

METODOLOGÍA BASADA EN FUNDENTES PARA LA OBTENCIÓN DE  
METALES PRECIOSOS PRESENTES EN LA CHATARRA ELECTRÓNICA

LEYNER ALEXANDER USEDA CUEVAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICOQUÍMICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES  
BUCARAMANGA

2019

METODOLOGÍA BASADA EN FUNDENTES PARA LA OBTENCIÓN DE  
METALES PRECIOSOS PRESENTES EN LA CHATARRA ELECTRÓNICA

LEYNER ALEXANDER USEDA CUEVAS

Trabajo de grado: Proyecto de investigación para optar al título de ingeniero  
metalúrgico

Director

PEDRO LUIS DELVASTO ANGARITA  
Doctor en ciencia y tecnología de materiales

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FISCOQUÍMICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE LOS MATERIALES  
BUCARAMANGA

2019

## DEDICATORIA

*A mi mamá y mi familia, todos mis logros son suyos, todas mis sonrisas son por ustedes.*

*A Santiago, Leonardo, Andrés, Karol, Andrea, a la banda y muchos otros amigos, que sin dudarlo y sin pedir nada a cambio han estado junto a mí brindándome conocimiento y palabras de aliento para emprender nuevos proyectos.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Ing. Luz Marina Duarte García, encargada de la sección de inventarios de la Universidad Industrial de Santander, su colaboración fue crucial en la obtención de la materia prima para desarrollar el presente proyecto.

Al personal técnico de la escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, por sus conocimientos técnicos y consejos a la hora de desarrollar el proyecto.

Al profesor Pedro Delvasto por su apoyo incondicional e increíble comprensión.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	15
1. OBJETIVOS .....	17
1.1. OBJETIVO GENERAL .....	17
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. MARCO REFERENCIAL.....	18
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	20
3.1. MATERIAS PRIMAS.....	21
3.2. TRITURACIÓN Y SEPARACIÓN EN MESA VIBRATORIA.....	23
3.3. LIXIVIACIÓN DEL COBRE .....	25
3.4. CALCINACIÓN .....	27
3.5. ENSAYO AL FUEGO.....	27
3.6. FUSION OXIDANTE .....	27
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
4.1. MATERIA PRIMA.....	29
4.2. TRITURACIÓN Y SEPARACIÓN .....	29
4.2. ANÁLISIS DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN .....	33
4.3. PROCESO DE CALCINACIÓN DE LOS PRODUCTOS SÓLIDOS PROVENIENTES DE LIXIVIACIÓN .....	36
4.4. ANÁLISIS QUÍMICO DEL CONCENTRADO METÁLICO.....	37
4.5. FUSIÓN OXIDANTE .....	38
4.6. IMPLICACIONES DE ESTOS RESULTADOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN INDUSTRIAL DE ESTOS PROCESOS DE RECICLAJE. ....	40
5. CONCLUSIONES .....	41
6. RECOMENDACIONES .....	42

BIBLIOGRAFÍA.....43

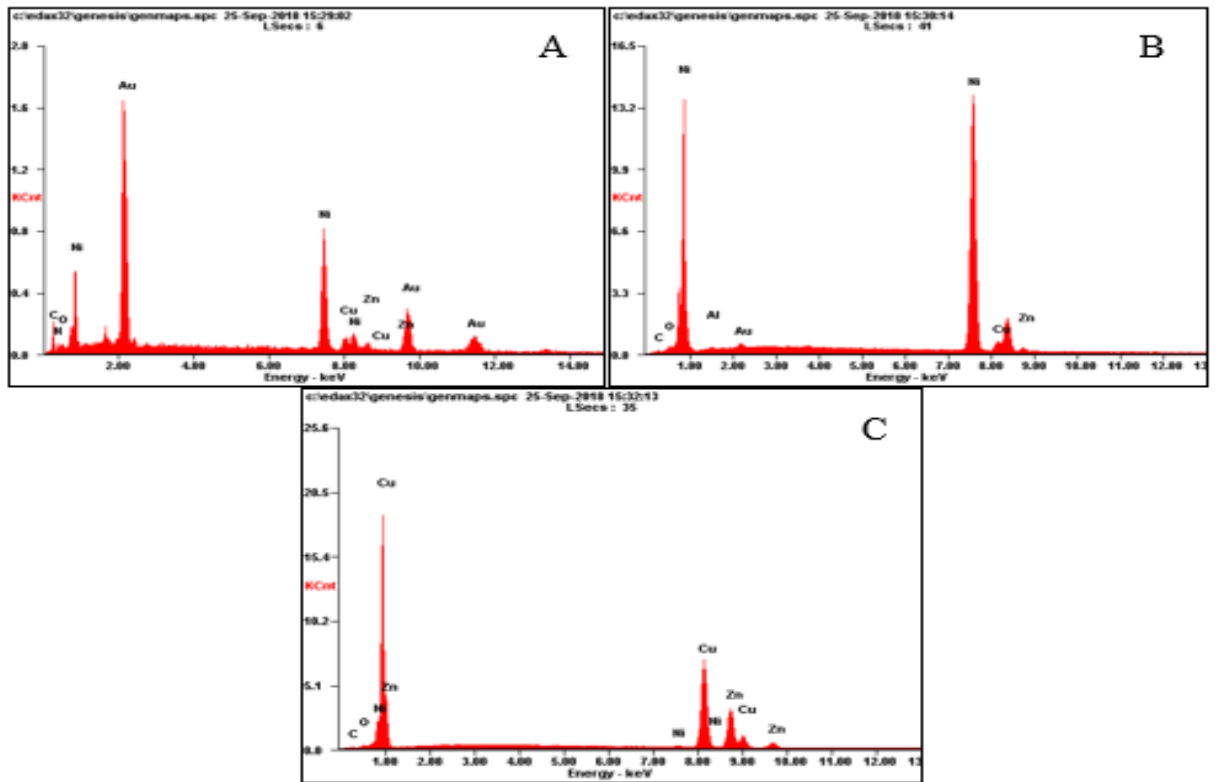
ANEXOS .....45

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Requerimientos teóricos de reactivos para la extracción de cobre en las muestras.....	26
Tabla 2. Fundentes usados y respectivos puntos de fusión. ....	28
Tabla 3. Resultados análisis digirmaizer para una muestra de flujo metálico.....	30
Tabla 4. Resultados Composición química normalizada promedio FRX muestra 1 .....	32
Tabla 5. Resultados Composición química normalizada promedio FRX muestra 2 .....	33
.Tabla 6. Concentración elemental del licor .....	33
Tabla 7. Composición química promedio zona 1 y 2.....	35
Tabla 8. Resultados de la composición química promedio de la aleación obtenida mediante ensayo al fuego SEM-EDS.....	37
Tabla 9. Composición química promedio de los puntos 1, 2, 3, 4 y general de la aleación final obtenida .....	38

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo propuesto para recuperar metales preciosos a partir de desechos electrónicos [10]. .....	19
Figura 2. Diagrama de flujo para la metodología experimental seguida en la presente investigación. ....	20
Figura 3. Componentes electrónicos de las TCI recuperadas de las computadoras desechadas. ....	21
Figura 4. TCI depopulada. ....	22
Figura 5. Fracción metálica sin interés.....	23
Figura 6. Pilas, condensadores, CI, MRV. ....	23
Figura 7. Proceso fusión oxidante. A) Con soplete. B) Cuchara de fundición. ....	28
Figura 8. Micrografía analizada por SEM-EDS a 5000x. Fases presentes en la fracción metálica de estudio. ....	29
Figura 9. Análisis químico SEM-EDS. A) Espectro recubrimiento superficial. B) Espectro recubrimiento intermedio. C) Espectro de la matriz.	



.....30

Figura 10. Diagrama proceso de trituración y separación en mesa vibratoria. ....31

Figura 11. Porción de flujos obtenidos en el proceso de separación. A) Metálico. B) polimérico. ....32

Figura 12. Flujo másico de lixiviación por etapas. ....33

Figura 13. Lixiviación por etapas. A) Sólidos restantes etapa 2. B). Sólidos restantes etapa 3. C) Filtro con precipitados e insolubles de etapa 1. D) Filtro con recubrimientos de oro etapa 3. ....35

Figura 14. Precipitados e insolubles de lixiviación analizadas por SEM-EDS. A) Zona 1. B) Zona 2. ....36

Figura 15. Diagrama proceso de calcinación. ....36

Figura 16. Resultados ensayo al fuego. A) Aleación Doré. B) Micrografía analizada por SEM-EDS 200X. ....37

Figura 17. Micrografía analizada por SEM-EDS 500X. A) precipitados 1-2. B) Matriz y compuesto de equilibrio 3-4. ....38

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Porcentaje de peso de metales en diferentes TCI: Fracciones Fracturada (M), Magnética (MA) y no magnética (NMA) Fuente: Tomado y adaptado de Flavia et al., (2015). .....	45
Anexo B. Recopilación de resultados para el reciclaje de PCBs mediante procesos de lixiviación [8], [9], [10], [11].....	46
Anexo C. Procesos pirometalúrgicos típicos para el reciclaje de metales presentes en los desechos electrónicos. Tomado de Cui y Zhan (2008).....	47
Anexo D. Proceso de lixiviación del cobre.....	47
Anexo E. Caracterización química del metal de interés estudiado.....	47
Anexo F. Calculo de la cantidad de ácido sulfúrico para lixiviar 1g de cobre y ley/pureza de oro en la materia prima.....	55
Anexo G. Diagramas de Ellingham.....	56

## RESUMEN

**TÍTULO:** METODOLOGÍA BASADA EN FUNDENTES PARA LA OBTENCIÓN DE METALES PRECIOSOS PRESENTES EN LA CHATARRA ELECTRÓNICA\*

**AUTOR:** LEYNER ALEXANDER USEDA CUEVAS\*\*

**PALABRAS CLAVE:** TARJETA DE CIRCUITO IMPRESO, FUSIÓN OXIDANTE, METALES PRECIOSOS, DEPOPULACIÓN

**DESCRIPCIÓN:** En el siguiente trabajo se diseñó una metodología para la obtención de metales preciosos presentes en los componentes electrónicos provenientes de las tarjetas de circuito impreso las cuales fueron recuperadas de los residuos de computadoras almacenadas y fuera de servicio. Se realizó una depopulación de cada una de las placas base para la selección, conminución y separación de los componentes ricos en metales preciosos, seguidos de tres etapas de lixiviación y filtración como sigue: Lixiviación con solución de 100ml 2M de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$  96%) y adición de 20 ml peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$  35%) durante 3h a 25°C filtrando y renovando la solución hasta completar 9h. Una vez obtenido el concentrado y los filtros en cada etapa se realizó una calcinación a 700°C y finalmente una fusión oxidante con soplete y la mezcla de fundentes  $KNO_3$ ,  $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ,  $Na_2CO_3$  y vidrio en polvo. Los resultados obtenidos se caracterizaron mediante microscopía electrónica de barrido con espectrometría de energía dispersa, espectrometría

de fluorescencia de rayos-x de energía dispersiva, microscopio electrónico de barrido y ensayo al fuego. Con lo cual se muestra que la aleación obtenida por fusión oxidante contiene metales preciosos como oro y plata además de una reducción sustancial de los elementos base que componen la materia prima.

---

\*Proyecto de grado

\*\*Facultad de Ingeniería Físicoquímica. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y ciencia de materiales.

Director: Pedro Luis Delvasto Angarita, Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales

### **ABSTRACT**

**TITLE:** METHODOLOGY BASED ON FLUXES FOR OBTAINING PRECIOUS METALS PRESENT IN ELECTRONIC SCRAP\*

**AUTHOR:** LEYNER ALEXANDER USEDA CUEVAS\*\*

**KEYWORDS:** PRINTED CIRCUIT BOARD, OXIDANT FUSION, PRECIOUS METALS, DEPOPULATION.

**DESCRIPTION:** In the following work, a methodology was designed to obtain precious metals present in the electronic components coming from the printed circuit cards, which were recovered from the waste of, stored and out of service computers. A depopulation of each of the base plates was carried out for the selection, comminution and separation of the components rich in precious metals followed by three stages of leaching and filtration in the following way: Leaching with solution of 100ml 2 M of sulfuric acid ( $H_2SO_4$  96%) and addition of 20 ml hydrogen peroxide ( $H_2O_2$  35%) for 3 h at 25°C filtering and renewing the solution until completing 9h. Once the concentrate was obtained together with the filters in each stage, calcination was carried out at 700°C and finally an oxidizing fusion with a torch and the mixture of fluxes  $KNO_3$ ,  $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$ ,  $Na_2CO_3$  and glass powder. The samples obtained from the oxidant fusion were characterized by scanning electron microscopy with scattered energy spectrometry, Dispersive Energy X-ray Fluorescence Spectrometry, Scanning

Electron Microscope and Fire Testing. This shows that the alloy obtained by oxidative fusion contains precious metals such as gold and silver as well as a substantial reduction of the base elements that make up the raw material.

---

\* Bachelor Thesis

\*\*Facultad de Ingeniería Físicoquímica. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y ciencia de materiales.

Director: Pedro Luis Delvasto Angarita, Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales

## **INTRODUCCIÓN**

El crecimiento acelerado de la población junto con el rápido desarrollo de la industria electrónica ha dado como resultado un aumento exponencial en la generación de residuos eléctricos y electrónicos, los cuales por su alto contenido de elementos peligrosos y contaminantes no pueden tratarse mediante técnicas convencionales. Se genera un nuevo riesgo social y ambiental para el manejo, disposición final y tratamiento de estos residuos. Además de ser componentes potencialmente peligrosos, podrían representar una fuente de metales y un reto científico para desarrollar métodos de extracción eficientes con el propósito de reducir el impacto ambiental en especial de aquellos residuos que comprometen los recursos naturales a disposición del ser humano.

Los aparatos eléctricos y electrónicos están compuestos de cientos de materiales diferentes, tanto valiosos como potencialmente peligrosos. Oro, plata, paladio y cobre son algunos de los materiales valiosos que se pueden recuperar de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos; plomo, cadmio, mercurio y arsénico son algunos de los componentes peligrosos que pueden estar presentes en los equipos eléctricos y electrónicos en desuso [9].

Según un diagnóstico de electrodomésticos y aparatos electrónicos de consumo realizado por la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia, el Centro Nacional de Producción Más Limpia y la Secretaría Federal de Asuntos Económicos de Suiza, se estima que en el 2008 hubo una generación de 40 mil

500 toneladas de basura electrónica en Colombia, y que para el 2013 ya se proyectan 75 mil toneladas [13]. Computadoras, televisores, equipos de audio, monitores, celulares, controles remotos, impresoras, y juguetes que funcionan a pila, hacen parte, entre otros, de este inventario, que en su gran mayoría llega a los basureros, por carencia de una legislación que controle el destino final de los residuos de los aparatos eléctricos y electrónicos, y por la falta de tecnologías eficientes que recuperen los materiales; existen estudios que confirman que el 25% de los aparatos eléctricos y electrónicos es material recuperable, el 72% es reciclable y sólo el 3% es desechable. [4]

El proceso de reciclaje de las tarjetas de circuito impreso (TCI) permite recuperar materias primas, principalmente metales, lo cual aporta a la preservación de los recursos naturales limitados y no renovables y la reducción del consumo de energía en la extracción de éstos. Por ejemplo, las TCI de computadores contienen hasta un 20 % en peso de Cu y 250 g/t de Au, que son significativamente altos comparados con menas de cobre (~0.5 – 1% Cu) y de oro (~1 – 10 g/t Au) [14]. Este tipo de minería urbana, además de tener un impacto positivo sobre el medio ambiente y la economía, implica menor costo, ahorro de energía y de recursos naturales que la extracción directa [15].

Partiendo de la realidad anteriormente descrita, el presente proyecto académico tiene como objeto de estudio la recuperación de metales preciosos que se encuentran en las tarjetas de circuito impreso, provenientes de las computadoras en desuso mediante un circuito de beneficio y procesos pirometalúrgicos, con el fin de producir una aleación con contenido significativo de oro y otros metales, como alternativa viable para la obtención de metales valiosos y con ello aportar soluciones al problema de flujo, manejo y disposición final de residuos electrónicos.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Proponer una metodología para la obtención de una aleación que contiene oro, a través de una serie de etapas metalúrgicas que incluyen fusión oxidante en presencia de agentes fundentes, empleando como materia prima tarjetas de circuito impreso desechadas.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Establecer un pretratamiento fisicoquímico adecuado para disminuir el contenido de metales base (Cu, Fe, Al, etc.) que presentan las tarjetas de circuito impreso desechadas, de manera de obtener un concentrado aurífero.
2. Implementar un sistema basado en la fusión oxidante con adición de agentes fundentes, para fundir el concentrado aurífero obtenido de las tarjetas de circuito impreso y producir una aleación que contenga oro y plata.
3. Analizar la factibilidad del proceso teniendo como objeto de estudio la eficiencia, la viabilidad técnica y las relaciones de costo/beneficio como alternativa para su implementación a escala industrial.

## 2. MARCO REFERENCIAL

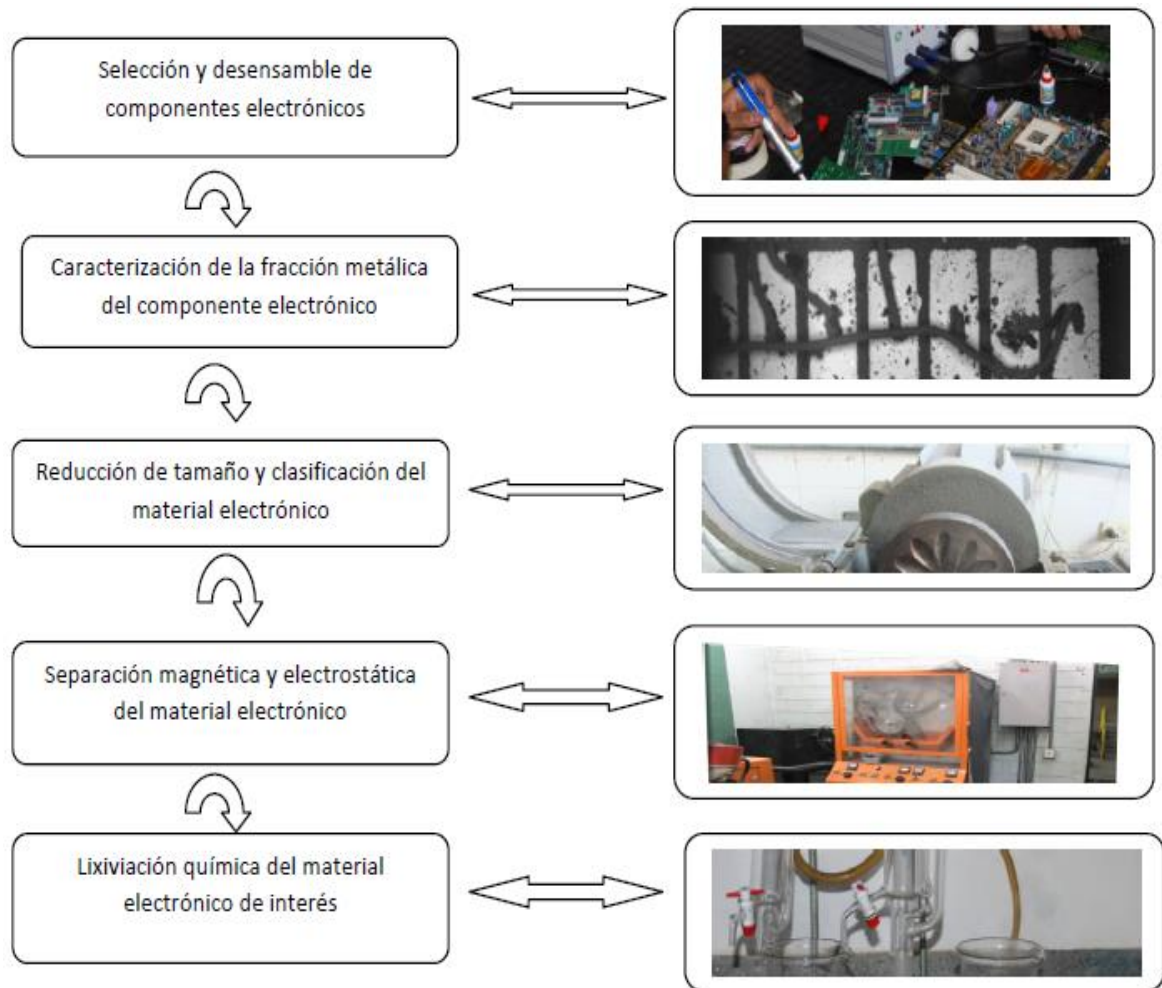
Dada la amplia variedad en la composición metálica de las TCI (Anexo A). La recuperación de metales preciosos implica contar con tecnologías y métodos eficientes para la ejecución de las operaciones de extracción de materiales metálicos, oro, plata, elementos del grupo del platino, entre otros, que involucran procedimientos propios del procesamiento de minerales tales como reducción de tamaño, concentración gravimétrica, separación por medios densos, al igual que métodos que involucran disolución selectiva de elementos y operaciones a altas temperaturas como pirolisis y fundición.

Los procesos actualmente utilizados involucran técnicas hidrometalúrgicas, en los cuales se realizan lixiviaciones ácidas o básicas de metales, extracción por solventes y procesos electrometalúrgicos. En la Figura 1, se reporta un diagrama de flujo (operaciones unitarias) a nivel de laboratorio para la obtención de metales preciosos y del grupo del platino presente en los desechos electrónicos [10].

Los procesos hidrometalúrgicos son quizá los más estudiados para el tratamiento de las TCI, esto debido a su bajo costos, impacto ambiental reducido y altas tasas de recuperación de metales. En el anexo B se reportan procesos para la extracción de metales en los residuos electrónicos [12].

En el anexo C se describen los procesos pirometalúrgicos típicos para el reciclaje de metales presentes en los desechos electrónicos. Se tiene que los procesos de alta temperatura son una alternativa posible, cuando se dispone de grandes cantidades de material.

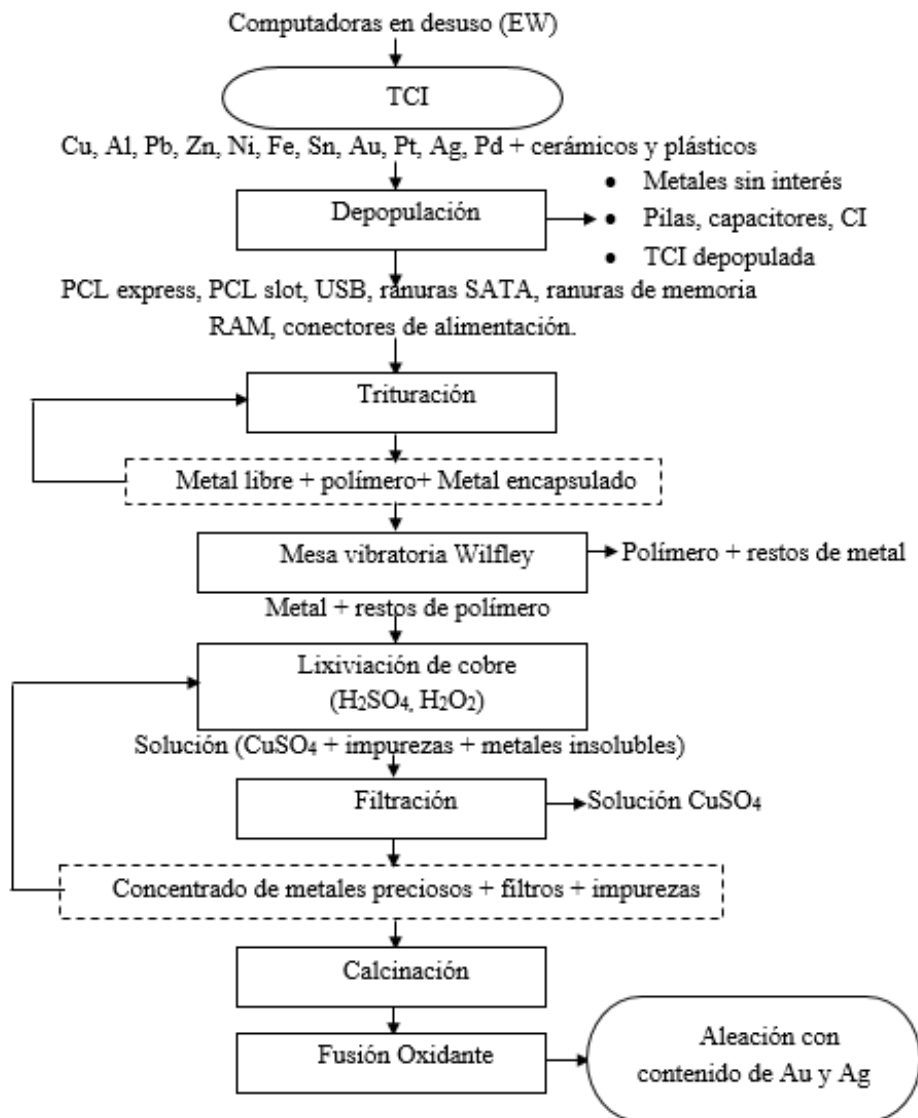
**Figura 1.** Diagrama de flujo propuesto para recuperar metales preciosos a partir de desechos electrónicos [10].



### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se propuso desarrollar el proceso mostrado en el diagrama de flujo de la Figura 2, tomando como base en lo reportado por los autores Oliveros, H., (2011), Silvas, F., Jiménez, M., Caldas, M., Moraes, C., Espinosa, D., Tenório, J. (2015) y Chaverra, D., (2014) [2].

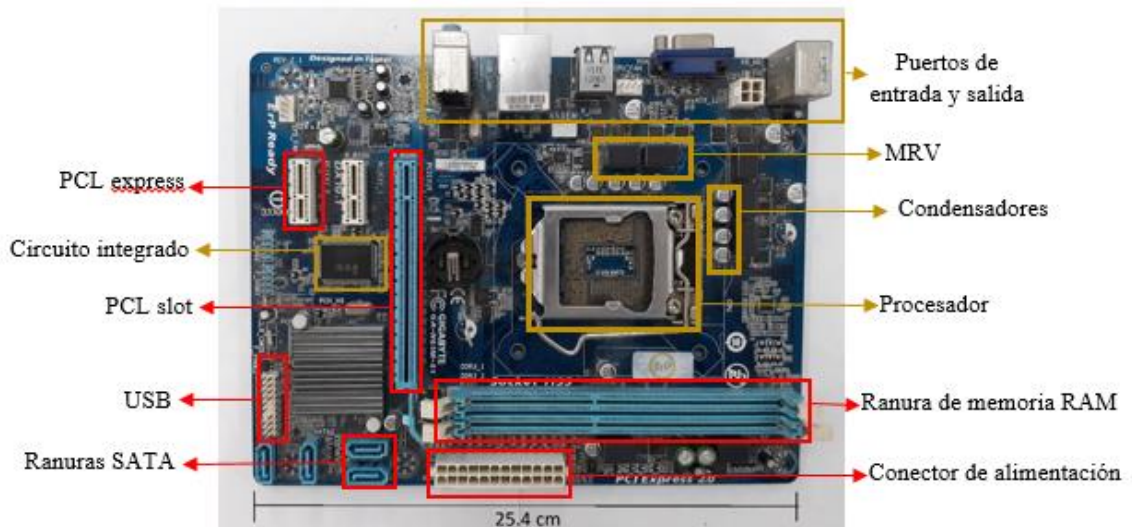
**Figura 2.** Diagrama de flujo para la metodología experimental seguida en la presente investigación.



### 3.1. MATERIAS PRIMAS

Las tarjetas de circuito impreso fueron obtenidas mediante el desensamblaje manual de computadoras en desuso, las cuales provenían de equipos antiguos dados de baja por la división de inventarios de la Universidad Industrial de Santander. Estas tarjetas se construyen en base a plásticos termoestables con fibra de vidrio como material esquelético. Diferentes componentes eléctricos tales como semiconductores, resistores, condensadores o chips son montados sobre las tarjetas e interconectados mediante soldadura de plomo, estaño y otros metales pesados. Los metales encapsulados dentro de las resinas y cerámicos fueron liberados mediante procesos mecánicos y caracterizados mediante microscopía electrónica de barrido con espectrometría de energía dispersa, espectrometría de fluorescencia de rayos-x de energía dispersiva y ensayo al fuego.

**Figura 3.** Componentes electrónicos de las TCI recuperadas de las computadoras desechadas.



Las TCI son un medio para sostener mecánicamente y conectar eléctricamente componentes electrónicos a través de rutas o pistas de material conductor

grabadas desde hojas de cobre laminadas sobre un sustrato no conductor. Los metales más comunes son Cu, Pb, Zn, Fe, Cd, Be, Cr, Au, Pt, Pd, y Ag y los plásticos son principalmente resinas epoxi que contienen retardantes de llama halogenados tóxicos.

Un total de 12 TCI fueron obtenidas con un peso promedio de 134 g cada una, dando como resultado una masa total de 5250g. Cada TCI fue calentada durante 15 minutos a una temperatura de 200°C en la plancha de calentamiento con el objetivo de ablandar la soldadura de los componentes electrónicos para ser retirados eventualmente con ayuda de pinzas manuales.

**Figura 4.** TCI depopulada.



Luego del desensamblaje manual, se producen cuatro flujos de materiales que se clasifican según sus características, naturaleza y composición con base a la literatura consultada a los resultados de las técnicas de caracterización de materiales. En la figura 5 se muestra la fracción de metal sin interés, compuesta por metales como Al, Cu, acero entre otros, provenientes de disipadores de calor, procesadores de pines, placas base de los puertos de entrada/salida y los zócalos de los procesadores; esta fracción representa un 38,5% de la masa total procesada con un peso de 2023 g. Se retiraron también pilas, condensadores, capacitores, reguladores de voltaje (MRV) y circuitos integrados (CI) los cuales poseen electrolitos que pueden ser tóxicos y corrosivos, como se puede observar



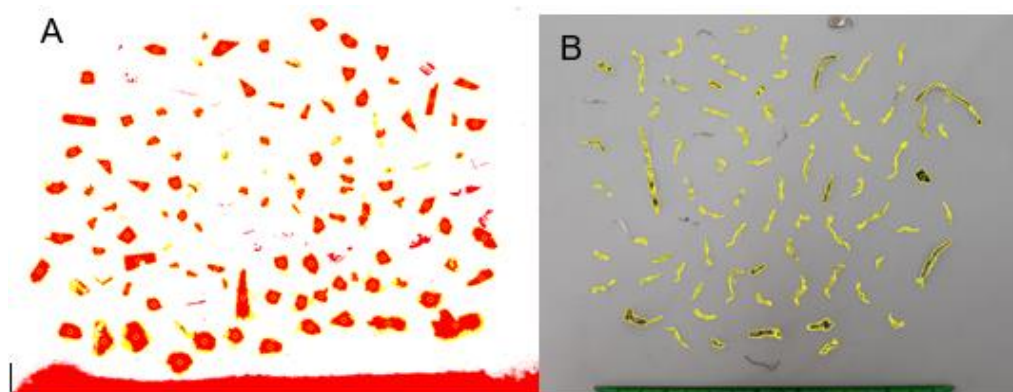
metálica de la fase polimérica, en la mesa vibratoria el polímero es desplazado por el movimiento y el flujo de agua que es almacenado en recipientes, por otra parte el metal es retenido en los diferentes resaltes de la mesa. Estos procesos garantizan que las emisiones de material particulado sean mínimas. La masa total procesada fue de 1071 g y en cada flujo se tiene una masa de 354 g y 717 g respectivamente. El material procesado se clasifica en dos flujos: metálico y polimérico. La clasificación de tamaño y el cálculo de la eficiencia se realizaron mediante el uso del software de análisis de imágenes Digimizer image analysis software, como se puede evidenciar en la figura 9.

**Figura 7.** A) Trituradora de cuchillas. B) Material luego se liberación total. C) Mesa Wilfley. D) Material polimérico separado.



Para el análisis mediante el software las muestras se esparcieron en bandejas y utilizando un cuadrado de  $1 \text{ cm}^2$  se tomaron 7 muestras, 4 en las esquinas y 3 en la sección central, cada patrón tomado se esparció en una hoja blanca con una regla. Las características de los elementos estudiados se muestran en la lista de mediciones, y el área media, diámetro y perímetro se muestran en la ventana de estadística. Este método se aplicó a los dos flujos y se promediaron los resultados.

**Figura 8.** Análisis del software digimizer. A) Binarización binaria. B) Analizar objeto.



El análisis químico de los sólidos en el flujo metálico se realizó utilizando la técnica de análisis: Espectrometría de fluorescencia de rayos-X de energía dispersa. Para la preparación se tomaron 4 muestras significativas de la masa total de sólidos de 10 g cada una denominadas como sigue: muestra 1, muestra 2, muestra 3, muestra 4, seguida de una fusión con soplete, usando llama reductora, para obtener una aleación metálica con sección transversal de al menos 1 cm<sup>2</sup> según los requerimientos del ensayo. Se dispuso del equipo: Espectrómetro de fluorescencia de rayos-X de energía dispersa Shimadzu EDX-800HS.

### **3.3. LIXIVIACIÓN DEL COBRE**

Para realizar el proceso de lixiviación de cobre (anexo D) y otros metales, se tomó la fracción metálica del concentrado, obtenida en la etapa anterior, la cual contenía un 93.4% de cobre en promedio. Las pruebas se realizaron en 100 ml de disolución, y se decidió utilizar una cantidad de sólidos de 10g y 20g. Los requerimientos teóricos de reactivos para la extracción de cobre en las muestras se resumen en la tabla 3 y anexo D.

Para lixiviar el cobre contenido en la muestra más pequeña, 10g, en una solución de 100 ml, se requieren 7.85 ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, es decir una solución de 1.47 M. Para la muestra de 20 g se requiere una solución de 2.95 M, de esta manera se decidió

trabajar con soluciones de 2M y 4M para realizar el proceso con exceso máximo de ácido sulfúrico del 140% para la muestra más pequeña. De igual manera para lixiviar el cobre en la muestra más pequeña, 10g, en una solución de 100 ml, se requiere aproximadamente 10.93 ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (35%). Se decidió trabajar con 20ml de y 40 ml, lo cual significa un exceso máximo de peróxido de hidrógeno del 183% para la muestra más pequeña.

Tabla 1. Requerimientos teóricos de reactivos para la extracción de cobre en las muestras.

Muestra (g)	Requerimientos teóricos		Concentración en 100ml		
	Cu (g)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (ml)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (ml)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (M)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (ml aprox)
10	0.934*10= 9.34	7.85	10.93	1.47	11
20	0.934*20= 18.68	15.69	21.86	2.95	22

Las pruebas experimentales fueron realizadas en una solución de 100 ml en un beaker de vidrio de 600 ml de capacidad sobre una plancha a temperatura ambiente durante 9 horas con filtración y cambio de solución en periodos de 3 horas por cada muestra de 10 g. Una vez cumplido en tiempo de la primera etapa, se decantó la solución con el objetivo de cambiar el solvente y mantener el resto de sólido en el fondo del beaker. Luego de finalizar las 9 horas de lixiviación se decanta la solución junto con los sólidos restantes en el papel filtro.

El volumen de solvente desplazado en las etapas 1, 2 y 3 de lixiviación fue almacenado y dispuesto en el laboratorio de hidro y electro metalurgia. El análisis químico de la solución lixivante se realizó mediante la técnica de análisis TXRF, para lo cual se tomó una muestra de 150ml del volumen desplazado en las etapas de filtración y se determinó la concentración de cada elemento en solución.

### **3.4. CALCINACIÓN**

La etapa de calcinación se divide en dos partes, denominadas así: secado del concentrado y calcinado de la muestra. En la primera etapa, se dispone la muestra en un horno a una temperatura de 100°C durante 1 hora y en la segunda etapa se introdujo la muestra secada en un horno de resistencia (mufla) durante 1 hora a 750°C. Este proceso elimina la humedad y los compuestos volátiles, dando como resultado un material concentrado en forma de polvo que a su vez es mucho más sencillo de procesar para el ensayo de fusión final.

### **3.5. ENSAYO AL FUEGO**

Se introdujo una muestra de 19.4g del material concentrado a un horno de resistencia eléctrica (mufla) a 1050°C durante 70min con la mezcla de fundentes y una adición de 20g litargirio, obteniéndose un botón de plomo. Una vez obtenido el botón se realizó una fusión oxidante para eliminar el plomo, dando como resultado una aleación Doré.

### **3.6. FUSION OXIDANTE**

Para obtener una aleación con contenido de Au y Ag a partir del concentrado, primero se estudiaron y seleccionaron los fundentes utilizados en el proceso de fusión oxidante. Los fundentes usados se muestran en la tabla 4. Las mezclas de las sales  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  y vidrio en polvo se utilizaron para obtener el punto de fusión más bajo, además de una alta fluidez al momento de la fusión, mientras que la sal  $\text{KNO}_3$  se adicionó con el fin de brindar un ambiente altamente oxidante debido a su descomposición y generación de oxígeno además de su alto poder de oxidación. Para los 10.78 g de muestra a ensayar se prepararon 55 g de la mezcla de fundentes según la tabla 4. Los cálculos para la adición de fundente se realizaron de acuerdo a [11].

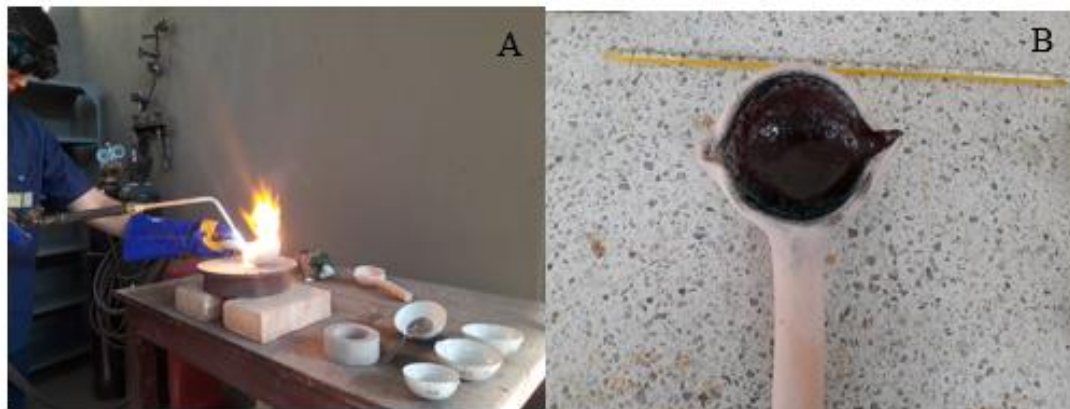
En la figura 10 se puede observar que las pruebas experimentales fueron realizadas en una cuchara cerámica de fundición para joyería, con capacidad de 100 g (B), la fuente de calor para la fusión procede de la combustión de los gases oxígeno (O<sub>2</sub>) y acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) las cuales pueden alcanzar temperaturas aproximadas de 3200°C (A).

La cuchara fue previamente calentada y curada, adicionando 5 g del fundente seguida de la adición total de la muestra y adición parcial del fundente hasta obtener una fase totalmente líquida. La fusión se realizó durante 12 min con llama oxidante y un consumo total de 30 g de fundente, una vez terminada la fusión y dejando reposar el material fundido durante 10 min se obtuvieron dos fases con una masa de total de 17.243 g y una vez separada la escoria y el metal se obtuvo una aleación con una masa de 1.383 g como resultado final del proceso propuesto

Tabla 2. Fundentes usados y respectivos puntos de fusión.

No	Fundente	Punto de fusión (°C)
1	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (15 gr)	851
2	KNO <sub>3</sub> (30 gr)	334
3	Na <sub>2</sub> [B <sub>4</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub> ]·8H <sub>2</sub> O (5gr)	741
4	Vidrio en polvo (5 gr)	1475

**Figura 7.** Proceso fusión oxidante. A) Con soplete. B) Cuchara de fundición.

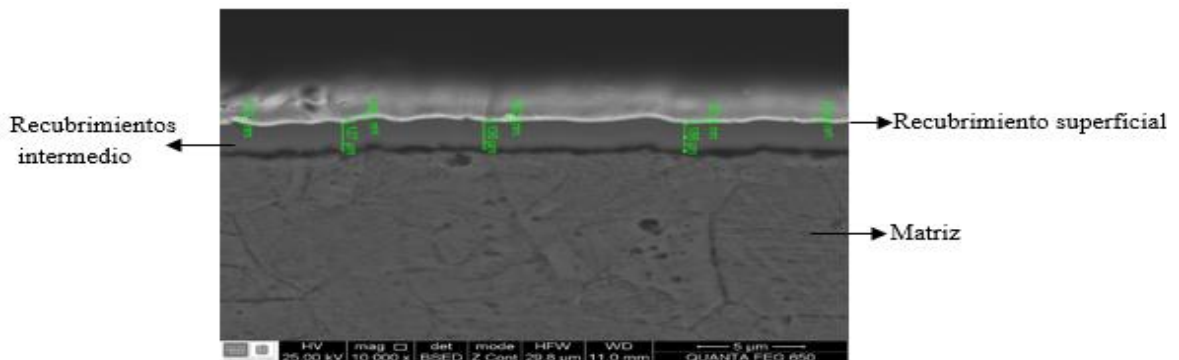


## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. MATERIA PRIMA

El metal liberado en forma de hebras se compone de tres fases que corresponden a matriz, un recubrimiento intermedio y uno recubrimiento superficial como se puede observar en la figura 11. En la matriz se encuentra la mayor cantidad de metales base (Cu, Zn, Ni) mientras que en los recubrimientos hay presencia de metales preciosos y algunos metales base (Au, Ag, Al, Fe, Ni). Los resultados de los análisis de los pines se muestran en la figura 12 y los espectros y tablas en el anexo E.

Figura 8. Micrografía analizada por SEM-EDS a 5000x. Fases presentes en la fracción metálica de estudio.



### 4.2. TRITURACIÓN Y SEPARACIÓN

En la figura 13 se detalla el flujo de masa en los procesos de trituración y separación en la mesa vibratoria. La eficiencia de separación del método escogido es del 95.7% en volumen y 95.6% en peso. Como resultado del proceso de trituración se tiene un flujo metálico con un tamaño de partícula promedio de 0.95 mm y un flujo polimérico con un tamaño de partícula de 0.84 mm como se evidencia en la tabla 5.

Figura 9. Análisis químico SEM-EDS. A) Espectro recubrimiento superficial. B) Espectro recubrimiento intermedio. C) Espectro de la matriz.

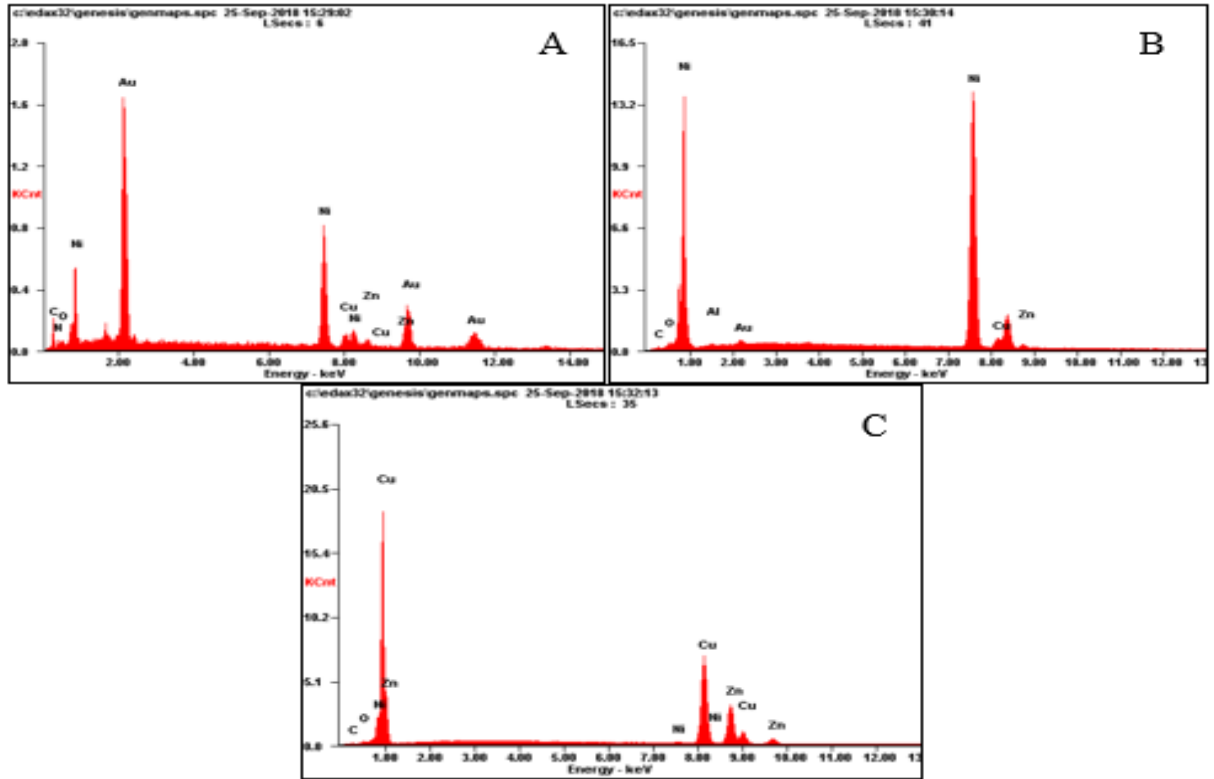
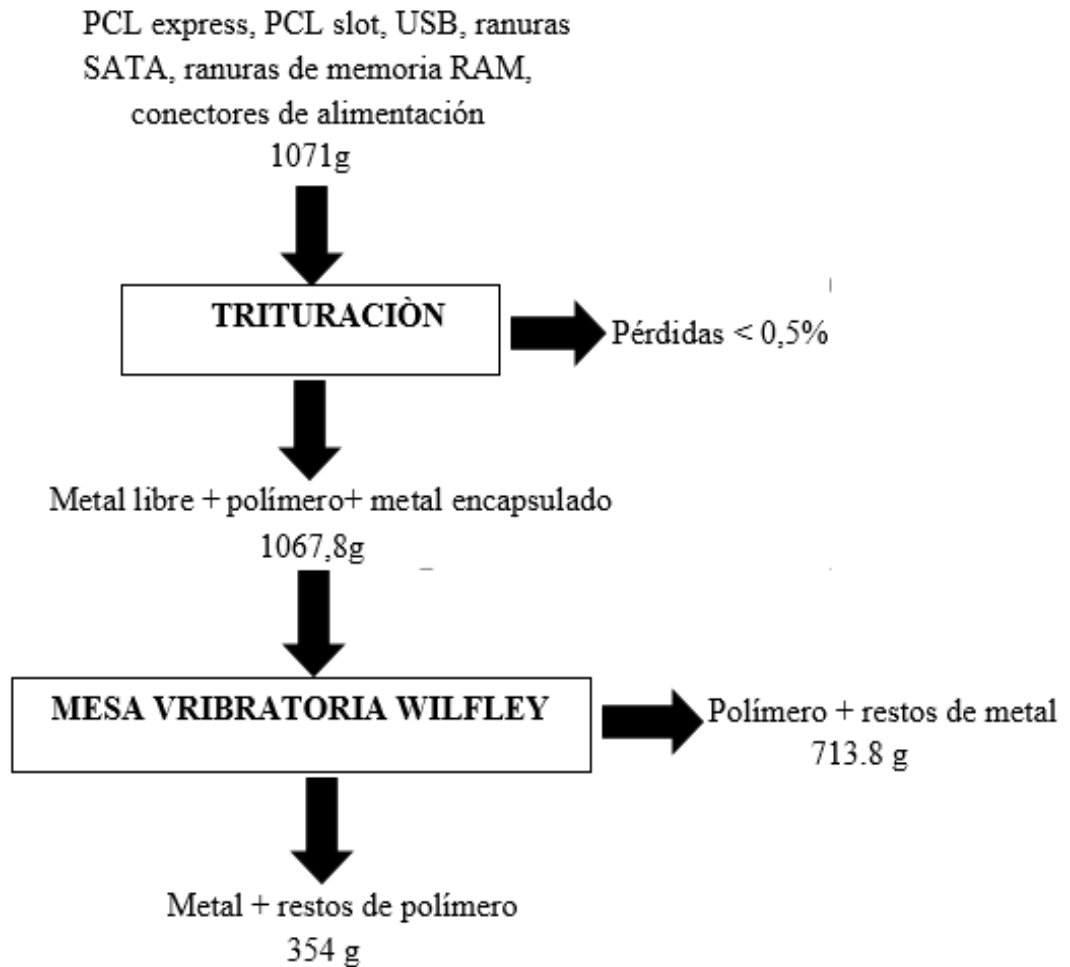


Tabla 3. Resultados análisis digirmaizer para una muestra de flujo metálico

Medidas	n	Dimensión	SD	Min	Max
Área	96	0,0816	0,1148	0,001	0,700
Perímetro	96	3,0340	2,7656	0,157	14,655
Longitud	96	1,0480	0,8482	0,049	4,959

Nota: el análisis de área se asume por estereología al ser equivalente a un análisis en volumen.

**Figura 10.** Diagrama proceso de trituración y separación en mesa vibratoria.



En la figura 14 A) se muestra el material resultante del proceso de trituración. Este material se procesó en la mesa vibratoria y se obtuvieron los dos flujos de la figura 14. Se tiene además que las pérdidas de material en la trituración y separación en mesa vibratoria es menor al 0,5%, lo cual se debe a que el espacio dentro de la trituradora es cerrado.

En la figura 14 B) se observa a simple vista poco contenido de metales y gran cantidad de material polimérico. Estos últimos pueden eliminarse en separación por medios densos o separación electrostática y pueden ser utilizados como materias primas para otros productos

**Figura 11.** Porción de flujos obtenidos en el proceso de separación. A) Metálico. B) polimérico.

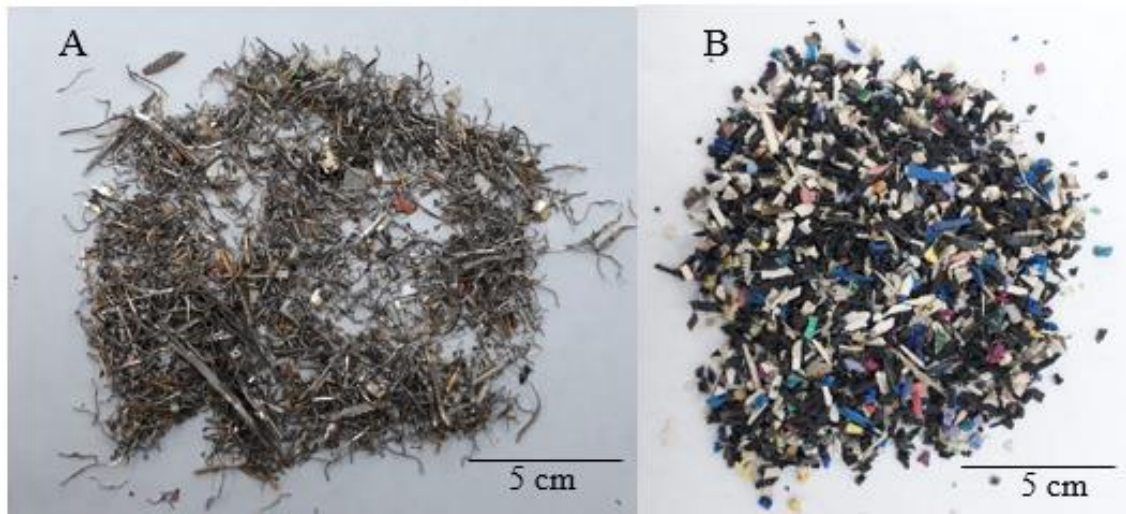


Tabla 4. Resultados Composición química normalizada promedio FRX muestra 1

Elemento	Composición (%)	Desviación media
Cobre	91.15	0.117
Estaño	5.86	0.067
Níquel	1.72	0.017
Calcio	0.92	0.048
Oro	0.12	0.023
Plomo	0.11	0.016
Hierro	0.07	0.006
Plata	0.06	0.011

Tabla 5. Resultados Composición química normalizada promedio FRX muestra 2

Elemento	Composición (%)	Desviación media
Cobre (Cu)	95.65	0.117
Estaño (Sn)	0.22	0.015
Níquel (Ni)	1.22	0.015
Zinc (Zn)	0.27	0.015
Oro (Au)	0.03	0.018
Plomo (Pb)	0.11	0.015
Hierro (Fe)	0.04	0.006
Plata (Ag)	0.009	0.010

#### 4.3. ANÁLISIS DEL PROCESO DE LIXIVIACIÓN

En la figura 15 se detalla el flujo de masa en el proceso de lixiviación en las tres etapas del proceso. En la tabla 8 se resume la concentración de cada elemento en el volumen de solución filtrado.

Figura 12. Flujo másico de lixiviación por etapas.

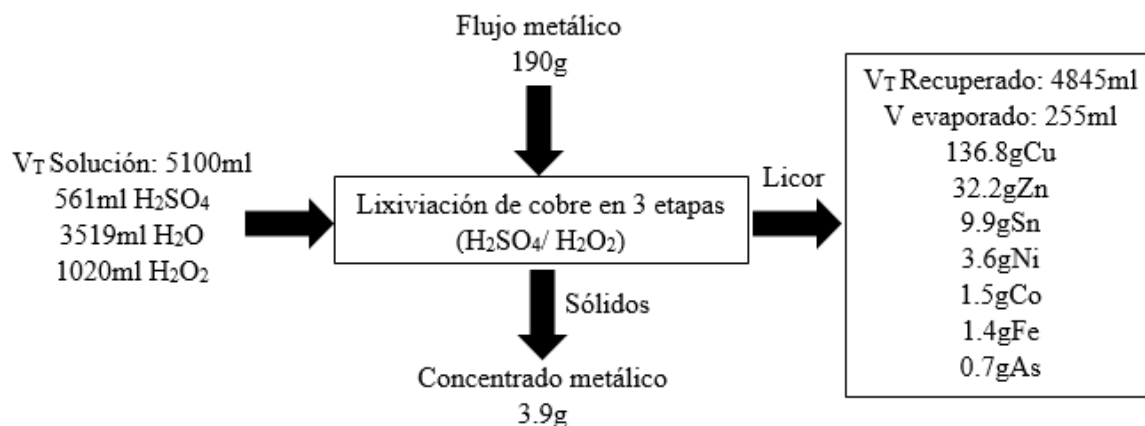


Tabla 6. Concentración elemental del licor

Elemento	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Sn
Cantidad mg/L	280.855	315.789	743.679	28244.464	6648.617	135.95	2058.808

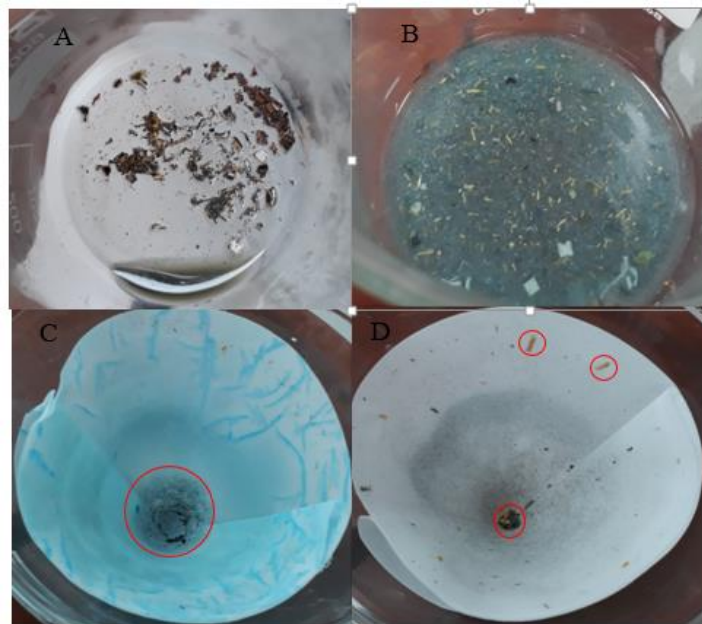
Las altas tasas de reducción de metales base ponen en manifiesto que el proceso de lixiviación establecido es secuencial y selectivo, primero se lixivian los metales base cobre y hierro principalmente mientras que a su vez se liberan las capas de los diferentes metales no solubles y ricos en oro (círculos rojos figura 16. D). Los resultados de esta extracción de metales base provenientes de residuos electrónicos en solución de ácido sulfúrico y adición de peróxido son comprobables a los resultados reportados por diferentes autores; Chaverra, D. [2] reporta la mejor extracción de cobre con un 95.2% obtenido con una solución de 2.32 M  $H_2SO_4$ , volumen de 18 ml  $H_2O_2$  durante 60 min, de igual forma estos resultados son equivalente con los valores reportados por [8] obteniéndose una extracción del cobre mayor al 97% además de otros elementos. Se utilizaron 190 g del flujo metálico en el proceso de lixiviación, obteniéndose un concentrado metálico más la masa de los filtros más la humedad de los mismos por cada etapa de 33.4 g, la reducción del flujo metálico ensayado fue del 98%. Se observó en la figura 16 que durante el proceso de lixiviación que la cantidad de sólidos tiene un efecto negativo sobre el proceso de extracción, ya que, a menor cantidad de sólidos, menor es la cantidad de cobre disponible para ser lixiviada y, por lo tanto, la extracción será mejor, esto además de que los reactivos están en exceso.

Solo los factores de concentración de ácido sulfúrico, volumen de peróxido de hidrógeno agregado y cantidad de sólidos tienen un efecto significativo sobre la extracción de cobre y otros metales base en el proceso de lixiviación. El peróxido de hidrógeno agregado tiene mayor efecto sobre la recuperación de cobre, esto se debe a que el oxígeno producido por la descomposición del  $H_2O_2$  reacciona con el cobre metálico para formar óxido cúprico, el cual puede reaccionar luego con el  $H_2SO_4$  para formar sulfato cúprico. De esta forma tanto el  $H_2O_2$  como el  $H_2SO_4$  actúan de forma positiva en el proceso de disolución.

Las altas tasas de reducción de metales base ponen en manifiesto que el proceso de lixiviación establecido es secuencial y selectivo, primero se lixivian los metales base cobre y hierro principalmente y a su vez se liberan las capas de los

diferentes metales no solubles y ricos en oro que son los círculos rojos en la figura 16 D).

**Figura 13.** Lixiviación por etapas. A) Sólidos restantes etapa 2. B). Sólidos restantes etapa 3. C) Filtro con precipitados e insolubles de etapa 1. D) Filtro con recubrimientos de oro etapa 3.

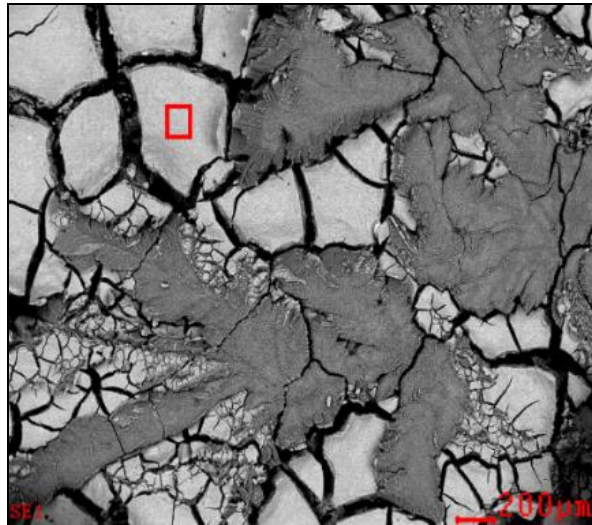


El material sólido resultante del proceso de lixiviación está constituido principalmente por precipitados en el círculo rojo figura 16 C), impurezas (material polimérico), filtros recolectados y metales no solubles en la figura 16 C) y D). En las tabla 9 se resume la composición química elemental promedio de los precipitados obtenidos en las primeras etapas de lixiviación para cada zona.

Tabla 7. Composición química promedio zona 1 y 2

%	C	N	O	Al	Si	P	S	Sn	Ca	Fe	Ni	Cu	Zn
Zona	1,1		34.0	0.1	0.3	1.3		38.7	1.1	0.	0.9	2.2	5.2
1	3	2.53	7	8	7	5	11.5	1	3	6	1	5	7
Zona	0.4	0.4	34.8	0.3		0.4	17.2		0.5	0.		28.	2.7
2	3	6	2	3	-	3	7	14.1	1	4	-	6	8

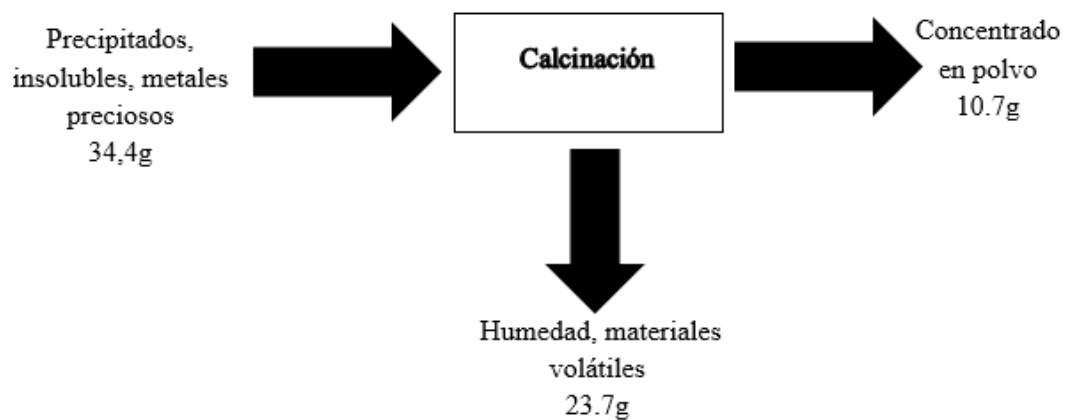
**Figura 14.** Precipitados e insolubles de lixiviación analizadas por SEM-EDS. A) Zona 1. B) Zona 2.



#### 4.4. PROCESO DE CALCINACIÓN DE LOS PRODUCTOS SÓLIDOS PROVENIENTES DE LIXIVIACIÓN

Según los resultados en la medición de pérdida de masa en el proceso de secado y calcinado, la diferencia corresponde a una reducción del 68.6% de la masa ensayada en este proceso. Una vez finalizado el proceso de calcinado se obtuvo un concentrado en polvo. En la figura 18 se puede evidenciar el proceso de calcinación realizado.

**Figura 15.** Diagrama proceso de calcinación.



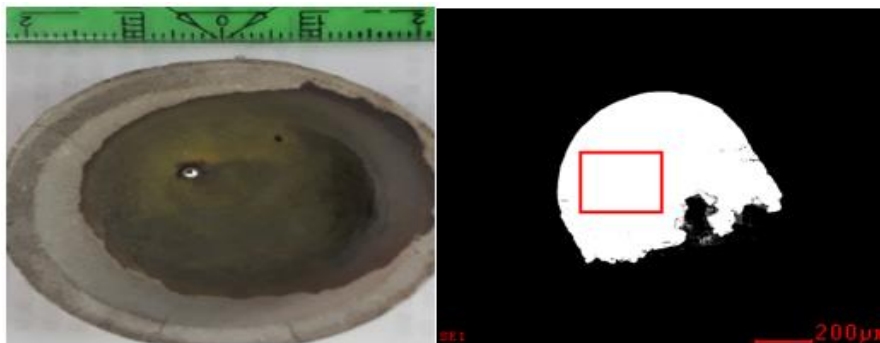
#### 4.5. ANÁLISIS QUÍMICO DEL CONCENTRADO METÁLICO

En la tabla 10 se muestran los resultados de la composición química promedio de la aleación obtenida en el ensayo al fuego para el análisis químico del concentrado en polvo luego del proceso de calcinación, se obtuvo un botón de plomo de 9.74 g y luego de la fusión oxidante se obtuvo una aleación Doré con una masa de 0.00489 g evidenciado en la figura 19.

Tabla 8. Resultados de la composición química promedio de la aleación obtenida mediante ensayo al fuego SEM-EDS.

Elemento	Peso%
C	1.85
N	2.20
O	1.18
Au	58.8
Ag	35.96

**Figura 16.** Resultados ensayo al fuego. A) Aleación Doré. B) Micrografía analizada por SEM-EDS 200X.



De acuerdo a los resultados obtenidos se estima la pureza y cantidad de oro y plata por tonelada de material (anexo F) dando como resultado: 148.2 gAu/ton, 90.6 gAg/ton y una pureza de 14.1 quilates.

#### 4.6. FUSIÓN OXIDANTE

La figura 20, compuesta por la micrografía de la aleación obtenida luego de la fusión oxidante, detalla la presencia de una matriz clara, con precipitados brillantes y oscuros que son analizados en los puntos 1-2 mediante SEM-EDS y cuyos resultados se muestran en la tabla 11. La composición química promedio de la matriz y el compuesto de equilibrio vistas en la figura 20.B puntos 3-4 se incluyen en la tabla 12.

**Figura 17.** Micrografía analizada por SEM-EDS 500X. A) precipitados 1-2. B) Matriz y compuesto de equilibrio 3-4.

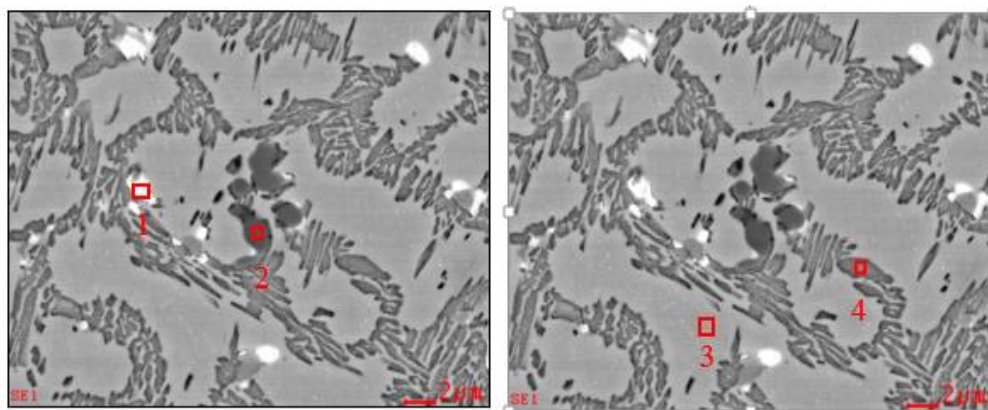


Tabla 9. Composición química promedio de los puntos 1, 2, 3, 4 y general de la aleación final obtenida

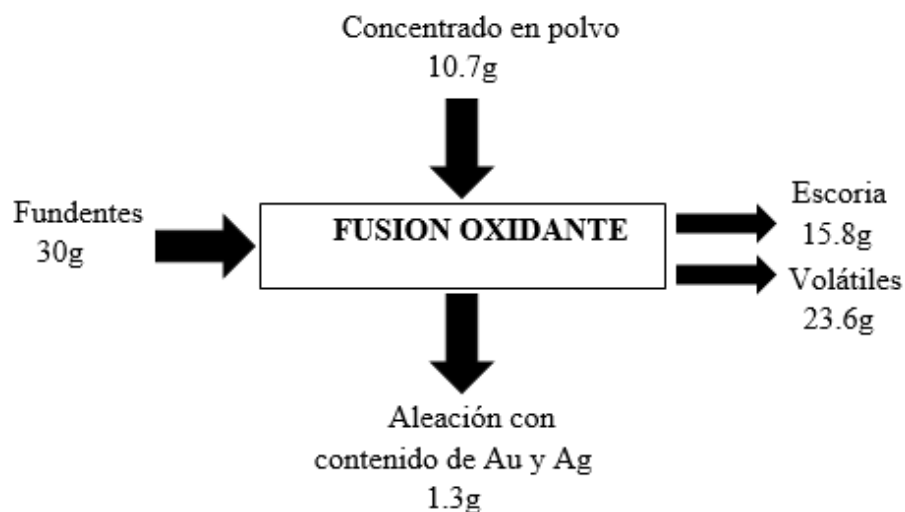
%	C	O	Au	Ag	S	Sn	Ca	Ni	Cu	Pb
Punto 1	0.57	0.57	0.64	1.29	-	33.04	1.15	9.55	53.2	-
Punto 2	0.34	0.72	1.16	1.05	10.62	9.41	-	2.54	74.17	-
Punto 3	1.01	1.07	0.64	13.2	-	15.09	0.41	3.31	23.31	41.97
Punto 4	1.42	0.96	2.74	1.98	-	17.33	0.75	4.4	70.41	-
General	0.99	1.08	1.50	1.72	0.54	25.37	0.89	7.19	57.54	3.17

Las micrografías ópticas y SEM-EDS permiten identificar la presencia de elementos preciosos oro (Au) y plata (Ag) en cada una de las fases y micro

constituyentes de la aleación obtenida. Así, en los puntos 2 y 4 se registra el mayor porcentaje de oro, mientras que, en el punto 1, se encuentra el mayor porcentaje de plata. El contenido de elementos tales como Zn, Fe, Cs, Mn y Si reportados en el ensayo de FRX (tablas 8-7 y anexo E), disminuyó, a razón de los procesos de lixiviación y fusión oxidante. En el anexo G se detallan las curvas de Zn y Mn sobre el diagrama de Ellingham. Una vez iniciado el proceso de fusión oxidante, elementos como Zn y Cs son volatilizados debido a las altas temperaturas a las que se desarrolla el proceso y su relativo bajo punto de fusión, por otra parte el elemento Mn sufre de un proceso de oxidación por lo que formará posteriormente parte de la escoria junto con otros elementos. Por último el Fe fue extraído totalmente durante el proceso de lixiviación por etapas, de acuerdo a los resultados de la concentración química del licor y la literatura comprada en el análisis del proceso de lixiviación.

Sin embargo, otros elementos como Cu, Sn, Ni y Pb, constituyen el mayor porcentaje de cada fase analizada. En la figura 21 se detalla el flujo másico del proceso final.

Figura 21. Flujo de masa fusión oxidante.



#### **4.7. IMPLICACIONES DE ESTOS RESULTADOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN INDUSTRIAL DE ESTOS PROCESOS DE RECICLAJE.**

La factibilidad del proceso es relativamente estable, debido a que el procedimiento empleado es sencillo en la práctica. No se requiere gran cantidad de materiales para desarrollar el proceso, ni gran consumo de energía. La alternativa es sólida, ya que el ácido sulfúrico es el solvente que se emplea principalmente, por lo que no se genera contaminación debido a la reacción que ocurre durante las etapas de lixiviación, comparado con los métodos que usan cianuro o mercurio y generan graves impactos en el ambiente y en el ser humano. Económicamente, es viable llevar a cabo un proceso de recuperación de oro y plata cuando se tienen grandes cantidades de material a procesar, debido al precio comercial que tienen los metales de interés en el mercado. Para esto, se tiene en cuenta la ley calculada de oro y plata por tonelada de materia procesado en este proyecto, siendo esta cantidad significativamente mayor en comparación con las leyes promedio de minerales explotados en la minería a nivel industrial. Además, el uso de ácido sulfúrico para la extracción de los metales base y la utilización de los fundentes requeridos, no implican grandes gastos económicos en el proceso.

En la literatura se reportan valores estimados de la eficiencia alcanzable al implementar metodologías para la obtención y refinación de oro y plata provenientes en los desechos electrónicos [2] [5], la manera de comprobar la eficiencia del método es por medio de la medición de pureza. La adecuada combinación de los métodos hidro y pirometalúrgicos puede alcanzar valores de pureza final hasta de 23.9 quilates y obtención de aleaciones con porcentajes mayores al 99% de oro en peso [5]. Para la implementación de esta metodología se debe realizar una investigación profunda acerca de los parámetros operacionales (tiempo y temperatura), la selección y combinación de fundentes en el proceso de fusión oxidante, así se asegurará una reducción aún más efectiva de los metales base, apuntando a una mayor pureza y cantidad de metales preciosos en la aleación final obtenida.

## 5. CONCLUSIONES

- Bajo las condiciones experimentales seguidas, la recuperación de oro y plata a partir de los componentes en las TCI, requirió de múltiples etapas, debido a la variedad de aleaciones y combinaciones de diferentes materiales poliméricos, cerámicos y metálicos que en ella existen. Bajo esta premisa se propuso la obtención de una aleación con contenido rico de oro y plata utilizando diferentes técnicas propias de la extracción de metales y procesamiento de minerales.
- En la caracterización de las materias primas se lograron identificar diferentes fases metálicas en los distintos componentes electrónicos, por otra parte en los procesos de liberación y separación propuestos se obtuvieron rangos granulométricos aceptables para los procesos de lixiviación ajustando el procedimiento en 3 etapas. Estos procesos físicos mostraron ser altamente eficientes puesto que se demostró que las técnicas utilizadas presentan rendimientos mayores al 90%, además de caracterizarse por ser una excelente alternativa en el proceso de reciclaje debido a que no generan contaminación. Por último se destaca el valor económico y ambiental de dichas operaciones dado que una vez separado el polímero por completo puede ser utilizado como materia prima para otras industrias.
- De acuerdo con los resultados obtenidos, el proceso de fusión oxidante no generó una reducción total de los metales base de la materia prima; sin embargo es importante resaltar que desde el punto de vista químico se obtuvieron reducciones significativas de los metales de menor interés, particularmente en el porcentaje de elementos como Cu, Sn, Fe, Zn y Cs, obteniéndose reducción del 99.52% de la masa de cobre y reducción total de Fe, Zn y Cs de la materia prima.
- Se resalta la aplicabilidad de las técnicas de procesamiento de minerales para liberar la fracción metálica, cerámica y polimérica de las TCI y reducir su cantidad de metales de poco interés mediante técnicas propias de la metalurgia extractiva, como una solución alternativa que es a su vez amigable con el medio ambiente para la disposición final de la chatarra electrónica.

## 6. RECOMENDACIONES

El proyecto de investigación deja abiertas múltiples líneas y puntos en los cuales se puede profundizar, como en análisis de sistemas y técnicas para lograr la máxima reducción del material, alcanzando una amplia variedad de rangos granulométricos en los procesos de trituración y molienda para así obtener mayores porcentajes de separación en las pasos posteriores, además de una mayor eficiencia en las etapas de lixiviación y lograr la máxima concentración de metales preciosos con el menor gasto de reactivos posible.

- Utilizar técnicas de separación magnética y electrostática para establecer mayor homogeneidad de los flujos obtenidos, además utilizar estos sistemas en los flujos poliméricos con el fin de convertir este material en materia prima de otros procesos.
- Desarrollar un diseño de experimentos para evaluar las etapas de lixiviación con diferentes tamaños de partículas y el efecto de la temperatura, la agitación, adición de oxígeno gaseoso durante el procesamiento de los flujos metálicos, de igual forma se recomienda estudiar la recuperación de cobre y otros metales base considerando la implementación de técnicas hidro y electrometalúrgicas.
- Para un mejor el proceso de fusión oxidante, realizar diferentes pruebas variando la proporción de los fundentes utilizados y controlar los parámetros de fusión (tipo de llama, tiempo de fusión, cantidad y mezcla de gases en el soplete) con el objetivo de determinar las condiciones que proporcioné la reducción total de los metales base y obtener una aleación constituida solo por metales preciosos. De esta forma se podrá evaluar la viabilidad financiera del proceso utilizado y establecer su factibilidad a nivel industrial.

## BIBLIOGRAFÍA

BIRLOAGA, Ionela, *et al.* Study on the influence of various factors in the hydrometallurgical processing of waste printed circuit boards for copper and gold recovery. *Waste Manage.* 2013. p. 33, 935–941.

CHAVERRA ARIAS, Darío Ernesto. Extracción de cobre a partir de tarjetas de circuito impresa de residuos electrónicos Universidad nacional de Colombia, Medellín, Colombia. 2014

CHI, X. STREICHER-Porte, M. WANG, MY. REUTER, MA. Informal electronic waste recycling a sector review with special focus on China. *Waste management.* Nueva York 2011. p. 31, 731–42.

COMFAMA Periódico informador. La chatarra electrónica en el mundo. Marzo de 2011.

CUEVAS GALEANA, Hichel. AVILA SALZAR, J. Trinidad. Reciclaje y afinación del oro a partir de chatarra electrónica Instituto Politécnico Nacional, Distrito Federal, México. 2013)

DEVECI, Haci. YAZICI, Ersin. AKCIL, Ata. Extraction of copper from scrap TV boards by sulphuric acid leaching under oxidising conditions. GOING GREEN-CARE INNOVATION 2010 CONFERENCE. Viena 2010. p. 45.

<https://www.journals.elsevier.com/waste-management>.

ILYAS, Sadia. ANWAR, Munir A. NIAZI, Shahida B. GHOURI, Afzal M. Bioleaching of metals from electronic scrap by moderately thermophilic acidophilic bacteria. *Hydrometallurgy* 2007. p. 88, 180–188.

KINOSHITA, Takehiko, *et al.* Metal recovery from non-mounted printed wiring boards via hydrometallurgical processing. *Hydrometallurgy*. 2003 p. 69, 73–79.

MINISTERIO DE AMBIENTE. D.C. Colombia, Vivienda y Desarrollo Territorial; Centro Nacional de Producción más Limpia. Lineamientos técnicos para el manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Colombia. Bogotá. 2009.

OLIVEROS GÓMEZ, Honorio. Metodología para recuperar metales preciosos: oro, plata y grupo del platino, presentes en los desechos electrónicos. Universidad nacional de Colombia, Medellín, Colombia. (2011).

Orson, S. Fire assaying, Massachusetts, USA: McGraw-Hill Company, 1940. p. 121-150.

SILVAS, Flavia, *et al.* Printed circuit board recycling: Physical processing and copper extraction by selective leaching. [En línea] 2015. (Recuperado en enero de 2018) ScienceDirect. Disponible en:

SWISS INFO. CH. Noticias Suizas. Julio 24, 2008.

TUNCUK, Ayşenur., STAZI, Valentina. Akcil. YAZICI, Ersin. Deveci, Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering*. 2012. p. 25, 28–37.

UNESCO. CYRANEK, Gunther. SILVA, Uca. Los residuos electrónicos: un desafío para la sociedad del conocimiento en América Latina y el Caribe. Plataforma RELAC SUR/IDRC, Montevideo, Uruguay, 2010.

## ANEXOS

**Anexo A.** Porcentaje de peso de metales en diferentes TCI: Fracciones Fracturada (M), Magnética (MA) y no magnética (NMA) Fuente: Tomado y adaptado de Flavia et al., (2015).

		Ag	Al	Au	Cu	Fe	Ni	Pb	Sn	Zn	Otros
		Ba(0.27)									
Impresoras	M	0.31	3.73	0.004	32.5	1.42	0.34	0.00	0.94	0.64	Ca(1.13)
	NMA	0.31	3.65	0.004	32	0.00	0.00	0.00	0.64	0.44	K(0.03),
	MA	0.00	0.08	0.00	0.5	1.42	0.34	0.00	0.32	0.20	Na(0.05)
		Sb(0.11)									
		Ba(0.16)									
Celular, teléfono	M	0.21	0.26	-	35.5	12.4	3.41	1.87	3.39	5.92	Ca(0.09)
	NMA	0.19	0.23	-	30.9	0.06	1.4	1.50	2.87	5.78	Ba(0.08)
	MA	0.02	0.03	-	3.58	10.5	1.23	0.37	2.87	0.14	Ca(0.08)
		Ba(0.08)									
		Ca(0.01)									
PC	M	0.13	4.26	0.15	23.7	5.28	0.37	4.19	6.23	4.22	
	NMA	0.11	3.4	0.12	22.4	0.25	0.13	3.74	5.52	3.83	-
	MA	0.02	0.86	0.03	1.32	5.03	0.24	0.45	0.71	0.39	
		Sb (0.13).									
		Ba(0.35)									
		, Br (4.6), Ca									
PC	M	0.25	2.26	0.05	4.49	1.06	0.25	4.54	6.35	0.04	(5.94, Cl (0.17), P (2.4), Mg (1.4), K (0.15)

**Anexo B.** Recopilación de resultados para el reciclaje de PCBs mediante procesos de lixiviación [8], [9], [10], [11].

Muestra(tamaño)	Medio	Condiciones	Extracción (Peso%)	Refs.
PCBs (<3mm)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	50°C;3h;1.48pH; H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ,2M;20mL H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /100mlH <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	46.25Cu; 5.65Fe; 21.06Sn; 51.08Zn	Birloaga et al. (2013)
WPCBs (<3mm)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	50°C;3h;1.52pH; H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ,2M;20ml H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /100mlH <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	11.46Cu; 62.16Fe; 26.37Sn; 310.78Zn	Birloaga et al. (2013)
PCBs de TVs(<3.35mm)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	68°C,4h;H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 1.6M	98.2Cu	Devecci (2010)
PCBs (50-150 um)	Sulfobacilos termosulfido oxidanos	45 C, 18 días, pH 2.0	81Ni, 89Cu, 79Al 83Zn	Ilyas et al. (2007)
PWBs (10x20x2mm)	HNO <sub>3</sub>	80°C,24h,0.1and HNO <sub>3</sub> 1 M	90 de Cu y Ni	Kinoshita et al. (2003)
PCBs (<1.0mm)	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	85°C,12h,H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ,2 M	100Cu y Zn; 95 de Fe, Ni y Al	Oh et al. (2003)
PCBs (2.5mm)	HNO <sub>3</sub>	80°C,6 h, 6 M HNO <sub>3</sub>	95 de Pb y Cu	Mecucci and Scott

**Anexo C.** Procesos pirometalúrgicos típicos para el reciclaje de metales presentes en los desechos electrónicos. Tomado de Cui y Zhan (2008).

Técnica	Metal recuperado	Característica del proceso	Resultado obtenido
Proceso Noranda, Quebec Canada	Cu, Au, Ag, Pt, Pd, Se, Te, Ni	Fundición de cobre y concentrado de cobre, convertidor, horno de fundición, electro refinación de metal.	Alta recuperación de cobre y metales preciosos
Fundición Boliden, Ronnskar. Suecia	Cu, Au, Ag, Pt, Pd, Zn, Ni	Reactor para concentrados, 100 mil toneladas por año, convertidor y refinación para cobre, refinación de metales preciosos.	a altas recuperaciones de cobre y metales preciosos
Umicore, Belgica	Metales preciosos, Se, Te, metales base	Lixiviación de cobre, electro refinación de metales preciosos, 250 toneladas de chatarra electrónica al año, horno de fundición con control de emisiones de gases, plástico sustituto del coque.	Recuperación de metales preciosos, Sb, Bi, Se, Te, In
Patentes Dunns para refinación de oro	Oro	Reacción de chatarra electrónica con cloro temperatura 800 a 700, disolución de impurezas con ácido clorhídrico, disolución de la plata con ácido nítrico e hidróxido de amonio; muestras con recuperaciones de oro.	Recuperación de oro con 99,9% de pureza proveniente de chatarra electrónica.
Patente Days para recuperar metales presentes en chatarra con cerámicos refractarios	Metales preciosos, platino y paladio	Chatarra cargada en horno de plasma a temperatura cercana a 1400 grados centígrados, cerámica en la escoria, plata y cobre también recuperados.	Recuperaciones de platino y paladio a partir de chatarra electrónica, en porcentajes de 80,8% y 94,2% respectivamente.
Patente Aleksandronvichs	Grupo del platino y oro	Fundición de metales mediante la reducción con carbón.	Metales del grupo del platino y oro recuperados.

#### ANEXO D. Proceso de lixiviación del cobre.

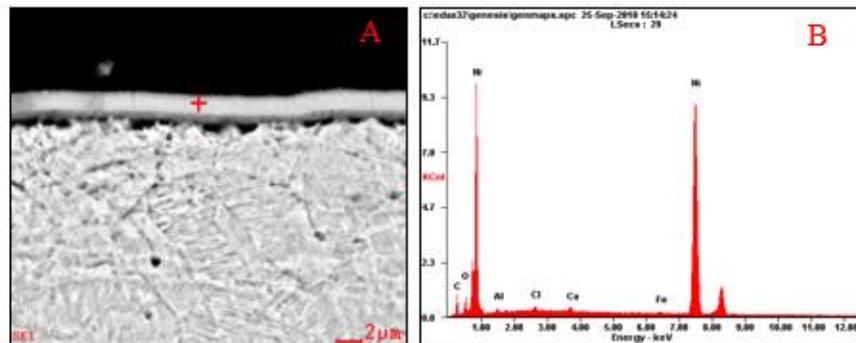
El proceso de lixiviación de cobre en solución de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) usando peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) como agente oxidante se da según la reacción (1)



$$\Delta H^0 = -339.79 \text{ kJ}, \quad \Delta G^0 = -324.73 \text{ kJ}, \quad K = 7.87 \times 10^56$$

#### ANEXO E. Caracterización química del metal de interés estudiado.

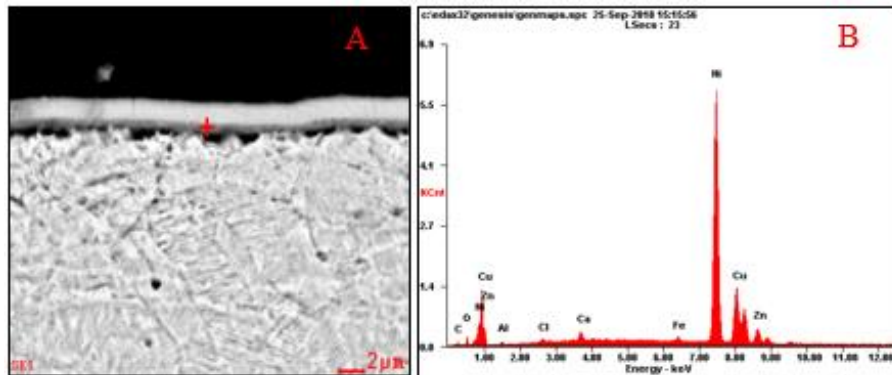
Análisis SEM-EDS de las hebras metálicas. A) Micrografía metal de interés 5000X. B) Espectro EDS en el punto señalado



Composición química promedio en el punto señalado:

Elemento	Peso%
C	10.55
O	03.24
Al	00.89
Cl	00.60
Ca	00.53
Fe	00.41
Ni	83.78

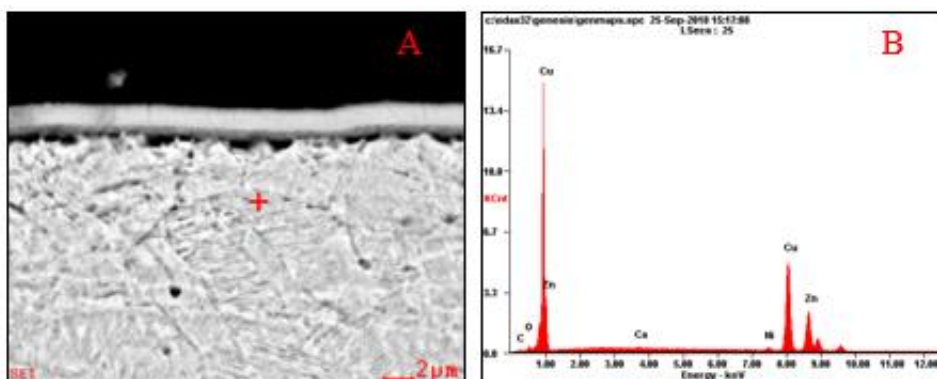
Análisis SEM-EDS de las hebras metálicas. A) Micrografía metal de interés 5000X.  
 B) Espectro EDS en el punto señalado.



Composición química promedio en el punto señalado

Elemento	Peso%
C	01.66
O	01.21
Al	00.54
Cl	00.32
Ca	00.77
Fe	00.60
Ni	68.96
Cu	18.95
Zn	06.99

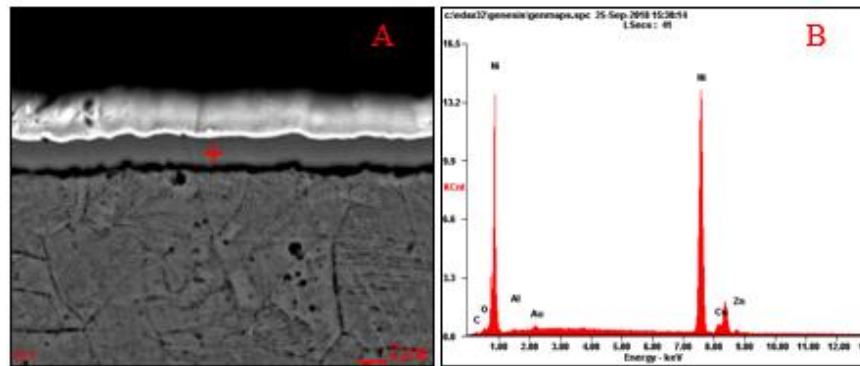
Análisis SEM-EDS de las hebras metálicas. A) Micrografía metal de interés 5000X.  
 B) Espectro EDS en el punto señalado.



Composición química promedio en el punto señalado

Elemento	Peso%
C	00.44
O	00.59
Ni	00.57
Cu	64.15
Zn	34.26

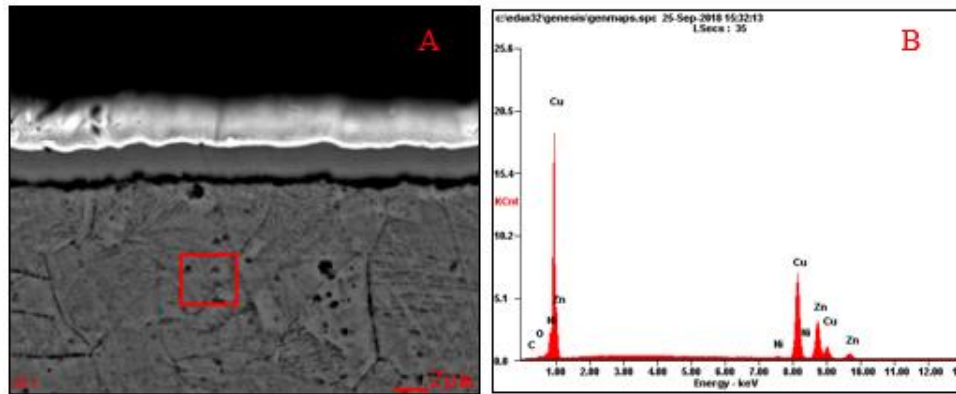
Análisis SEM-EDS de las hebras metálicas. A) Micrografía metal de interés 5000X.  
B) Espectro EDS en el punto señalado



Composición química promedio en el punto señalado

Elemento	Peso%
C	00.79
O	01.26
Ca	00.26
Ni	01.33
Cu	63.02
Zn	33.33

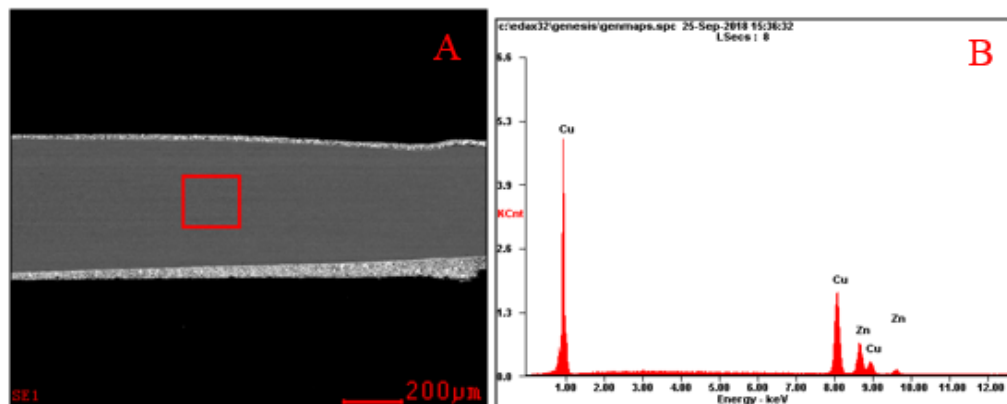
Análisis SEM-EDS de las hebras metálicas. A) Micrografía metal de interés 5000X.  
 B) Espectro EDS en el punto señalado.



Composición química promedio en el punto señalado.

Elemento	Peso%
C	00.15
O	00.76
Al	00.47
Au	01.77
Ni	90.70
Cu	04.06
Zn	02.10

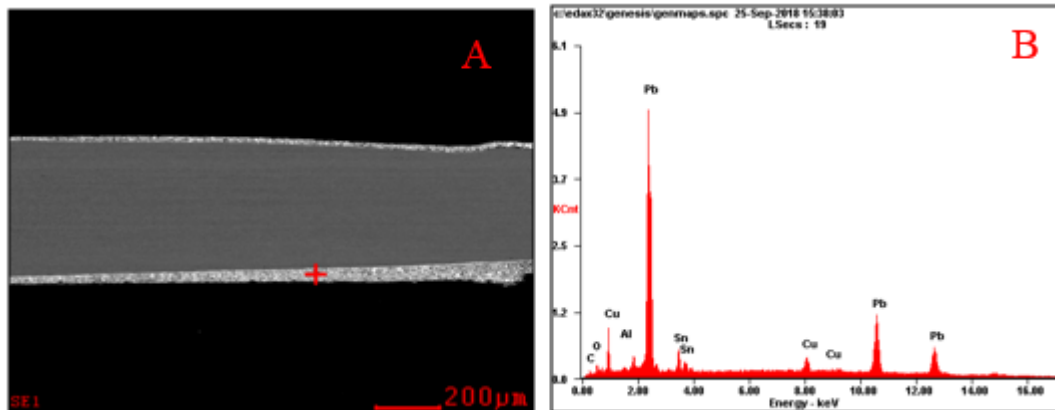
Análisis SEM-EDS de las hebras metálicas. A) Micrografía metal de interés 5000X.  
 B) Espectro EDS en el punto señalado.



Composición química promedio en el punto señalado.

Elemento	Peso%
Cu	69.92
Zn	30.08

Análisis SEM-EDS de las hebras metálicas. A) Micrografía metal de interés 5000X.  
B) Espectro EDS en el punto señalado.

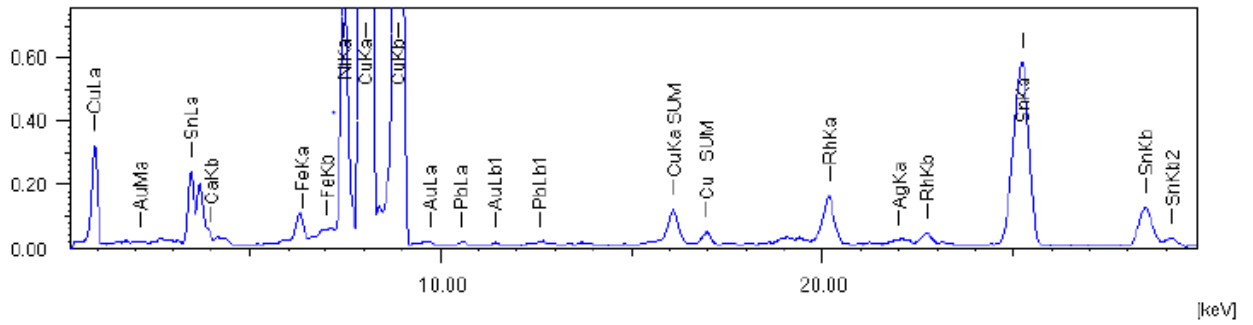


Composición química promedio en el punto señalado

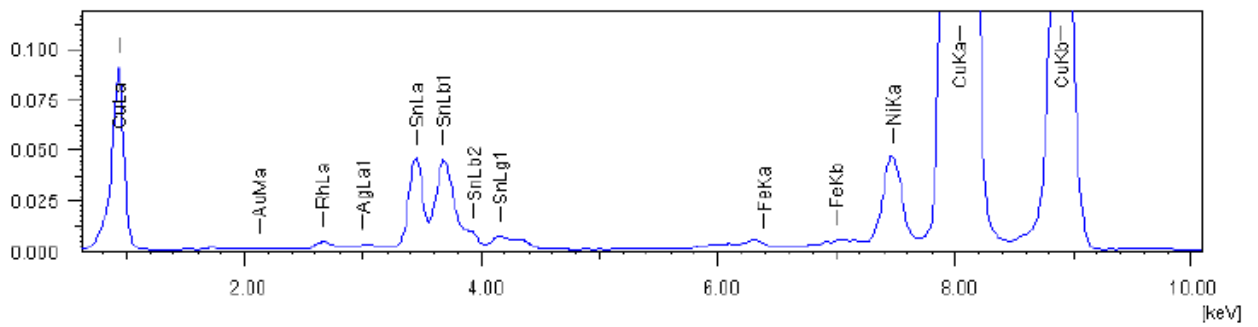
Elemento	Peso%
C	01.09
O	02.25
Al	00.29
Sn	06.41
Cu	03.63
Pb	86.34

## Espectro de fluorescencia de rayos-X muestra 1.

[cps/uA] Tl-U

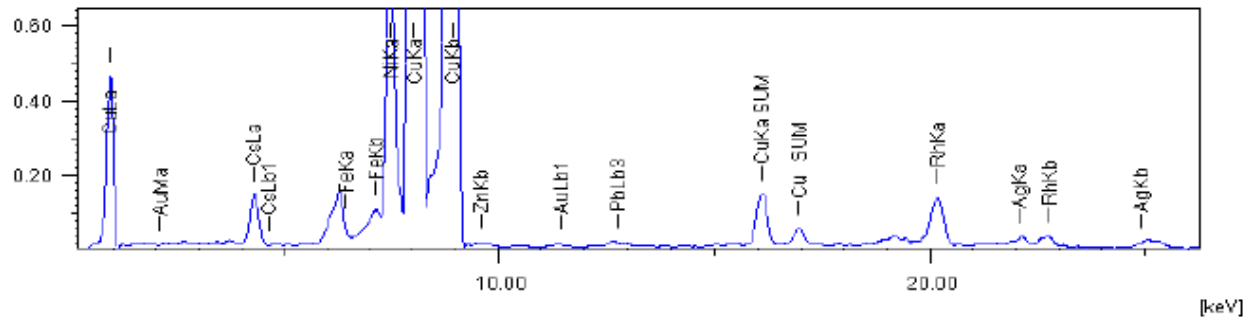


[cps/uA] Na-Sc

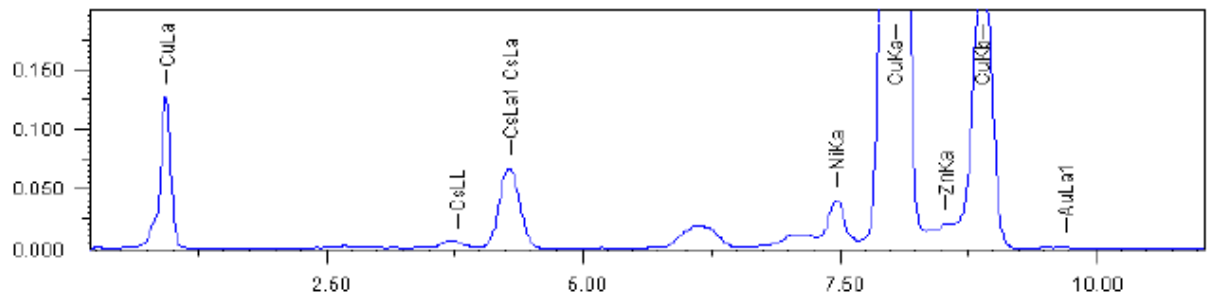


## Espectro de fluorescencia de rayos-X muestra 2.

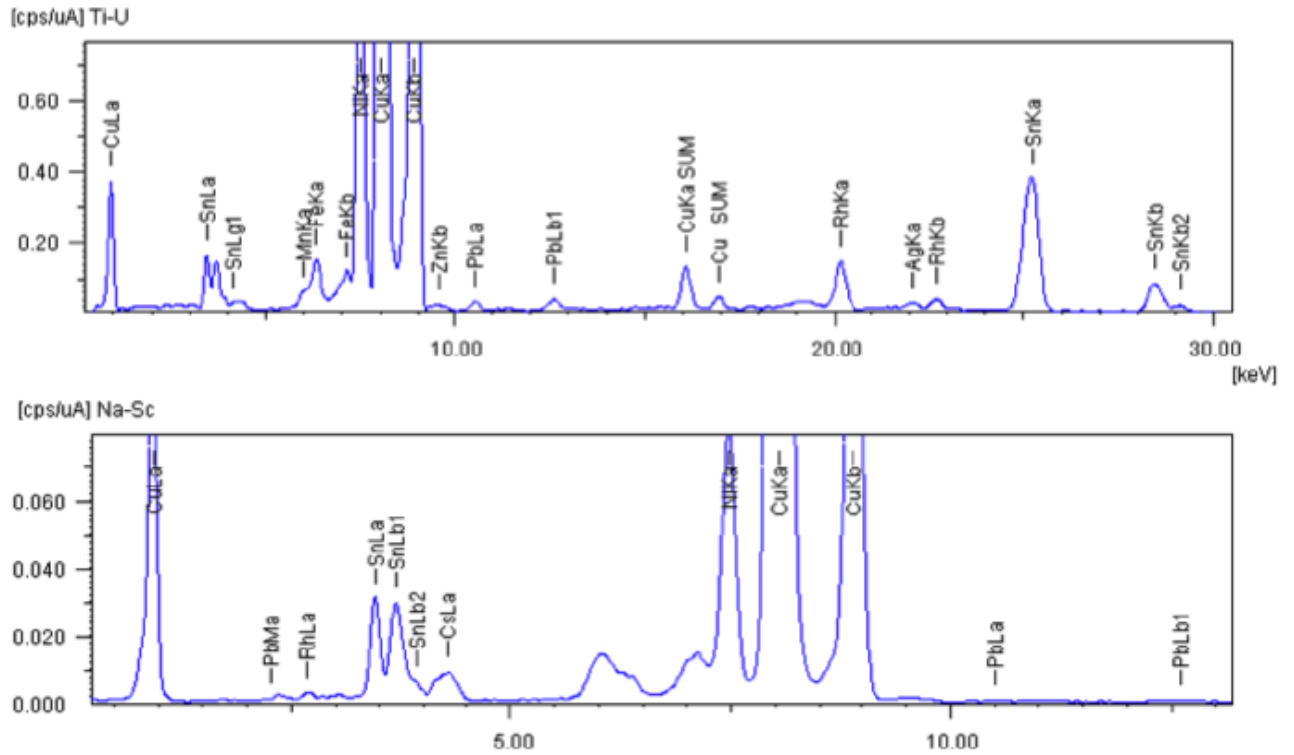
[cps/uA] Tl-U



[cps/uA] Na-Sc



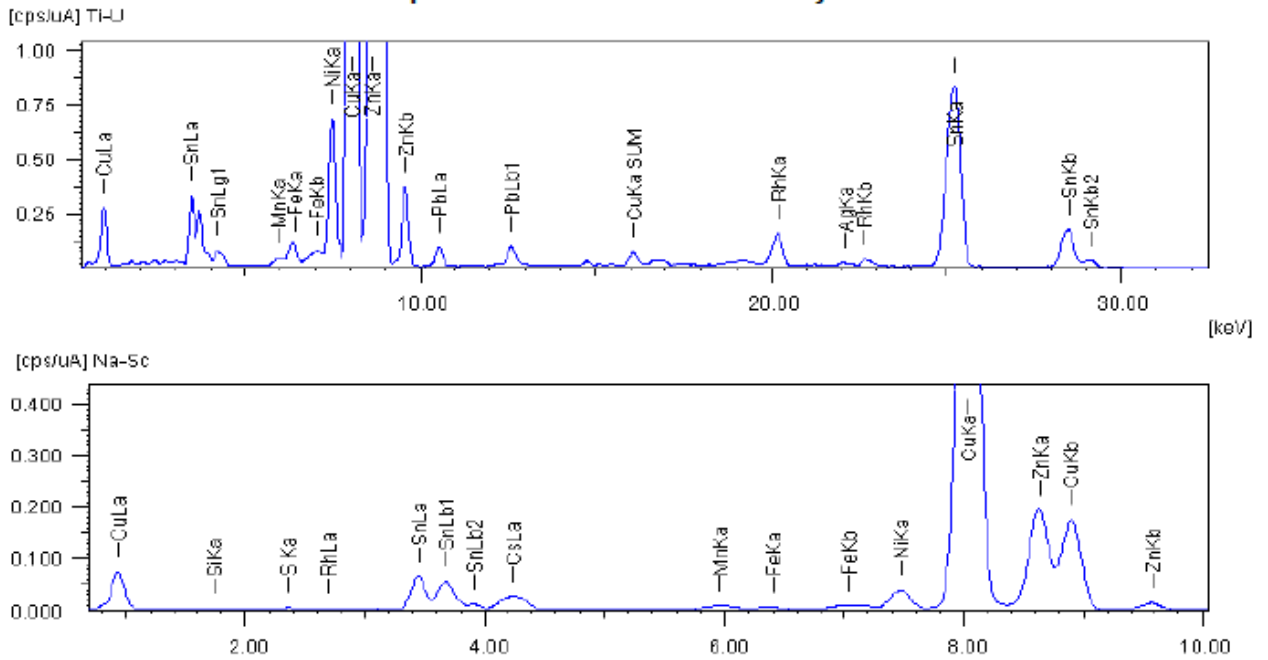
### Espectro de fluorescencia de rayos-X muestra 3.



Resultados composición química promedio FRX muestra 3.

Elemento	Composición (%)	Desviación media
Cobre (Cu)	90.31	0.114
Estaño (Sn)	4.97	0.032
Níquel (Ni)	2.86	0.022
Cesio (Cs)	0.82	0.026
Zinc (Zn)	0.36	0.019
Plomo (Pb)	0.33	0.018
Hierro (Fe)	0.15	0.007
Manganeso (Mn)	0.12	0.07
Plata (Ag)	0.09	0.01

### Espectro de fluorescencia de rayos-x muestra 4.



### Resultados composición química promedio FRX muestra 4.

Elemento	Composición (%)	Desviación media
Cobre (Cu)	70.8	0.104
Estaño (Sn)	11.31	0.076
Níquel (Ni)	1.43	0.017
Cesio (Cs)	3.38	0.026
Zinc (Zn)	11.49	0.019
Plomo (Pb)	0.87	0.023
Silicio (Si)	0.28	0.015
Azufre (S)	0.16	0.007
Hierro (Fe)	0.13	0.008
Manganeso (Mn)	0.09	0.008
Plata (Ag)	0.07	0.01

**ANEXO F.** Calculo de la cantidad de ácido sulfúrico para lixiviar 1g de cobre y ley/pureza de oro en la materia prima.

Según la ecuación (1) se calculan los requerimientos teóricos del  $H_2SO_4$  (1.84 g/ml) y  $H_2O_2$  (35%) (1.31 g/ml) para lixiviar 1 g de cobre:

$$1gCu * \frac{mol}{63.55} * \frac{1mol}{1mol} * \frac{98g}{mol} * \frac{ml}{1.84g} = 0.84ml H_2SO_4$$

$$1gCu * \frac{mol}{63.55} * \frac{1mol}{1mol} * \frac{34g}{mol} * \frac{ml}{1.31g} * 2.87 = 1.17ml H_2O_2$$

Como resultado del proceso se calcula la ley de oro y plata de la materia prima por tonelada.

$$1x10^6g \left( \frac{0.00489gc}{19.4g} \right) * 58.8\%Au = 148.2g \frac{Au}{ton}$$

$$1x10^6g \left( \frac{0.00489gc}{19.4g} \right) * 35.96\%Ag = 90.6g \frac{Ag}{ton}$$

Como resultado del ensayo al fuego se calcula la pureza del oro de la aleación obtenida.

$$\text{Número de quilates} = \frac{0.00282gAux24}{0.00489gt} = 14.1 \text{ quilates}$$

ANEXO G. Diagrama de Ellingham.

