

**RECUPERACIÓN DE COBRE A PARTIR DE LOS RESIDUOS DE TARJETAS
DE CIRCUITOS INTEGRADOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y
ELECTRÓNICOS**

MARIANA VARGAS MUÑOZ

**UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS
MEDELLÍN
2017**

**RECUPERACIÓN DE COBRE A PARTIR DE LOS RESIDUOS DE TARJETAS
DE CIRCUITOS INTEGRADOS DE APARATOS ELÉCTRICOS Y
ELECTRÓNICOS**

MARIANA VARGAS MUÑOZ

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO DE PROCESOS**

ASESOR

Msc. LUIS FERNANDO TIRADO GALLEGO

COASESOR

Msc. JAIME ANDRÉS GUTIERREZ MONSALVE

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS

MEDELLÍN

2017

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Jurado

Jurado

Medellín, 05 de abril de 2017

AGRADECIMIENTOS

Como desarrolladora de este proyecto, agradezco a cada uno de las personas que apoyaron e hicieron parte de este proyecto y que me guiaron hacia el desarrollo del mismo.

A mi familia que fue una gran motivación y me dieron la fortaleza para afrontar cada proyecto de mi vida.

Luis Fernando Tirado, asesor del proyecto, por su disposición e idoneidad en cada una de sus recomendaciones.

Jaime Andrés Gutiérrez, co-asesor del proyecto, porque gracias a su acompañamiento y permanente motivación hizo posible hacer una realidad este gran reto.

José Adrián Tamayo, estudiante de Doctorado en Ingeniería de Materiales de la Universidad de Antioquía, por su apoyo incondicional y conocimiento brindado para llevar a feliz término este proyecto.

Un especial agradecimiento al laboratorio CIMEX de la Universidad Nacional y al Laboratorio CIDEMAT de la Sede de Investigación de la Universidad de Antioquia, por su amabilidad y disposición.

Al personal de los laboratorios de Ingeniería de Procesos por su disponibilidad y acompañamiento en cada una de las pruebas desarrolladas.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	16
1.1 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	16
1.2 HIPÓTESIS.....	16
2. OBJETIVOS.....	17
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	17
3. MARCO TEÓRICO	18
3.1 ¿QUE ES UN RESIDUO O DESECHO PELIGROSO?	18
3.1.1 Gestión de Residuos o Desechos Peligrosos	19
3.2 COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS ELÉCTRICOS Y ELECTRONICOS	20
3.3 GENERALIDADES DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS INTEGRADOS (TCI)	21
3.3.1 Composición de las Tarjetas de Circuito Impresas (TCI)	22
3.4 PROCESOS PARA LA RECUPERACIÓN DE COBRE DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS INTEGRADOS	24
3.4.1 Procesamiento Pirometalúrgico	24
3.4.2 Procesamiento Hidrometalúrgico: proceso utilizado en este trabajo de grado	27
3.4.3 Proceso Biometalúrgico	29
4. ANTECEDENTES.....	32
5. METODOLOGÍA	34

5.1	PROCESO HIDROMETALÚRGICO PARA LA RECUPERACIÓN DE COBRE A PARTIR DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS INTEGRADOS LOS RAEE	34
5.1.1	REDUCCIÓN DE TAMAÑO Y CLASIFICACIÓN.....	34
5.1.2	SEPARACIÓN MAGNÉTICA Y ELECTROESTÁTICA.....	36
5.1.3	LIXIVIACIÓN Y ELECTRÓLISIS	39
5.2	DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES QUE AFECTAN SIGNIFICATIVAMENTE LA RECUPERACIÓN DE COBRE	42
5.3	OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO OBTENCION DE COBRE A PARTIR DE LAS TCI DE LOS RAEE	44
5.4	ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LOS DISEÑO FACTORIAL Y DE OPTIMIZACIÓN	45
5.5	ANÁLISIS ECONÓMICO	45
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
6.1	RESULTADOS DEL DISEÑO DE UN PROCESO HIDROMETALÚRGICO PARA LA RECUPERACIÓN DE COBRE A ESCALA DE LABORATORIO.....	46
6.1.1	Balance de Masa.....	49
6.2	RESULTADOS DE LOS FACTORES QUE AFECTAN SIGNIFICATIVAMENTE EL PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN DE COBRE	49
6.2	RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO OBTENCION DE COBRE A PARTIR DE LAS TCI DE LOS RAEE	54
6.3	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL PROTOTIPO DE COBRE RECUPERADO.....	59
6.4	RESULTADOS ANÁLISIS ECONÓMICO	65

6.5	RESULTADOS ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL.....	67
7.	CONCLUSIONES.....	70
8.	RECOMENDACIONES.....	72
9.	BIBLIOGRAFÍA.....	73
	ANEXOS.....	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Composiciones representativas de los materiales de las tarjetas de circuitos integrados. a, b, c, d, e, f y g hacen referencia a distintos autores	23
Tabla 2. Diseño factorial fraccionado 2^{5-2} con dos puntos al centro para la determinación de los factores más significativos en la recuperación de cobre	43
Tabla 3. Diseño compuesto central $2^{2+estrella}$ para determinar el punto óptimo de los factores significativos.....	44
Tabla 4. Resultados de cobre recuperado en cada ensayo basado en el análisis de absorción atómica.....	50
Tabla 5. Tabla ANOVA diseño factorial fraccionado 2^{5-2}	52
Tabla 6. Resultados de cobre recuperado en cada ensayo basado en el análisis de absorción atómica del diseño de optimización.....	54
Tabla 7. Tabla ANOVA para el diseño de optimización	56
Tabla 8. Costos de las materias primas necesarias para la recuperación de cobre de las TCI de los RAEE	66
Tabla 9. Duración de uso de los equipos del proceso de recuperación de un kilo de cobre.....	67
Tabla 10. Impacto ambiental de las TCI de los RAEE tratadas con la metodología propuesta vs Arrojar las TCI de los RAEE a un relleno sanitario	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del ciclo de vida de un producto	20
Figura 2. Ejemplo de tarjeta de circuito integrado eléctrica	22
Figura 3. Ejemplo de tarjeta de circuito integrado electrónica	22
Figura 4. Desmantelación de las partes plásticas, metálicas y condensadores de las TCI	35
Figura 5. Reducción de tamaño de las TCI pasando de 15x12 cm a 5x4 cm	35
Figura 6. Reducción de tamaño de las TCI pasando de 5x4 cm a 1x4 mm.....	36
Figura 7. Proceso de Separación Magnética	37
Figura 8. Proceso de Separación Electroestática	38
Figura 9. Lavado del material resultante de las separaciones magnética y electroestática.....	39
Figura 10. Proceso de Lixiviación	40
Figura 11. Análisis de Voltametría	41
Figura 12. Electro-deposición del cobre y prototipo de cobre recuperado	42
Figura 13. Diagrama de bloques del proceso de recuperación de cobre de las TCI de los RAEE.....	47
Figura 14. Diagrama de flujo el proceso para la recuperación de cobre a partir de las TCI de los RAEE.....	48
Figura 15. Resultado SEM/EDS muestra de cobre electro-depositado parte 1	62
Figura 16. Resultado SEM/EDS muestra de cobre electro-depositado parte 2	63
Figura 17. Resultado SEM/EDS muestra de cobre electro-depositado parte 3	64

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Composición RAEE (%)	21
Gráfica 2. Método gráfico para evaluación de normalidad.....	51
Gráfica 3. Comportamiento de la variable de respuesta con cada factor evaluado	53
Gráfica 4. Método gráfico para evaluación de normalidad diseño de optimización.....	55
Gráfica 5. Interacciones de los factores con la variable de respuesta	57
Gráfica 6. Superficie de Respuesta	58
Gráfica 7. Análisis de Voltametría [Potencia (V) vs Corriente (mA)] dirección positiva	60
Gráfica 8. Análisis de Voltametría [Potencia (V) vs Corriente (mA)] dirección negativa	60

RESUMEN

Se evaluó el proceso hidrometalúrgico para la recuperación de cobre a partir de los residuos de tarjetas de circuitos integrados (TCI) de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). A partir de un diseño experimental factorial 2^{5-2} con dos puntos al centro y con ayuda de la tabla ANOVA se determinó que los factores que más afectan la concentración de cobre en dicho proceso son el carbonato de amonio y el sulfato de cobre; los demás factores evaluados (amoníaco, agitación y tiempo) no mostraron diferencias significativas por lo que se fijaron en los niveles más favorables (0.5 Molar [M], 200RPM y 24h); usando este diseño se obtuvo una recuperación máxima de 7580,74 mg/L de cobre con una concentración de carbonato de amonio de 1.0M y de sulfato de cobre de 0.05M. Conociendo los factores que más afectaron la concentración del cobre, se procedió a la optimización de las condiciones de carbonato de amonio y sulfato de cobre a partir de la metodología de superficie de respuesta, para esto se hizo uso de un diseño central compuesto $2^{2+estrella}$ donde los factores evaluados fueron la concentración de carbonato de amonio y sulfato de cobre: utilizando este diseño se logró recuperar un máximo de 0.79g Cu/ 5g TCI con una eficiencia del 79% (que equivale a 7881mg Cu/L) a una concentración de 1M de carbonato de amonio y 0.05M de sulfato de cobre. Por último, para determinar la pureza del cobre obtenido se realizó un análisis de Microscopía electrónica de barrido acoplado a un espectrofotómetro de emisión atómica SEM/EDS; éste análisis permitió determinar que el cobre recuperado tuvo una pureza del 99.34%, sin diferencias significativas con los reportes obtenidos para este tipo de proceso y publicados en la literatura.

A partir del diagrama de flujo presentado en este informe, se muestra la viabilidad de utilizar este proceso como una alternativa que puede ser utilizada en la Industria Colombiana para la recuperación eficaz del cobre a partir de RAEE, adicionalmente se muestra la importancia de la metodología del diseño experimental como una herramienta fundamental para la optimización y creación de procesos industriales.

Palabras clave: RAEE, TCI, cobre, hidrometalurgia, diseño de experimentos, optimización, análisis ambiental y económico.

INTRODUCCIÓN

A raíz de la creciente demanda de productos electrónicos y eléctricos y por ende de los metales o materiales necesarios para su fabricación, se ha incrementado también la demanda de estas materias primas y por ende la presión ambiental debido a las explotaciones mineras y petroleras legales e ilegales para atender dicha demanda de insumos (GreenPeace, 2012). Igualmente, los Residuos de los Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE) poseen un gran contenido de metales peligrosos como cadmio, plomo, mercurio, arsénico y productos como bifenilos policlorados, policloruro de vinilo (PVC), entre otros, que los convierten en materiales contaminantes para el suelo, el agua, el aire y la salud humana si no se disponen de una manera adecuada y responsable (Chaverra Arias & Restrepo Baena, 2014).

Actualmente no existe suficiente infraestructura para reciclar este tipo de residuos en el país y se carece de información general y detallada en cuanto a estudios técnicos y de mercado. Además, hay pocas empresas formales que se dedican a este reciclaje y en cambio se estima una creciente proliferación de actividades “artesanales” de recuperación, esto hace que el desarrollo de procesos de recuperación o reciclaje de RAEE con técnicas ambientalmente sostenibles y accesibles a las empresas locales, sea una prioridad ambiental y una oportunidad de negocio (CORANTIOQUIA, Municipio de Envigado, Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Rural de Envigado, Enviaseo E.S.P, Ecycling S.A.S, 2015).

Actualmente, en Colombia rige la Ley 1672 de “Gestión de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos” aprobada el 19 de julio del 2013, la cual surgió como resultado de la Cooperación Colombo Suiza (Méndez Fajardo, 2013). Aun teniendo una ley en Colombia que reglamente y controle el destino final de los residuos de los aparatos eléctricos y electrónicos, hacen falta tecnologías eficientes y

ambientalmente sostenibles que recuperen dichos materiales, para hacer un manejo completo de los RAEE (Oliveros Gómez, 2011).

Se encuentran diferentes métodos metalúrgicos para la recuperación de metales a partir de las TCI de los RAEE entre ellos está la pirometalurgia, que consiste en el conjunto de procesos químicos y operaciones físicas a alta temperatura que, convenientemente elegidas entre diferentes variantes y en su secuencia, permiten que el metal en estado nativo o como componente de uno o varios compuestos en un mineral, pueda obtenerse en estado metálico o formando un compuesto con pureza y/o forma adecuada para su utilización posterior (Gabriel, 2009). También se encuentra la biometalurgia, que consta de la solubilización de minerales a partir de matrices complejas utilizando la acción directa o indirecta de microorganismos (Lock, 2009). Por último, se encuentra el proceso hidrometalurgico utilizado en este proyecto, que se fundamenta en el procesamiento inicial de los materiales metálicos reduciendo su tamaño y concentrando el objeto de interés, luego se extrae el metal mediante la lixiviación y electro-obtención. La hidrometalurgia es la técnica de extracción más adecuada para tratar los minerales complejos, sulfurados y no sulfurados, tienen gran flexibilidad para cambiar operaciones unitarias con el objetivo de lograr un proceso óptimo si estas operaciones son muy selectivas y es posible una gran automatización, por lo tanto, tiene un ahorro considerable de energía (Mendoza Hurtado, 1981).

Se ha demostrado que las Tarjetas de Circuitos Integrados (TCI) contienen aproximadamente 21.3% Cu, 5.94% Sn, 3.2% Pb y 2.24% Fe, 0.025% Au, 0.1% Ag y 0.01% Pd (Chatterje & Kumar, 2009) (Li, Lu, Guo, Xu, & Zhou, 2007)., dado que el cobre es el metal de mayor presencia, el alcance de este proyecto se centra únicamente en la obtención de este metal, sin cerrarse a la recuperación de otros metales preciosos en subsiguientes etapas.

Por lo tanto, desarrollar una metodología hidrometalurgica para la obtención de cobre de las TCI de los RAEE a escala de laboratorio, es el punto al que se quiere llegar con este proyecto.

1. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ¿Cuáles métodos u operaciones unitarias son requeridas para la recuperación del cobre a escala de laboratorio, a partir de los residuos de tarjetas de circuitos integrados de los RAEE?
- ¿Cuál es el porcentaje de cobre que se recuperaría de los residuos de tarjetas de circuitos integrados de los RAEE?

1.2 HIPÓTESIS

Es posible desarrollar el montaje a escala de laboratorio para la recuperación del cobre a partir de las tarjetas de circuitos integrados de los RAEE y que el proceso hidrometalúrgico desarrollado sea amigable con el ambiente.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un proceso hidrometalúrgico a escala de laboratorio para la recuperación de cobre a partir de los residuos de tarjetas de circuitos integrados de los aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un proceso hidrometalúrgico para la recuperación de cobre a escala de laboratorio en la Universidad EAFIT.
- Determinar los factores que afectan significativamente el porcentaje de recuperación de cobre, partiendo del proceso diseñado con anterioridad.
- Optimizar las condiciones del proceso de recuperación del cobre con el fin de obtener los mayores rendimientos.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 ¿QUE ES UN RESIDUO O DESECHO PELIGROSO?

Según el decreto 4741 del 30 de diciembre de 2005 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de la República de Colombia, un residuo o desecho peligroso “es aquel residuo o desecho que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas puede causar riesgo o daño para la salud humana y el ambiente. Así mismo, se considera residuo o desecho peligroso los envases, empaques y embalajes que hayan estado en contacto con ellos.” Por lo tanto, la clasificación de un residuo como peligroso es una de las etapas más valiosas en la gestión de los residuos, ya que de ella depende que los que sean clasificados se sometan a un control más riguroso con el propósito de incrementar la seguridad en su manejo y prevenir y reducir riesgos para la salud o el ambiente (Ministerio de Ambiente, Vivienda, y Desarrollo Territorial Republica de Colombia, 2007).

Entre estos residuos o desechos peligrosos se encuentran los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, esto debido a que ya no es posible su reciclaje y los componentes contaminantes que poseen deben enviarse a empresas para disponerlos en incineradores o rellenos sanitarios especiales. Los elementos y compuestos que los hacen peligrosos son: Berilio, Cromo Hexavalente, Cobre, Arsénico, Selenio, Antimonio, Mercurio (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 2010).

3.1.1 Gestión de Residuos o Desechos Peligrosos

Históricamente, las políticas de gestión de residuos se han centrado en la búsqueda de soluciones de disposición final, en un modelo de gestión de “fin de tubo”. Esta visión parcializada del problema, ha evolucionado hacia un enfoque estratégico integral que cubre todo el ciclo de vida de los productos y residuos como base para el desarrollo de un modelo conceptual que permita abordar en forma sostenible y eficaz un sistema de gestión de residuos.

Por lo anterior se plantea que los residuos son parte del ciclo de vida de los materiales, lo que lleva a la necesidad de establecer un enfoque integral en la gestión de los residuos peligrosos que permita su manejo seguro o ambientalmente adecuado a lo largo de todo su ciclo de vida: desde que se extraen para la obtención de las materias primas, se sintetizan o procesan, se transportan, almacenan o comercializan y se utilizan, hasta el descarte del producto cuando ya no sirve para el fin que fue adquirido o que dejó de satisfacer las necesidades de su propietario.

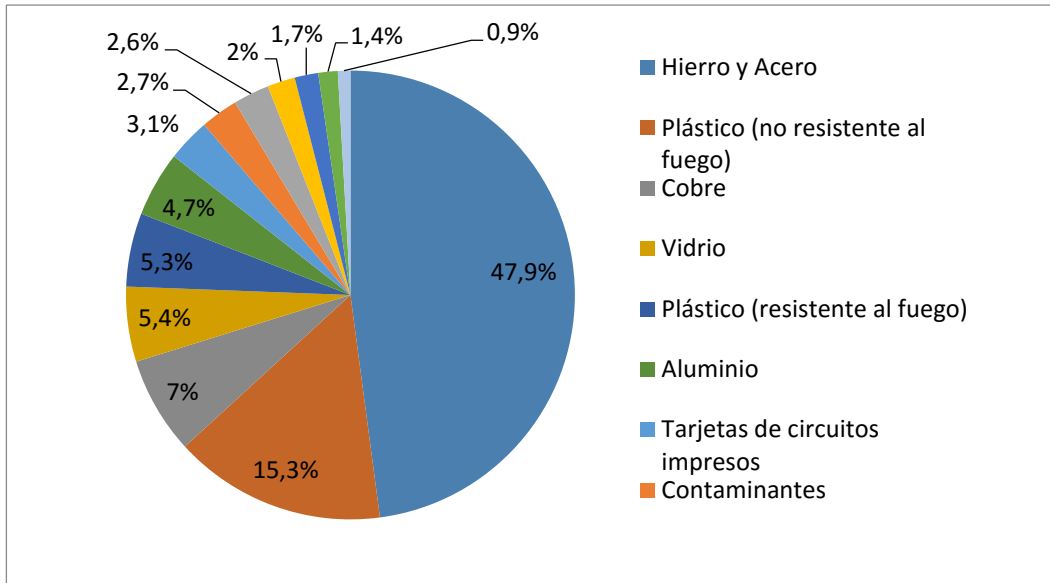
En este aspecto se aplica el término de producción más limpia que se refiere a la aplicación continua de una estrategia ambiental integrada y preventiva a los procesos, productos y servicios para aumentar la eficiencia global, reducir riesgos a la sociedad y al medio ambiente. La producción más limpia es posible aplicarla a procesos utilizados en cualquier tipo de industria, a productos y a varios servicios prestados a la sociedad. Esto conlleva a la adopción de medidas organizativas, operativas que permitan minimizar la cantidad y peligrosidad de los residuos y desechos peligrosos (Ministerio de Ambiente, Vivienda, y Desarrollo Territorial Republica de Colombia, 2007).



Figura 1. Esquema del ciclo de vida de un producto (Elaboración propia)

3.2 COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS ELÉCTRICOS Y ELECTRONICOS

La mayor parte de los aparatos eléctricos y electrónicos se fabrican con el debido control por parte de las tarjetas de circuitos integrados que regulan el funcionamiento del equipo. Sin embargo, se componen de cientos de diferentes materiales que pueden ser tanto tóxico, pero también de gran valor, por lo tanto, los RAEE son de una naturaleza diversa y compleja de los residuos, puesto que tienen ambos ingredientes peligrosos y no peligrosos (Vats & Singh, 2014). La composición del material de los diferentes aparatos a menudo es similar, pero el porcentaje de los diferentes componentes puede variar mucho (Widmer, Oswald-Krapf, Sinha-Khetriwal, Schnellmann, & Böni, 2005).



Gráfica 1. Composición RAEE (%) (Widmer, Oswald-Krapf, Sinha-Khetriwal, Schnellmann, & Böni, 2005)

3.3 GENERALIDADES DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS INTEGRADOS (TCI)

Las TCI representan entre el 3,1% y el 6,0% del total de los RAEE (Vidyadhar & Mehrotra, 2009) y son un material de interés creciente, no sólo por su contenido de metales, sino también por las complicaciones presentadas durante la recuperación de metales debido a su composición compleja y falta de métodos establecidos. Estas se construyen sobre la base plana de un aislante eléctrico de resina epoxi reforzada con fibra de vidrio. El laminado permite la fijación de todos los componentes eléctricos y electrónicos y las interconexiones entre ellos a través de caminos de cobre (Szałatkiewicz, 2014).



Figura 2. Ejemplo de tarjeta de circuito integrado eléctrica (Szałatkiewicz, 2014)

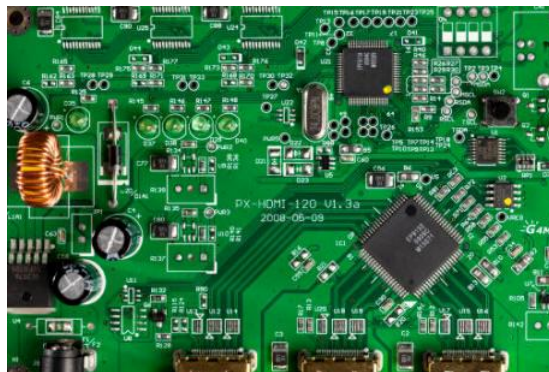


Figura 3. Ejemplo de tarjeta de circuito integrado electrónica (Szałatkiewicz, 2014)

3.3.1 Composición de las Tarjetas de Circuito Impresas (TCI)

Las TCI son plataformas en las que se instalan los circuitos integrados y otros dispositivos electrónicos y conexiones. Típicamente las TCI contienen un 40% de metales, 30% de orgánicos y un 30% de cerámicos. Sin embargo, hay una gran variación en la composición de los residuos de TCI procedentes de diferentes aparatos, de diferentes fabricantes y de diferente edad. La concentración de cobre

en las TCI es de alrededor del 20% en peso y tiende a permanecer constante (Harue Yamane, Tavares de Moraes, Romano Espinosa, & Soares Tenório, 2011).

En la Tabla 1, se muestra las concentraciones más representativas de los materiales de las tarjetas de circuitos integrados.

Tabla 1. Composiciones representativas de los materiales de las tarjetas de circuitos integrados. a, b, c, d, e, f y g hacen referencia a distintos autores

Materiales	% a	% b	% c	% d	% e	% f	% g
Metales (Max. 40%)							
Cu	20	26,8	10	15,6	22	17,85	23,47
Al	2	4,7	7	-	-	4,78	1,33
Pb	2	-	1.2	1,35	1,55	4,19	0,99
Zn	1	1.5	1.6	0,16	-	2,17	1,51
Ni	2	0,47	0.85	0,28	0,32	1,63	2,35
Fe	8	5,3	-	1,4	3,6	2	1,22
Sn	4	1	-	3,24	2,6	5,28	1,54
Sb	0,4	0,06	-	-	-	-	-
Au/ppm	1000	80	280	420	350	350	570
Pt/ppm	-	-	-	-	-	4,6	30
Ag/ppm	2000	3300	110	1240	-	1300	3301
Pd/ppm	50	-	-	10	-	250	294
Cerámicos (Max. 30%)							
SiO ₂	15	15	-	41.86	30	-	1
Al ₂ O ₃	6	-	-	6,97 CaO	-	-	-
Óxidos alcalinos y alcalinotérreos	6	-	-	9,95 MgO	-	-	-
Titanatos, micas, etc.	3	-	-	0.48	-	-	-
Plásticos (Max. 30%)							
Polietileno	9,9	-	-	-	16	-	-
Polipropileno	4,8	-	-	-	-	-	-
Poliéster	4,8	-	-	-	-	-	-
Epóxicos	4,8	-	-	-	-	-	-
Cloruro de polivinilo	2,4	-	-	-	-	-	-
Polietra-fluoroetano	2,4	-	-	-	-	-	-
Nylon	0,9	-	-	-	-	-	-

(Luda, 2011)

3.4 PROCESOS PARA LA RECUPERACIÓN DE COBRE DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS INTEGRADOS

A pesar de la composición de la chatarra promedio fluctuante entre los distintos RAEE, más del 70% de su valor depende de su alto contenido en metales. Por lo tanto, la recuperación metalúrgica de metales de los RAEE es una cuestión de relevancia y ha sido recientemente revisado por Cui (Cui & Zhang, 2008) subrayando tres enfoques posibles: pirometalurgia, hidrometalurgia y biometalurgia.

3.4.1 Procesamiento Pirometalúrgico

Es el proceso más antiguo y más común utilizado para la recuperación de metales de los RAEE, este consiste en fundir los desechos electrónicos en un horno de alta temperatura. El proceso de fundición se realiza en diversas etapas (Namias , 2013) (Galvez A., 2003) (Universidad de Atacama, 2010) (Codelco, 2015):

- **Tostación:** es un tratamiento químico preliminar que consiste específicamente en la oxidación de los sulfuros a óxidos, ya que muchos de los metales no ferrosos se presentan en forma de sulfuros. La tostación de los sulfuros es un proceso (de reacción de gas - sólido) en el que se pone en contacto aire en grandes cantidades, a veces enriquecido con oxígeno, con los concentrados del mineral de sulfuro. Esto se hace a una temperatura elevada que varía entre 500-900 °C a la que se combine el oxígeno del aire con el azufre del sulfuro para formar SO₂ gaseoso y con los metales para formar óxidos metálicos, con una presión externa de 1 atm. Al producto sólido de la tostación se le llama calcinado.
- **Fusión:** La fusión es un proceso de concentración que se lleva acabo con la intención de liberar el elemento metálico del compuesto en que está

contenido en la carga, en una forma pura y eficiente. Este consiste en alimentar a un horno de fusión que varía entre 1200 y 1400 °C, las impurezas de carga se depositan formando un producto ligero de desecho llamado escoria, el cual puede separarse por gravedad de la porción más pesada que contiene prácticamente todos los componentes metálicos deseados. Los valores metálicos se recuperan del proceso de fusión en forma líquida, o como líquidos y luego productos metálicos solidificados, mientras que los productos de desecho se dejan como residuos sólidos sin fundir, escoria líquida, gases o compuestos líquidos que se han solidificado.

Los gases y vapores emanados por la extracción de los productos (metal blanco y escoria), son captados y conducidos mediante ventilación a un sistema de limpieza de gases secundarios, donde un filtro de mangas recupera las partículas en suspensión (las que luego son recirculadas como carga fría al Horno de Fusión). Luego, los gases y vapores son neutralizados disolviéndolos en agua y posteriormente emitidos a la atmósfera.

- **Conversión:** es la etapa segunda y final en la fundición de minerales o concentrados de sulfuros y es también una operación de concentración. Mediante la inyección de aire, oxígeno o aire enriquecido se lleva a cabo un proceso de oxidación selectiva por medio del cual los elementos con mayor afinidad por el oxígeno se oxidan primero y pueden separarse.
- **Refinación:** es la operación final en la que se separan, y generalmente se recuperan, las últimas cantidades de impurezas de los procesos extractivos de los metales mayores. La operación de refinación se considera por lo general separadamente del proceso extractivo y sus características dependen del tipo de impurezas y de las cantidades a separar, así como de la pureza deseada del producto metálico refinado.

Básicamente el material obtenido de la etapa de conversión pasa a un horno de refinación entre 500 – 800 °C donde primero ocurre la oxidación comúnmente con dióxido de azufre, que permite remover el sulfuro contenido hasta un nivel de 50 ppm; una vez limpio el cobre, se inicia la etapa de reducción del nivel de oxígeno presente en el baño fundido, mediante la inyección de gas natural fraccionado con vapor de aire. Así se obtiene un metal anódico con un alto porcentaje de pureza; por consiguiente, el metal anódico se extrae del horno de ánodos por una canaleta cubierta. El tiempo de este proceso es de alrededor 8 horas.

La ruta pirometalúrgica es generalmente más económica, ecoeficiente y maximiza la recuperación de los metales preciosos, sin embargo, tienen ciertas limitaciones las cuales se resumen a continuación (Hagelüken, 2006) (Cui & Zhang, 2008) (Khaliq, Akbar Rhamdhan, Brooks, & Masood, 2014):

- La recuperación de los plásticos no es posible debido a que los plásticos se utilizan como combustible en el proceso de fusión.
- Se generan emisiones peligrosas como las dioxinas durante la fusión de las materias primas que contienen retardantes de llama halogenados. Por lo tanto, se requieren instalaciones especiales para minimizar la contaminación del medio ambiente.
- Se requiere una gran inversión para la instalación de plantas de reciclaje de residuos electrónicos integrados que maximizan la recuperación de metales valiosos y también protegen el medio ambiente mediante el control de las emisiones de gases peligrosos.
- La quema instantánea de polvo fino de materiales orgánicos (por ejemplo, las fracciones no metálicas de basura electrónica) pueden ocurrir antes de llegar al baño de metal. En tales casos, la aglomeración puede ser necesaria

para aprovechar eficazmente el contenido de energía y también para minimizar el riesgo para la salud por partículas finas de polvo.

- Los componentes de cerámica en el material de alimentación pueden aumentar el volumen de la escoria generada en los altos hornos, disminuyendo la eficacia en la recuperación de los metales preciosos del proceso.
- Controlar los procesos de fundición y refinación es un reto, debido a las materias primas complejas. La experiencia en el manejo y proceso de la termodinámica de las posibles reacciones será difícil.
- La recuperación de hierro no es fácil, ya que terminan en la fase de escoria como óxidos.

3.4.2 Procesamiento Hidrometalúrgico: proceso utilizado en este trabajo de grado

Es un proceso donde se extraen los metales desde los materiales que los contienen mediante procesos fisicoquímicos acuosos. También se apoya en las distintas operaciones unitarias que utilizan métodos físicos para mejorar y lograr la concentración y separación de los metales. En general la hidrometalurgia se desarrolla en tres etapas distintivas y secuenciales (Domic Mihovilovic, 2001) (Diamantino Feijó, 2007) (Alfaro Cortes, 2015) (Cifuentes Seves, 2007):

- **Lixiviación:** en esta etapa intervienen además del material sólido de origen, un agente lixiviantes (disolvente) que normalmente está disuelto en la solución acuosa y ocasionalmente un agente externo que actúa como oxidante o reductor y participa en la disolución del metal de interés. La presión puede ser distinta a la atmosférica desde condiciones de vacío de unos pocos kilopascales hasta más de 5.000 kilopascales y la temperatura

puede ser inferior o superior a las de ambiente desde 0°C hasta 250 °C manteniendo solamente el requisito de desarrollarse en un medio acuoso.

- **Purificación y/o concentración:** Con el objetivo de concentrar y eliminar contaminantes la mezcla resultante de la lixiviación se deja decantar para que se separe en dos capas o fases. La fase superior corresponde a la capa orgánica, que se mantiene allí debido a su menor peso específico. En esta fase orgánica, que se conoce como fase cargada o fase extracto, se encuentra retenido el ion metálico de interés formando un complejo orgánico-metálico. Luego esta mezcla se filtra y se diluye con un líquido de menor densidad que el agua (etanol, kerosene, propanol, etc.) cuya función es facilitar el atrapamiento del metal de interés y su purificación.
- **Electro-obtención:** esta se lleva a cabo en una celda compuesta por un cátodo sobre el cual se va recuperar el metal y por un ánodo que debe ser inatacable para evitar la contaminación de la solución. Para recuperar cierto tipo de metal se recomienda un electrolito y cátodo adecuado, por ejemplo, para el cobre se recomienda como electrolito una solución de sulfato y como cátodo acero inoxidable. Para realizar la electrólisis es necesario aplicar entre los electrodos una diferencia de potencial mayor que la diferencia mínima de electrólisis; el rango de densidades de corriente aplicadas en soluciones acuosas es de 200 y 300 A/m². El tiempo en el que se lleva a cabo este proceso según la ley de Faraday depende de la masa depositada, en algunas industrias que manejan grandes cantidades el proceso toma entre 6 a 14 días.

Las rutas hidrometalúrgicas se han utilizado con éxito para recuperar los metales preciosos de los desechos electrónicos. Sin embargo, estos procesos se asocian

con ciertas desventajas que limitan su aplicación en la escala industrial (Hilson & Monhemius, 2006) (La Brooy, Linge, & Walker, 1994) (Cui & Zhang, 2008):

- En general las rutas hidrometalúrgicas son lentas y consumen mucho tiempo. Existen preocupaciones con respecto a la economía de las rutas de la hidrometalurgia en comparación con los procesos pirometalúrgicos.
- El proceso mecánico de los desechos electrónicos toma más tiempo para reducir el tamaño de la disolución eficiente. Es necesarios utilizar un equipo sellado, para evitar la pérdida habitual del material de interés.
- El cianuro es un lixiviante peligroso y por lo tanto debe utilizarse con altos estándares de seguridad. Puede causar la contaminación de los ríos y el agua de mar, especialmente cerca de las minas de oro, lo que plantea graves riesgos para la salud a los habitantes.
- La lixiviación de haluro es difícil de implementar debido a los ácidos corrosivos fuertes y condiciones oxidantes. Se requiere equipo especializado de acero inoxidable y cauchos para la lixiviación de oro usando agentes de haluro de desechos electrónicos.
- El consumo de tiosulfato es comparativamente mayor y el proceso global es más lento, lo que limita su aplicación para la extracción de oro a partir de minerales, así como de desechos electrónicos.
- Existe el riesgo de pérdida de metales preciosos durante la disolución y los pasos posteriores, por lo tanto, se verá afectada la recuperación total de los metales.

3.4.3 Proceso Biometalúrgico

La Biometalúrgia para la recuperación de componentes valiosos de la basura electrónica ha ido ganando popularidad en los últimos años. Los microorganismos tienen la capacidad de unirse a iones metálicos presentes en el entorno externo en

la superficie celular o para su transporte en la célula para diversas funciones intracelulares. Esta interacción podría promover la selectividad o no selectividad en la recuperación de los metales (Luda, 2011). Las interacciones entre las bacterias y los metales incluyen sorción, reducción, oxidación y precipitación de sulfuro. Hay dos métodos principales de biometalúrgia para eliminar los metales: la biolixiviación y la biosorción (Ilyas & Jae-chun, 2015).

La biolixiviación se ha usado tradicionalmente en aplicaciones industriales con el fin de lixiviar el concentrado de metal a partir de minerales, especialmente de uranio y cobre. En este proceso se utilizan microorganismos que obtienen su energía de la oxidación de compuestos inorgánicos y que viven en condiciones extremas: pH ácido (no puede pasar de 3), aireación, temperaturas que no supera los 45°C y altas concentraciones de metales. Los microorganismos utilizados con mayor frecuencia para este proceso son las bacterias que pertenecen al género de las *Acidithiobacillus*, entre las que destacan las *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Acidithiobacillus thiooxidans*.

El proceso se desarrolla generalmente en un tanque de acero inoxidable de gran tamaño, equipado con agitadores mecanizados y con la introducción de aire por ventiladores, lo que asegura la disponibilidad de oxígeno y dióxido de carbono para los microorganismos. Es necesario inocular estos reactores con los microorganismos, para lograr la biolixiviación que opera en un proceso continuo; hay que tener en cuenta que a menor tamaño de partícula el tiempo de lixiviación aumenta y con ello el consumo de reactivos (COCHILCO - Comisión Chilena del Cobre, 2009).

Por otro lado, la biosorción se refiere a la captación de metales que lleva a cabo una biomasa completa (viva o muerta), a través de mecanismos fisicoquímicos como la adsorción o el intercambio iónico. Este proceso involucra una fase sólida

(sorbente) y una fase líquida (solvente, que es normalmente el agua) que contiene las especies disueltas que van a ser sorbidas (sorbato, e. g. iones metálicos). Debido a la gran afinidad del sorbente por las especies del sorbato, este último es atraído hacia el sólido y enlazado por diferentes mecanismos. Este proceso continúa hasta que se establece un equilibrio entre el sorbato disuelto y el sorbato enlazado al sólido (a una concentración final o en el equilibrio). La afinidad del sorbente por el sorbato determina su distribución entre las fases sólida y líquida. La calidad del sorbente está dada por la cantidad del sorbato que puede atraer y retener en forma inmovilizada.

Los hongos, incluyendo las levaduras, han recibido especial atención con relación a la biosorción de metales, particularmente porque la biomasa fúngica como la del ascomiceto *Aspergillus niger*, la cual se origina como un subproducto de diferentes fermentaciones industriales. Generalmente se utilizan reactores de cama empacada para pequeños volúmenes o fluidizada para grandes volúmenes que aumentan la resistencia mecánica y disminuyen la dificultad para separar la biomasa del efluente. El tiempo de biosorción depende de la concentración residual de metal en el efluente (Tapia, y otros, 2011) (Cañizares Villanueva, 2000).

Los procesos biometalúrgicos de los desechos electrónicos tiene una serie de ventajas sobre los métodos tradicionales, incluyendo bajos costos de operación, la minimización del volumen de lodos biológicos y / o químicos para ser manipulados y la alta eficiencia en los efluentes de desintoxicación; y como desventajas esta la velocidad de reacción lenta y la presencia de metales pesados (Zeljko, Korac, & Ranitovic , 2011).

4. ANTECEDENTES

En Medellín, existen algunas empresas encargadas del desensamble de los RAEE logrando manejar pocas cantidades; a la fecha se puede mencionar a la empresa Lito Ltda donde los procesos que manejan básicamente son de desensamble y separación de partes de computadores y otros aparatos eléctricos y electrónicos; de igual manera se puede mencionar a la empresa eCycling, la cual se encuentra montando una planta para el desensamble y separación de las partes de los RAEE. En muchas ocasiones estos gestores se convierten en una especie de intermediarios para exportar estos materiales a otros países que cuentan con la tecnología requerida para disponer estos residuos (Cárdenas Espinosa, 2010). En Colombia el proceso utilizado para el tratamiento y recuperación de metales de los RAEE es el pirometalúrgico, el cual lo ha desarrollado por 16 años la compañía GAIA VITARE en Bogotá.

De igual forma algunos recicladores informales recogen estos equipos en desuso para realizar su desensamble de manera artesanal y comercializar algunas partes (Uribe Restrepo , Wolfensberger Malo , & Ott , 2009).

En la literatura se reporta que el proceso de recuperación de cobre a partir de las tarjetas de circuitos integrados de los RAEE con menor impacto ambiental es el proceso hidrometalúrgico, aunque es de anotar que depende en gran medida de los solventes utilizados para la lixiviación. A continuación, se nombran algunos de los desarrollos realizados:

Algunos estudios reportan el uso de ácido sulfúrico como reactivo para la lixiviación, siendo este un compuesto muy reactivo y corrosivo que puede dañar a las plantas y a los animales que entran en contacto con él, si se hace un mal manejo de este; además puede provocar incendios si entra en contacto con otros materiales

combustibles lo que hace de su tratamiento un proceso delicado y por ende es necesaria una gran inversión (Chaverra Arias & Restrepo Baena, 2014) y (Zeljko, Korac, & Ranitovic , 2011).

Los procesos hidrometalúrgicos mencionados en la literatura utilizan ácidos ya sea sulfúrico o ácido cianhídrico en el proceso de lixiviación, estos solventes suelen recuperarse por extracción por solventes obteniendo una solución acida limpia reutilizable (Santander Araya, 2014).

Por otro lado, otros autores han reportado el uso de soluciones básicas para la lixiviación, principalmente en procesos pirometalúrgicos, como amoniaco más carbonato de amonio (sal), este último fue utilizado anteriormente como levadura química en polvos para hornear. La toxicidad de las soluciones de amoniaco no suelen causar problemas en los humanos u otros mamíferos y se utilizan como fertilizantes, estos suelen recuperarse por absorción. Por lo tanto, al no presentarse un estudio de un proceso hidrometalúrgico utilizando soluciones básicas, evaluar su utilización, abriría la posibilidad para su implementación posterior (Rudnik, Pierzynka, & Handzlik, 2014).

Lo anterior puede usarse como punto de partida para realizar el diseño de experimentos con una solución de amoniaco más carbonato de amonio y evaluar su utilización en el proceso hidrometalúrgico.

5. METODOLOGÍA

5.1 PROCESO HIDROMETALÚRGICO PARA LA RECUPERACIÓN DE COBRE A PARTIR DE LAS TARJETAS DE CIRCUITOS INTEGRADOS LOS RAEE

La etapa experimental se desarrolló en el Laboratorio de metalmecánica, Fenómenos químicos y de productos naturales y Taller de madera de la Universidad EAFIT, el Laboratorio CIMEX de la Universidad Nacional y el Laboratorio CIDEMAT de la Sede de Investigación Universitaria de la Universidad de Antioquia en Medellín–Colombia.

5.1.1 REDUCCIÓN DE TAMAÑO Y CLASIFICACIÓN

Se tomaron alrededor de 1000 g de material conformado por tarjetas de circuitos impresos de los RAEE. Consecuentemente se retiraron manualmente con un alicate los condensadores electrolíticos (poseen electrolitos tóxicos y corrosivos), luego con un cincel y un martillo se retiraron las partes metálicas y plásticas de mayor tamaño que son: aceros magnéticos, sockets para microprocesadores, tarjetas controladoras (módem, video, etc.), módulos de memoria RAM. Todas estas partes retiradas comprendieron aproximadamente un 25% w/w del total de las TCI.



Figura 4. Desmantelación de las partes plásticas, metálicas y condensadores de las TCI

Luego se pasó a la reducción de tamaño, donde se cortaron las TCI a un tamaño de 1x4 mm haciendo uso de diferentes sierras sin fin, logrando el tamaño entre el rango recomendado.

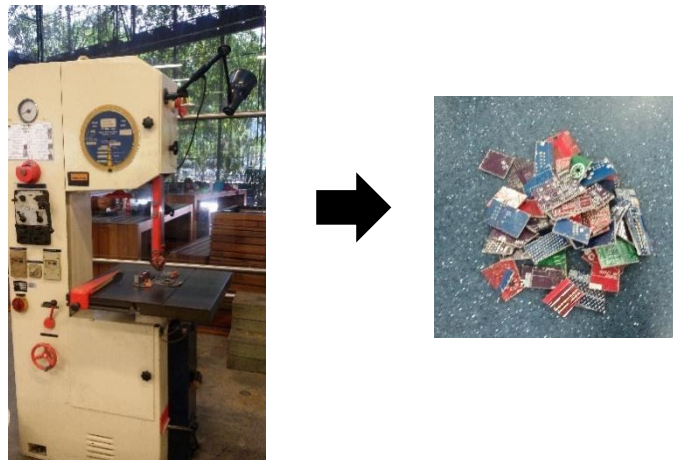


Figura 5. Reducción de tamaño de las TCI pasando de 15x12 cm a 5x4 cm

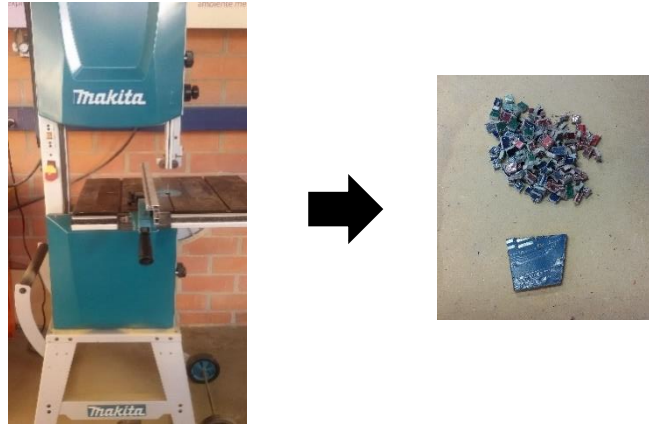


Figura 6. Reducción de tamaño de las TCI pasando de 5x4 cm a 1x4 mm

5.1.2 SEPARACIÓN MAGNÉTICA Y ELECTROESTÁTICA

Con el objetivo de eliminar las especies de poco interés y obtener un material apropiado para un buen proceso metalúrgico extractivo, se realizó un proceso de concentración mediante separación magnética y electrostática, eliminando así las especies ferrosas y las no metálicas.

Este proceso comenzó con la separación magnética, donde se alimentan las TCI con un tamaño de 1x4 mm a una campana vibratoria conectada a un magneto, las especies ferrosas se adhieren a la pared del magneto y son posteriormente desechadas en el recipiente. Se operó el separador magnético a una velocidad de rodillo de 50 rpm, con una intensidad de corriente de 1,5 A, ya que a mayores velocidades la selectividad de esta separación es menor.



Figura 7. Proceso de Separación Magnética

Posteriormente se procesó la fracción no ferrosa, gracias a un separador electrostático, el cual aprovechando las diferencias en conductividad eléctrica aparta las especies no conductoras de las conductoras para obtener un concentrado metálico. El material se deposita en el recipiente alimentador que posee una palanca que abre y cierra una compuerta para alimentar paulatinamente la muestra al tambor para la posterior separación. Se opera el separador electrostático a una intensidad de 15 KV y a una velocidad de rotación del tambor de 20 rpm.



Figura 8. Proceso de Separación Electroestática

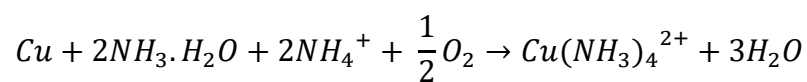
Consecuentemente el material obtenido se lavó con etanol y se dejó secar por 15 minutos en un horno a 55°C debido a que fue manipulado, con este lavado se pasiva la superficie para sus posteriores tratamientos, es decir, se limpia la muestra y se eliminan los agentes que puedan afectar los resultados de los procesos subsiguientes. Luego este se destila y se recupera el 98% del utilizado.



Figura 9. Lavado del material resultante de las separaciones magnética y electroestática

5.1.3 LIXIVIACIÓN Y ELECTRÓLISIS

La lixiviación se lleva a cabo a partir de una solución de 100 ml que contiene entre 0,5M y 1,5M amoníaco (NH_3), entre 1M y 2M de $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ carbonato de amonio y entre 0,05M y 0,2M de sulfato de cobre, a la cual se le adicionó 5 g del material ya separado y lavado. Por consiguiente, con un diseño de experimentos factorial fraccionado 2^{5-2} con dos puntos al centro, se evaluó la lixiviación a un tiempo de 6h, 12h y 24h; y a una agitación de 200, 300 y 400 rpm, con el propósito de encontrar las condiciones de los factores que afectan significativamente la recuperación del cobre (Rudnik, Pierzynka, & Handzlik, 2014). Este proceso se representa en la siguiente reacción:



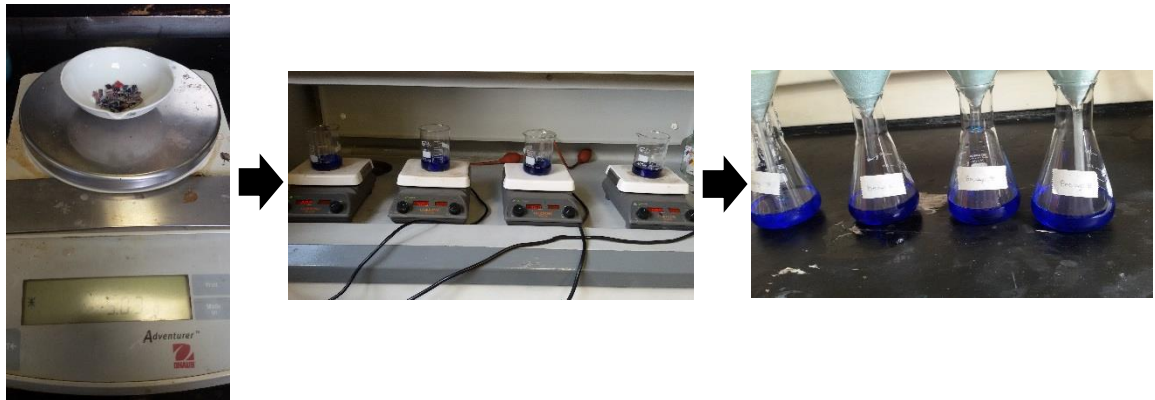


Figura 10. Proceso de Lixiviación

Luego de encontrar los factores más significativos se desarrolló un diseño de optimización por medio de una metodología de Superficie de Respuesta (Diseño Central Compuesto $2^{2+\text{estrella}}$) para encontrar las condiciones de los factores más significativos que maximizan la concentración de cobre. Consecuentemente a la solución que presento mayor recuperación de cobre, se le determinó el rango de potencial de deposición del cobre con el propósito de alcanzar a electro-depositar un cobre con una alta pureza, esto se logra a partir de un análisis de Voltametría, el cual se desarrolló en un área de 1cm^2 con cátodo y ánodo de acero inoxidable, por su accesibilidad, economía y para evitar la contaminación de la muestra con oxido. Como electrodo de referencia se utilizó la aleación Ag/AgCl (plata/cloruro de plata). La otra cara de la superficie a electro-depositar se cubrió con cinta DEJO para garantizar aislamiento de la superficie. En este análisis se realizó un barrido de los potenciales para saber el grado en el que se encuentra $\text{Cu}_{(0)}$ entre 400mV a -900mV a una velocidad de 20mV/s con 4 ciclos y un Open Circuit Potential de 14mV .



Figura 11. Análisis de Voltametría

Con el fin de recuperar el cobre, se desarrolló la electro-deposición en un beaker de 50ml, al cual se le adicionaron 50 ml de la solución óptima y se le suministro un potencial intermedio entre el rango que se determinó con la Voltametría de -865mV. Con el propósito de lograr niveles adecuados de productividad, se evaluó la concentración de cobre luego de una hora, cabe recordar que se utilizó como cátodo y ánodo una lámina de acero inoxidable con un área total de 1 cm²; posteriormente se analizó la pureza y morfología de la muestra de cobre electro-depositada en el ánodo utilizando una técnica de microscopia electrónica de barrido acoplada a un espectrofotómetro de emisión atómica SEM/EDS.

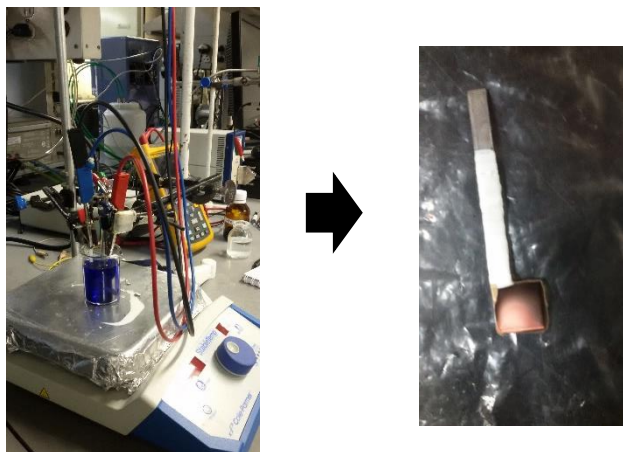


Figura 12. Electro-deposición del cobre y prototipo de cobre recuperado

5.2 DETERMINACIÓN DE LOS FACTORES QUE AFECTAN SIGNIFICATIVAMENTE LA RECUPERACIÓN DE COBRE

Para determinar los factores que afectan significativamente la recuperación de cobre, se planteó un diseño factorial fraccionado 2^{5-2} con dos puntos al centro. Los factores, sus niveles y las corridas utilizadas para este diseño se muestran en la Tabla 2:

Tabla 2. Diseño factorial fraccionado 2^{5-2} con dos puntos al centro para la determinación de los factores más significativos en la recuperación de cobre

Ensayo	Concentración de Amoniacó [M]	Concentración de Carbonato de Amonio [M]	Concentración de Sulfato de Cobre [M]	Tiempo (h)	Agitación (rpm)
1	1	1,5	0,1	12	300
2	0,5	1	0,05	24	400
3	1,5	1	0,05	6	200
4	0,5	2	0,05	6	400
5	1,5	2	0,05	24	200
6	0,5	1	0,2	24	200
7	1,5	1	0,2	6	400
8	0,5	2	0,2	6	200
9	1,5	2	0,2	24	400
10	1	1,5	0,1	12	300

Los factores no significativos se fijaron en el nivel que maximizó la recuperación del cobre (Montgomery, 2004). La variable de respuesta que se evaluó fue la concentración de cobre en la solución, para el análisis de datos se utilizó el programa Statgraphics Centurion XVIII y paquetes de R stats, los análisis estadísticos de los datos se realizaron de acuerdo a lo reportado en el numeral 5.4.

Variables como la temperatura influyen la cinética de la lixiviación afectando la vaporización o pérdida de amoniacó en la solución, siendo así es recomendable su variabilidad entre 18°C y 30°C, por lo tanto, es tomada la temperatura ambiente promedio de Medellín de 21,6°C, en cuanto a la presión se presenta la misma afectación de pérdida de amoniacó donde se recomienda no supere 1,09 atm, por consiguiente, es tomada la presión promedio de Medellín de 0,84 atm (Sun, y otros, 2015).

5.3 OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO OBTENCION DE COBRE A PARTIR DE LAS TCI DE LOS RAEE

Con el resultado del diseño de experimentos anterior, se realizó un diseño compuesto central $2^{2+estrella}$ de superficie de respuesta para determinar la configuración óptima de los factores más significativos sobre la variable de respuesta definida con anterioridad. Para determinar la combinación de factores y niveles que maximicen las dos variables de respuesta se realizó una optimización de la deseabilidad a partir de un análisis de ponderación de las variables de respuesta (Montgomery, 2004). Los factores y, sus niveles y las corridas utilizadas para este diseño se muestran en la siguiente Tabla 3:

Tabla 3. Diseño compuesto central $2^{2+estrella}$ para determinar el punto óptimo de los factores significativos

Ensayo	Concentración Carbonato de Amonio [M]	Concentración Sulfato de Cobre [M]
1	0,6	0,035
2	1	0,02
3	0,0343146	0,035
4	1	0,05
5	0,2	0,02
6	0,6	0,0562132
7	0,2	0,05
8	0,6	0,0137868
9	1,16569	0,035
10	0,6	0,035

5.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA LOS DISEÑO FACTORIAL Y DE OPTIMIZACIÓN

Los resultados obtenidos se ajustaron a partir de un modelo de regresión simple, cuadrático o cubico de acuerdo al modelo que exhiba un mejor coeficiente de determinación (R^2). Siendo los datos paramétricos se realizó un análisis ANOVA para determinar la composición de mejor respuesta y se utilizaron test (LSD, Tuckey o pruebas T) que permitieran determinar diferencias significativas entre los tratamientos evaluados. Adicionalmente a ello se realizaron todas las superficies de respuesta y las gráficas de interacción entre todos los factores y sus niveles, así como las multicorrelaciones, análisis multivariantes y el modelamiento estadístico requerido.

5.5 ANÁLISIS ECONÓMICO

A partir de los consumos de energía que requirió el proceso a escala de laboratorio, y el costo de las materias prima utilizados, se analizó el costo por gramo de cobre recuperado y se determinó la viabilidad de la aplicación de este proceso a nivel industrial.

5.6 ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL

Teniendo en cuenta los dos posibles escenarios de disposición de las TCI, ya sea ser arrojadas al relleno sanitario o ser procesadas y recuperar el cobre de estas de acuerdo al proceso que se planteó en el proyecto, se compararon los impactos ambientales de ambos caminos.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 RESULTADOS DEL DISEÑO DE UN PROCESO HIDROMETALÚRGICO PARA LA RECUPERACIÓN DE COBRE A ESCALA DE LABORATORIO.

El proceso hidrometalúrgico desarrollado para la recuperación de cobre de las TCI de los RAEE se ve representado en el diagrama de bloques con sus respectivas entradas y salidas en la Figura 13. De igual forma con el propósito de conocer más detalladamente el proceso que se desarrolló con las TCI y su transformación por el paso de cada etapa mencionada en el diagrama de bloques se presenta el diagrama de flujo del proceso, donde se muestran las entradas y salidas, se especifica el contenido en cada corriente y los equipos utilizados en la Figura 14.

Figura 13. Diagrama de bloques del proceso de recuperación de cobre de las TCI de los RAEE

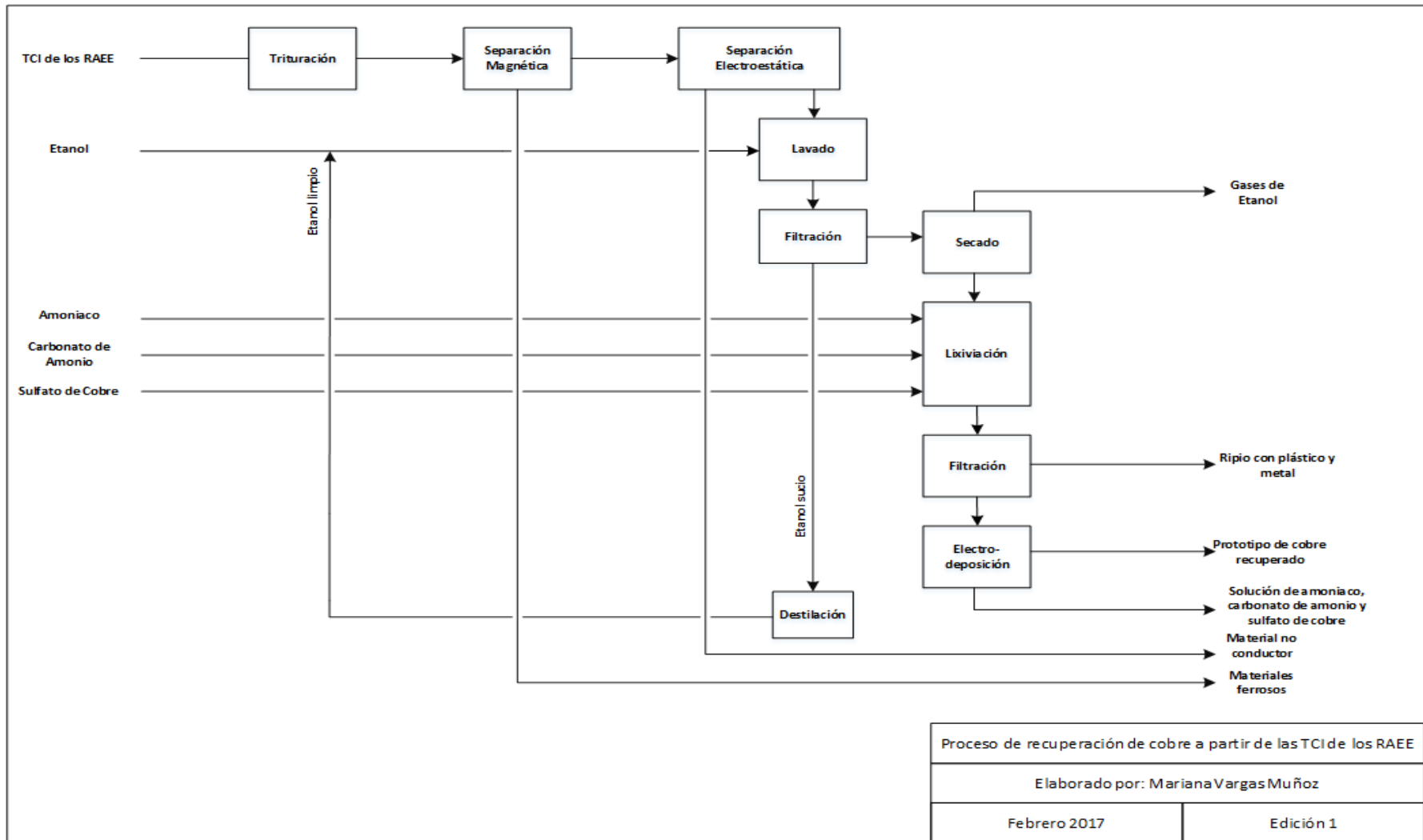
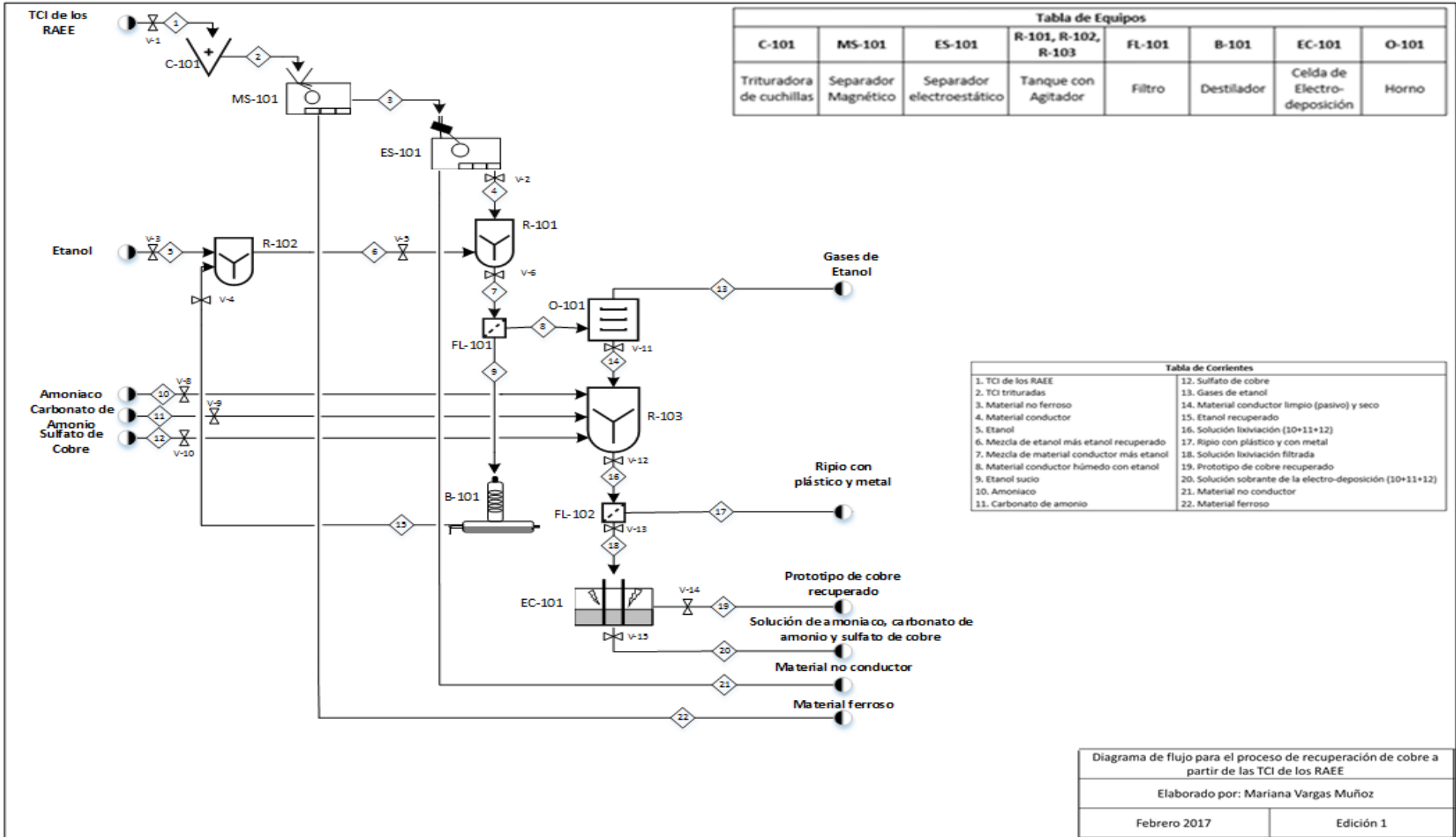


Figura 14. Diagrama de flujo del proceso para la recuperación de cobre a partir de las TCI de los RAEE



6.1.1 Balance de Masa

A continuación, se presenta el balance de masa paso a paso para la recuperación de cobre de 7 g de TCI de los RAEE a condiciones de temperatura y presión ambiente de Medellín (21,6°C y 0,84 atm):

En la primera etapa del proceso ingresa a la trituradora de cuchillas 7 g de TCI, posteriormente a la etapa de separación magnética ingresan las TCI que salieron de la trituradora, obteniendo de esta separación 6,13 g de material no ferroso y 0,87g de material ferroso. Luego a la separación electrostática entra el material no ferroso y como resultado de esta separación se obtienen 5,24 g de material conductor y 0,89 g de material no conductor. Al terminar con el proceso de separación el material conductor entra a una limpieza con 10 ml de etanol. De este proceso se destila y se recuperan 9,8 ml de etanol que se reintegran al proceso. El material conductor limpio es secado y se ingresa al proceso de lixiviación, donde se agrega 0,85 g de amoniaco, 9,6 g de carbonato de amonio, 0,8 g de sulfato de cobre y 100 ml de agua desionizada. Seguidamente de este proceso se obtiene una solución de 100 ml rica en cobre y 0,57 g del material al cual fue retirado el cobre.

Por último, a la etapa de electro-deposición entra la solución de 100 ml rica en cobre producto de la lixiviación y de la cual salen 0,83 g de cobre.

6.2 RESULTADOS DE LOS FACTORES QUE AFECTAN SIGNIFICATIVAMENTE EL PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN DE COBRE

Para determinar los factores que afectan significativamente la recuperación de cobre se utilizó un diseño de experimentos 2^{5-2} con dos puntos al centro el cuál se observa en la Tabla 2, para determinar la concentración de cobre en cada ensayo se realizó un análisis de absorción atómica que fue desarrollado por el laboratorio

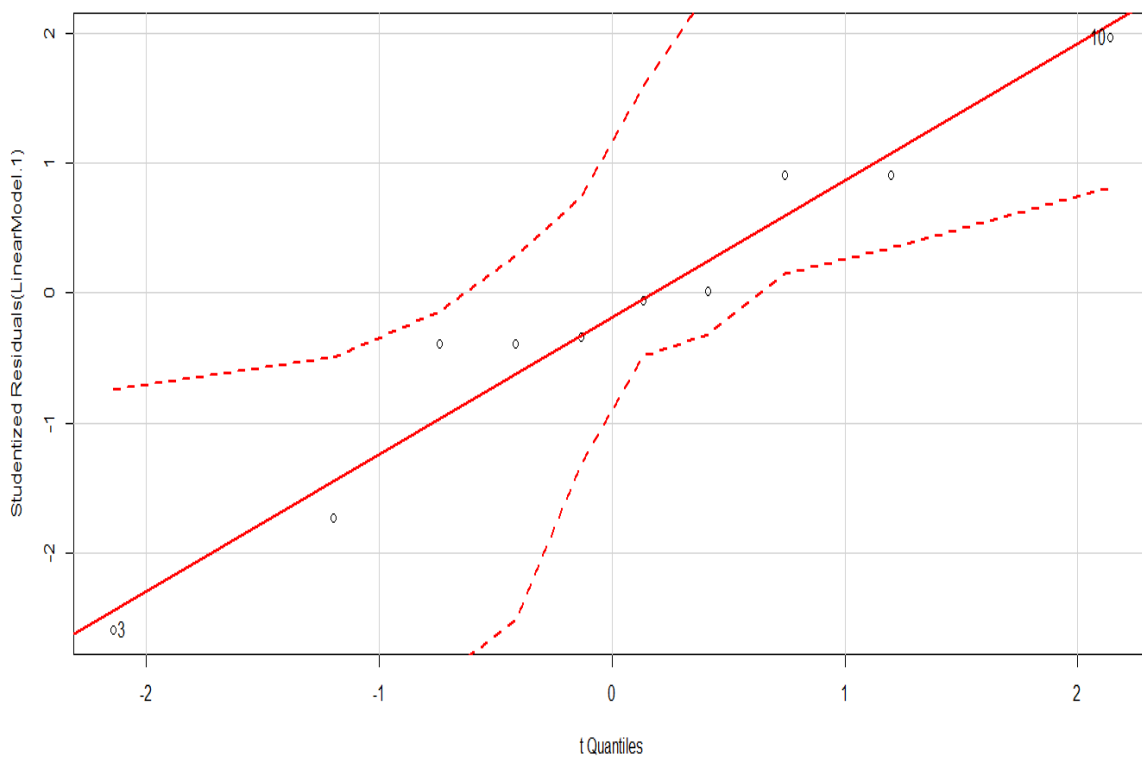
de análisis fisicoquímicos de la Universidad de Antioquia (ver Anexo 1), los resultados arrojados para cada ensayo fueron los siguientes (Tabla 4):

Tabla 4. Resultados de cobre recuperado en cada ensayo basado en el análisis de absorción atómica

Ensayo	Concentración de cobre inicial (mg/L)	Concentración de cobre total (mg/L)	Concentración de cobre recuperado (mg/L)
1	6354	9241,49	2887,49
2	3177	10757,74	7580,74
3	3177	5025,49	1848,49
4	3177	4725,99	1548,99
5	3177	8776,74	5599,74
6	12708	19006,24	6298,24
7	12708	13169	461
8	12708	12800	92
9	12708	15130,24	2422,24
10	6354	10247,24	3893,24

Los resultados obtenidos son ingresados al programa R stat, y se procede a la comprobación de los supuestos donde se obtuvo lo siguiente:

- Igualdad de varianza por Breush-Pagan: p-value = 0,8885
- Independencia de los residuales por Durbin Watson: p-value = 0,5446
- Normalidad de los residuales por método gráfico (ver Gráfica 2):



Gráfica 2. Método gráfico para evaluación de normalidad

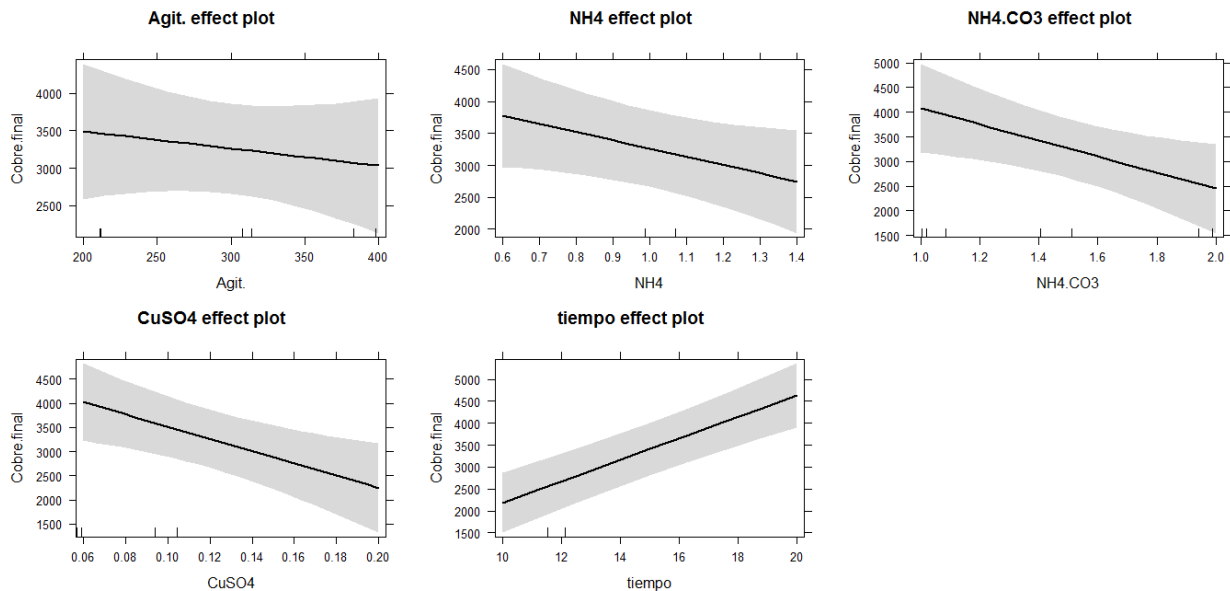
De acuerdo a los resultados obtenidos se cumplen los supuestos de la ANOVA, generando la tabla ANOVA en la Tabla 5, se muestran los factores que afectaron significativamente la recuperación del cobre:

Tabla 5. Tabla ANOVA diseño factorial fraccionado 2⁵⁻²

Factores	Sum Sq	F Value	Pr (>F)
Agitación	416556	0,8908	0,3987086
Amoniaco	3365067	7,1959	0,0550841 .
Carbonato de amonio	5322769	11,3823	0,0279461 *
Sulfato de cobre	7400552	15,8225	0,0164268 *
Tiempo	39754420	85,0116	0,0007689 ***
Residuales	1870541		

Conforme se observa en la Tabla 5, los factores que afectan significativamente la recuperación del cobre por tener una probabilidad de cometer error tipo I dada por el valor Pr menor a 0,05 son: carbonato de amonio, sulfato de cobre y tiempo.

Comparando estos datos con los encontrados en la literatura, se menciona que las condiciones más favorables para que pueda disolverse espontáneamente el cobre es en soluciones con iones de cobre (II), además la sal de carbonato de amonio permite la lixiviación eficaz del cobre, sin degradación incontrolada de la aleación, influyendo en la cantidad de cobre recuperado en el tiempo (Rudnik, Pierzynka, & Handzlik, 2014), los resultados obtenidos se alinean con los estudios publicados y por tanto se concluyen como lógicos. Por el contrario, el factor tiempo es tomado como una variable dependiente y sensible a los cambios de los otros dos factores mencionados con anterioridad. Aunque la tabla ANOVA lo describe como el factor más significativo, hay que tener en cuenta que aumentar el tiempo a más de 24 horas, reduciría la factibilidad económica del proceso de recuperación, por lo tanto, el carbonato de amonio y el sulfato de cobre serán las variables con las cuales se desarrolló el diseño de optimización con el propósito de encontrar el punto óptimo de recuperación de cobre. En la Gráfica 3, se muestra el efecto que tiene cada factor y sus niveles sobre la recuperación del cobre:



Gráfica 3. Comportamiento de la variable de respuesta con cada factor evaluado

De acuerdo a la Gráfica 3, el nivel que maximiza la recuperación de cobre para cada variable es: amoníaco 0,5M, agitación 200rpm y el tiempo se mantendrá en 24h. Para el caso de los factores significativos, una concentración de 0,05M de CuSO_4 y una concentración de 1,0M de NH_4CO_3 mostró un máximo de recuperación de 7580,74 mg Cu/L, es por esto que para el proceso de optimización se fijarán los factores no significativos en 0,5M, 200 rpm y 24h para el amoníaco, la agitación y el tiempo respectivamente; y para los factores, carbonato de amonio se variarán entre 0,2-1 M y el sulfato de cobre entre 0,02-0,05M; niveles que se consideran los más probables para encontrar un óptimo.

6.2 RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO OBTENCION DE COBRE A PARTIR DE LAS TCI DE LOS RAEE

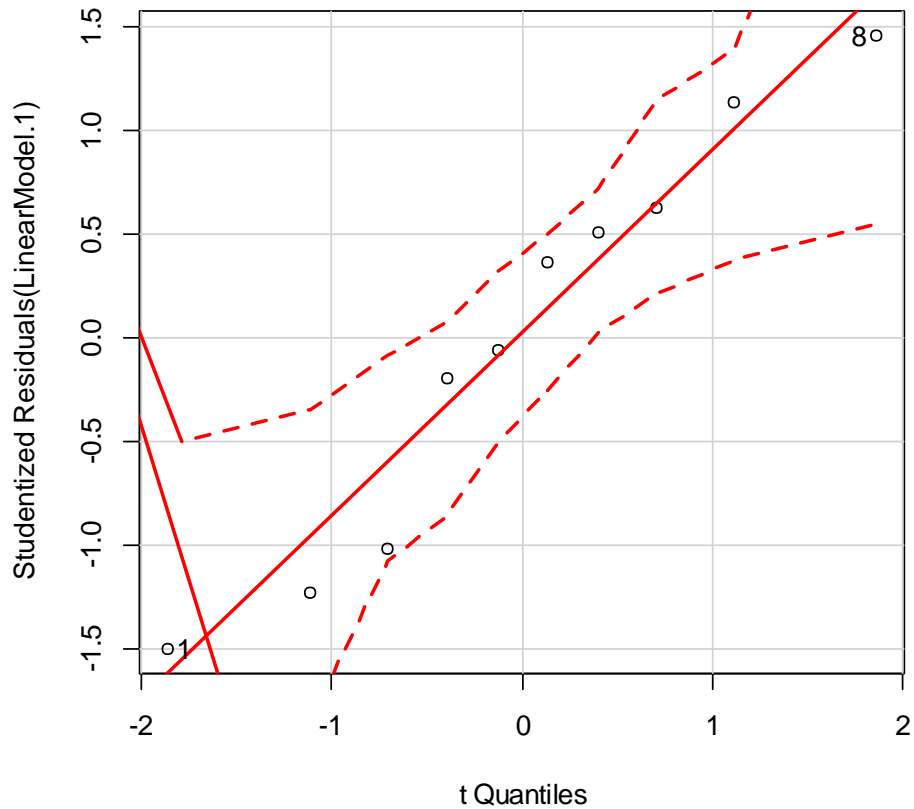
Para determinar la configuración óptima de los factores más significativos sobre la recuperación de cobre, se utilizó un Diseño Central Compuesto $2^{2+estrella}$ de superficie de respuesta (Tabla 3). Como variable de respuesta se utilizó la concentración de cobre en cada tratamiento, la cual fue medida utilizando un análisis de absorción atómica que fue desarrollado por el laboratorio de análisis fisicoquímicos de la Universidad de Antioquia (ver Anexo 2), los resultados arrojados para cada ensayo se muestran en la Tabla 6:

Tabla 6. Resultados de cobre recuperado en cada ensayo basado en el análisis de absorción atómica del diseño de optimización

Ensayo	Concentración de cobre inicial (mg/L)	Concentración de cobre total mg/L	Concentración de cobre recuperado (mg/L)
1	2223,9	5497,0	3273,1
2	1270,8	5517,4	4246,6
3	2223,9	3830,0	1606,1
4	3177,0	11058,0	7881,0
5	1270,8	3835,4	2564,6
6	3571,8	8324,6	4752,8
7	3177,0	5756,5	2579,5
8	876,0	4652,3	3776,2
9	2223,9	7549,9	5326,0
10	2223,9	6603,4	4379,5

Al igual que con el diseño anterior los resultados obtenidos son ingresados al programa R paquetes PlotsR y StatR, y se procede a la comprobación de los supuestos donde se obtuvo lo siguiente:

- Igualdad de varianza por Breush-Pagan: p-value = 0,9831
- Independencia de los residuales por Durbin Watson: p-value = 0,5519
- Normalidad de los residuales por método gráfico (ver Gráfica 4):



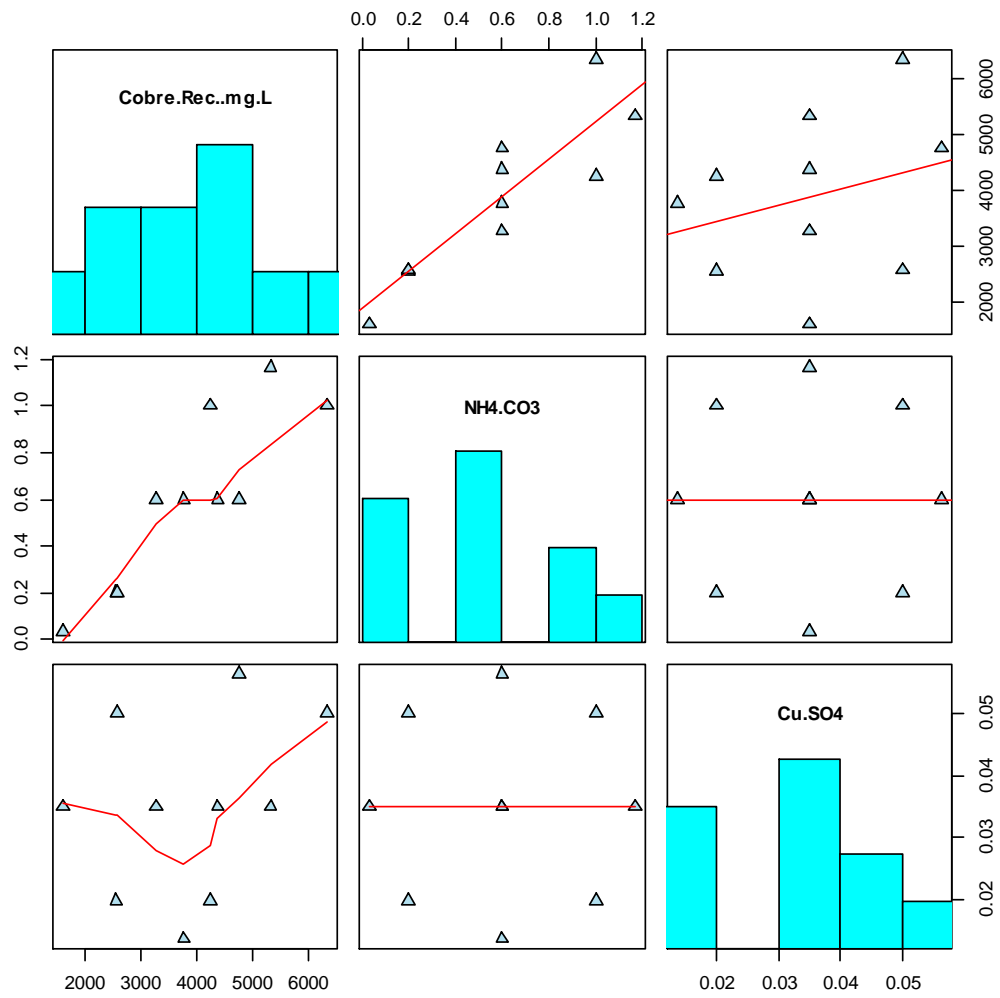
Gráfica 4. Método gráfico para evaluación de normalidad diseño de optimización

Sabiendo que los supuestos se cumplen, se puede generar la tabla ANOVA del diseño utilizado la cual se ve a continuación:

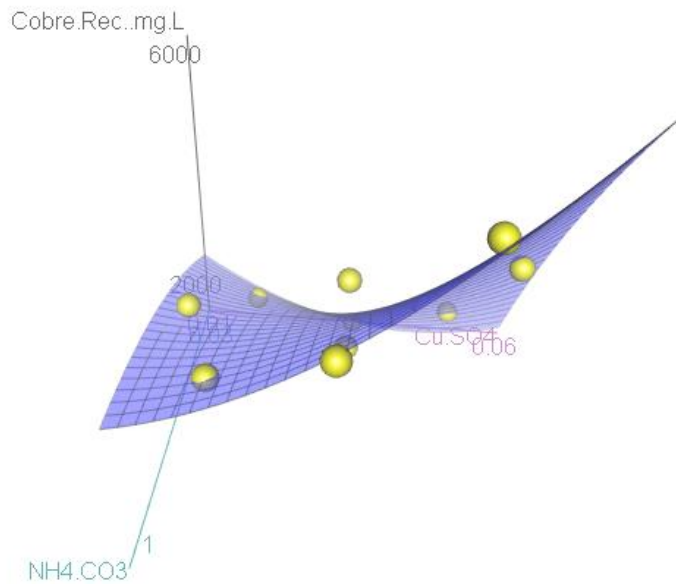
Tabla 7. Tabla ANOVA para el diseño de optimización

Factores	Sum Sq	Df	F value	Pr (>F)	
Cu.SO4	1521562	1	6,8270	0,0399676	*
NH4.CO3	14318312	1	64,2436	0,0002013	***
Cu.SO4: NH4.CO3	1079583	1	4,8439	0,070017	.
Residuals	1337253	6			

De acuerdo a la Tabla 7, se rectifica que tanto el sulfato de cobre como el carbonato de amonio afectan significativamente la recuperación de cobre, sin embargo, la interacción entre ambos factores no resultó significativa. De acuerdo al valor-P publicado, es posible inferir que el carbonato de amonio tiende a tener un mayor efecto sobre la recuperación del cobre. Para observar más detalladamente el comportamiento de estos factores con respecto a la variable de respuesta, se presenta la Gráfica 5, un análisis de regresiones múltiples que permite visualizar las correlaciones observadas entre los factores y la variable de respuesta y en la Gráfica 6, el comportamiento de la superficie de respuesta:



Gráfica 5. Interacciones de los factores con la variable de respuesta



Gráfica 6. Superficie de Respuesta

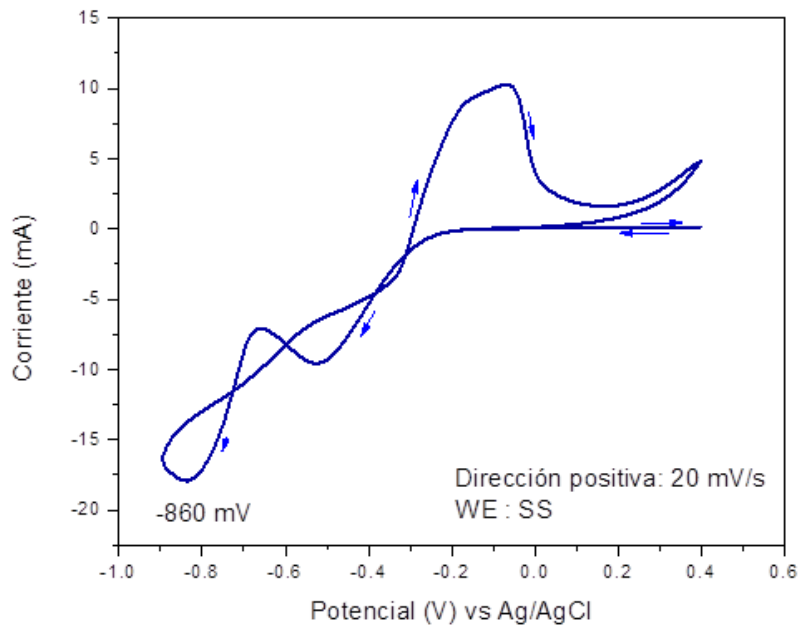
Conforme a la Gráfica 5 y 6, no se encontró punto óptimo, ya que no hay presencia de curvatura en los paneles de intersección de la variable de respuesta respecto a los factores evaluados. La máxima cantidad de cobre recuperado supero los 6000 mg Cu/L y se dio con el tratamiento NH_4CO_3 a una concentración de 1,0 M y a una concentración de CuSO_4 de 0,05 M que corresponde a los niveles más altos evaluados para cada factor. Para poder encontrar un óptimo se requiere la realización de más corridas explorando las zonas de niveles altos en los factores, sin embargo, no se cuenta con partida presupuestal para la realización de más. Lo encontrado en este estudio se corresponde con la literatura, en donde los autores (Rudnik, Pierzynka, & Handzlik, 2014) publican concentraciones iguales de los factores significativos para una mayor recuperación de cobre. Además, los datos muestran una distribución normal, es decir, tienden a una media global.

En la literatura se utilizan como métodos de optimización para la recuperación del cobre tanto diseños de superficie de respuesta como modelos matemáticos en Matlab, es decir, ambos métodos son válidos y la escogencia del uno o del otro va en que se tenga una mayor fortaleza, en nuestro caso seleccionamos el método de superficie de respuesta y modelamos los datos utilizando R, ya que es un software de libre acceso y no requiere licenciamiento (Chaverra Arias & Restrepo Baena, 2014) (Fogarasi, Imre-Lucaci, Varga, & Ilea, 2012).

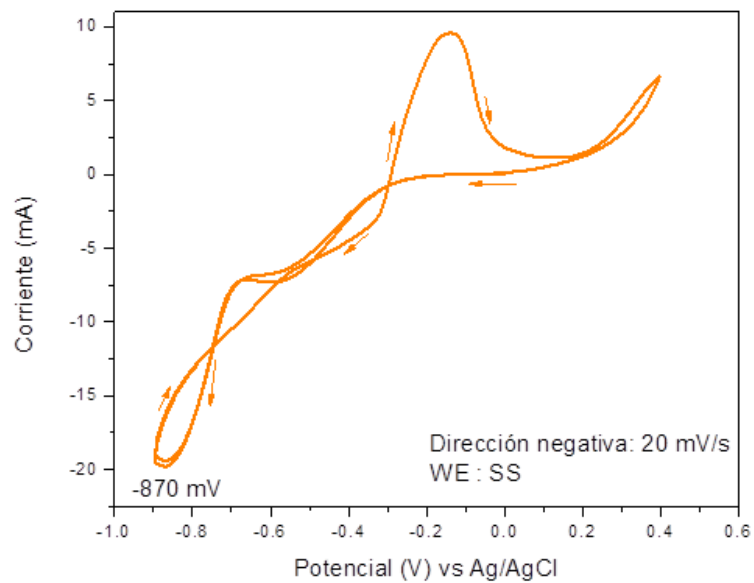
Finalmente se logró recuperar 0,79 g de cobre de 5 g de TCl, según la Tabla 1 el porcentaje de cobre en las TCl es en promedio un 20%, por lo tanto, en 5 g de TCl se recuperaría 1g de cobre, puesto que se obtuvo una recuperación de 0,79 g la eficiencia del proceso de recuperación de cobre fue de un 79% del global reportado en la literatura. Con este resultado se encontraron las mejores condiciones del proceso para la recuperación de cobre de las TCl en los factores evaluados utilizando un proceso de Lixiviación y Electrólisis.

6.3 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL PROTOTIPO DE COBRE RECUPERADO

Se realizó un análisis de Voltametría a la solución con mayor recuperación de cobre, con el fin de conocer el grado en el que se encuentra $Cu_{(0)}$ y por tanto su pureza. A partir de dicho análisis se obtuvieron los siguientes resultados:



Gráfica 7. Análisis de Voltametría [Potencia (V) vs Corriente (mA)] dirección positiva



Gráfica 8. Análisis de Voltametría [Potencia (V) vs Corriente (mA)] dirección negativa

El análisis de Voltametría consiste en aplicar un barrido de potencial tanto en el sentido directo (positivo) como en el inverso (negativo). Este barrido se inicia en un valor de 400mV hasta un valor final de -900mV o de -900mV hasta un valor 400mV teniendo en cuenta el sentido; como resultado de este análisis se obtiene una corriente a medida que se modifica el potencial.

Según la Gráfica 7 y 8, se evidencian dos picos uno de oxidación donde obtenemos Cu^{+2} y el otro de reducción donde obtenemos $\text{Cu}_{(0)}$ en estado metal; en este caso el potencial de intereses es el de reducción porque se quiere obtener el cobre metálico; según esto la Gráfica 7 nos muestra un potencial de reducción de cobre de -860mV y la Gráfica 8 de -870mV, teniendo en cuenta este resultado para la electro-deposición se utiliza un potencial de reducción intermedio de -865mV. La electro-deposición se desarrolla por 1 hora, la muestra obtenida se analizó por SEM/EDS en el Laboratorio de Microscopia de Barrido de la Sede de Investigación Universitaria de la Universidad de Antioquia arrojando lo siguiente:

Figura 15. Resultado SEM/EDS muestra de cobre electro-depositado parte 1

Cobre electro-depositado

Spectrum processing:
Peak possibly omitted: 0.275 keV

Processing option: All elements analyzed (Normalized)
Number of iterations = 2

Standard:
Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
Fe K	1.53	1.2626	0.74	0.14	0.84
Cu K	161.50	0.9988	99.26	0.14	99.16
Totals			100.00		

Project: 2017-02-01
Owner: INCA
Site: Site of Interest 1

Sample: Cobre electro-depositado
Type: Default
ID:

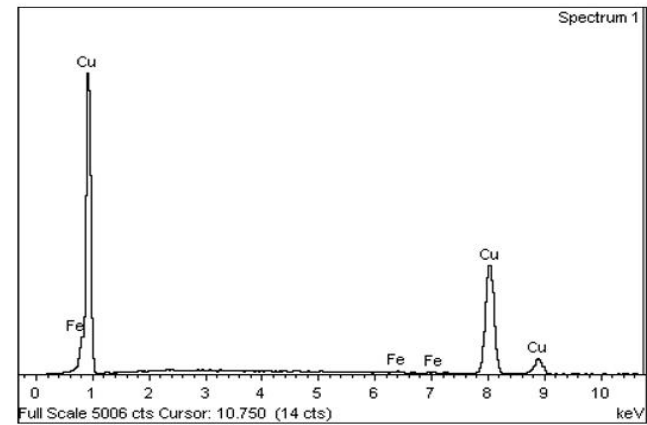
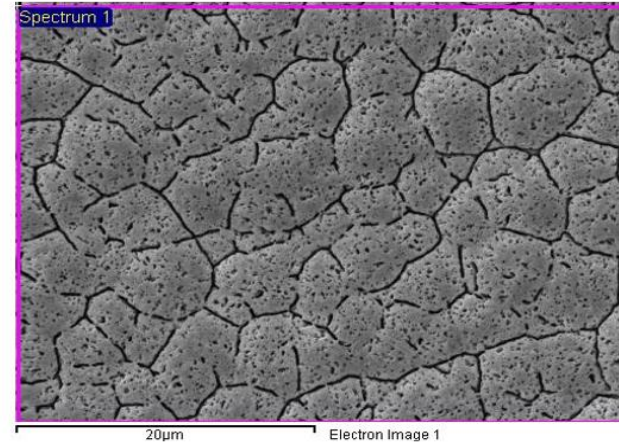


Figura 16. Resultado SEM/EDS muestra de cobre electro-depositado parte 2

Cobre electro-depositado

Spectrum processing:
Peak possibly omitted: 0.265 keV

Processing option: All elements analyzed (Normalized)
Number of iterations = 2

Standard:
Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
Fe K	1.05	1.2646	0.50	0.13	0.56
Cu K	166.85	0.9992	99.50	0.13	99.44
Totals			100.00		

Project: 2017-02-01 Owner: INCA Site: Site of Interest 2	Sample: Cobre electro-depositado Type: Default ID:
--	--

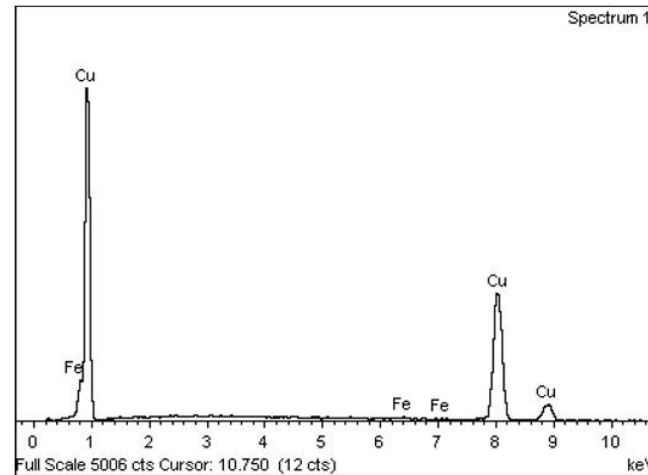
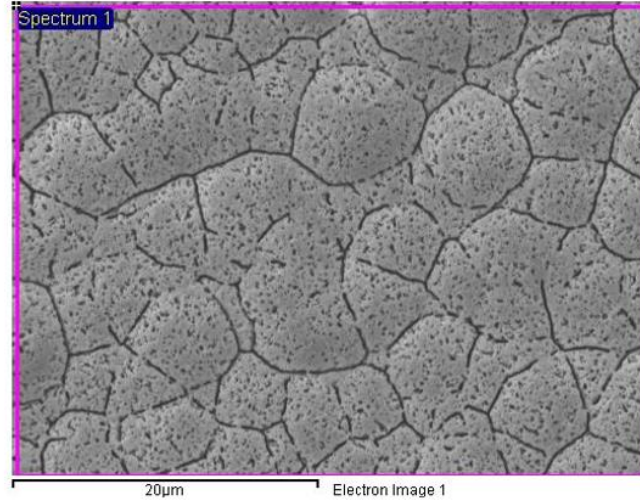


Figura 17. Resultado SEM/EDS muestra de cobre electro-depositado parte 3

Cobre electro-depositado

Spectrum processing:
Peak possibly omitted: 0.276 keV

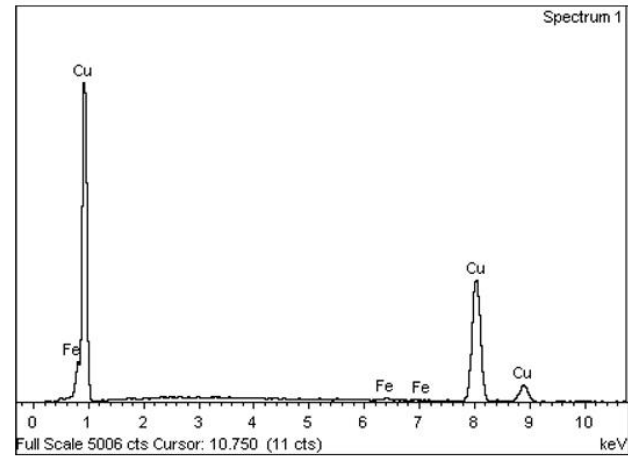
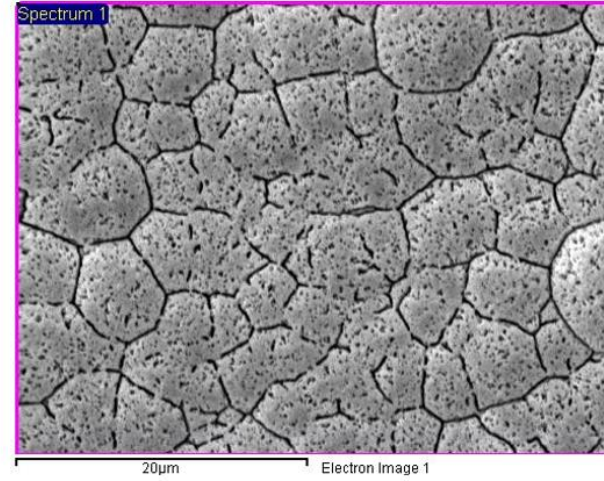
Processing option: All elements analyzed (Normalized)
Number of iterations = 3

Standard:
Fe Fe 1-Jun-1999 12:00 AM
Cu Cu 1-Jun-1999 12:00 AM

Element	App Conc.	Intensity Corr.	Weight%	Weight% Sigma	Atomic%
Fe K	1.08	1.2645	0.51	0.14	0.58
Cu K	167.83	0.9992	99.49	0.14	99.42
Totals			100.00		

Project: 2017-02-01
Owner: INCA
Site: Site of Interest 3

Sample: Cobre electro-depositado
Type: Default
ID:



Para tener un resultado más cercano a lo real se analizaron tres partes de la muestra de cobre que fue electro-depositado, en la Figura 15 se obtiene un porcentaje atómico del cobre de 99,16% y de hierro por 0,84%, en la Figura 16 se obtiene 99,44% de cobre y 0,56%; por último en la Figura 17 se obtiene 99,42% de cobre y 0,58% de hierro. En cuanto al resultado del espectro electromagnético el cual nos muestra la composición semicuantitativa del recubrimiento, se comprueba tanto en la Figura 15 como en la 16 y 17 que la muestra está compuesta mayoritariamente por Cobre (Cu), y posee una menor cuantía de Hierro (Fe) como impurezas o como parte del sustrato. Pasando a la morfología de la muestra, se observa en las 3 figuras un crecimiento granular y la formación de una película que a medida que crece se va craquelado lo que nos indica un desprendimiento del metal electro-depositado, esto es positivo ya que se busca que no sea muy adherente para poder retirarlo. En promedio se obtuvo de la muestra con una pureza del cobre de 99,34%, aunque según la literatura esta pureza puede llegar al 99,99%, en este proceso se puede lograr a este mismo valor, electro-depositando varias muestras dentro del rango de potencial que nos arrojó la voltametría hasta acercarnos a esta alta pureza (Rudnik, Pierzynka, & Handzlik, 2014).

6.4 RESULTADOS ANÁLISIS ECONÓMICO

Se realizó una evaluación de los costos relacionados a la recuperación de un kilo de cobre en cuanto a materias primas y consumo de energía, así se puede identificar si el producto y el proceso son factibles económicamente para su producción a nivel industrial y su posterior comercialización.

Inicialmente se sugirió montar la planta en Rionegro, esto por poseer una temperatura promedio de 18,5 °C, facilitando la conservación de los reactivos y de las TCI. En el proceso se utilizó como materia prima principal las TCI, luego el etanol para el lavado de las TCI trituradas; por último, los reactivos para la lixiviación que

fueron seleccionados: el amoniaco, carbonato de amonio y sulfato de cobre, los datos correspondientes a el costo de cada una de estas materias primas se encuentran enunciados en la Tabla 8.

Tabla 8. Costos de las materias primas necesarias para la recuperación de cobre de las TCI de los RAEE

Materia Prima	\$COP/Kg	\$COP/L
TCI	5.000	-
Amoniaco	-	9.400
Carbonato de amonio	1.415	-
Sulfato de cobre	7.900	-
Etanol	-	1.500

El costo de materias primas para recuperar 1 kilo de cobre se representa en la fórmula 1:

Costo materias primas

$$\begin{aligned}
 &= (\text{precio TCI} \times \text{Kg TCI}) + (\text{precio } NH_4 \times L \text{ de } NH_4) \\
 &+ (\text{precio } (NH_4)_2CO_3 \times \text{Kg de } (NH_4)_2CO_3) + (\text{precio } Cu_2SO_4 \times \text{Kg de } Cu_2SO_4) \\
 &+ (\text{precio etanol} \times L \text{ de etanol})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Por lo tanto, para obtener un kilo de cobre el costo de las materias primas sería aproximadamente \$41.319 COP, en cuanto a los costos fijos se deben tener en cuenta los tiempos de uso de los equipos involucrados en el proceso de recuperación de cobre, estos se presentan a continuación en la Tabla 9.

Tabla 9. Duración de uso de los equipos del proceso de recuperación de un kilo de cobre

Equipo	Tiempo de uso (h)
Cierra sin fin	4
Separador Magnético	0,5
Separador Electroestático	0,5
Plancha con Agitación	24
Fuente de voltaje	5

A partir de la Tabla 9 se obtiene un costo variable total de \$3.460 COP por un kilo de cobre recuperado, dándonos un costo total de \$44.778 COP. En promedio un kilo de cobre cuesta \$20.314 COP, es decir, el costo de recuperación de 1 kilo de cobre cuesta un 223% en comparación al costo de la extracción de un kilo de cobre por la industria minera, esta diferencia se debe principalmente por el impacto del costo de las TCI, ya que para obtener un kilo se necesitan 6.329 Kg de TCI, de igual forma se podrían plantear estrategias de negociación con las empresas que recogen estos residuos, además de entablar una red de recolección de estos residuos, logrando disminuir significativamente el costo de este, haciendo más competitivo el precio de recuperación de cobre con el precio que ofrece el mercado.

6.5 RESULTADOS ANÁLISIS DE IMPACTO AMBIENTAL

Al evaluar los impactos ambientales que puede causar la disposición de las TCI de los RAEE, ya sea con el proceso hidrometalúrgico propuesto, o ser arrojadas a un relleno sanitario, se obtiene la siguiente Tabla (La Asociación de Ciudades y Regiones para el Reciclaje, 2010) (Bellver, López Marijuán, Cembranos, & Castillo, 2013) (Organización Mundial de la Salud, 2003) (Productos OPPAC S.A, 2013):

Tabla 10. Impacto ambiental de las TCI de los RAEE tratadas con la metodología propuesta vs Arrojar las TCI de los RAEE a un relleno sanitario

FACTORES	ACCIONES	
	Disposición de las TCI de los RAEE en un relleno sanitario	Procesamiento de las TCI de los RAEE con el proceso hidrometalúrgico planteado
Agua	La liberación de iones de plomo a causa de las aguas subterráneas ácidas que suele haber en los vertederos, podrían traer efectos nocivos	Eutrofización de las aguas superficiales
	Acidificación de los ríos	
Suelo	La lixiviación de las sustancias peligrosas: el mercurio de los paneles de circuitos impresos, el PCB de los condensadores, los difeniletros polibrominados (PBDE) y el cadmio de los plásticos pueden disolverse en el suelo y las aguas subterráneas	Toxicidad de las aguas
	Acumulación de sustancias químicas en el suelo	
Aire	La vaporización del mercurio puede producir incendios incontrolados en los vertederos, provocando la emisión al aire de dioxinas y furanos extremadamente tóxicos	-

Conforme a los impactos que cada uno de los escenarios de disposición de las TCI generan, podemos encontrar que, aunque la metodología propuesta para la recuperación de cobre genera contaminación ambiental esta es mucho menor a si se disponen las TCI en un relleno sanitario, por lo tanto, es una mejor opción en cuanto a impacto ambiental. Igualmente, con este proceso recuperaremos productos con valor agregado que pueden convertirse en productos y unidades de negocio que impacten la sociedad y las empresas. También si comparamos el artículo (Rudnik, Pierzynka, & Handzlik, 2014) que utilizo la misma solución, pero que en vez de desarrollar un proceso hidrometalúrgico desarrollo un proceso pirometalúrgico, adicionaríamos al impacto ambiental la generación de gases altamente tóxicos, resaltando de igual forma la metodología propuesta en este proyecto.

7. CONCLUSIONES

Se propuso una metodología hidrometalúrgica para la recuperación de cobre de las TCI de los RAEE, utilizando una solución lixiviante básica con amoníaco, carbonato de amonio y sulfato de cobre. Inicialmente se analizaron los factores que influían significativamente en la recuperación del cobre, donde a partir de un diseño de factorial fraccionado 2^{2-5} con dos puntos al centro se obtuvo que los factores que influían significativamente eran el carbonato de amonio, sulfato de cobre y tiempo, el análisis de las muestras se realizó a través de absorción atómica. Aplicando este diseño se observó que se obtuvo un máximo de recuperación de cobre de 7.580,74mg Cu/L, con los niveles de CuSO_4 de 0,05 M y de NH_4CO_3 de 1,0 M. Los demás factores se fijaron en los niveles 200 rpm para la agitación, 24 horas para el tiempo y para el amoníaco de 0,5 M.

Para la optimización de la concentración de CuSO_4 y NH_4CO_3 se utilizó un diseño central compuesto $2^{2+\text{estrella}}$ con dos puntos al centro, en este diseño no se tuvo en cuenta el factor tiempo, ya que agregar más tiempo al proceso de lixiviación lo haría inviable para aplicaciones industriales. El diseño de optimización nos arrojó que el nivel (concentración) que maximiza la recuperación de cobre en el carbonato de amonio es 1,0 M y en el sulfato de cobre es 0,05 M, aunque no se encontró un punto óptimo. Bajo estas condiciones, y las especificadas en la conclusión anterior para los demás factores, se obtuvo una recuperación de cobre media de 6500mg Cu/L. Se logró un mejor tratamiento pese a que no se logró cumplir el objetivo de optimizar la recuperación de cobre, esto debido a la capacidad presupuestal del proyecto.

Mediante un análisis de absorción atómica, se logró determinar la eficiencia en la recuperación de cobre, donde a partir de 5 g TCI se recuperaron 0,79 g de cobre. Este resultado evidencia un 79% de eficiencia respecto a lo publicado en la literatura

en donde es posible recuperar un máximo de 1 g de cobre por cada 5 g de TCI procesada (Luda, 2011).

Mediante un análisis de voltametría se encontró el rango de potencial de reducción del cobre para la electro-deposición de este, entre -870mV y -860mV, para el proceso de electrodeposición se aplicó un valor intermedio de -865mV por 1 h y a partir de un análisis SEM/EDS fue posible conocer la morfología y pureza del cobre electro-depositado. Con este análisis se obtuvo una pureza en promedio de 99,34%, se verifico que la muestra está compuesta mayormente de cobre y que su morfología craquelada indica un desprendimiento lo que lo hace fácil de retirar.

Con el fin de realizar el análisis económico del proyecto se determinaron los costos de materia prima y costos fijos para 1 kilo de cobre recuperado, dándonos como resultado un costo de materias primas por \$41.319COP y un costo variable por \$3.460COP para un costo total por kilo de cobre de \$44.778COP, comparativamente con el costo comercial de un kilo de cobre por \$20.314COP, la recuperación del cobre es un 223% más costoso, esto debido al costo que representan las TCI para recuperar un kilo de cobre, siendo así no viable económicamente.

Con este trabajo logramos desarrollar un proceso para la recuperación de cobre a partir de RAEE y TCI a nivel de laboratorio; se establecieron las condiciones de producción que maximizaron la recuperación de cobre, de igual manera se indagó sobre la pertinencia económica y el impacto ambiental de estas alternativas; en función a lo mostrado aquí se cumplió la hipótesis inicial del trabajo.

8. RECOMENDACIONES

Otra alternativa para disminuir el impacto ambiental del proceso de recuperación de cobre sería estudiar la recuperación de amoníaco por absorción y también buscar alternativas de recuperación para los demás reactivos.

Para conseguir un cobre a una pureza del 99.99%, se recomienda realizar un diseño de experimentos teniendo en cuenta el rango de potencial de reducción que arrojó la voltametría.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Chaverra Arias, D. E., & Restrepo Baena, O. J. (2014). *Metodología para la recuperación de cobre de tarjetas de circuitos impresos de computador*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Hagelüken, C. (2006). *Improving Metal Returns and Eco-Efficiency in Electronics Recycling—A Holistic Approach for Interface Optimisation between Pre-Processing and Integrated Metals Smelting and Refining*. Scottsdale, AZ, USA: In Proceedings of the IEEE International Symposium on Electronics and the Environment.
- Luda, M. P. (2011). *Recycling of Printed Circuit Boards*. Integrated Waste Management - Volume II. doi:ISBN 978-953-307-447-4
- Oliveros Gómez, H. (2011). *Metodología para recuperar metales preciosos: oro, plata y grupo del platino, presentes en desechos electrónicos*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Widmer, R., Oswald-Krapf, H., Sinha-Khetriwal, D., Schnellmann, M., & Böni, H. (2005). Global perspectives on e-waste. *ELSEVIER*, 436 – 458.
- Zeljko, K., Korac, M., & Ranitovic, M. (2011). *Hydrometallurgical Process for Extraction of Metals from Electronic Waste – Part II: Development of the Processes for the Recovery of Copper from Printed Circuit Boards (PWB)*. Serbia: Association of Metallurgical Engineers of Serbia.
- Alfaro Cortes, R. E. (2015). *Teoría del curso: Termodinámica Aplicada*. Chile: (BY-NC).

- Bellver, J., López Marijuán, D., Cembranos, F., & Castillo, J. J. (2013). *La huella del consumismo tecnológico*. Madrid: Fuhem ecosocial.
- Cañizares Villanueva, R. O. (2000). *Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana*. México D.F: Revista Latinoamericana de Microbiología .
- Cárdenas Espinosa, R. D. (2010). *E- Basura: Las Responsabilidades Compartidas en la Disposición Final de los Equipos Electrónicos en algunos Municipios del Departamento de Caldas, Vistos desde la Gestión del Mantenimiento y los Procesos de Gestión de Calidad*. Atlantic International University .
- Chatterje, S., & Kumar, K. (2009). Effective electronic waste management and recycling process involving formal and non-formal sectors. *International Journal of Physical Sciences*, 893-905.
- Cifuentes Seves, L. (2007). *Procesos hidro-electr-ometalúrgicos mi 51g*. Santiago: Universidad de Chile.
- COCHILCO - Comisión Chilena del Cobre. (2009). *Biolixiviación: Desarrollo actual y sus expectativas*. COCHILCO - Comisión Chilena del Cobre.
- Codelco. (2015). *Codelco Educa*. Obtenido de https://www.codelcoeduca.cl/procesos_productivos/tecnicos_fundicion.asp
- CORANTIOQUIA, Municipio de Envigado, Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Rural de Envigado, Enviaseo E.S.P, Ecycling S.A.S. (2015). *RAEE - Buenas prácticas ambientales en el manejo de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos*. Envigado.

- Cui, J., & Zhang, L. (2008). Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review *Journal of Hazardous Materials*. *Journal of Hazardous Materials*, 158, 228-256.
- Diamantino Feijó, F. (2007). *Redução das perdas de zinco associadas aos processos de purificação do licor por cementação e de tratamento dos resíduos gerados da vitorantim metais*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais .
- Domic Mihovilovic, E. M. (2001). *Hidrometalúrgia - fundamentos, procesos y aplicaciones* (Primera ed.).
- Fogarasi, S., Imre-Lucaci, F., Varga, T., & Ilea, P. (2012). Eco-Friendly Leaching of Base Metals from Waste Printed Circuit Boards: Experimental Study and Mathematical Modeling. *Stud. Univ. Babes-Bol*, 91–100.
- G. R. (2009). *Curso MI 51 A - Pirometalurgia*. Santiago: Universidad de Chile.
- Galvez A., E. (2003). *Pirometalúrgia I*. Antofagasta: Universidad Católica del Norte.
- GreenPeace. (2012). *Minería y Basura Electrónica - El manejo irracional de los recursos*. Buenos Aires: GreenPeace.
- Harue Yamane, L., Tavares de Moraes, V., Romano Espinosa, D., & Soares Tenório, J. (2011). Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. *Waste Management*, 2553-2558.
- Hilson, G., & Monhemius, A. (2006). *Alternatives to cyanide in the gold mining industry: What prospects for the future?* *J. Clean. Prod.*


- Ilyas, S., & Jae-chun, L. (2014 de Mayo de 2015). Biometallurgical Recovery of Metals from Waste Electrical and Electronic Equipment: a Review. *ChemBioEng*, 148–169.
- Khaliq, A., Akbar Rhamdhan, M., Brooks, G., & Masood, S. (19 de Febrero de 2014). Metal Extraction Processes for Electronic Waste and Existing Industrial Routes: A Review and Australian Perspective. *Resources*, 152-179.
- La Asociación de Ciudades y Regiones para el Reciclaje. (2010). *La Gestión de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos*. Bruselas: Jean-Pierre Hannequart (ACRR).
- La Brooy, S., Linge, H., & Walker, G. (1994). *Review of gold extraction from ores*. Miner. Eng.
- Li, J., Lu, H., Guo, J., Xu, Z., & Zhou, Y. (2007). Recycle Technology for Recovering Resources and Products from Waste Printed Circuit Boards. *Environmental Science & Technology*, 1995-2000.
- Lock, D. H. (2009). *Aplicaciones en la biometalurgia - Biometallurgical applications*. Lima: Universidad Católica de Perú.
- Méndez Fajardo, S. (2013). Tratamiento diferenciado de residuos eléctricos y electrónicos. *Hoy en la Javeriana*, 14-15.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda, y Desarrollo Territorial Republica de Colombia. (2007). *Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos*. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y análisis de experimentos*. México D.F: Limusa S.A.
- Namias , J. (2013). *The Future of Electronic Waste Recycling in the United States: Obstacles and Domestic Solutions*. Columbia University, Broadway. Earth Engineering Center.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2010). *Los residuos electrónicos: Un desafío para la Sociedad del Conocimiento en América Latina y el Caribe*. Montevideo: UNESCO Montevideo, Günther Cyranek, Consejero de Comunicación e Información para el MERCOSUR y Chile.
- Organización Mundial de la Salud. (2003). *Ammonia in drinking-water*. Ginebra : OMS.
- Productos OPPAC S.A. (2013). *Hoja de seguridad sulfato de cobre*. Navarra: Productos OPPAC, S.A.
- Rudnik, E., Pierzynka, M., & Handzlik, P. (2014). Ammoniacal leaching and recovery of copper from alloyed low-grade e-waste. *J Mater Cycles Waste Manag*, 11.
- Santander Araya, C. (2014). *Recuperación de ácido sulfúrico desde una solución de ácido débil*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Sun, Z., Xiaoc, Y., Sietsma, J., Agterhu, H., Visser, G., & Yang, Y. (2015). *Selective copper recovery from complex mixtures of end-of-life electronic products with ammonia-based solution*. Netherlands: ELSEVIER.

- Szałatkiewicz, J. (2014). Metals Content in Printed Circuit Board Waste. *Pol. J. Environ. Stud.*, 23, 2365-2369.
- T. Havlik, D. O. (2010). *Leaching of copper and tin from used printed circuit boards after thermal treatment*. Kosice: Elsevier. doi:183 (2010) 866–873
- Tapia, P., Santander, M., Pávez, O., Valderra, L., Guzmán, D., & Romero, L. (2011). *Biosorción de iones cobre con biomasa de algas y orujos deshidratados*. Madrid: Revista de Metalurgia.
- Universidad de Atacama. (2010). *Pirometalurgia II - Aspectos Termodinámicos de la Fundición de Cobre*. Copiapó: Universidad de Atacama.
- Uribe Restrepo , L. M., Wolfensberger Malo , M., & Ott , D. (2009). *Manejo de los RAEE a través del sector informal en Medellín*. Medellín: Programa Seco/Empa sobre la Gestión de RAEE en América Latina.
- Vats, M., & Singh, S. (2014). E-Waste characteristic and its disposal. *International Journal of Ecological Science and Environmental Engineering*, 1(2), 49-61.
- Vidyadhar, D. A., & Mehrotra, A. (2009). *A novel flowsheet for the recovery of metal values from waste printed circuit boards*. Resour. Conserv. Recycl.

ANEXOS

Anexo 1. Resultados ensayo 1-10 de absorción atómica para la identificación de los factores más significativos en la recuperación de cobre

	REPORTE DE RESULTADOS F-SA-05	Instituto de Química Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
LABORATORIO DE ANALISIS FISICOQUIMICOS "LAFQ"		

REPORTE DE RESULTADOS No 161201-10		
Usuario: Mariana Vargas Muñoz	No. Muestras: 1	
Empresa: Universidad EAFIT	Fecha de Recepción: 02 de diciembre de 2016	
Dirección: Crra 39E #48F SUR – 150 APTO 616	Fecha de Reporte: 14 de diciembre de 2016	
Teléfono: 313 752 3911		
Fax:		

CÓDIGO INTERNO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
161201	ENSAYO 1

PARAMETRO	RESULTADO	METODOLOGIA
COBRE	9241,488 ± 179,605 mg de Cu/L	Espectrometría de absorción atómica

OBSERVACIONES:


- Los resultados reportados son válidos únicamente para las muestras analizadas, entregadas por el cliente y son de carácter confidencial.
- Este informe no se puede reproducir sin autorización del cliente.
- El laboratorio de análisis fisicoquímicos no se hace responsable del proceso de muestreo.
- En caso de reclamaciones, se recibirán únicamente durante los (8) ocho días siguientes a la recepción del informe de resultados.



JULIÁN ANDRÉS ZAPATA OCHOA

Director Técnico LAFQ

Instituto de Química.

	REPORTE DE RESULTADOS F-SA-05	Instituto de Química
		Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
LABORATORIO DE ANALISIS FISICOQUIMICOS "LAFQ"		

REPORTE DE RESULTADOS No 161201-10


Usuario: Mariana Vargas Muñoz	No. Muestras: 1
Empresa: Universidad EAFIT	Fecha de Recepción: 02 de diciembre de 2016
Dirección: Crra 39E #48F SUR – 150 APTO 616	Fecha de Reporte: 14 de diciembre de 2016
Teléfono: 313 752 3911	
Fax:	


CÓDIGO INTERNO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
161202	ENSAYO 2

PARAMETRO	RESULTADO	METODOLOGIA
COBRE	10757,738 ± 8,132 % de Cu	Espectrometría de absorción atómica

OBSERVACIONES:

- Los resultados reportados son válidos únicamente para las muestras analizadas, entregadas por el cliente y son de carácter confidencial.
- Este informe no se puede reproducir sin autorización del cliente.
- El laboratorio de análisis fisicoquímicos no se hace responsable del proceso de muestreo.
- En caso de reclamaciones, se recibirán únicamente durante los (8) ocho días siguientes a la recepción del informe de resultados.


JULIÁN ANDRÉS ZAPATA OCHOA
 Director Técnico LAFQ
 Instituto de Química.

 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1957	REPORTE DE RESULTADOS F-SA-05	Instituto de Química Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
LABORATORIO DE ANALISIS FISICOQUIMICOS "LAFQ"		

REPORTE DE RESULTADOS No 161201-10

Usuario: Mariana Vargas Muñoz	No. Muestras: 1
Empresa: Universidad EAFIT	Fecha de Recepción: 02 de diciembre de 2016
Dirección: Crra 39E #48F SUR – 150 APTO 616	Fecha de Reporte: 14 de diciembre de 2016
Teléfono: 313 752 3911	
Fax:	

CÓDIGO INTERNO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
161203	ENSAYO 3


PARAMETRO	RESULTADO	METODOLOGIA
COBRE	5025,488 ± 52,326 mg de Cu/L	Espectrometría de absorción atómica

OBSERVACIONES:

- Los resultados reportados son válidos únicamente para las muestras analizadas, entregadas por el cliente y son de carácter confidencial.
- Este informe no se puede reproducir sin autorización del cliente.
- El laboratorio de análisis fisicoquímicos no se hace responsable del proceso de muestreo.
- En caso de reclamaciones, se recibirán únicamente durante los (8) ocho días siguientes a la recepción del informe de resultados.

Julián Zapata

JULIÁN ANDRÉS ZAPATA OCHOA
 Director Técnico LAFQ
 Instituto de Química.

 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1955	REPORTE DE RESULTADOS F-SA-05	Instituto de Química Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
LABORATORIO DE ANALISIS FISICOQUIMICOS "LAFQ"		

REPORTE DE RESULTADOS No 161201-10


Usuario: Mariana Vargas Muñoz Empresa: Universidad EAFIT Dirección: Cra 39E #48F SUR – 150 APTO 616 Teléfono: 313 752 3911 Fax:	No. Muestras: 1 Fecha de Recepción: 02 de diciembre de 2016 Fecha de Reporte: 14 de diciembre de 2016
--	---

CÓDIGO INTERNO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
161204	ENSAYO 4


PARAMETRO	RESULTADO	METODOLOGIA
COBRE	4725,988 ± 176,777 mg de Cu/L	Espectrometría de absorción atómica

OBSERVACIONES:

- Los resultados reportados son válidos únicamente para las muestras analizadas, entregadas por el cliente y son de carácter confidencial.
- Este informe no se puede reproducir sin autorización del cliente.
- El laboratorio de análisis fisicoquímicos no se hace responsable del proceso de muestreo.
- En caso de reclamaciones, se recibirán únicamente durante los (8) ocho días siguientes a la recepción del informe de resultados.


JULIÁN ANDRÉS ZAPATA OCHOA
 Director Técnico LAFQ
 Instituto de Química.

Universitaria: Calle 67 No. 53-108 ■ Bloque 1 Laboratorio 1-235 ■
Teléfono: 219 5665 ■ **Dirección electrónica:** laboratorioafq@udea.edu.co

 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1955	REPORTE DE RESULTADOS F-SA-05	Instituto de Química Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
LABORATORIO DE ANALISIS FISICOQUIMICOS "LAFQ"		

REPORTE DE RESULTADOS No 161201-10

Usuario: Mariana Vargas Muñoz	No. Muestras: 1
Empresa: Universidad EAFIT	Fecha de Recepción: 02 de diciembre de 2016
Dirección: Cra 39E #48F SUR – 150 APTO 616	Fecha de Reporte: 14 de diciembre de 2016
Teléfono: 313 752 3911	
Fax:	

CÓDIGO INTERNO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
161205	ENSAYO 5


PARAMETRO	RESULTADO	METODOLOGIA
COBRE	8776,738 ± 6,717 mg de Cu/L	Espectrometría de absorción atómica

OBSERVACIONES:

- Los resultados reportados son válidos únicamente para las muestras analizadas, entregadas por el cliente y son de carácter confidencial.
- Este informe no se puede reproducir sin autorización del cliente.
- El laboratorio de análisis fisicoquímicos no se hace responsable del proceso de muestreo.
- En caso de reclamaciones, se recibirán únicamente durante los (8) ocho días siguientes a la recepción del informe de resultados.

Julian Zapata

JULIÁN ANDRÉS ZAPATA OCHOA
 Director Técnico LAFQ
 Instituto de Química.

 UNIVERSIDAD DE ANTOQUIA 1955	REPORTE DE RESULTADOS F-SA-05	Instituto de Química Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
LABORATORIO DE ANALISIS FISICOQUIMICOS "LAFQ"		

REPORTE DE RESULTADOS No 161201-10

Usuario: Mariana Vargas Muñoz Empresa: Universidad EAFIT Dirección: Crra 39E #48F SUR – 150 APTO 616 Teléfono: 313 752 3911 Fax:	No. Muestras: 1 Fecha de Recepción: 02 de diciembre de 2016 Fecha de Reporte: 14 de diciembre de 2016
---	---

CÓDIGO INTERNO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
161206	ENSAYO 6


PARAMETRO	RESULTADO	METODOLOGIA
COBRE	19006,238 ± 49,497 mg de Cu/L	Espectrometría de absorción atómica

OBSERVACIONES:

- Los resultados reportados son válidos únicamente para las muestras analizadas, entregadas por el cliente y son de carácter confidencial.
- Este informe no se puede reproducir sin autorización del cliente.
- El laboratorio de análisis fisicoquímicos no se hace responsable del proceso de muestreo.
- En caso de reclamaciones, se recibirán únicamente durante los (8) ocho días siguientes a la recepción del informe de resultados.

Julian Zapata

JULIÁN ANDRÉS ZAPATA OCHOA
 Director Técnico LAFQ
 Instituto de Química.

	REPORTE DE RESULTADOS F-SA-05	Instituto de Química Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
	LABORATORIO DE ANALISIS FISICOQUIMICOS "LAFQ"	

REPORTE DE RESULTADOS No 161201-10


Usuario: Mariana Vargas Muñoz Empresa: Universidad EAFIT Dirección: Crra 39E #48F SUR – 150 APTO 616 Teléfono: 313 752 3911 Fax:	No. Muestras: 1 Fecha de Recepción: 02 de diciembre de 2016 Fecha de Reporte: 14 de diciembre de 2016
---	---


CÓDIGO INTERNO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
161207	ENSAYO 7

PARAMETRO	RESULTADO	METODOLOGIA
COBRE	13169,238 ± 175,009 mg de Cu/L	Espectrometría de absorción atómica

OBSERVACIONES:

- Los resultados reportados son válidos únicamente para las muestras analizadas, entregadas por el cliente y son de carácter confidencial.
- Este informe no se puede reproducir sin autorización del cliente.
- El laboratorio de análisis fisicoquímicos no se hace responsable del proceso de muestreo.
- En caso de reclamaciones, se recibirán únicamente durante los (8) ocho días siguientes a la recepción del informe de resultados.


JULIÁN ANDRÉS ZAPATA OCHOA
 Director Técnico LAFQ
 Instituto de Química.

 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1957	REPORTE DE RESULTADOS F-SA-05	Instituto de Química Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
LABORATORIO DE ANALISIS FISICOQUIMICOS "LAFQ"		

REPORTE DE RESULTADOS No 161201-10


Usuario: Mariana Vargas Muñoz	No. Muestras: 1
Empresa: Universidad EAFIT	Fecha de Recepción: 02 de diciembre de 2016
Dirección: Cra 39E #48F SUR – 150 APTO 616	Fecha de Reporte: 14 de diciembre de 2016
Teléfono: 313 752 3911	
Fax:	


CÓDIGO INTERNO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
161208	ENSAYO 8

PARAMETRO	RESULTADO	METODOLOGIA
COBRE	12800,000 ± 1192,182 mg de Cu/L	Espectrometría de absorción atómica

OBSERVACIONES:

- Los resultados reportados son válidos únicamente para las muestras analizadas, entregadas por el cliente y son de carácter confidencial.
- Este informe no se puede reproducir sin autorización del cliente.
- El laboratorio de análisis fisicoquímicos no se hace responsable del proceso de muestreo.
- En caso de reclamaciones, se recibirán únicamente durante los (8) ocho días siguientes a la recepción del informe de resultados.


JULIÁN ANDRÉS ZAPATA OCHOA
 Director Técnico LAFQ
 Instituto de Química.

 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1949	REPORTE DE RESULTADOS F-SA-05	Instituto de Química Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
LABORATORIO DE ANALISIS FISICOQUIMICOS "LAFQ"		

REPORTE DE RESULTADOS No 161201-10

Usuario: Mariana Vargas Muñoz Empresa: Universidad EAFIT Dirección: Crra 39E #48F SUR – 150 APTO 616 Teléfono: 313 752 3911 Fax:	No. Muestras: 1 Fecha de Recepción: 02 de diciembre de 2016 Fecha de Reporte: 14 de diciembre de 2016
---	---

CÓDIGO INTERNO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
161209	ENSAYO 9


PARAMETRO	RESULTADO	METODOLOGIA
COBRE	15130,238 ± 134,704 mg de Cu/L	Espectrometría de absorción atómica

OBSERVACIONES:

- Los resultados reportados son válidos únicamente para las muestras analizadas, entregadas por el cliente y son de carácter confidencial.
- Este informe no se puede reproducir sin autorización del cliente.
- El laboratorio de análisis fisicoquímicos no se hace responsable del proceso de muestreo.
- En caso de reclamaciones, se recibirán únicamente durante los (8) ocho días siguientes a la recepción del informe de resultados.

Julian Zapata

JULIÁN ANDRÉS ZAPATA OCHOA
 Director Técnico LAFQ
 Instituto de Química.

 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA	REPORTE DE RESULTADOS F-SA-05	Instituto de Química
		Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
LABORATORIO DE ANALISIS FISICOQUIMICOS "LAFQ"		

REPORTE DE RESULTADOS No 161201-10

Usuario: Mariana Vargas Muñoz	No. Muestras: 1
Empresa: Universidad EAFIT	Fecha de Recepción: 02 de diciembre de 2016
Dirección: Crra 39E #48F SUR – 150 APTO 616	Fecha de Reporte: 14 de diciembre de 2016
Teléfono: 313 752 3911	
Fax:	

CÓDIGO INTERNO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
161210	ENSAYO 10

PARAMETRO	RESULTADO	METODOLOGIA
COBRE	10247,238 ± 52,679 mg de Cu/L	Espectrometría de absorción atómica


OBSERVACIONES:

- Los resultados reportados son válidos únicamente para las muestras analizadas, entregadas por el cliente y son de carácter confidencial.
- Este informe no se puede reproducir sin autorización del cliente.
- El laboratorio de análisis fisicoquímicos no se hace responsable del proceso de muestreo.
- En caso de reclamaciones, se recibirán únicamente durante los (8) ocho días siguientes a la recepción del informe de resultados.

Julian Zapata

JULIÁN ANDRÉS ZAPATA OCHOA
 Director Técnico LAFQ
 Instituto de Química.

Anexo 2. Resultados ensayo 1-10 de absorción atómica para la optimización de las variables más significativas para la recuperación de cobre

 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1957	REPORTE DE RESULTADOS F-SA-05	Instituto de Química Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
LABORATORIO DE ANALISIS FISICOQUIMICOS "LAFQ"		

REPORTE DE RESULTADOS No 170101-10


Usuario: Mariana Vargas Muñoz Empresa: Universidad EAFIT Dirección: Cra 39E #48F SUR – 150 APTO 616 Teléfono: 313 752 3911 Fax:	No. Muestras: 1 Fecha de Recepción: 18 de enero de 2017 Fecha de Reporte: 27 de enero de 2017
--	---


CÓDIGO INTERNO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
170101	ENSAYO 1

PARAMETRO	RESULTADO	METODOLOGIA
COBRE	5497 ± 114,55 mg de Cu/L	Espectrometría de absorción atómica

OBSERVACIONES:

- Los resultados reportados son válidos únicamente para las muestras analizadas, entregadas por el cliente y son de carácter confidencial.
- Este informe no se puede reproducir sin autorización del cliente.
- El laboratorio de análisis fisicoquímicos no se hace responsable del proceso de muestreo.
- En caso de reclamaciones, se recibirán únicamente durante los (8) ocho días siguientes a la recepción del informe de resultados.


JULIÁN ANDRÉS ZAPATA OCHOA
 Director Técnico LAFQ
 Instituto de Química.

 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1955	REPORTE DE RESULTADOS F-SA-05	Instituto de Química Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
LABORATORIO DE ANALISIS FISICOQUIMICOS "LAFQ"		

REPORTE DE RESULTADOS No 170101-10


Usuario: Mariana Vargas Muñoz Empresa: Universidad EAFIT Dirección: Cra 39E #48F SUR – 150 APTO 616 Teléfono: 313 752 3911 Fax:	No. Muestras: 1 Fecha de Recepción: 18 de enero de 2017 Fecha de Reporte: 27 de enero de 2017
--	---


CÓDIGO INTERNO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
170102	ENSAYO 2

PARAMETRO	RESULTADO	METODOLOGIA
COBRE	5517,38 ± 88,92 mg de Cu/L	Espectrometría de absorción atómica

OBSERVACIONES:

- Los resultados reportados son válidos únicamente para las muestras analizadas, entregadas por el cliente y son de carácter confidencial.
- Este informe no se puede reproducir sin autorización del cliente.
- El laboratorio de análisis fisicoquímicos no se hace responsable del proceso de muestreo.
- En caso de reclamaciones, se recibirán únicamente durante los (8) ocho días siguientes a la recepción del informe de resultados.


JULIÁN ANDRÉS ZAPATA OCHOA
 Director Técnico LAFQ
 Instituto de Química.

 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA <small>1826</small>	REPORTE DE RESULTADOS F-SA-05	Instituto de Química Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
LABORATORIO DE ANALISIS FISICOQUIMICOS "LAFQ"		

REPORTE DE RESULTADOS No 170101-10

Usuario: Mariana Vargas Muñoz No. Muestras: 1
 Empresa: **Universidad EAFIT** Fecha de Recepción: 18 de enero de 2017
 Dirección: Crra 39E #48F SUR – 150 APTO 616 Fecha de Reporte: 27 de enero de 2017
 Teléfono: 313 752 3911
 Fax:

CÓDIGO INTERNO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
170104	ENSAYO 4


PARAMETRO	RESULTADO	METODOLOGIA
COBRE	11058 ± 111,4 mg de Cu/L	Espectrometría de absorción atómica

OBSERVACIONES:

- Los resultados reportados son válidos únicamente para las muestras analizadas, entregadas por el cliente y son de carácter confidencial.
- Este informe no se puede reproducir sin autorización del cliente.
- El laboratorio de análisis fisicoquímicos no se hace responsable del proceso de muestreo.
- En caso de reclamaciones, se recibirán únicamente durante los (8) ocho días siguientes a la recepción del informe de resultados.

Julian Zapata

JULIÁN ANDRÉS ZAPATA OCHOA
 Director Técnico LAFQ
 Instituto de Química.

 UNIVERSIDAD DE ANTOQUIA 1955	REPORTE DE RESULTADOS F-SA-05	Instituto de Química Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
LABORATORIO DE ANALISIS FISICOQUIMICOS "LAFQ"		

REPORTE DE RESULTADOS No 170101-10


Usuario: Mariana Vargas Muñoz Empresa: Universidad EAFIT Dirección: Crra 39E #48F SUR – 150 APTO 616 Teléfono: 313 752 3911 Fax:	No. Muestras: 1 Fecha de Recepción: 18 de enero de 2017 Fecha de Reporte: 27 de enero de 2017
---	---


CÓDIGO INTERNO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
170105	ENSAYO 5

PARAMETRO	RESULTADO	METODOLOGIA
COBRE	3835,44 ± 284,88 mg de Cu/L	Espectrometría de absorción atómica

OBSERVACIONES:

- Los resultados reportados son válidos únicamente para las muestras analizadas, entregadas por el cliente y son de carácter confidencial.
- Este informe no se puede reproducir sin autorización del cliente.
- El laboratorio de análisis fisicoquímicos no se hace responsable del proceso de muestreo.
- En caso de reclamaciones, se recibirán únicamente durante los (8) ocho días siguientes a la recepción del informe de resultados.


JULIÁN ANDRÉS ZAPATA OCHOA
 Director Técnico LAFQ
 Instituto de Química.

	REPORTE DE RESULTADOS F-SA-05	Instituto de Química
		Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
LABORATORIO DE ANALISIS FISICOQUIMICOS "LAFQ"		

REPORTE DE RESULTADOS No 170101-10


Usuario: Mariana Vargas Muñoz No. Muestras: 1
 Empresa: **Universidad EAFIT** Fecha de Recepción: 18 de enero de 2017
 Dirección: Crta 39E #48F SUR – 150 APTO 616 Fecha de Reporte: 27 de enero de 2017
 Teléfono: 313 752 3911
 Fax:


CÓDIGO INTERNO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
170106	ENSAYO 6

PARAMETRO	RESULTADO	METODOLOGIA
COBRE	8324,63 ± 76,55 mg de Cu/L	Espectrometría de absorción atómica

OBSERVACIONES:

- Los resultados reportados son válidos únicamente para las muestras analizadas, entregadas por el cliente y son de carácter confidencial.
- Este informe no se puede reproducir sin autorización del cliente.
- El laboratorio de análisis fisicoquímicos no se hace responsable del proceso de muestreo.
- En caso de reclamaciones, se recibirán únicamente durante los (8) ocho días siguientes a la recepción del informe de resultados.


JULIÁN ANDRÉS ZAPATA OCHOA
 Director Técnico LAFQ
 Instituto de Química.

 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA 1937	REPORTE DE RESULTADOS F-SA-05	Instituto de Química Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
LABORATORIO DE ANALISIS FISICOQUIMICOS "LAFQ"		

REPORTE DE RESULTADOS No 170101-10

Usuario: Mariana Vargas Muñoz Empresa: Universidad EAFIT Dirección: Cra 39E #48F SUR – 150 APTO 616 Teléfono: 313 752 3911 Fax:	No. Muestras: 1 Fecha de Recepción: 18 de enero de 2017 Fecha de Reporte: 27 de enero de 2017
--	---

CÓDIGO INTERNO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
170108	ENSAYO 8


PARAMETRO	RESULTADO	METODOLOGIA
COBRE	4652,25 ± 50,20 mg de Cu/L	Espectrometría de absorción atómica

OBSERVACIONES:

- Los resultados reportados son válidos únicamente para las muestras analizadas, entregadas por el cliente y son de carácter confidencial.
- Este informe no se puede reproducir sin autorización del cliente.
- El laboratorio de análisis fisicoquímicos no se hace responsable del proceso de muestreo.
- En caso de reclamaciones, se recibirán únicamente durante los (8) ocho días siguientes a la recepción del informe de resultados.

Julian Zapata

JULIÁN ANDRÉS ZAPATA OCHOA
 Director Técnico LAFQ
 Instituto de Química.

 UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA <small>1893</small>	REPORTE DE RESULTADOS F-SA-05	Instituto de Química Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
LABORATORIO DE ANALISIS FISICOQUIMICOS "LAFQ"		

REPORTE DE RESULTADOS No 170101-10


Usuario: Mariana Vargas Muñoz Empresa: Universidad EAFIT Dirección: Cra 39E #48F SUR – 150 APTO 616 Teléfono: 313 752 3911 Fax:	No. Muestras: 1 Fecha de Recepción: 18 de enero de 2017 Fecha de Reporte: 27 de enero de 2017
--	---

CÓDIGO INTERNO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA
170109	ENSAYO 9

PARAMETRO	RESULTADO	METODOLOGIA
COBRE	7549,88 ± 4,42 mg de Cu/L	Espectrometría de absorción atómica

OBSERVACIONES:

- Los resultados reportados son válidos únicamente para las muestras analizadas, entregadas por el cliente y son de carácter confidencial.
- Este informe no se puede reproducir sin autorización del cliente.
- El laboratorio de análisis fisicoquímicos no se hace responsable del proceso de muestreo.
- En caso de reclamaciones, se recibirán únicamente durante los (8) ocho días siguientes a la recepción del informe de resultados.



JULIÁN ANDRÉS ZAPATA OCHOA
 Director Técnico LAFQ
 Instituto de Química.

