácido sulfúrico (Karal) y dosificando peróxido de hidrógeno (Karal), con una relación de sólido/líquido (1/10), a temperatura entre 60 y 80°C, con agitación magnética (Birloaga et al., 2013). La concentración se midió por espectrofotometría de absorción atómica (EAA) con un equipo *AAAnalyst 200*, Perkin Elmer.

Separación

Se hizo mediante extracción líquido-líquido. Para la extracción la fase acuosa es la solución filtrada de la lixiviación ajustada a pH de 2 a 3 con hidróxido de sodio (Karal) y la fase orgánica se prepararon con un agente extractante, AcorgaM5774 (Cytec Solvay), diluido en queroseno (Reasol). El tiempo de contacto entre las fases fue de 10 a 30 minutos por medio de agitación magnética de 500 a 600 rpm, a temperatura ambiente y después las fases se separaron. La fase acuosa se analizó por EAA y la fase orgánica se determinó por balance de masa. El rendimiento de extracción (% Ext) se determinó con la ecuación (1):

$$\% \text{ Ext} = \frac{[\text{Cu}]_{\text{org}}}{([\text{Cu}]_{\text{ac}} + [\text{Cu}]_{\text{org}})} 100\% \quad (1)$$

donde $[\text{Cu}]_{\text{org}}$ y $[\text{Cu}]_{\text{ac}}$ correspondieron a las concentraciones del metal en la fase orgánica y en la fase acuosa, respectivamente. Para la reextracción se utilizó ácido sulfúrico recuperando el agente extractante. El rendimiento de reextracción (% Reex o Des) se calculó con la ecuación (2):

$$\% \text{ Des} = \frac{[\text{Cu}]_{\text{ac}}}{([\text{Cu}]_{\text{ac}} + [\text{Cu}]_{\text{org}})} 100\% \quad (2)$$

Con las mejores condiciones de extracción y de reextracción se obtuvieron las isothermas de estos procesos ajustándoles un modelo matemático para determinar el número de etapas de extracción y reextracción por el método de McCabe-Thiele, para un sistema de extracción en contracorriente, como se muestra en la Figura 1.

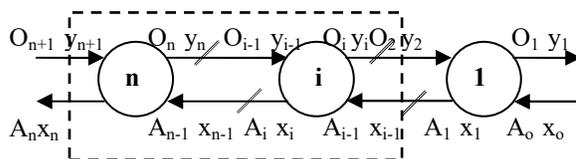


Figura 1. Esquema de la extracción en flujo en contracorriente

Las etapas de extracción se determinaron con la isoterma de extracción y un balance de materia entre las etapas i y n, donde cada etapa se consideraba en equilibrio y las fases orgánica (O) y acuosa (A) se consideraban completamente inmiscibles, con una relación de flujo volumétrico (A/O) constante. Para un extractante nuevo, la concentración de metal es igual a cero ($y_{n+1} = 0$) y la concentración a la salida en la fase acuosa (x_n), se obtuvo de la recta de operación, ecuación (3):

$$y_i = \frac{A}{O} (x_{i-1} - x_n) \quad (3)$$

Con la concentración inicial y final del metal en la fase acuosa; las condiciones de extracción y un programa iterativo se determinó el número de etapas para la separación. La reextracción consistió en el contacto entre la fase orgánica (cargada con cobre) y ácido sulfúrico, para recuperar el agente extractante y obtener al metal en solución. Las etapas de la reextracción se obtuvieron de forma similar que para la extracción.

La electrodeposición se realizó utilizando la solución acuosa de la desextracción o desorción con electrodos de plomo y acero inoxidable a una temperatura de 50 a 55°C y las condiciones de intensidad y voltaje fueron controladas con una fuente de poder (Steren PRL-25).

Resultados y discusión

Recolección, trituración y análisis granulométrico

Como se mencionó en la metodología, al material recolectado se le retiraron capacitores, resistencias, plásticos y otros materiales. Después se trituraron y molieron en el equipo que se presenta en la Figura 2.



Figura 2. Equipo de molienda

Después se registraron las masas de cada fracción separadas con las mallas que se muestran en la Figura 3, obteniendo un total de 135.53 g.

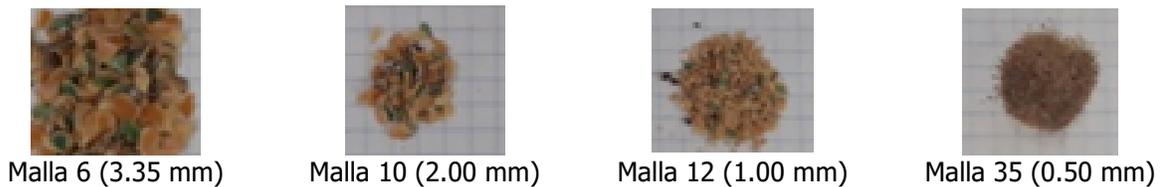


Figura 3. Fracciones obtenidas del material triturado

La curva granulométrica se presenta en la Figura 4, se puede apreciar que la mayor parte del material se encuentra clasificado entre diámetros 2 y 3.35 mm, correspondientes al 73 y 80%, respectivamente.

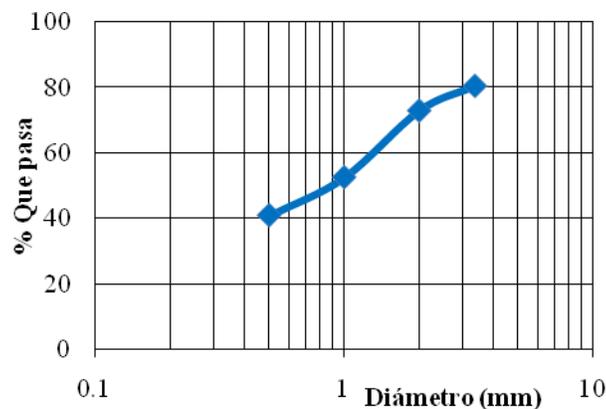


Figura 4. Distribución granulométrica

Lixiviación

El proceso se realizó con muestras de 10 g agregando una mezcla de 80 mL de ácido sulfúrico (2 mol/L) y 10 mL de peróxido de hidrógeno (20% v/v) en un matraz de tres bocas a reflujo con agua de enfriamiento a una temperatura de 70°C, la cual es controlada por un baño de agua y agitación magnética de 650 rpm como se muestra en la Figura 5, durante 180 minutos. Después de 80 minutos se adicionaron 10 mL más de peróxido de hidrógeno y cada 20 minutos se recolectaban muestras y se medía la concentración por EAA a las disoluciones apropiadas.

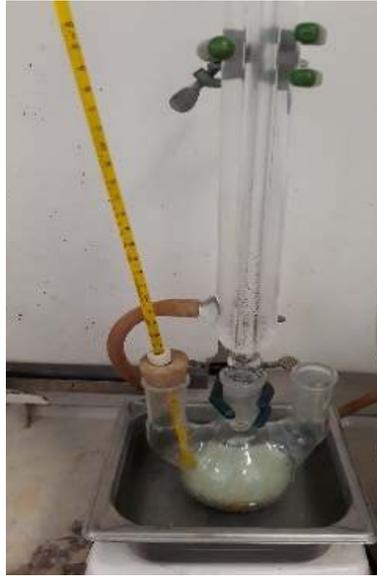


Figura 5. Sistema de lixiviación

Los resultados de la lixiviación se presentan en la Figura 6.

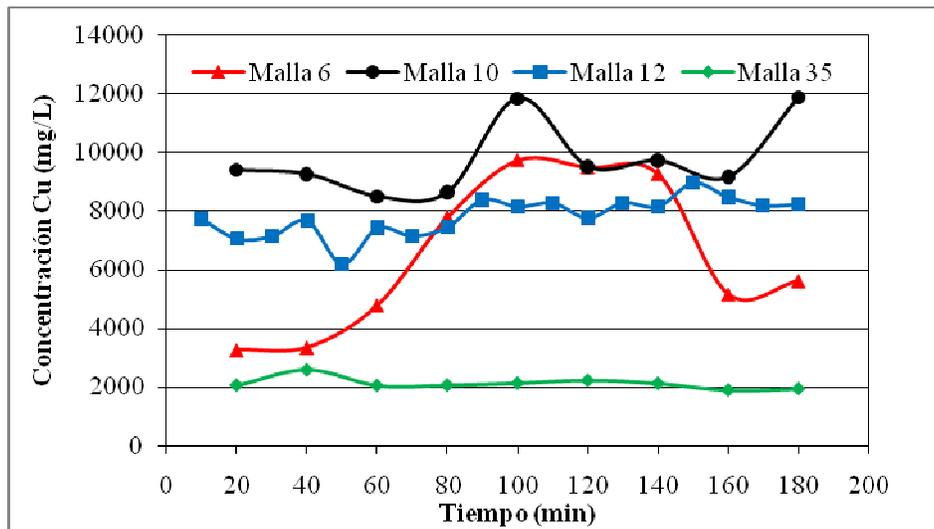


Figura 6. Evolución de la lixiviación para cada fracción en función del tiempo

En la Figura 6 se observa que, para los tamaños de partícula de tamices 6 y 10, se obtienen concentraciones de cobre en solución de: 12.2 y 9.7 g/L, respectivamente, con un tiempo de contacto de 100 min.

Extracción líquido-líquido / Reextracción (*stripping*)

La solución filtrada de la lixiviación se puso en contacto con la solución del agente extractante (Acorga M5774) diluido en queroseno al 30% (v/v), en una relación de fases de uno a uno y ajustando el pH a 3 usando el agente respectivo, ya que este valor de pH es recomendable para el mayor rendimiento de extracción. La temperatura fue de 24°C. La reacción se representa por la ecuación 4, donde RH representa el agente extractante:



La Figura 7 presenta la fase acuosa rica en cobre (izquierda) y la fase orgánica inicial (derecha). En la Figura 8 se muestran las fases después de la extracción, la orgánica a la izquierda y la acuosa a la derecha. Con base en los resultados de la lixiviación, para obtener la isoterma de extracción se utilizó una solución de 12 g/L, variando la relación de fases A/O y manteniendo constantes la concentración del agente extractante Acorga M5574, el pH, la temperatura y el tiempo de contacto de fases. El cálculo de las etapas con diferentes valores de A/O se presenta en las Figuras 9 y 10.

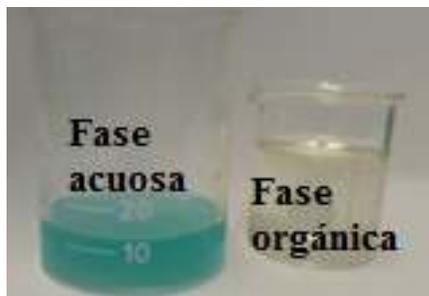


Figura 7. Fases antes de extracción

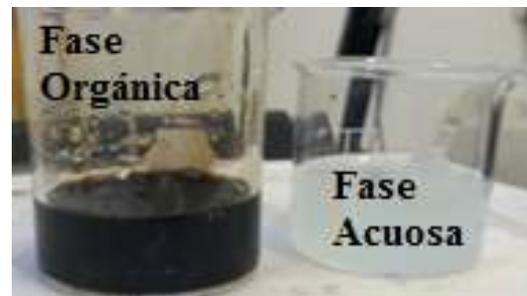


Figura 8. Fases después de la extracción

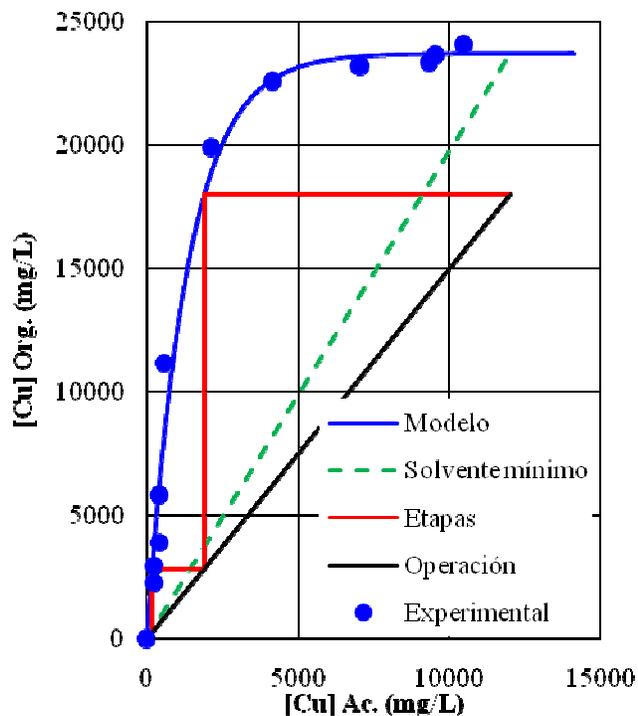


Figura 9. Tres etapas con A/O = 1.5; $X_i = 12$ g/L; $X_f = 13.3$ mg/L; [AcorgaM5574] = 30%; pH 3, tiempo = 10 min

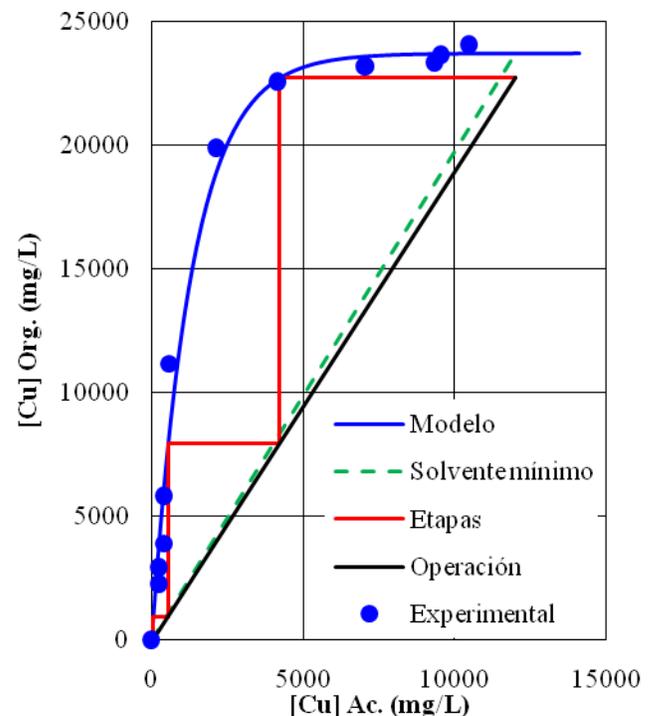


Figura 10. Tres etapas con A/O = 1.9; $X_i = 12$ g/L; $X_f = 53.6$ mg/L; [AcorgaM5574] = 30%; pH 3, tiempo = 10 min

En los dos casos se requirieron tres etapas de extracción y, para $A/O = 1.5$, se obtuvo en fase orgánica una concentración de 17.5 g/L y un rendimiento de 99.9% y, para $A/O = 1.9$, una concentración de 22.7 g/L y un rendimiento de 99.5%.

La reextracción (*stripping*) consistió en el contacto de la fase orgánica (cargada con cobre) y ácido sulfúrico por 10 min, a temperatura ambiente (24°C). La reacción de reextracción se representó por medio de la ecuación (4) en el sentido de derecha a izquierda. Para el cálculo de las etapas de reextracción se utilizó como concentración inicial la de 23 g/L. Los resultados se presentan en las Figuras 11 y 12. Para la relación $O/A = 1.5$ se obtuvo un valor de 34.5 g/L en fase acuosa y un rendimiento de 99.9%. Para una $O/A = 2.4$, los valores fueron de 54.9 g/L con un rendimiento del 99.6%. Por tanto, fue mejor operar con $O/A = 2.4$.

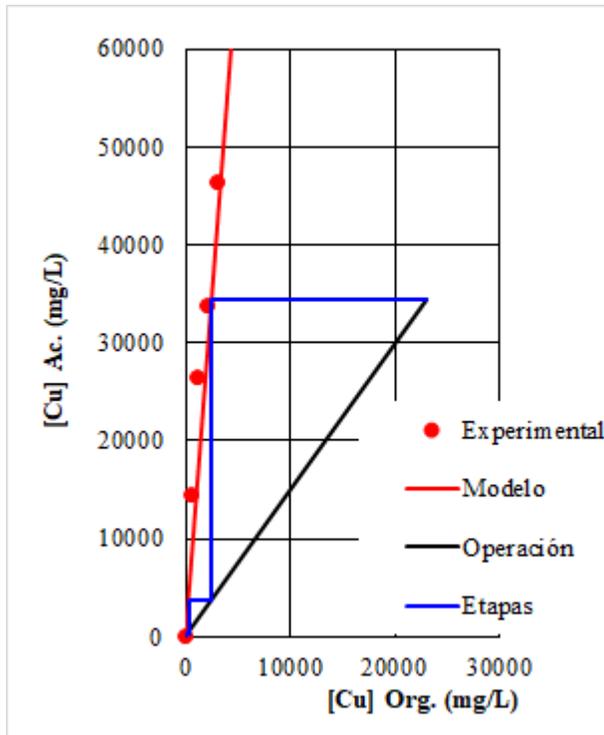


Figura 11. Tres etapas relación $O/A = 1.5$; $Y_{\text{inicial}} = 23 \text{ g/L}$; $Y_{\text{final}} = 24.8 \text{ mg/L}$, $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 2 \text{ mol/L}$; tiempo = 10 min

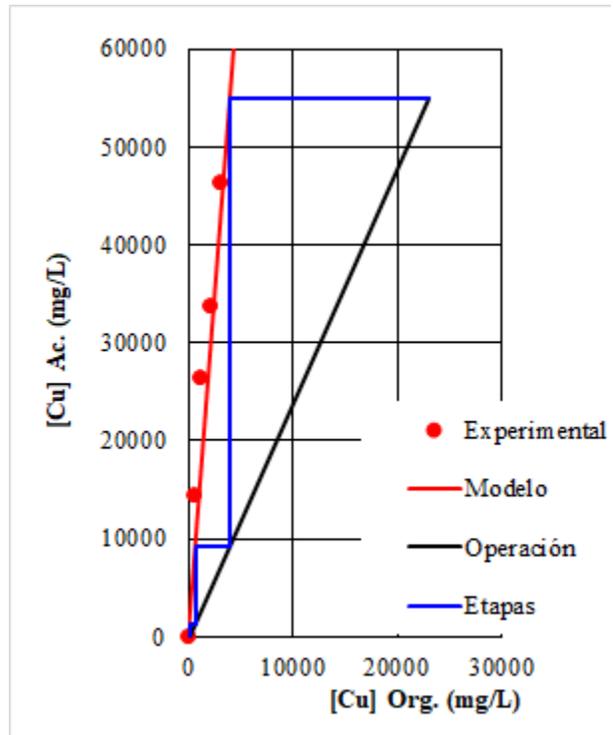


Figura 12. Tres etapas relación $O/A = 2.4$; $Y_{\text{inicial}} = 23 \text{ g/L}$; $Y_{\text{final}} = 94.4 \text{ mg/L}$; $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 2 \text{ mol/L}$; tiempo = 10 min

Electrodeposición

La solución de electrodeposición es la que se obtuvo de la reextracción. Como se mencionó en la metodología, como cátodo se utilizó acero inoxidable y como ánodo plomo. En el cátodo ocurre la reacción de reducción de cobre y en el ánodo ocurre su oxidación. El sistema de electrodeposición se presenta en la Figura 13.

La prueba se realizó durante 60 min a una temperatura de $50\text{-}55^{\circ}\text{C}$ y las condiciones de voltaje y amperaje fueron 3 voltios y 1 ampere, respectivamente. El porcentaje de recuperación en la electrodeposición fue de 95%.

Los resultados que se presentan en la Figura 14a muestran los electrodos al inicio de la prueba y con el depósito de cobre obtenido se pueden ver en la Figura 14b.



Figura 13. Sistema para la electrodeposición empleando una fuente de poder (Steren PRL-25 y medidores de corriente y voltaje)



Figura 14a. Electrodo de acero inoxidable 316 L (derecha) y electrodo de plomo (izquierda), antes de la electrodeposición



Figura 14b. Electrodo de acero inoxidable 316 L (izquierda) y electrodo de plomo (derecha), después de la electrodeposición

Se realizó un estudio de difracción de rayos X al sólido depositado en la placa de acero inoxidable. Este estudio fue realizado en el Laboratorio Nacional de Biotecnología Agrícola, Médica y Ambiental (LANBAMA) del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. (IPICYT), San Luis Potosí, S.L.P., México.

En la Figura 15 se muestra el difractograma del sólido depositado, en el que se pueden identificar los picos característicos de los compuestos. Se tienen Cu, $\text{Cu}(\text{HCCO})_2$, Fe_2O_3 y $\text{FeO}(\text{OH})$, en respectivo orden de abundancia.

Con esta caracterización se confirma la presencia de cobre en el sólido depositado.

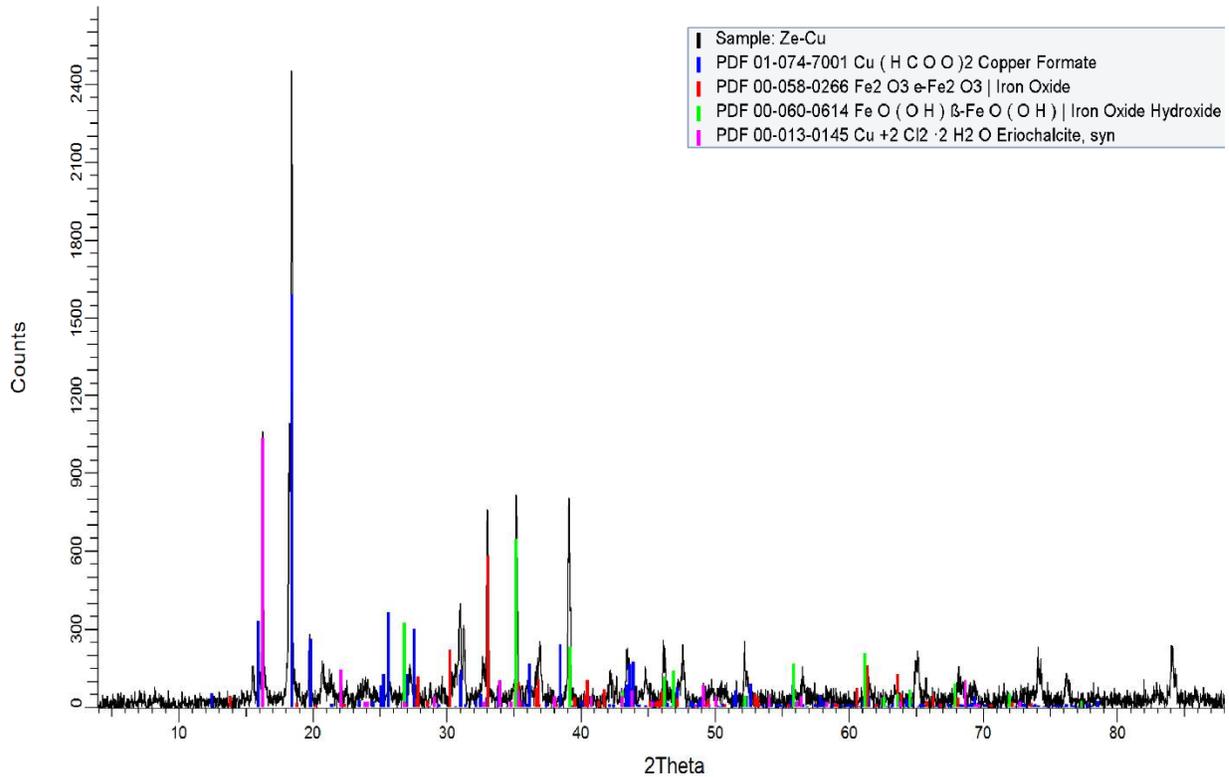


Figura 15. Difractograma de difracción de rayos X realizado a muestra de cobre electrodepositado en una placa de acero inoxidable

Conclusiones

En esta investigación se logró el objetivo de obtener cobre a partir de los circuitos impresos provenientes de los RAEE, empleando un proceso hidrometalúrgico que inicia con la trituración y la lixiviación del material de desecho, seguida de la etapa de extracción y desextracción para finalmente electrodepositarlo. Los resultados muestran que este proceso puede ser factible ya que permite tener altas eficiencias de recuperación de este metal y puede proponerse como una alternativa viable para dar solución al problema de disposición final de este tipo de residuos, contribuyendo a la disminución del impacto ambiental.

Glosario

Término	Significado
AcorgaM5774 (Cytec Solvay)	Agente extractante empleado en esta investigación
IPICYT	Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. (México)
LANBAMA	Laboratorio Nacional de Biotecnología Agrícola, Médica y Ambiental (LANBAMA)
Masa	La masa es una propiedad intrínseca de los cuerpos. Se mide en kg en el sistema internacional de unidades
Peso	El peso es la fuerza que la gravitación ejerce sobre los cuerpos. Se mide en Newtons y, por ello, la masa no es igual al peso
RAEE	Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos
Reextracción	Representa la operación inversa a la extracción y aparece como " reextracción "

Término	Significado
<i>WEEE</i>	<p>en el artículo de F.J. Alguacil. 1998 (Referencia-4.pdf) y en el texto de Germán Cáceres-Arenas de la Universidad de Atacama, sección: 4.6.2.1 (p. 81) (Referencia-5.pdf). En un manual de operación de una compañía minera (Mexicana de Cananea, S.A. de C.V., 1980) la palabra que aparece es "Despojo" (Referencia-6.pdf) y en el artículo de Toache et al. 2015 (Referencia-7.pdf) como "desextracción". En los textos en inglés aparece como "stripping", por ejemplo, en los textos de Habashi, F. 1999 (Referencia-1.pdf) y de Michael L. Free. 2013 (Referencia-2-str.pdf), https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118732465.ch6). En referencias en francés la operación aparece como: "dés extraction", como en el artículo de Bernard Boullis y Jean-Guy Devezeaux de Lavergne, 2006 (Referencia-3.pdf). De acuerdo con esta revisión, el autor responsable sugiere el uso del término "reextracción".</p> <p>Siglas en inglés para <i>Waste Electrical and Electronic Equipment</i></p>

Reconocimientos

Se dedica este trabajo con profundo respeto a la memoria del Dr. Alberto Florentino Aguilera Alvarado, por su comprometida labor en la formación de ingenieros químicos y por su calidad humana que siempre brindó a sus estudiantes y colegas en la Universidad de Guanajuato y que se le recordará por siempre.

Al Ing. Enrique Villegas de la empresa *Cytec-Solvay Group* por el suministro del agente extractante Acorga M5774 utilizado en esta investigación. También se reconoce al Laboratorio Nacional de Biotecnología Agrícola y Ambiental LANBAMA, IPICYT, San Luis Potosí, S.L.P., por los estudios de difracción de rayos X al sólido depositado en la placa de acero inoxidable.

Bibliografía

- Alguacil, F.J. 1998. La recuperación de cobre mediante lixiviación-extracción con disolventes-electrólisis: Hacia el siglo XXI. Revista de Metalurgia Madrid (Revistas CSIC). 34(6):499-506. DOI: <https://doi.org/10.3989/revmetalm.1998.v34.i6.818>. (Ref-4 Glosario).
- Akbari, S., Ahmadi, A. 2019. Recovery of copper from a mixture of printed circuit boards (PCBs) and sulphidic tailings using bioleaching and solvent extraction processes. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification.142107584. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107584>.
- Baldé, C.P., Forti V., Gray, V., Kuehr, R., Stegmann, P. 2017. The Global E-waste Monitor. United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna. Pp. 64-66. https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/Global-E-waste_Monitor_2017_electronic_single_pages.pdf
- Birloaga, I., De Michelis, I., Ferella, F., Buzatu, M., Vegliò, F. 2013. Study on the influence of various factors in the hydrometallurgical processing of waste printed circuit boards for copper and gold recovery. Waste Management. 33(4):935-941. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.003>.
- Boullis, B., Devezeaux de Lavergne, J.-G. 2006. Le traitement du combustible usé: Une filière bien maîtrisée. CLEFS CEA – No 53 – Hiver 2005-2006. Pp. 19-25 (Fig. 3, p. 24). (Ref-3 Glosario).
- Cáceres-Arenas, G. 2016. Apuntes. Pub. Universidad de Atacama, sección 4.6.2.1 (p. 81). Atacama, Chile. (Ref-5 Glosario).
- Chaverra, D., Restrepo, O. 2013. Extracción de cobre a partir de residuos de tarjetas de circuitos impresos. Revista Colombiana de Materiales. 5:233-238. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/materiales/article/view/19222>
- Concha-M., M. 2012. Grandes mineras advierten caída de casi 50% en leyes de mineral de cobre en 20 años, Economía y Negocios. Jueves 28 de junio de 2012. Consultado 20-febrero-2017. <http://www.economiaynegocios.cl/noticias/noticias.asp?id=97921#>,
- Cui, H., Anderson, C.G. 2016. Literature review of hydrometallurgical recycling of printed circuit boards (PCBs). Journal of Advanced Chemical Engineering. 6(1):1000142:1-12. <https://www.longdom.org/open-access/literature-review-of-hydrometallurgical-recycling-of-printed-circuitboards-pcb-2090-4568-1000142.pdf>
- DOF. 2013 (Primera Sección). Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011, Que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo. 12-38. Diario Oficial de la Federación. Estados Unidos Mexicanos. <https://www.profepa.qob.mx/innovaportal/file/6633/1/nom-161-semarnat-2011.pdf>

-
- Flandinet, L., Tedjar, F., Ghetta, V., Fouletier, J. 2012. Metals recovering from waste printed circuit boards (WPCBs) using molten salts. *Journal of Hazardous Materials*. 213-214:485-490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.02.037>.
- Free, M.L. 2013. *Hydrometallurgy: Fundamentals and Applications*. P. 193. Editorial Wiley-Tms. Estados Unidos. (Ref-2 Glosario).
- Guimarães, Y.F., Santos, I.D., Dutra, A.J.B. 2014. Direct recovery of copper from printed circuit boards (PCBs) powder concentrate by a simultaneous electroleaching-electrodeposition process. *Hydrometallurgy*. 149:63-70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.06.005>.
- Habashi, F. 1999. *A Textbook of Hydrometallurgy*. 2ª edición. Editorial Métallurgie Extractive Québec. ISBN: 2980324779, 9782980324772. Canadá. (Ref-1 Glosario).
- Harue-Yamane, L., Tavares-de-Moraes, V., Romano-Espinosa, D.C., Soares-Tenório, J.A. 2011. Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. *Waste Management*. 31(12):2553-2558. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.006>.
- Hernández-Pacheco, A., Noyola, J.L. 2007. The Milpillas Project. Cytec Solutions. 28 pp. <https://dokumen.tips/download/link/the-milpillas-project-cytec-industries-configuration-and-extractant-formulation>
- Mexicana de Cananea, S.A. de C.V. 1980. Manual. Pp. 11-14. Sonora, México. (Ref-6 Glosario).
- Perkins, D.N., BruneDrisse, M.N., Nxele, T., Sly, P.D. 2014. E-Waste: A Global Hazard, *Annals of Global Health*. 80(4):286-295. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.aogh.2014.10.001>
- Saidan, M., Brown, B., Valix, M. 2012. Leaching of electronic waste using biometabolised acids. *Chinese Journal Chemical Engineering*. 20(3):530-534. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(11\)60215-2](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(11)60215-2).
- Toache, A.D., Hernández, L.E., Lapidus, G.T., Legorreta-G., F. 2015. Extracción con solventes de Fe contenido en soluciones provenientes de la lixiviación de arcillas caolínicas utilizando como extractantes D2EHPA y CYANEX 2722015. En *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*. Vol. 2. AACTyM-Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo ISSN: 2395-8405. Pp. 51-59. Pachuca, Hidalgo, México. (Ref-7 Glosario).
- Treybal, R.E. 2003. *Operaciones de Transferencia de Masa*. McGraw-Hill. Pp.529-531, 862. Ciudad de México, México.
- Tuncuk, A., Stazi, V., Akcil, A., Yazici, E.Y., Deveci, H. 2012. Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering*. 25(1):28-37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.09.019>.
- Valdés, H., Sepúlveda, R., Romero, J., Valenzuela, F., Sánchez, J. 2013. Near critical and supercritical fluid extraction of Cu(II) from aqueous solutions using a hollow fiber contactor. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 65:58-67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2012.12.005>.
- Zhu, P., Chen, Y., Wang, L.Y., Qian, G.Y., Zhou, M., Zhou, J. 2012. A new technology for separation and recovery of materials from waste printed circuit boards by dissolving bromine epoxy resins using ionic liquids. *Journal of Hazardous Materials*. 239-240:270-278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.08.071>.
-

UNIVERSIDAD DE
GUANAJUATO



**La División de Ciencias
Naturales y Exactas**

Lamenta profundamente el fallecimiento del

**Dr. Alberto Florentino
Aguilera Alvarado**

Quien fuera un entrañable y querido profesor del
Departamento de Ingeniería Química de esta
División.

Extendemos nuestras condolencias a sus
familiares y amigos, esperando que encuentren
pronta resignación a tan lamentable pérdida.

Descanse en paz

Respetuosamente

Dr. Agustín Ramón Uribe Ramírez
Director



Campus Guanajuato | División de Ciencias
Naturales y Exactas

Guanajuato, Gto., 28 abril 2021