

Extracción y Caracterización de la Fracción No Metálica de las Tarjetas de Circuitos Impresos de Computadoras Desechadas

Loyo C.*; Arroyo C.*; Aldás M.*; Montero R. **

* *Escuela Politécnica Nacional, Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros, Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Quito, Ecuador*

e-mail: carlos.loyo@outlook.com; carla_vam@yahoo.com; miguel.aldas@epn.edu.ec

** *Empresa Pública Yachay, Dirección de Investigación Científica y Transferencia de Tecnología*
e-mail: rmontero@yachay.gob.ec

Resumen: Los residuos electrónicos han sido en los últimos años una de las principales fuentes de contaminación a nivel mundial, debido principalmente a la gran producción y comercialización de este tipo de equipos. Uno de los componentes fundamentales y más difíciles de reciclar debido a la complejidad de su mezcla son las tarjetas de circuitos impresos (PCBs). Este proyecto tiene como objetivo extraer y caracterizar la fracción no metálica (FNM) de las PCBs con el propósito de determinar una forma práctica de reciclaje de dichos residuos. Primeramente se retiraron los puertos de salida, baterías y capacitores de las tarjetas, después fueron cizalladas y molidas en un molino de martillos para ser enviadas a la separación gravimétrica, finalmente se tomaron dos tamaños de partícula uno entre 0.15 y 0.075 mm y el otro menor a 0.075 mm, con el fin de determinar la influencia del tamaño de partícula en su composición. Esta fracción fue caracterizada mediante espectroscopía de infrarrojo (FTIR), calorimetría diferencial de barrido (DSC), termogravimetría (TGA) y análisis para la determinación de lixiviados (TCLP). Las PCBs están compuestas principalmente por resina epóxica y fibra de vidrio. Además, se determinó que los residuos de mayor tamaño contiene 67.22 % de fibra de vidrio mientras que la de menor tamaño contiene 78.78 %. Los metales que lixiviaron en mayor concentración fueron el zinc, cobre y plomo y en menores cantidades el cobalto, plata y níquel. Una manera económica y práctica de reciclar la FNM de PCBs sería mediante la reutilización física, es decir, como carga en materiales compuestos debido a la gran cantidad de fibra de vidrio contenida principalmente en el material de menor tamaño. No es recomendable realizar una combustión de los residuos ya que se obtiene una gran cantidad de cenizas y se necesita una alta temperatura para su descomposición. Así mismo, no es recomendable su disposición en desechos sanitarios debido a la lixiviación de los metales pesados.

Palabras clave: Tarjetas de circuitos impresos, fracción no metálica, caracterización, espectroscopía de infrarrojo, calorimetría diferencial de barrido, termogravimetría, reciclaje físico, reciclaje.

Abstract: Electronic waste has been one of the main sources of pollution worldwide in the last years, due to large-scale of production and commercialization of this kind of equipment. One of the most important components and more difficult to recycle due to the complexity of mixture are the printed circuit boards. The aim of this project is to extract and characterize the non-metallic fraction (NMF) of the PCBs in order to determine a practical way to recycle this waste. First, ports, batteries, and capacitors were removed. Then, they were sheared and ground in a hammer mill in order to do the gravimetric separation. Finally, two particle sizes, one between 0.15 and 0.075 mm and another less than 0.075 mm, were taken to determine the influence of particle size composition. This fraction was characterized by infrared spectroscopy (FTIR), differential scanning calorimetry (DSC), thermogravimetry (TGA) and analysis for determining leachate. The PCBs are mainly composed of epoxy resin and fiberglass. In addition, it was determined that bigger waste fraction contains 67.22 % fiberglass while smaller contains 78.78 %. The metals were leached in higher concentration were zinc, copper and lead; and cobalt, silver and nickel in minor amounts. Physical recycling is an economical and practical way to recycle the PCBs as a filler in composites because of the amount of fiberglass contained in the NMF. It is not recommended to perform a combustion of waste due to the big quantity of ash obtained and high temperature needed for decomposition. It is also not recommended for disposal in landfill due to the leaching of heavy metals.

Keywords: Printed circuit boards, non-metallic fraction, characterization, infrared spectroscopy, differential scanning calorimetry, thermogravimetry, physical recycling, recycling.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha existido un gran incremento en la producción de aparatos eléctricos y electrónicos; los cuales, una vez terminada su vida útil pasan a formar parte de los desechos eléctricos y electrónicos. En el año de 1990 se generaron alrededor de 20 millones de toneladas de desechos mientras que el año 2015 se estima que existirán 75 millones de toneladas. Si esta gran cantidad de desechos no son tratados adecuadamente pueden producir grandes impactos ambientales [6].

El factor más importante para determinar el tipo de reciclaje que se debe llevar a cabo para los desechos eléctricos y electrónicos, es su composición. Sin embargo, el progreso en cuanto a producción de aparatos eléctricos y electrónicos ha llevado a las industrias a utilizar una gran variedad de materiales para su fabricación, provocando de esta manera que su separación y posterior reciclaje se dificulte [10].

Las tarjetas de circuitos impresos (PCB por sus siglas en inglés) son la plataforma sobre la cual los componentes microelectrónicos se montan. Las PCBs proporcionan las interconexiones eléctricas entre sus componentes. Las PCBs se encuentran en prácticamente todos los aparatos eléctricos y electrónicos [4]. Además, se encuentran en todos los sistemas de armamento y equipos aeroespaciales, siendo así una parte esencial del funcionamiento de los equipos. Las placas de circuitos impresos son la base de la industria electrónica, siendo su producción crucial para la fabricación y venta de más de un billón de equipos electrónicos al año [9].

Las placas de circuitos impresos son una mezcla compleja de fibra de vidrio, resina polimérica y múltiples tipos de metales. Esta mezcla compleja y sus características hacen de su reciclaje uno de los más difíciles de realizar. Sin embargo, el reciclaje de estas placas no solo es importante ambientalmente, sino también es importante económicamente ya que está compuesta de varios metales valiosos. Entre los más importantes se encuentran el oro y la plata, los cuales están en un rango entre 244 a 857 g/t para el oro y entre 520 a 2901 g/t para la plata [2, 3, 5].

El proceso de recuperación de la fracción metálica de las PCBs a nivel mundial ya está muy avanzado. Sin embargo, la recuperación y reciclaje de la fracción no metálica no ha sido aún implementada, pese a que entre el 70 % y 80 % de las PCBs corresponde a la parte no metálica. Esta fracción está compuesta por fibra de vidrio (65 %), resina epóxica (32 %), impurezas (cobre <3 %, soldadura <0.1 %) y retardantes a la llama bromados. Esta falta de exploración en el reciclaje de la fracción no metálica se debe a que éste proceso no constituye un beneficio altamente económico como lo es el reciclaje de la fracción metálica [4, 5].

La disposición y recuperación de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos tienen altas implicaciones ambientales, en especial la fracción no metálica de dichos residuos, debido a que esta contiene sustancias peligrosas como cadmio, plomo o retardantes a la llama bromados. Estas sustancias demandan altos costos de producción para

ser eliminadas, además de ser peligrosas para la salud y el medioambiente [6, 11].

Por estos motivos, el presente trabajo pretende extraer y caracterizar la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras desechadas, para poder determinar el potencial de reciclaje que tienen estos desechos.

2. METODOLOGÍA

2.1 Obtención de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras desechadas

Inicialmente fueron seleccionadas las tarjetas de circuitos impresos de los residuos electrónicos recolectados por empresas dedicadas a esta actividad. Se seleccionaron tarjetas de circuitos impresos de computadoras desechadas. Posteriormente se retiraron los puertos de salida USB, audio, videos, serie, paralelo y VGA de las tarjetas y además se extrajeron las baterías y capacitores.

Mediante la utilización de una cizalla se cortaron las tarjetas en 8 partes de aproximadamente 6 cm de lado. Estos pedazos de tarjetas obtenidos fueron molidos a través de un molino de martillos, el cual está conformado por una tolva de alimentación, una cámara de trituración, un juego de cuchillas metálicas y una malla metálica.

Una vez realizada la molienda se separó el producto obtenido en dos partes de acuerdo a su tamaño mediante un tamiz. El material con tamaño menor a 1.18 mm fue llevado a una mesa de separación gravimétrica con el fin de separar la fracción no metálica de la fracción metálica de las tarjetas de circuitos impresos. El material con tamaño mayor a 1.18 mm fue reprocesado en el molino de martillos. Para mejorar la separación gravimétrica se adicionó agua, por lo cual se tuvo que realizar un posterior secado tanto de la fracción metálica como de la fracción no metálica. Del proceso de separación se obtuvieron tres fracciones: la fracción metálica, la fracción no metálica y la fracción de mixtos, esta última fue reprocesada en la mesa de separación gravimétrica con el fin de obtener una mayor cantidad de fracción no metálica.

Finalmente la fracción no metálica fue tamizada a través de las mallas número 100 y 200. Se obtuvieron dos tamaños de partícula: el primero comprendido entre 0.15 y 0.075 mm y el segundo con tamaño menor a 0.075 mm. Estos dos tamaños de partícula fueron caracterizados posteriormente por separado.

2.2 Caracterización de la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos

2.2.1 Análisis de Espectroscopia de Infrarrojo (FTIR)

Primero se llevó a cabo la eliminación de la humedad tanto del material con tamaño de partícula 0.15-0.075 mm como del material con tamaño <0.075 mm, para lo cual se lo colocó en la estufa a 100 °C durante dos horas. Debido a que la muestra es de tamaño de partícula muy fina, se llevó a cabo

la formación de una pastilla de la mezcla del material de análisis con bromuro de potasio, en una relación 1:100.

Las pastillas formadas de las muestras de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos fueron analizadas por transmitancia desde los 4 000 cm^{-1} hasta los 400 cm^{-1} con el espectrofotómetro de infrarrojo. Para obtener una buena resolución de los espectros se llevó a cabo una normalización, suavizado de los picos y corrección de la línea base, mediante el software del equipo. Se realizaron un total de tres ensayos de espectroscopía de infrarrojo.

2.2.2 Análisis de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

Con el propósito de determinar las propiedades térmicas de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos se llevó a cabo el análisis de Calorimetría Diferencial de Barrido.

Los ensayos se realizaron en atmósfera de nitrógeno con un flujo de 20 mL/min con 5 barridos: primer calentamiento (desde temperatura ambiente hasta 250 °C a una tasa de calentamiento de 10 °C/min), paso isothermal (a 250 °C durante 10 minutos), primer enfriamiento (desde 250 °C hasta temperatura ambiente), segundo calentamiento (desde temperatura ambiente hasta 250 °C a una tasa de calentamiento de 10 °C/min), y segundo enfriamiento (desde 250 °C hasta temperatura ambiente). Se realizaron un total de tres ensayos de calorimetría diferencial de barrido.

2.2.3 Análisis de Termogravimetría (TGA)

Con el propósito de determinar la temperatura de descomposición y la composición en cuanto a materia orgánica e inorgánica se realizó el análisis de termogravimetría.

Para realizar este análisis se tomó aproximadamente 10 mg de muestra y se lo colocó en el porta muestra del equipo de termogravimetría. El procedimiento que se llevó a cabo fue con base en la norma ASTM E2105 [1]. La prueba se llevó a cabo con una tasa de calentamiento de 10 °C/min hasta alcanzar los 900 °C y un flujo de nitrógeno de 50 mL/min.

Se realizaron un total de tres ensayos de termogravimetría.

2.2.4 Análisis de determinación de toxicidad de lixiviados (TCLP)

Para realizar el análisis de toxicidad de lixiviados se tomó una muestra representativa de ambos tamaños de partícula, después se procedió a colocar 10 g de muestra con 200 mL de agua destilada, posteriormente se reguló el pH de la solución en 4 y se dejó en agitación continua durante 21 horas. Este ensayo se realizó con referencia al método EPA 1311.

Una vez terminada la agitación se realizó a caracterización de los metales lixiviados mediante el equipo de Espectrofotometría de Absorción Atómica.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Obtención de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras desechadas

Los puertos de salida, capacitores y batería corresponden a 11.27 % del peso total de las tarjetas de circuitos impresos seleccionadas. Estos componentes fueron removidos debido a que los puertos de salida están compuestos en su totalidad por metales, los cuales ocasionarían daños considerables en los equipos de molienda; mientras que los capacitores y baterías contienen sustancias altamente tóxicas que necesitan un tratamiento diferente.

En la Tabla 1 se presentan los resultados de las dos fracciones de tamaño obtenidas después de la molienda en el molino de martillos. Pese a que el molino de martillos no es el más adecuado para moler este tipo de residuos, se obtuvo casi la mitad del material con tamaño menor a 1.18 mm, el cual fue llevado a la separación gravimétrica.

Solo el material que tenía un tamaño menor a 1.18 mm pudo ser llevado a la separación gravimétrica debido principalmente a que en el material con mayor tamaño no se separaba de una manera eficiente su parte metálica de su parte no metálica. Además, se apreciaron aglomerados metálicos que tenían un tamaño mayor a 1.18 mm, estos aglomerados se formaron dentro del molino.

Como muestra la Tabla 1, el material llevado a la separación gravimétrica correspondía al 43.42 %, mientras que el restante 58.58 % fue reprocesado en el molino de martillos para incrementar la extracción de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos.

En la Tabla 2 se observan los resultados obtenidos de fracción metálica y fracción no metálica obtenida después de realizar el proceso de separación gravimétrica

Tabla 1. Resultados de las fracciones obtenidas después de la molienda en el molino de martillos

	Peso de tarjetas sin capacitores, puertos de salida y baterías (g)	Peso de material con tamaño mayor 1.18 mm (g)	Peso de material con tamaño menor 1.18 mm (g)
	15 303.63	8 659.42	6 644.22
Porcentajes	100.00 %	56.58 %	43.42 %

Tabla 2. Resultados obtenidos después de la separación gravimétrica

	Material total procesado en la separación gravimétrica (g)	Fracción metálica (g)	Fracción no metálica (g)
	6 17.09	2 092.84	4 324.25
Porcentaje	100.00 %	32.61 %	67.39 %

Según un estudio realizado por [4], entre el 70 % y 80 % del peso total de las tarjetas de circuitos impresos corresponde a la fracción no metálica. En la Tabla 2 se puede observar que se obtuvo un 67.39 % de fracción no metálica. Esta variación con respecto al estudio citado se debe principalmente a pérdidas de material no metálico durante la separación

gravimétrica. Como se puede observar en la Fig. 1, en la fracción metálica obtenida existe aún una cantidad de material no metálico que no pudo ser separado. Asimismo, se perdió una parte del material no metálico que no se sedimentó en el agua utilizada para mejorar la separación gravimétrica.

En la Tabla 3 se muestran los porcentajes de las fracciones de tamaño 0.15-0.075 mm y <0.075 mm obtenidas mediante tamizado de la fracción no metálica. Se puede observar que la mayor cantidad de material corresponde al de tamaño mayor a 0.15 mm. Este material puede ser molido mediante un molino de discos ya que el contenido de metales es mínimo. Además, un molino de discos permite obtener un tamaño deseado mediante el ajuste de la separación de sus discos. También se obtuvo mayor cantidad de material con tamaño de partícula <0.075 mm respecto al material con tamaño de partícula entre 0.15-0.075 mm. Esto es conveniente si se desea realizar un reciclaje físico ya que, como se discutirá posteriormente, este material contiene una mayor cantidad de fibra de vidrio que permite reforzar materiales compuestos.

Tabla 3. Resultados de los pesos obtenidos en el tamizado con malla número 100 y 200

	Peso de fracción no metálica (g)	Material con tamaño mayor a 0.15 mm (g)	Material con tamaño entre 0.15 mm y 0.075 mm (g)	Material con tamaño menor a 0.075 mm (g)
	4 324.25	2 221.67	960.19	1 142.39
Porcentaje	100.00 %	51.38 %	22.20 %	26.42 %
Porcentaje	100.00 %	51.38 %	48.62 %	

3.2 Caracterización de la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos

3.2.1 Análisis de Espectroscopía de Infrarrojo (FTIR)

En la Fig. 2 se muestran un espectro infrarrojo obtenido por transmitancia, en un rango de 4 000 hasta los 400 cm^{-1} , de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos. El espectro infrarrojo obtenido no se logró comparar con un espectro estándar disponible en la biblioteca del software del equipo utilizado. Esto sucede porque existe una gran variedad de componentes en las tarjetas de circuitos impresos. Sin embargo, se lograron apreciar los principales componentes de las tarjetas los cuales se señalan en la Fig. 2: resina epóxica y fibra de vidrio (representada por los grupos silicato).

3.2.2 Análisis de Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

En la Fig. 3 se muestra el termograma realizado desde temperatura ambiente hasta 250 $^{\circ}\text{C}$, para la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos de computadoras con el fin de determinar la temperatura de transición vítrea. Se puede observar que la temperatura de transición vítrea de la fracción no metálica es aproximadamente 133.4 $^{\circ}\text{C}$, la cual no difiere significativamente con la temperatura de transición vítrea indicada en bibliografía que corresponde a 140 $^{\circ}\text{C}$ [8].



Figura 1. Fracción metálica obtenida después de la separación gravimétrica

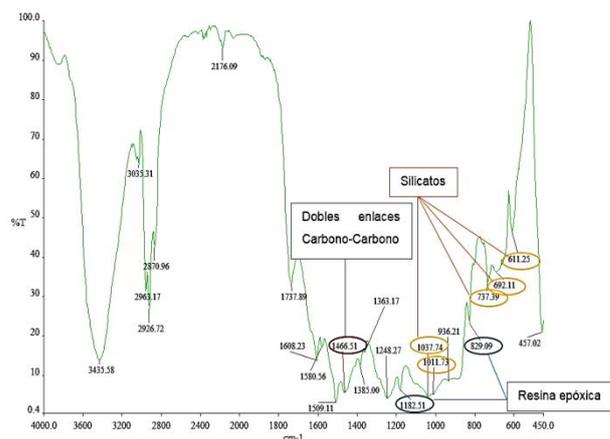


Figura 2. Espectro infrarrojo de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula de tamaño 0.15-0.075 mm

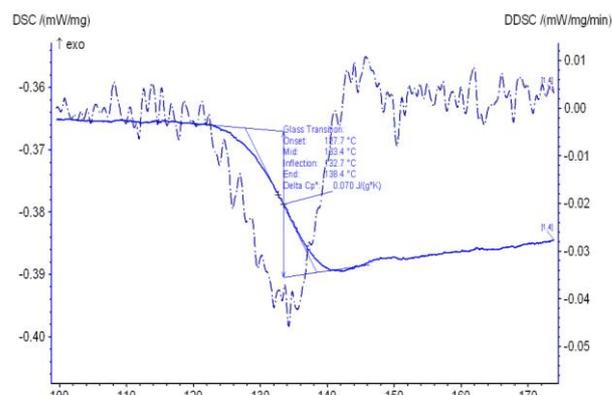


Figura 3. Termograma de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos

Esta diferencia se debe principalmente a que la temperatura indicada en bibliografía se realizó de compuestos que contenía solamente fibra de vidrio y resina epóxica, mientras que el material analizado en el proyecto puede contener trazas de metales como cobre, plomo, níquel y compuestos bromados.

3.2.3 Análisis de Termogravimetría (TGA)

En las Fig. 4 y Fig. 5 se presentan los termogramas obtenidos de la fracción no metálica de tamaño 0.15-0.075 mm y <0.075 mm. Los diagramas termogravimétricos nos indican la estabilidad térmica que tiene la muestra, la cual es muy importante tanto para el reciclaje físico como para el reciclaje químico [3, 7]. Para el caso de los residuos utilizados en este

proyecto podemos observar que tienen una alta estabilidad térmica ya que los materiales gruesos y finos empiezan a descomponerse a los 291 °C y 269 °C respectivamente. Es decir no hay ningún peligro de descomposición en los procesos de reciclaje físico que se realizan comúnmente, en los cuales se trabaja generalmente a temperatura ambiente o máximo a 100 °C. Además, en las Fig. 4 y Fig. 5 se puede observar que se alcanzó la mayor degradación para gruesos y finos a los 346 °C y 351 °C respectivamente.

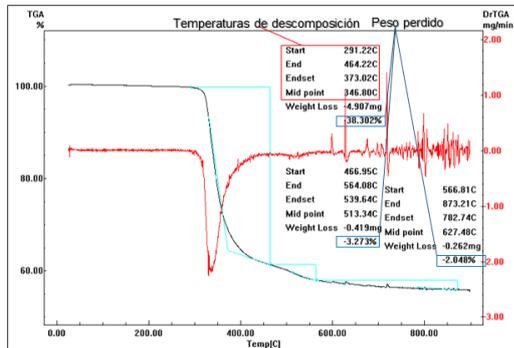


Figura 4. Diagrama termogravimétrico obtenido de la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula de tamaño 0.15-0.075 mm

Finalmente se puede observar que la descomposición de la mayor parte de la resina epóxica se obtiene a una temperatura para gruesos y finos de 464 °C y 443 °C respectivamente. En la Tabla 4 se presentan los resultados del análisis termogravimétrico para ambos tamaños de partícula analizados en cuanto a porcentaje en peso de material orgánico e inorgánico para las 3 repeticiones realizadas.

Los componentes mayoritarios de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos son la resina epóxica y la fibra de vidrio, por lo que se puede observar en la Tabla 4 que existe una mayor cantidad de material inorgánico. Además, en el material con menor tamaño de partícula se observa que existe una mayor cantidad de material inorgánico (que corresponde en su mayoría a la fibra de vidrio). Esto se debe principalmente a que la fibra se encuentra liberada en este tamaño de partícula. Es importante determinar el contenido de material inorgánico, ya que en caso de realizarse un reciclaje físico de estos residuos como refuerzo, conviene tener la mayor cantidad de esta fibra para mejor ciertas propiedades mecánicas del material reforzado, como las de tracción, flexión o abrasión.

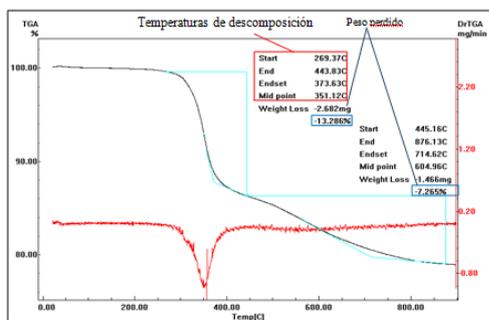


Figura 5. Diagrama termogravimétrico obtenido de la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos con tamaño de partícula <0.075 mm

3.2.4 Análisis de determinación de toxicidad de lixiviados (TCLP)

En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos del análisis de toxicidad de lixiviados para cada tamaño de partícula.

Tabla 4. Resultados del análisis termogravimetría para ambos tamaños de partícula

	Material orgánico (%)		Material inorgánico (%)	
	0.15-0.075 mm	<0.075 mm	0.15-0.075 mm	<0.075 mm
M1	40.61	20.55	59.39	79.45
M2	26.92	20.54	73.08	79.46
M3	30.81	22.56	69.19	77.44
Promedio	32.78	21.22	67.22	78.78

Tabla 5. Resultados del análisis de toxicidad de lixiviados

Elemento	Tamaño de partícula	
	0.075-0.15 mm Concentración (mg/L)	<0.075 mm Concentración (mg/L)
Zinc	2.34	3.79
Cobre	20.43	38.22
Plomo	43.01	27.99
Cobalto	0.01	0.01
Plata	0.02	0.03
Níquel	0.07	0.23
Cromo	<0.01	<0.01
Cadmio	<0.01	<0.01
Bario	<0.1	<0.1
Arsénico	<0.1	<0.1
Mercurio	<0.1	<0.1

En la Tabla 5 se puede observar que para ambos tamaños de partícula las concentraciones más altas de metales obtenidas en los lixiviados pertenecen al zinc, cobre y plomo. Sin embargo, el único valor que excede los valores máximos permitidos para ensayos de lixiviación según la norma técnica de suelo de la ordenanza metropolitana es la concentración de plomo, cuyo valor máximo permisible es de 0.2 mg/L.

Se observó además que, en general, para el material con partículas de tamaño <0.075 mm existe una mayor concentración de metales. Esto se debe a que a menor tamaño de partícula los metales se liberan de la matriz polimérica, por lo que aumenta su facilidad de lixiviación.

4. CONCLUSIONES

Mediante separación gravimétrica se determinó que las tarjetas de circuitos impresos utilizadas contenían un 32.61 % de fracción metálica y 67.39 % de fracción no metálica.

Mediante FTIR se logró determinar que la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos están compuestas principalmente por resina epóxica y fibra de vidrio.

Mediante TGA se determinó que la fracción no metálica de tarjetas de circuitos impresos de tamaño 0.15-0.075 mm tiene 67.22 % de material inorgánico (fibra de vidrio) y 32.78 % de material orgánico (resina epóxica); y para el material de tamaño <0.075 mm se obtuvo un 78.78 % de material inorgánico y 21.22 % de material orgánico.

Mediante el TCLP se determinó que la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos superan los límites permisibles de lixiviación de plomo por lo tanto no es recomendable su disposición en rellenos sanitarios.

La fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos puede ser utilizada para un reciclaje físico, es decir incorporarlos como carga dentro de una matriz para formular un material compuesto.

No es recomendable realizar un reciclaje químico de la fracción no metálica de las tarjetas de circuitos impresos, ya que las temperaturas de descomposición son muy altas.

REFERENCIAS

- [1] ASTM E2105. (2010). *Standard Practice for General Techniques of Thermogravimetric Analysis (TGA) Coupled With Infrared Analysis (TGA/IR)*. Estados Unidos.
- [2] E. De la Torre, A. Guevara y S. Espinoza. (2009). Los teléfonos celulares una nueva mina de metales preciosos, factible de valorizar mediante tostación y lixiviación con cianuro. *Revista Politécnica*. 30(1). 21-28
- [3] I. De Marco, B. M. Caballero, M. J. Chomón, M. F. Laresgoiti, A. Torres, G. Fernández y S. Arnaiz, (2008). Pyrolysis of electrical and electronic wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 82(2), 179-183.
- [4] J. Guo, J. Li, Q. Rao y Z. Zu. (2008). Phenolic Molding Compound Filled with Nonmetals of Waste PCBs. *Environmental Science & Technology*, 42(2), 624-628.
- [5] J. Guo, J. Guo y Z. Xu. (2009). Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 168(2-3), 567-590.
- [6] V. Goodship y A. Stevels. (2012). *Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook*. (1ra Ed). Conwall, Reino Unido: TJ International Ltd.
- [7] N. H. Hoe, A. Salmiaton y H. Hizam. (2014). Catalytic Pyrolysis and a Pyrolysis Kinetic Study of Shredded Printed Circuit Board for Fuel Recovery. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 9(3), 224-240.
- [8] E. Kaisersberger, S. Knappe, H. Mohler y S. Rahner. (2004). *TA for Polymer Engineering: DSC TG DMA TMA*. (1ra Ed). Wurzburg, Alemania: Netzsch-Geratebau.
- [9] J. La Dou (2006). Printed circuit board industry. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 209(3), 211-219.
- [10] M. Oguchi, H. Sakanamura y A. Terazono. (2013). Toxic metals in WEEE: Characterization and substance flow analysis in waste treatment processes. *Science of the Total Environment*, 463(8), 1124-1132.
- [11] P. A. Wager, M. Schlupe, E. Muller y R. Gloor. (2011). RoHS regulated Substances in Mixed Plastics from Waste Electrical and Electronic Equipment. *Environmental Science & Technology*, 46(2), 628-635.