

**PLANTEAMIENTO DE UN PROCESO DE LIXIVIACIÓN PARA LA
RECUPERACIÓN DEL COBRE, LA PLATA Y EL ORO CONTENIDOS EN
TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CELULARES DESECHADOS EMPLEANDO
SOLUCIONES ÁCIDAS Y DE TIOSULFATO DE AMONIO**

CARLOS BERNARDO MÁRQUEZ SARABIA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2018

**PLANTEAMIENTO DE UN PROCESO DE LIXIVIACIÓN PARA LA
RECUPERACIÓN DEL COBRE, LA PLATA Y EL ORO CONTENIDOS EN
TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CELULARES DESECHADOS EMPLEANDO
SOLUCIONES ÁCIDAS Y DE TIOSULFATO DE AMONIO**

CARLOS BERNARDO MÁRQUEZ SARABIA

**Trabajo de grado para optar al título de
INGENIERO QUÍMICO**

**Director: Profesor JULIO ELÍAS PEDRAZA ROSAS
Mg. En Ingeniería Civil de Minas**

**Codirectores: Profesor JULIO ANDRÉS PEDRAZA AVELLA
Ing. Químico, Dr.
DIEGO OSWALDO PEREZ ACEVEDO
Químico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2018

De manera muy especial dedico este trabajo:

A Dios, Señor Milagroso de Buga, Virgen de El Carmen y Virgen de la Torcoroma,
por favores recibidos.

A mis abuelos Eufemia Mora (QEPD), Ángela Meneses (QEPD), Luis Márquez
(QEPD) y Ceferino Sarabia (QEPD) por su acompañamiento espiritual.

A mis padres Bernardo Márquez y Esther Sarabia por su apoyo incondicional en
esta etapa, su esfuerzo, paciencia y por creer en mí.

A mis hermanas Yessika y Nana, por brindarme su
compañía y apoyo para que todo esto fuera posible.

Y en especial a mi amigo del alma, Evelio Santana por su constante motivación.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Química por los conocimientos adquiridos para formarme como profesional.

A los profesores Julio Elías Pedraza y Julio Andrés Pedraza por brindarme su confianza, su tiempo, dedicación y por permitirme desarrollar esta tesis en el grupo de investigación GIMBA.

Al codirector Diego Pérez, por su orientación en cada paso, gracias por sus aportes, su tiempo y motivación para el desarrollo de esta tesis.

A Yury López y Ricardo Grandas, por brindarme su tiempo e instrucción cada vez que lo necesité durante el curso del proyecto.

Al Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA), por la disposición de un espacio para trabajar. A los laboratorios de rayos X por su valiosa colaboración.

Un agradecimiento especial a Oscar Rondón, por el acompañamiento durante el comienzo del desarrollo de este proyecto.

Gracias a todos aquellos que de alguna u otra manera influyeron en el desarrollo de mi trabajo de grado.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	17
1. MARCO TEÓRICO.....	19
1.1. TRATAMIENTO DE LAS TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CELULARES DESECHADOS.....	19
1.2. DETERMINACIÓN DE ORO POR ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA CON INTERFERENCIA DE HIERRO.....	19
1.3. PROCESO DE LIXIVIACIÓN.....	20
1.3.1. Disolución de cobre y plata.....	20
1.3.2. Disolución de oro y plata.....	21
1.3.2.1. Concentraciones de tiosulfato de amonio.....	21
1.3.2.2. Condiciones de pH en solución lixivante.....	22
1.3.3. Separación sólido/líquido y lavado de colas de lixiviación.....	22
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	24
2.1. TRATAMIENTO FÍSICO DE TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CELULARES COMO MUESTRAS DE EXPERIMENTACIÓN.....	24
2.1.1. Obtención del material.....	25
2.1.2. Adecuación física y reducción de tamaño.....	25
2.1.3. Tamaño de partícula.....	25
2.2. DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE METALES EN TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CELULARES.....	25
2.2.1. Determinación analítica de oro con interferencia de hierro.....	26
2.2.2. Método de adición estándar de oro.....	26
2.2.3. Método de dilución estándar de oro.....	26
2.3. DISOLUCIÓN DE COBRE Y PLATA DE TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CELUALRES EMPLEANDO SOLUCIONES ÁCIDAS.....	27
2.3.1. Disolución del cobre contenido en el material.....	27

2.3.2. Estudio de dos etapas consecutivas de lixiviación ácida.....	28
2.4. DISOLUCIÓN DE PLATA Y ORO DE TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CELULARES CON TIOSULFATO DE AMONIO, COBRE (II) Y AMONIACO.....	28
2.4.1. Estudio del efecto del tiempo de disolución.....	28
2.4.2. Estudio del efecto de la concentración de tiosulfato.....	29
2.4.3 Etapas de disolución con tiosulfato de amonio.....	29
2.5. FILTRACIÓN Y LAVADO DE RESIDUOS SÓLIDOS DE LAS DISOLUCIONES ÁCIDAS Y DE TIOSULFATO DE AMONIO.....	30
2.5.1. Estudio de líquido retenido por las colas de filtración.....	30
2.5.2. Estudio del lavado de colas de lixiviación.....	30
2.6. DISOLUCIÓN DE ORO Y PLATA EMPLEANDO SOLUCIONES DE TIOSULFATO CON EL COBRE (II) DE LAS SOLUCIONES DE LAVADO.....	30
2.7. PROPUESTA DE UN DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO DE LIXIVIACIÓN DE COBRE, PLATA Y ORO DE RESIDUOS ELECTRÓNICOS.....	30
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
3.1. DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE COBRE, PLATA, ORO Y HIERRO EN LOS RESIDUOS ELECTRÓNICOS DE EXPERIMENTACIÓN.....	32
3.1.1. Determinación analítica de oro por Espectroscopia de Absorción atómica suprimiendo la interferencia del hierro.....	32
3.1.2. Composición química elemental.....	33
3.2. DISOLUCIÓN DE COBRE Y PLATA EMPLEANDO SOLUCIONES DE ÁCIDO SULFÚRICO Y PERÓXIDO DE HIDRÓGENO.....	33
3.2.1 Primera etapa de lixiviación ácida	33
3.2.2. Segunda etapa de lixiviación ácida.....	34
3.3. DISOLUCIÓN DE ORO Y PLATA EMPLEANDO SOLUCIONES DE TISOULFATO DE AMONIO, COBRE (II) Y AMONIACO.....	35
3.3.1. Primera lixiviación básica.....	35
3.3.1.1. Estudio del efecto del tiempo de disolución.....	35
3.3.1.2. Estudio de la concentración de tiosulfato de amonio.....	35
3.3.2. Segunda lixiviación básica.....	35

3.3.3. Mejores condiciones de disolución del oro y la plata.....	36
3.4. OPERACIÓN DE LAVADO DE COLAS DE LIXIVIACIÓN.....	37
3.4.1. Líquido retenido por las colas de filtración.....	37
3.4.2. Extracción del cobre de las colas por el agua de lavado de la primera lixiviación ácida.....	37
3.4.3. Estudio de la extracción de cobre y plata con la primera lixiviación ácida.....	39
3.4.4 Estudio de la extracción de plata con la segunda lixiviación ácida.....	39
3.4.5. Estudio de la extracción de oro y plata con la primera lixiviación básica.....	40
3.5. DISOLUCIÓN DE ORO Y PLATA CON SOLUCIONES DE TIOSULFATO EMPLEANDO EL COBRE (II) EXTRAÍDO CON EL PRIMER LAVADO DE LA PRIMERA LIXIVIACIÓN ÁCIDA.....	41
3.6. PROPUESTA DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN DE COBRE, PLATA Y ORO DE RESIDUOS DE TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CELUALRES.....	42
4. CONCLUSIONES.....	44
5. RECOMENDACIONES.....	46
BIBLIOGRAFÍA.....	47
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
ANEXOS.....	54

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Diseño experimental para disolución de oro y plata con tiosulfato de amonio.....	29
Tabla 2. Concentraciones de hierro y oro en las soluciones orgánicas de la cuantificación del oro por EAA.....	32
Tabla 3. Composición química elemental de los residuos de las tarjetas electrónicas.....	33
Tabla 4. Extracción de cobre por lavado de las colas de la primera lixiviación ácida.....	38
Tabla 5. Cobre (II) extraído con diferentes volúmenes de agua de lavado de las colas de la primera lixiviación ácida.....	38

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama Eh-pH del sistema: (a) Cu-S-H₂O, (b) Ag-S-H₂O.....	23
Figura 2. Diagrama Eh-pH del sistema: (a) Cu-NH₃-S₂O₃ (-2) y (b) Au-NH₃-S₂O₃(-2) a 25 °C (0.0005 M Au; 0.1 M S₂O₃(-2); 0.1 M NH₃/NH₄; 0.0005 M Cu)...	.23
Figura 3. Diagrama metodológico para experimentación propuesta.....	24
Figura 4. (a) Metodología para determinación analítica de oro, (b) Ensayos para evaluar la precisión en la determinación analítica del oro.....	27
Figura 5. Procedimiento para el lavado de colas de filtración de las lixiviaciones.....	31
Figura 6. Disolución de plata con soluciones ácidas, (a) en función del tiempo de la segunda lixiviación (b) en las dos etapas de lixiviación.....	34
Figura 7. Disolución de oro y plata como función, (a) tiempo de disolución, (b) concentración de tiosulfato.....	36
Figura 8. Segunda etapa de disolución de oro y plata con tiosulfato como función del tiempo.....	36
Figura 9. Porcentaje de líquido retenido en residuos sólidos de lixiviación.....	37
Figura 10. Extracción de cobre y plata en licor de primera lixiviación ácida y en sus soluciones de lavado, (a) cobre, (b) plata.....	39
Figura 11. Extracción de plata en licor de segunda lixiviación ácida y en sus soluciones de lavado.....	40
Figura 12. Extracción de oro y plata en licor de primera lixiviación con tiosulfato y en sus soluciones de lavado, (a) oro, (b) plata.....	41

Figura 13. Disolución total de metales preciosos empleando el cobre (II) extraído con el primer lavado de la primera etapa de lixiviación ácida, (a) oro, (b) plata.....42

Figura 14. Propuesta de un diagrama de flujo del proceso de lixiviación de metales contenidos en las tarjetas electrónicas de celulares desechados.....43

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. REACTIVOS UTILIZADOS EN EL PROCESO.....	53
ANEXO B. PRINCIPALES EQUIPOS UTILIZADOS.....	54
ANEXO C. BALANCE DE MASA PARA LA PLATA.....	55
ANEXO D. ENSAYOS PARA DETERMINACIÓN ANALITICA DEL ORO	56
ANEXO E. PREPARACIÓN ETAPAS DE ESTUDIO PRACTICO	57
ANEXO F. RESULTADOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX) PARA TARJETAS DE CELULARES.....	58

RESUMEN

TITULO: PLANTEAMIENTO DE UN PROCESO DE LIXIVIACIÓN PARA LA RECUPERACIÓN DEL COBRE, LA PLATA Y EL ORO CONTENIDOS EN TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CELULARES DESECHADOS EMPLEANDO SOLUCIONES ÁCIDAS Y DE TIOSULFATO DE AMONIO*

AUTOR: CARLOS BERNARDO MÁRQUEZ SARABIA **

PALABRAS CLAVES: METALES PRECIOSOS, TIOSULFATO DE AMONIO, EXTRACCIÓN CON SOLVENTE, LIXIVIACION.

DESCRIPCIÓN:

Se llevó a cabo a nivel de laboratorio la lixiviación del oro y la plata junto con el cobre contenidos en tarjetas electrónicas de celulares desechados, con el fin de proponer un diagrama de flujo de este proceso. Inicialmente, fue determinada mediante la digestión ácida con agua regia del material y la técnica de Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA), la concentración de metales; empleándose para el oro, una metodología que permitiera suprimir las interferencias del hierro. Luego, se determinaron las mejores condiciones para la lixiviación del cobre, la plata y el oro, evaluando el tiempo de reacción y la concentración de reactivos; utilizando ácido sulfúrico y peróxido de hidrogeno para disolver el cobre y parte de la plata, tiosulfato de amonio, más cobre (II) y amoniaco para el oro y el resto de la plata. Posteriormente, se evaluó la operación de lavado de los residuos sólidos de lixiviación. Finalmente, se experimentó el uso del cobre (II) contenido en una solución de lavado de colas de lixiviación como reactivo necesario en la disolución de oro y plata con tiosulfato.

La interferencia del hierro, en la cuantificación del oro fue suprimida, determinándose que las tarjetas de estudio contenían 684 ppm de este metal. Iniciando con una doble lixiviación ácida, seguida de una lixiviación básica con tiosulfato, a un tamaño de partícula D80 malla 100# del material de experimentación, se obtuvo una muy alta disolución del cobre, mayor al 99,0%, un 95,0% del oro y un 77,0% de la plata; empleando una solución de ácido sulfúrico 2,5 M con 20% en volumen de peróxido de hidrógeno al 35,0%, durante 3 horas de disolución; y luego una solución con tiosulfato de amonio 0,4 M, cobre (II) 20 mM y suficiente amoniaco para mantener un pH de 10,5, durante 4 horas de reacción. Al utilizar aguas de lavado con cobre (II) en la lixiviación básica con tiosulfato se llegó a porcentajes de disolución de 85,0% para el oro y 52,0% para la plata.

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Julio Elías Pedraza Rosas. Codirectores: Julio Andres Pedraza Avella, Diego Oswaldo Pérez Acevedo.

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF A LEACHING PROCESS FOR THE RECOVERY OF COPPER, SILVER AND GOLD CONTAINED IN ELECTRONIC CELLULAR CARDS DISPOSED USING ACID SOLUTIONS AND AMMONIUM THYLOULPHATE*

AUTHOR: CARLOS BERNARDO MÁRQUEZ SARABIA **

KEYWORDS: PRECIOUS METALS, AMMONIUM THIOSULFATE, SOLVENT EXTRACTION, LEACHING.

DESCRIPTION:

It took place the leaching of gold and silver together with the copper contained in discarded cell electronic cards at a laboratory level with the objective of proposing a flowchart of this process. Firstly, it was determined by the acid digestion with loyal water of the material and the technique of Atomic Absorption Spectroscopy (AAS), the concentration of metals; using for gold, a methodology that allowed to suppress the interferences of iron. Secondly, the best conditions for the leaching of copper, silver and gold were determined, evaluating the concentration of reagents and the reaction time; using sulfuric acid and hydrogen peroxide to dissolve the copper and some part of the silver, ammonium thiosulfate, some more copper (II) and ammonia for the gold and the rest of silver. Afterwards, the washing operation of solid leaching residues was evaluated. Finally, it was experienced the use of copper (II) contained in a solution of washing of leaching glues as a necessary reagent in the dissolution of gold and silver with thiosulfate.

The iron interference in the quantification of the gold was suppressed, determining that the study cards contained 684 ppm of this metal. Starting with a double acid leaching, followed by a basic leaching with thiosulfate, at a particle size D80 100# of the experimental material, a very high copper dissolution was obtained, greater than 99,0%, a 95% of the gold and a 77,0 % of silver; using a solution of 2.5 M sulfuric acid with 20% by volume of 35,0% of hydrogen peroxide, for 3 hours of dissolution; and then a solution with 0,4 M ammonium thiosulfate, 20 M copper (II) and enough ammonia to maintain a pH of 10,5, during 4 hours of reaction. When using copper (II) wash waters in the basic leaching with thiosulfate, it was possible to reach dissolution percentages of 85,0% for gold and 52,0% for silver.

*Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Julio Elías Pedraza Rosas. Codirectores: Julio Andres Pedraza Avella, Diego Oswaldo Pérez Acevedo.

INTRODUCCIÓN

Los teléfonos celulares son presentados hoy en día como herramientas esenciales para la comunicación interpersonal, asimismo, la transferencia y almacenamiento de información, y demás utilidades aportadas con el uso de estos aparatos electrónicos, los convierten en dispositivos necesarios para un cómodo desarrollo de la población mundial; ocasionando así un acelerado aumento año tras año en su producción mundial, reducción significativa de su vida útil y obsolescencia temprana, puesto que dejan de ser utilizados antes de dejar de funcionar [1, 2].

Una gran variedad de componentes se encuentran en los equipos móviles desechados, con elementos valiosos como cobre, oro, plata, paladio y platino. También, constituyentes tóxicos como plomo, mercurio, cromo, níquel, berilio, antimonio, arsénico y otros compuestos que conforman la matriz de estos aparatos [3]. Por lo tanto, se ha contemplado la incorporación de este flujo de residuos como fuentes alternativas para la extracción de varios de estos metales, especialmente los preciosos, oro y plata, acorde a su potencial de recuperación [4].

Tradicionalmente, es conocida la alta eficiencia del cianuro como agente lixivante del oro y la plata en minerales. Sin embargo, su elevada toxicidad ha impulsado una serie de investigaciones enfocadas al uso de agentes lixiviantes alternativos; menos contaminantes y de fácil manipulación a nivel industrial [5, 6]. El tiosulfato se ha propuesto como una buena opción para disolver el oro y la plata, gracias a su baja toxicidad, viabilidad económica y fácil degradación, así como el reducido impacto ambiental y factible manejo operacional son ventajas ofrecidas con el uso de este reactivo [7].

La lixiviación de metales preciosos empleando tiosulfato de amonio implica adicionar amoniaco y cobre (II) como agentes catalizadores de la reacción de disolución. En estudios consultados [8, 9, 10], el cobre contenido en las tarjetas

electrónicas debe ser disuelto y removido en su totalidad, previo a la disolución del oro y la plata con el tiosulfato, consecuente a que excesos del mismo generan la inestabilidad y rápida degradación del reactivo lixivante. Por consiguiente, se debe producir un material libre de cobre empleando etapas previas de lixiviación ácidas que extraigan este metal, seguido de lavados con agua de los residuos sólidos ricos en oro y plata para su efectiva posterior lixiviación con tiosulfato.

En este trabajo, complementario al realizado por Oscar Rondón¹, mediante diferentes experimentos adicionales, se buscaron las mejores condiciones de operación para la disolución del cobre, la plata y el oro contenido en estos materiales mediante lixivaciones sucesivas empleando soluciones de ácido sulfúrico con peróxido de hidrógeno como oxidante y de soluciones amoniacales con tiosulfato de amonio y cobre (II). También se evaluó la operación de lavado de los residuos sólidos provenientes de las etapas lixiviación, así como la posibilidad de emplear las aguas de lavado ricas en cobre (II) en el proceso de disolución de oro y plata con soluciones de tiosulfato.

Con base en los resultados de toda la experimentación realizada se propuso el planteamiento de un diagrama de flujo de las etapas de lixiviación de las tarjetas electrónicas de celulares desechados empleando soluciones ácidas y soluciones de tiosulfato de amonio.

Adicionalmente, la cuantificación de los metales de interés en el material de las tarjetas de experimentación se realizó empleando la técnica de Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA), sometiendo las muestras a digestión con agua regia, previamente reducidas a tamaños finos. Puesto que en esta disolución se disuelve el hierro presente en estos materiales, y dado que es bien conocido que la lectura del oro es interferida por la presencia de hierro, especialmente el férrico (III), fue necesario realizar un trabajo experimental adicional para tener lecturas más precisas y confiables en cuanto a la cuantificación del oro [11, 12, 13].

¹ RONDÓN, Oscar. Evaluación del proceso de disolución del cobre, el oro y la plata contenidos en tarjetas electrónicas de celulares desechados empleando soluciones ácidas y tiosulfato de amonio (Trabajo de grado de pregrado). Universidad Industrial de Santander: Bucaramanga. 2017.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. TRATAMIENTO DE LAS TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CELULARES DESECHADOS

Las tarjetas electrónicas de celulares representan entre el 10% y 30% del peso total de un teléfono celular. El tratamiento de residuos electrónicos como los celulares desechados puede dificultarse debido a que diferentes metales, retardantes de llama bromados, cerámicas, resinas y otros elementos no metálicos están altamente mezclados entre sí. En consecuencia, una separación física de las diferentes partes de un teléfono móvil, así como una reducción de tamaño de sus respectivas placas electrónicas deben ser usadas como pretratamientos para aumentar la eficiencia en la disolución de los metales valiosos [10].

1.2. DETERMINACIÓN DE ORO POR ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA CON INTERFERENCIA DE HIERRO

La espectroscopia de absorción atómica (EAA) se postula como una de las mejores técnicas en la determinación del oro junto al tradicional ensayo al fuego; sin embargo, estos métodos analíticos aplicados a materiales electrónicos están sujetos a varias fuentes de error que incluyen interferencias debido a otras especies diferentes al elemento de interés; en particular, los constituidos por los del grupo del platino y otros metales pesados. El hierro en especial, es uno de los principales constituyentes en la mayoría de muestras y mayores causantes de alteración de las mediciones del oro al cuantificarlo por EAA [13].

El efecto del hierro en la señal de absorción atómica del oro deja como resultado un aumento en los picos de representación para la señal de este elemento precioso; por lo que la coexistencia del hierro causa un error en la determinación

analítica del oro. Diferentes estudios han revelado que hay una fuerte absorción de la línea del hierro (242,4 nm) cercana a la línea analítica del oro (242,8 nm) haciendo que el hierro interfiera fuertemente en la determinación del oro [14, 15, 16].

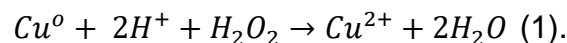
Las interferencias pueden ser evitadas mediante la correcta preparación de la solución a leer que excluya la presencia de metales indeseables. En diferentes metodologías de análisis se establece que el oro en soluciones ácidas puede ser separado del hierro usando etapas de extracción por solvente con Éter Dietílico y Metil Isobutilcetona (MIBK) para fines analíticos previo complejamiento del hierro con ácido fosfórico [12].

El método de adición estándar es empleado en matrices complejas permitiendo con esto la detección de fallas en el procedimiento analítico, aumentando la precisión de la determinación del elemento de interés con adiciones múltiples de concentraciones añadidas a la muestra en lugar de repeticiones de una sola experiencia [16].

1.3. PROCESO DE LIXIVIACIÓN

La lixiviación de estos materiales consiste en extraer los metales solubles en un medio acuoso específico bajo condiciones apropiadas. Comprende tres etapas: 1. Disolución de los metales, 2. Separación de los residuos sólidos del licor rico en metales mediante filtración, 3. Lavados de estos residuos o colas de lixiviación.

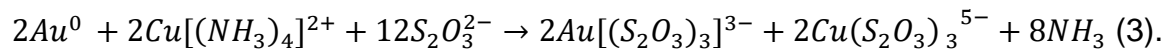
1.3.1. Disolución de cobre y plata. El cobre contenido en las tarjetas electrónicas de celulares es disuelto por soluciones de ácido sulfúrico acompañadas de peróxido de hidrógeno mediante la siguiente reacción (1):



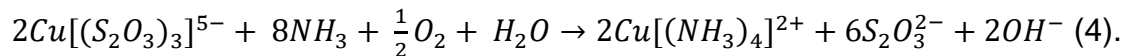
El oxígeno producido por la descomposición del peróxido de hidrógeno reacciona con el cobre metálico oxidándolo a Cu (II) y formando sulfato de cobre (II) ($CuSO_4$)

disuelto en medio acuoso [18]. En el primer diagrama de Pourbaix de la Figura 1 se presenta el diagrama para este sistema.

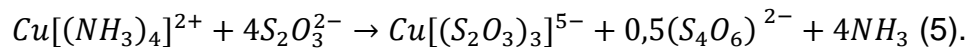
1.3.2. Disolución del oro y la plata. Un comportamiento similar entre el oro y la plata se presenta para su disolución con soluciones de tiosulfato amoniacal y en presencia de cobre (II). La presencia de un agente oxidante y un ligando complejante son necesarios en la disolución de estos elementos. Se utiliza la cuprotetramina, $Cu[(NH_3)_4]^{2+}$, como agente oxidante y el ion tiosulfato, $S_2O_3^{2-}$, como el complejante. La reacción de disolución del oro se lleva a cabo como se presenta a continuación (3):



Se puede observar que el electrón liberado de la oxidación del oro metálico para convertirse en oro oxidado (Au^+) es utilizado por el Cu (II) como complejo $Cu[(NH_3)_4]^{2+}$ para reducirse a Cu (I) en $Cu[(NH_3)_4]^{1+}$. Posterior a esto, se da un intercambio de ligandos de $Cu[(NH_3)_4]^{1+}$ a $Cu[(S_2O_3)_3]^{5-}$. En ese momento el $Cu[(S_2O_3)_3]^{5-}$ reacciona con oxígeno y amoníaco para reducirse nuevamente y formar la cuprotetramina como se observa (4):



La adición de cobre (II) a la solución de amoníaco genera la formación del complejo cuprotetramino $Cu[(NH_3)_4]^{2+}$. Este complejo oxida al tiosulfato como se puede apreciar [20] (5):



Es indeseable la formación de los aniones tritionato ($S_3O_6^{2-}$) y tetracionato ($S_4O_6^{2-}$) debido a que son conocidos por no presentar ninguna actividad lixivante sobre estos metales [24]. Por otro lado, el tiosulfato puede ser consumido, en reacciones secundarias, por peróxidos, fosfinas, polisulfuros, cromados, bromuros, ioduros y otros compuestos que pueden estar presentes en los residuos electrónicos [10].

1.3.2.1. Concentración de tiosulfato de amonio. La lixiviación de oro y plata se incrementa con el aumento en la concentración de tiosulfato, sin embargo, después de alcanzar un máximo en la disolución de estos metales, el aumento en la concentración de este reactivo disminuye el grado de disolución. A elevadas concentraciones de tiosulfato aumenta su consumo presentándose un aumento en la degradación de este reactivo como el sulfato, tritionato y tetrionato. Por tanto, la concentración de tiosulfato tiene que ser controlada puesto que la estabilidad de los complejos de oro con tiosulfato depende de la concentración de tiosulfato en la solución [18].

1.3.2.2. Condiciones de pH en solución lixivante. La estabilidad del ion tiosulfato ($S_2O_3^{2-}$) es función del pH de la solución lixivante. La descomposición química de este anión a compuestos estables y semi-estables como tetrionato ($S_4O_6^{2-}$), tritionato ($S_3O_6^{2-}$), sulfito (SO_3^{2-}) y sulfato (SO_4) sulfato ocurre fácilmente si no se establece un medio básico en la solución lixivante. Cuando la solución alcanza valores de pH inferior a 6 el tiosulfato se oxida a tetrionato ($S_4O_6^{2-}$) [19].

1.3.3. Separación sólido/líquido y lavado de colas de lixiviación. En las grandes empresas mineras la separación sólido-líquido, después de la disolución de los metales, se realiza normalmente utilizando varios espesadores y un filtro final. En el caso de plantas de baja capacidad de producción como es la lixiviación de residuos electrónicos esta operación es realizada empleando solo filtros [20]. Es importante conocer el líquido retenido por los residuos de lixiviación posterior a la separación de la fase sólida y líquida en el proceso de filtración, con el objetivo de poder diseñar adecuadamente la operación de lavado, volumen de agua de lavado y número de lavados. Una vez efectuada la separación de las fases sólida y líquida por medio de la filtración, se deben aplicar lavados consecutivos con agua para recuperar los metales ya disueltos y los reactivos remanentes, logrando con esto mejoras a nivel económico y ambiental [21].

Figura 1. Diagrama Eh-pH del sistema: (a) Cu-S-H₂O (b) Ag-S-H₂O.

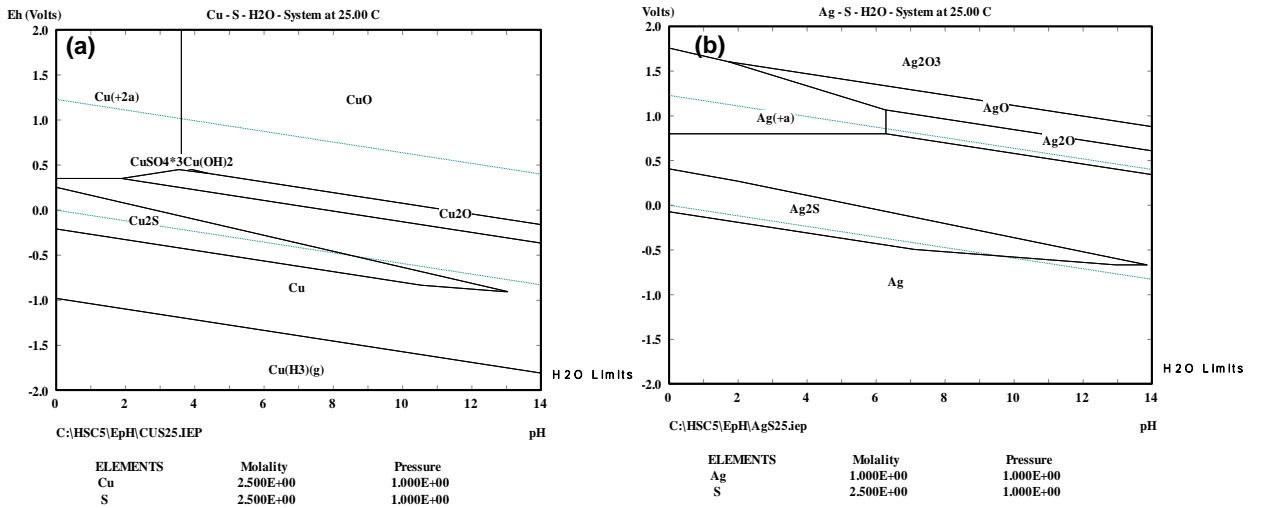
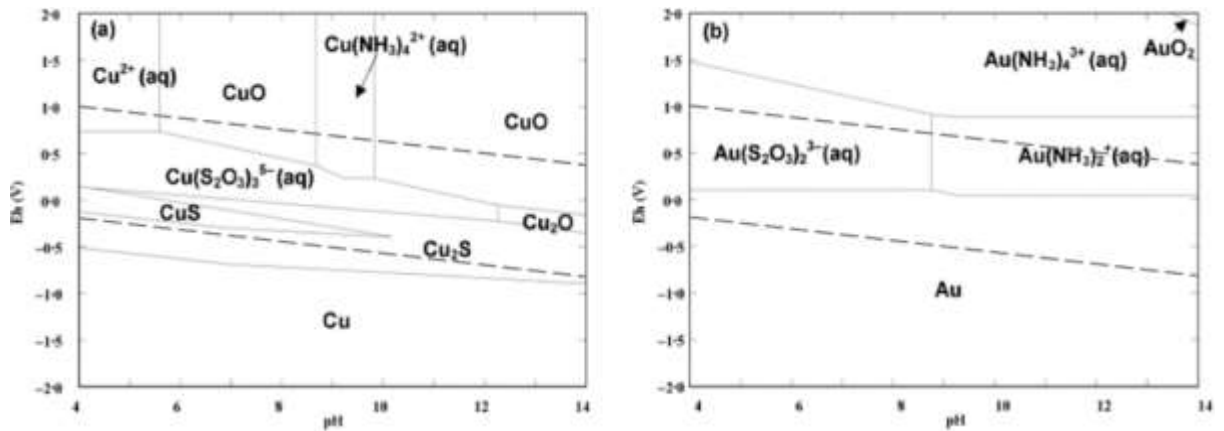


Figura 2. Diagrama Eh-pH del sistema: (a) Cu-NH₃-S₂O₃(-2) y (b) Au-NH₃-S₂O₃(-2) a 25 °C (0.0005 M Au; 0.1 M S₂O₃(-2); 0.1 M NH₃/NH₄; 0.0005 M Cu).

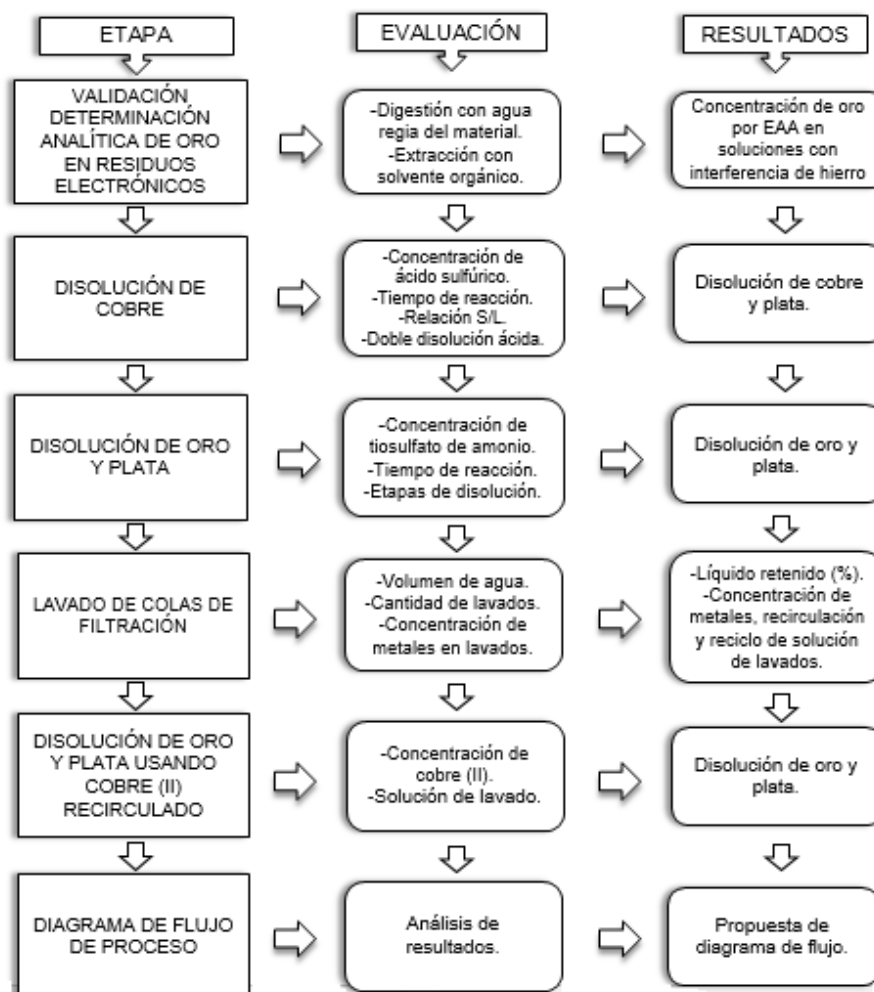


Fuente: D. M. Muir and M. G. Aylmore. Thiosulphate as an alternative to cyanide for gold processing –issues and impediments. Mineral Processing and Extractive Metallurgy (Trans. Inst. Min. Metall. C) March 2004 Vol. 113.

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental del presente trabajo se desarrolló con base en el esquema metodológico mostrado en la Figura 3.

Figura 3. Diagrama metodológico para la experimentación propuesta.



2.1. TRATAMIENTO FÍSICO DE TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CELULARES COMO MUESTRAS DE EXPERIMENTACIÓN

2.1.1. Obtención del material. La compañía de reciclaje de aparatos eléctricos y electrónicos en Bucaramanga, SOCIAL RAEE, realizó la donación de los teléfonos celulares desechados. En la recolección de los equipos necesarios para el desarrollo de la experimentación se solicitó la diversidad en marcas comerciales de dispositivos móviles, así como modelos de diferentes años, manufactura y zonas de comercialización (Motorola, Samsung, Nokia, BlackBerry, LG, Iphone, etc.) con el fin de establecer una población que estandarizara el contenido de metales de interés en las tarjetas electrónicas de dichos celulares.

2.1.2. Adecuación física y reducción de tamaño. Una vez extraídas las tarjetas electrónicas de los teléfonos celulares fueron tratadas de forma manual retirando teclados, cubiertas plásticas y partes metálicas indeseables en el proceso. Un corte manual utilizando una *cizalla de banco para láminas metálicas* fue empleado hasta conseguir trozos de tarjeta de aproximadamente un (1) centímetro cuadrado de área. Posteriormente, la totalidad del material se depositó en la cámara de molienda del *tritador de cuchillas Thomas Wiley model 4* del Laboratorio de Beneficio de Minerales de la Universidad Industrial de Santander, que opera a 800 revoluciones por minuto (rpm) y cuenta con un tamiz de perforaciones circulares de un (1) milímetro de diámetro.

2.1.3. Tamaño de partícula. Las tarjetas ya molidas fueron clasificadas en un *tamiz Tyler 100m* agitando manualmente hasta alcanzar que el 80% de la totalidad del material molido atravesara el tamiz, estableciendo así un tamaño de partícula D80 malla 100# sugerido por el estudio de RONDÓN, O. [22] para alcanzar una efectiva disolución del cobre, plata y oro.

2.2. DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE LOS METALES EN LAS TARJETAS ELECTRÓNICAS

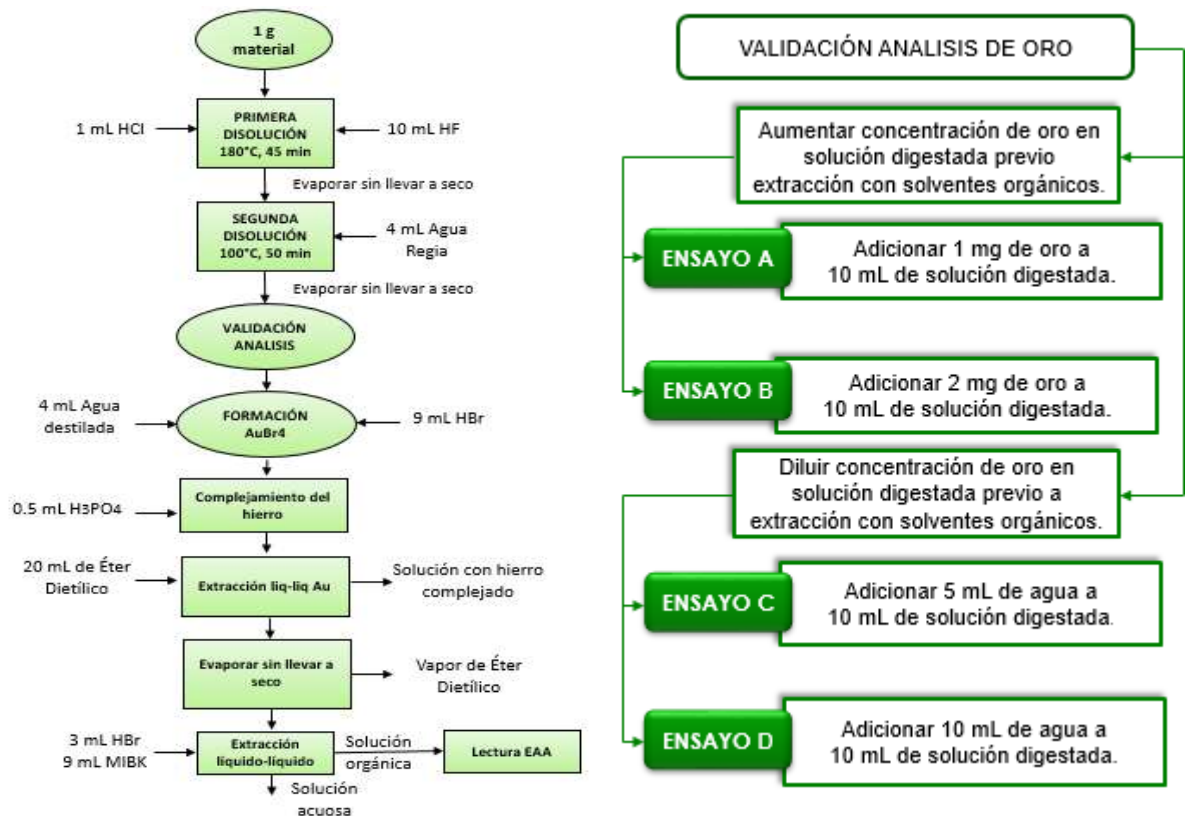
Las cantidades analíticas determinadas para el cobre, el hierro y la plata, así como su contenido en las soluciones de lixiviación ácidas, de tiosulfato, y de lavado generadas durante el desarrollo de la metodología de experimentación fueron determinadas en el Parque Tecnológico de Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander mediante Espectrofotómetro de Absorción Atómica (EAA), Modelo 210 VGP, Buck Scientific.

2.2.1. Determinación analítica de oro con interferencia del hierro. Una acertada caracterización del oro contenido en las tarjetas electrónicas se llevó a cabo el procedimiento presentado en la Figura 4(a), sugerido por la literatura cuando se presentan interferencias por hierro en la técnica de EAA. Esta metodología se puede resumir en tres grandes etapas. Inicialmente, se realizan dos (2) digestiones ácidas consecutivas sobre el material hasta conseguir su disolución total. Como etapa intermedia, para garantizar la no presencia del hierro en el medio orgánico empleado en la extracción del oro se adiciona ácido fosfórico (H_2PO_3) como medio complejante de este elemento, generando su permanencia en el medio acuoso inicial. Luego, dos (2) tratamientos consecutivos de extracción del oro en solución con fases orgánicas de Dietil Éter y MIBK se realizan para finalmente determinar analíticamente este metal precioso [16].

2.2.1.1. Método de adición estándar de oro. Buscando verificar la extracción completa del oro, se agregó solución patrón de este metal, conteniendo 1 y 2 mg de Au, a volúmenes determinados de la solución ácida digerida de las tarjetas electrónicas previo a las etapas de extracción con las fases orgánicas, Ensayo A y B, Figura 4(b). Con este procedimiento se lleva a cabo una alteración controlada de la cantidad del oro inicial que al suprimirse de la lectura determinada por el equipo de EAA se obtuvo el valor real de la concentración del oro.

2.2.1.2. Método de dilución estándar de oro. Similarmente, volúmenes de agua destilada de 5 y 10 mL se agregaron a dos porciones de 10 mL de solución digestada, respectivamente, previo a la extracción con solvente orgánico, permitiendo diluir el oro en solución, para luego determinarlo por el equipo EAA. Tomando en cuenta las respectivas diluciones, se recalculó el valor real de la concentración del oro, Ensayos C y D, Figura 4(b).

Figura 4. (a) Metodología para determinación analítica de oro, (b) Ensayos para evaluar la precisión en la determinación analítica del oro.



2.3. DISOLUCIÓN DE COBRE Y PLATA DE TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CELULARES EMPLEANDO SOLUCIONES ÁCIDAS

2.3.1. Disolución del cobre contenido en el material. En el estudio presentado por RONDÓN, O. [22], condiciones de operación para disolver la totalidad del cobre contenido en las tarjetas electrónicas fueron determinadas. Una vez reducidas las tarjetas a un tamaño de partícula D80 malla 100#, se sometieron al proceso de disolución ácida empleando las siguientes condiciones: relación sólido-solución lixivante de 1/20 (g/mL), solución de ácido sulfúrico (H_2SO_4) al 2,5 M, y 20% en volumen de solución de peróxido de hidrogeno (H_2O_2) al 35%; durante 3 horas de reacción. Buscando escalar el proceso, se pasó de 1 g de muestra de experimentación (trabajo de RONDÓN, O. [22]) a 5 g para el desarrollo de este trabajo, de acuerdo al procedimiento especificado en el Anexo E. Una vez separado el licor rico en cobre, los residuos sólidos fueron la materia prima para las posteriores disoluciones de oro y plata.

2.3.2. Estudio de dos etapas consecutivas de lixiviación ácida. A (a) consecuencia que no todo el cobre (b) contenido en el material fue disuelto, una segunda disolución ácida fue sugerida [22], buscando que los residuos sólidos con oro y plata quedaran libres de cobre. Este elemento, a pesar de ser necesario como catalizante en la disolución posterior del oro y la plata con tiosulfato, afecta positiva o negativamente si su concentración no es la adecuada, por lo cual su presencia debe ser controlada. En el análisis químico del licor de la primera etapa de lixiviación, además del cobre, fueron encontradas cantidades considerables de plata. Una segunda lixiviación del material fue estudiada, variando el tiempo de reacción; experiencias a 1, 2, 3 y 4 horas fueron realizadas, utilizando el mismo tipo de solución ácida de la primera etapa, tratando de disolver todo el cobre pero además buscando disolver la mayor cantidad de plata del material en medio ácido previo a la disolución con tiosulfato.

2.4. DISOLUCIÓN DE PLATA Y ORO DE TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CELULARES CON TIOSULFATO DE AMONIO, COBRE (II) Y AMONIACO.

2.4.1. Estudio del efecto del tiempo de disolución. De acuerdo al diseño experimental planteado, Tabla 1, inicialmente fueron realizados algunos ensayos para evaluar el efecto del tiempo en la disolución del oro y la plata del material sólido empleando solución lixivante con concentraciones fijas de tiosulfato de amonio 0,3 M, 20 mM de Cu(II), y pH de 10,5 con la adición de amoniaco. Fueron evaluados tiempos de 1, 2, 3, 4 y 5 horas; utilizando botellas plásticas selladas con su tapa como recipientes de lixiviación y empleando un agitador de rodillos. Una vez finalizada cada prueba a los diferentes tiempos de experimentación, se efectuaba la separación sólido/líquido y el lavado de los residuos sólidos con agua destilada, juntando el licor con las soluciones de lavado para ser analizada la solución resultante por la técnica de EAA.

2.4.2. Estudio del efecto de la concentración del tiosulfato. En búsqueda de las mejores condiciones de operación en cuanto a la concentración de tiosulfato de amonio se realizaron varios experimentos a las concentraciones presentadas en la Tabla 1, con un tiempo de reacción constante de 4 horas, de acuerdo a los mejores resultados encontrados en el estudio del efecto del tiempo, bajo los parámetros presentados en esa misma tabla.

Tabla 1. Diseño experimental para disolución de oro y plata con tiosulfato de amonio.

Variable	Rango
Concentración de tiosulfato	0,1 M, 0,2 M, 0,3 M, 0,4 M, 0,5 M
Tiempo de disolución	1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 5 h
Etapas de lixiviación	1era etapa, 2da etapa

Parámetros	Valor
Relación S/L	1/15 (g/mL)
Agitación por rotación	51 rpm
Concentración cobre (II)	20 mM
pH	10.5

2.4.3. Etapas de disolución con tiosulfato de amonio. Buscando aumentar la efectividad de la disolución del oro y la plata se estudió el efecto de una doble lixiviación, empleando los mismos parámetros de los ensayos anteriores, pero con la mitad de la mejor cantidad de tiosulfato de amonio encontrada en el estudio de una sola etapa, a los diferentes tiempos de disolución presentados en la Tabla 1.

2.5. FILTRACIÓN Y LAVADO DE RESIDUOS SÓLIDOS DE LAS DISOLUCIONES ÁCIDAS Y DE TIOSULFATO DE AMONIO.

La separación sólido/líquido para cada prueba experimental se efectuaba utilizando un filtro de laboratorio al vacío y realizando un triple lavado de los residuos sólidos con agua destilada.

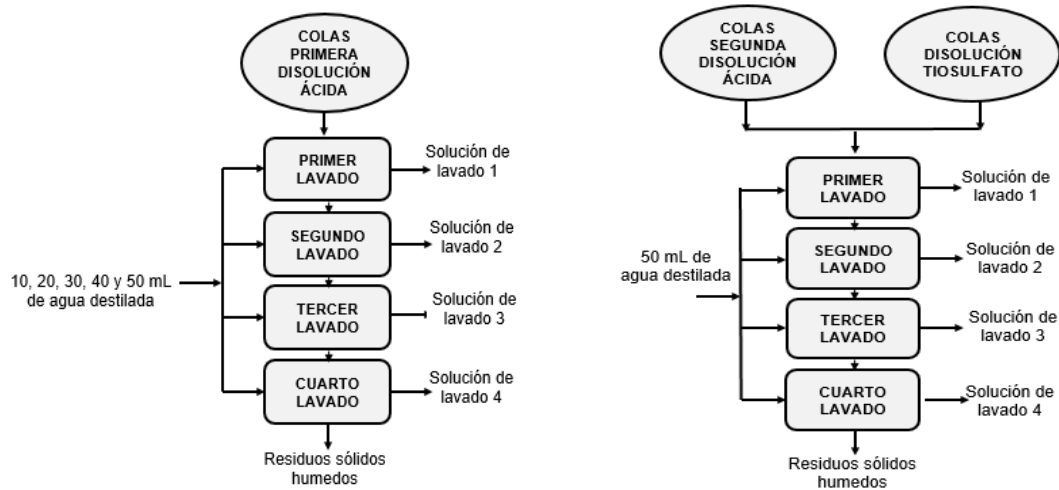
2.5.1. Estudio de líquido retenido por las colas de filtración. En búsqueda del volumen de agua de lavado mínimo necesario para extraer los metales disueltos pero presentes en las colas de lixiviación, se determinó el líquido retenido por las colas de lixiviación mediante la aplicación de la norma ASTM-D2216-10 [24].

2.5.2. Estudio del lavado de las colas de lixiviación. Para determinar el volumen de agua necesario en cada uno de los lavados de las colas, así como el número de lavados en las diferentes lixivitaciones, se realizaron los ensayos especificados en la Figura 5. En cada solución de lavado se analizó el contenido de cobre, plata y oro por EAA.

2.6. DISOLUCIÓN DE ORO Y PLATA EMPLEANDO SOLUCIONES DE TIOSULFATO CON EL COBRE (II) DE LAS SOLUCIONES DE LAVADO.

En la búsqueda de la solución de lavado con concentraciones de cobre (II) cercanas a 20 mM, recomendadas por la literatura como la adecuada en la disolución de oro y plata con tiosulfato, se analizaron los resultados de los contenidos de cobre en las diferentes soluciones del estudio del lavado de las colas de la primera disolución ácida.

Figura 5. Procedimiento para el lavado de colas de filtración de las lixiviaciones.



Una vez seleccionada la solución de lavado con esta concentración de cobre se efectuaron varias pruebas de disolución de oro y plata para comprobar su efectividad, bajo las mejores condiciones de operación, encontradas durante el estudio de disolución adicionando el cobre (II) como reactivo en forma de sulfato de cobre, junto a un mayor volumen de amoníaco para mantener un pH constante de 10,5.

2.7. PROPUESTA DE DIAGRAMA DE FLUJO DE UN PROCESO DE LIXIVIACIÓN DE COBRE, PLATA Y ORO DE TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CELULARES.

Una vez establecidos las mejores condiciones de operación para la disolución de cobre, plata y oro de las tarjetas electrónicas, así como el volumen de agua y número de lavados necesarios para extraer la mayor cantidad de metales disueltos, y a su vez, evaluada la efectividad del cobre (II) presente en las soluciones de lavado al utilizarlo como reactivo catalizador de la reacción de disolución de oro y plata con tiosulfato de amonio, se planteó un diagrama de flujo de proceso.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. DETERMINACIÓN ANALÍTICA DE COBRE, PLATA, ORO Y HIERRO EN LOS RESIDUOS ELECTRÓNICOS DE EXPERIMENTACIÓN

3.1.1. Determinación analítica de oro por Espectroscopía de Absorción Atómica (EAA) suprimiendo la interferencia del hierro. La metodología propuesta en la Figura 4(a), para la separación del hierro y del oro en la determinación analítica de este metal precioso resultó efectiva, puesto que el hierro disuelto con las soluciones ácidas permanece en esta la fase acuosa una vez realizadas las etapas de extracción del oro con el Éter Dietílico y MIBK, encontrándose concentraciones mínimas no interferentes en cada una de los ensayos realizados, como se puede observar en la Tabla 2. Las concentraciones de hierro en la fase orgánica fueron inferiores a 0,23 mg/L de los 352,0 mg/L contenidas en las soluciones acuosas ácidas iniciales, asegurando así la permanencia del hierro en esta fase y la no presencia en la orgánica dónde se realizaron las lecturas del oro, las cuales tuvieron una baja desviación estándar menor al 1,93 (Tabla 2).

Tabla 2. Concentraciones de hierro y oro en las soluciones orgánicas de la cuantificación del oro por EAA.

Experimento	Hierro Fase Orgánica [mg/L]	Desviación estandar	Concentración de Oro en material [ppm]	Desviación estandar
Ensayo A	0,029	0,038	681,36	1,927
Ensayo B	0,014	0,033	684,11	1,078
Ensayo C	0,23	0,33	685,08	1,58
Ensayo D	0,12	0,11	687,09	0,41
Original	0,042	0,020	683,29	0,300

La cantidad de oro determinada en cada uno de los ensayos, comparada con la determinada en la solución sin tratamiento de dilución o adición del oro, referenciada como *Original* en esta tabla, son similares. Se puede entonces apreciar una extracción total del oro por la fase orgánica, con valores reproducibles y sin interferencia por el hierro.

3.1.2. Composición química del material de estudio. El contenido de oro, plata, cobre y hierro en las tarjetas electrónicas de celulares para un tamaño de partícula D80 malla 100 son presentados en la Tabla 3. Las cantidades de cobre, plata y hierro analizados por esta técnica presentan valores similares a los establecidos en la literatura. Concentraciones de 38,98% para el cobre, 0,177% para la plata y 0,57% para el hierro fueron empleados para efectos de cálculos en el estudio de las lixiviaciones. La concentración del oro, de 684,19 ppm, tomada como el valor promedio de los resultados reportados en la Tabla 2.

Tabla 3. Composición química elemental de los residuos de tarjetas electrónicas.

Metal	Au [g/ton]	Ag [kg/ton]	Cu [kg/ton]	Fe [kg/ton]
EAA	684.19	1.77	389.77	5.71

Adicionalmente, se realizaron análisis por Difracción de Rayos X (DRX), cuyos resultados se presentan en el Anexo F.

3.2. DISOLUCIÓN DE COBRE Y PLATA EMPLEANDO SOLUCIONES DE ÁCIDO SULFÚRICO Y PERÓXIDO DE HIDRÓGENO

3.2.1. Primera etapa de lixiviación ácida. Disoluciones cercanas al 100% del cobre contenido en las tarjetas electrónicas fueron logradas en una primera etapa de aplicación ácida bajo las mejores condiciones de operación: tamaño de partícula D80 malla 100#, relación sólido/líquido de 1/20 (g/mL), 2,5 M de ácido sulfúrico, 20% en volumen de peróxido de hidrógeno (35%), tiempo de 3 horas. Una vez separados del licor de lixiviación, los residuos sólidos del material fueron

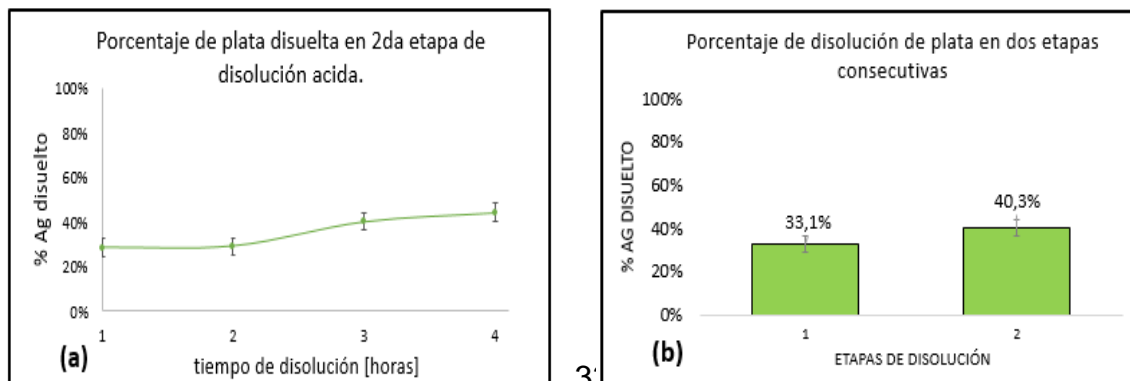
lavados con agua destilada, secados y preparados para posteriores etapas del estudio de lixiviación. En la Figura 10(a) se presentan los porcentajes de extracción del cobre en el licor y en las soluciones de los diferentes lavados, que al sumarlos se obtiene la disolución total.

Bajo las mejores condiciones para la disolución del cobre, también se disolvió un 33,1% de plata; resultados que se presentan en la Figura 6(b). La desviación estándar para repeticiones de tres ensayos fue de 0,498%.

3.2.2. Segunda etapa de lixiviación ácida. El comportamiento en cuanto a la disolución de la plata, en la segunda lixiviación del material con soluciones ácidas, en función del tiempo y bajo las mejores condiciones de la primera etapa de lixiviación ácida se presenta en la Figura 6(a). Incrementos en esta variable de estudio presentan a su vez leves mejoras en la disolución de la plata. Tiempos superiores a 3 horas no aportan un aumento significativo en la disolución de la plata. Como resultado, un 40,3% de la plata se disuelve adicionalmente con la aplicación de una segunda etapa de lixiviación ácida en un tiempo de 3 horas, que sumado a la disolución de la primera etapa, extraería en total un 73,4% de la plata, Figura 6(b). La desviación estándar para repeticiones de tres ensayos fue de 0,034%.

Un balance de masa para describir el comportamiento de la disolución de la plata en las diferentes lixivaciones de las tarjetas, tanto en las dos etapas ácidas y como en la posterior etapa con tiosulfato, se presenta en el Anexo C.

Figura 6. Disolución de plata con soluciones ácidas, (a) en función del tiempo de la segunda lixiviación, (b) en las dos etapas de lixiviación.



3.3. DISOLUCIÓN DE ORO Y PLATA EMPLEANDO SOLUCIONES DE TIOSULFATO DE AMONIO, COBRE (II) Y AMONÍACO

3.3.1. Primera lixiviación básica.

3.3.1.1. Estudio del efecto del tiempo en la disolución. Se puede apreciar en el comportamiento de la disolución del oro y la plata de la Figura 7(a), que un tiempo oportuno de disolución es de 4 horas, tiempos mayores no exponen aumentos significativos en el grado de disolución del oro y la plata del material.

3.3.1.2. Estudio de la concentración del tiosulfato de amonio. Se observa que el incremento de la concentración del tiosulfato en la solución lixivante de la primera etapa de disolución básica, favorece la cantidad de oro y plata disueltos, Figura 7(b). Puede apreciarse que concentraciones menores a 0,3 M de tiosulfato disuelven mayoritariamente la plata, mientras que el oro se disuelve en cantidades no mayores al 60,0%. Gráficamente, se presenta una pendiente más pronunciada para la disolución de la plata en comparación con la del oro.

Una mejor disolución del oro fue obtenida cuando se aplicaron dos etapas previas de disolución ácida antes de la lixiviación con tiosulfato; lo cual se aprecia en la Figura 7(b). Es observado el comportamiento de disoluciones de oro cuando es realizada una sola y a su vez, dos etapas de disolución ácida de las tarjetas. Una disolución previa de la mayor parte de la plata (lixiviaciones ácidas) es conveniente para una mayor selectividad del oro por el reactivo, debido a su liberación al disolverse la plata.

Adicionalmente, se puede observar que empleando una sola etapa de lixiviación ácida [22] las disoluciones del oro no superan el 45,0%, inclusive a cantidades de tiosulfato superiores al 0,3 M por el contrario disminuyen la efectividad del proceso de disolución del oro.

3.3.2. Segunda lixiviación básica. Los resultados de la disolución del oro y la plata con una segunda etapa de lixiviación con tiosulfato se presentan en la Figura 8. Como se puede observar, bajas cantidades de disolución de metales se obtuvieron, aun usando tiempos de disolución de más de 4 horas.

Figura 7. Disolución de oro y plata como función, (a) tiempo disolución, (b) concentración de tiosulfato.

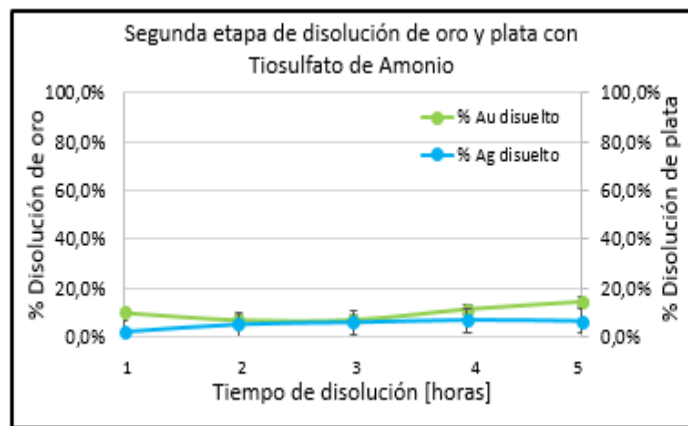
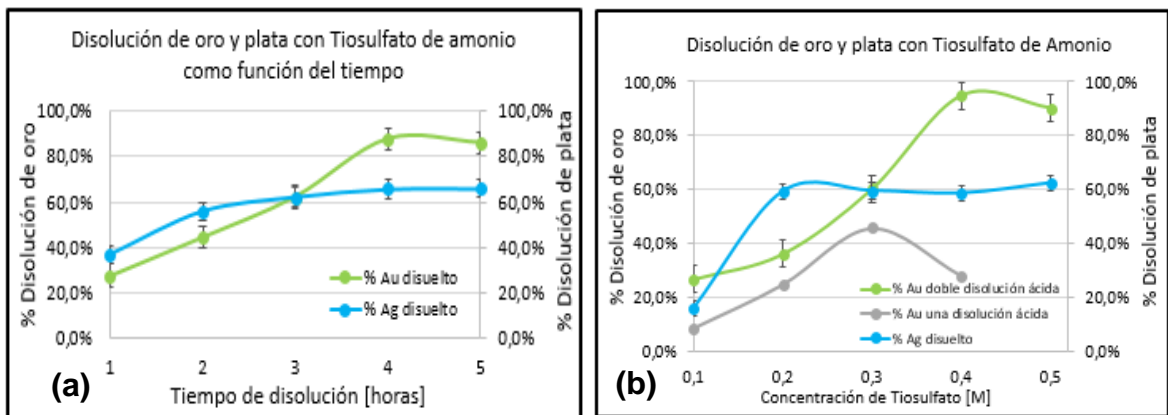


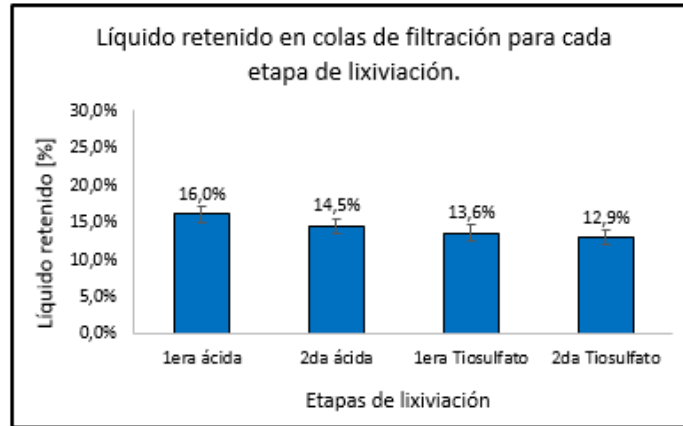
Figura 8. Segunda etapa de disolución de oro y plata con tiosulfato como función del tiempo.

3.3.3. Mejores condiciones de disolución del oro y la plata. Una concentración de 0,4 M para el tiosulfato de amonio, 20 mM de cobre (II) y un pH regulado con amoníaco de 10,5, junto a un tiempo de disolución de 4 horas, en una única etapa de lixiviación, fueron necesarios para alcanzar un porcentaje de disolución del 94,0% para el oro y 67,0% para la plata restante y no disueltas en las etapas ácidas. Por otra parte, emplear dos etapas de lixiviación con tiosulfato bajo concentraciones de 0,3 M y 0,4 M de tiosulfato, en cada etapa de lixiviación, respectivamente, no aporta mayores cantidades de oro y plata disueltas que hacer uso de una única etapa con 0,4 M de tiosulfato. Realizar una doble lixiviación ácida antes de la lixiviación con tiosulfato conlleva a la disolución total del cobre, hierro y una gran parte de la plata presente en el material, próximos a un total del 87,0%, como se puede deducir de los cálculos del balance de masa presentado en el Anexo C.

3.4. OPERACIÓN DE LAVADO DE LAS COLAS DE LIXIVIACIÓN.

3.4.1. Líquido retenido por las colas de filtración. En la Figura 9, se presentan los resultados del líquido retenido en los residuos sólidos de las diferentes etapas de lixiviación estudiadas; reportándose, 16,0% p/p para los residuos de la primera disolución ácida, 14,5% p/p para los de la segunda lixiviación ácida, 13,6% p/p para la primera y 12,9% p/p para la segunda lixiviación con tiosulfato, respectivamente; con desviaciones estándar de 3,2%, 4,0%, 2,3%, 4,4% para cada etapa de lixiviación. Así, por ejemplo para la primera lixiviación ácida, cantidades superiores a 0.8 mL de agua son necesarias para el lavado del material sólido cuando es empleada una muestra de 5 g.

Figura 9. Porcentaje de líquido retenido en los residuos sólidos de lixiviación.



3.4.2. Extracción del cobre de las colas por el agua de lavado en la primera lixiviación ácida. La cantidad de cobre extraído con los diferentes volúmenes de agua y etapas de lavado se muestran en la Tabla 4. Altos volúmenes de agua extraen una mayor cantidad del cobre (II) contenido en la humedad retenida por los residuos, debido a que mayores volúmenes generan que se libere mayor cantidad del líquido retenido. Con estos resultados, se puede intuir que dos lavados con 50 mL de agua serían suficientes para lavar este tipo de residuos, empleando la mayor cantidad de agua dependiendo de su accesibilidad.

Tabla 4. Extracción de cobre por lavado de las colas de la primera lixiviación ácida.

		Volumen de agua				
		10 mL	20 mL	30 mL	40 mL	50 mL
Primer lavado	[mg/L] Cu	4.51	2.83	1.99	1.61	1.57
	mg Cu (II)	45.14	56.67	59.70	64.33	78.65
Segundo lavado	[mg/L] Cu	1.04	0.60	0.49	0.38	0.30
	mg Cu (II)	4.51	0.60	0.74	0.76	0.75
Tercer lavado	[mg/L] Cu	0.14	0.070	0.040	0.030	0.010
	mg Cu (II)	0.0014	0.0014	0.0011	0.0010	0.00030
Cuarto lavado	[mg/L] Cu	0.010	0.010	0.0040	0.0030	0.0010
	mg Cu (II)	0.00012	0.00011	0.00011	0.00010	0.00010

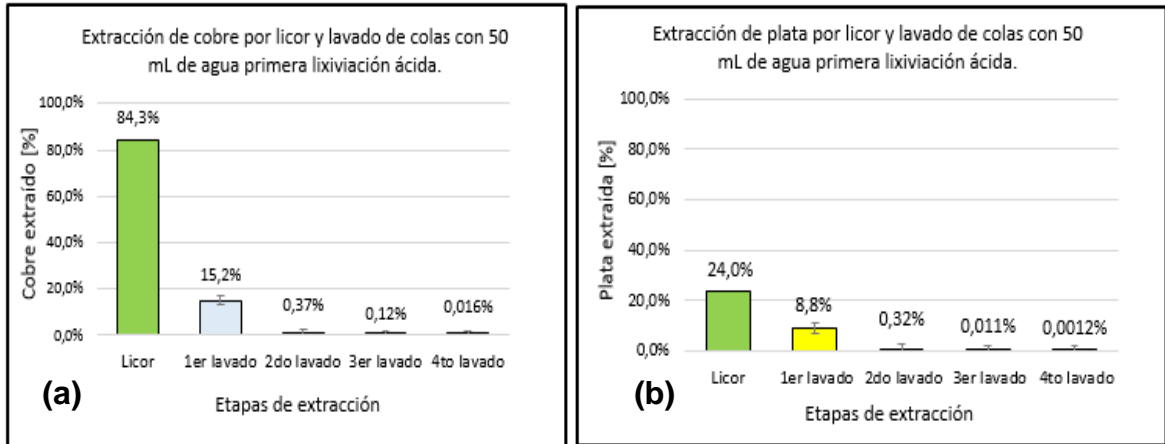
En la cuarta columna de la Tabla 5 son presentadas las concentraciones, en mM, del cobre (II) en las soluciones de lavado con los diferentes volúmenes de agua para el primer lavado de la primera lixiviación ácida. Empleando volúmenes de agua entre 30 y 50 mL se pueden obtener soluciones de lavado con concentraciones entre 18 y 25 mM de Cu (II) las cuales podrían proveer el cobre (II) necesario en la disolución del oro y de la plata con tiosulfato.

Tabla 5. Cobre (II) extraído con diferentes volúmenes de agua de lavado de las colas de la primera lixiviación ácida.

1er lavado de colas	[mg/L] Cu(II) EEA	mg Cu (II) extraídos en lavado	[mM] Cu (II) en solución de lavado	Desviación estandar de las lecturas EEA
10 mL	4,51	45,14	14,21	0,319
20 mL	2,83	56,67	17,83	0,186
30 mL	1,99	59,70	18,79	0,384
40 mL	1,61	64,33	20,25	0,118
50 mL	1,57	78,65	24,75	0,086

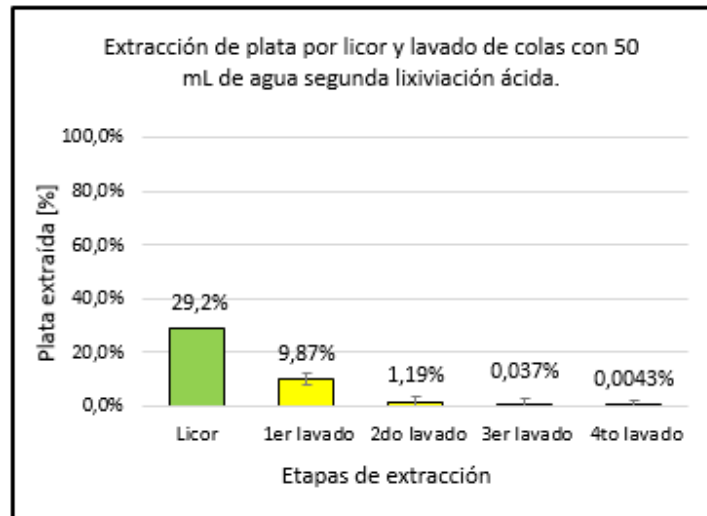
3.4.3. Estudio de la extracción de cobre y plata con la primera lixiviación ácida. La extracción de cobre y plata en el licor de disolución y en las soluciones acuosas de lavado de las colas, con 50 mL de agua, de la primera lixiviación ácida se aprecia en la Figura 10. Un volumen de agua de 50 mL equivale a 62,5 veces el líquido retenido por estos residuos (16%). El 15,2% de cobre y 8,8% de plata disueltos del material son extraídos en un primer lavado que podrían mezclarse con el licor obtenido o utilizarse como aportantes del cobre necesario en la lixiviación con tiosulfato. Con el segundo lavado se extraen bajas cantidades de estos metales; por lo que estas soluciones se podrían reutilizar como aguas de posteriores lavados. Un tercer y cuarto lavado son innecesarios, puesto que las cantidades de metales extraídos son despreciables. De la suma del cobre extraído en el licor con el de las soluciones de lavado se puede deducir que el cobre prácticamente se disolvió en su totalidad, mientras que la plata solo un 33,12% en la primera etapa de lixiviación ácida.

Figura 10. Extracción de cobre y plata en licor de primera lixiviación ácida y en sus soluciones de lavado, (a) cobre, (b) plata.



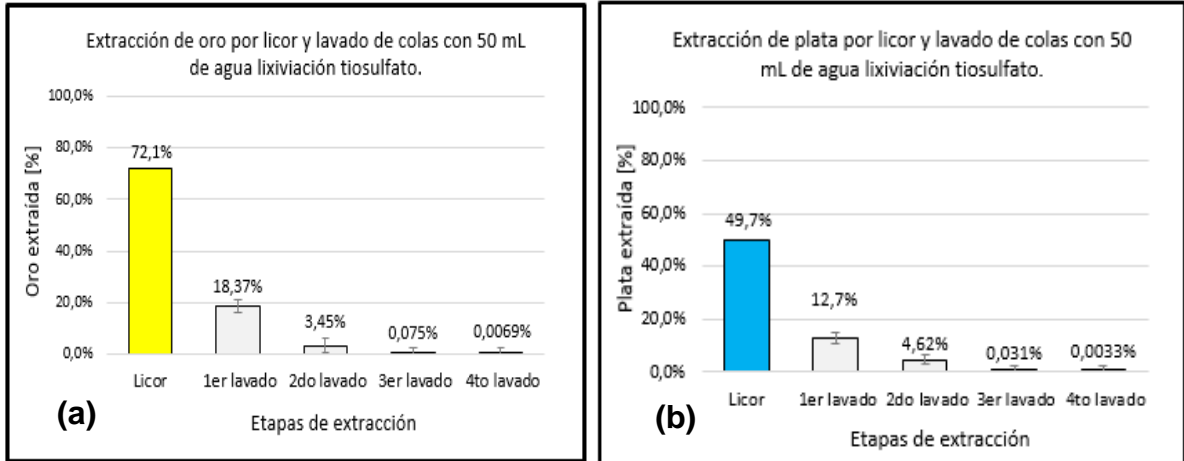
3.4.4. Estudio de la extracción de plata con la segunda lixiviación ácida. Los resultados de este estudio se presentan en la Figura 11. Un primer lavado de las colas con 50 mL de agua extrae un 9,87% de la plata disuelta en esta etapa ácida. Un segundo lavado con el mismo volumen de agua extrae el 1,19%. Con estos resultados será conveniente mezclar la solución de este primer lavado con el licor y reutilizar las soluciones del segundo lavado como aguas de posteriores lavados. Las soluciones acuosas de un tercer y cuarto lavado contienen bajas cantidades de plata por lo que no serán necesarios estos lavados. De la suma de la plata extraída en el licor con el de las soluciones de lavado se puede calcular que alrededor del 40% de la plata se disolvió en esta segunda etapa de lixiviación ácida.

Figura 11. Extracción de plata en licor de segunda lixiviación ácida y en sus soluciones de lavado.



3.4.5. Estudio de la extracción de oro y plata con la primera lixiviación básica. En la Figura 12 se presentan los resultados obtenidos para esta experimentación. Un primer y segundo lavado con 50 mL de agua de las colas extraen una cantidad de oro equivalente al 18,37% y 3,45% del oro disuelto del material, respectivamente, Figura 12(a), por lo que es conveniente mezclar las soluciones de estos dos lavados con la solución licor de oro. Un tercer y cuarto lavado con 50 mL de agua extraen bajas cantidades de oro, sin embargo, por su alto valor es conveniente su reutilización como posteriores aguas de lavado. Para la plata, un primer y segundo lavado con 50 mL de agua extraen el 12,7% y 4,62% de metal disuelto, mientras que con el tercer y cuarto lavado son bajos los porcentajes de extracción, Figura 12(b). Por estar presente en las mismas soluciones junto con el oro, es válido el mismo tratamiento de destino de las aguas de lavado dado para el oro en el párrafo anterior.

Figura 12. Extracción de oro y plata en licor de primera lixiviación con tiosulfato y en sus soluciones de lavado, (a) oro, (b) plata.



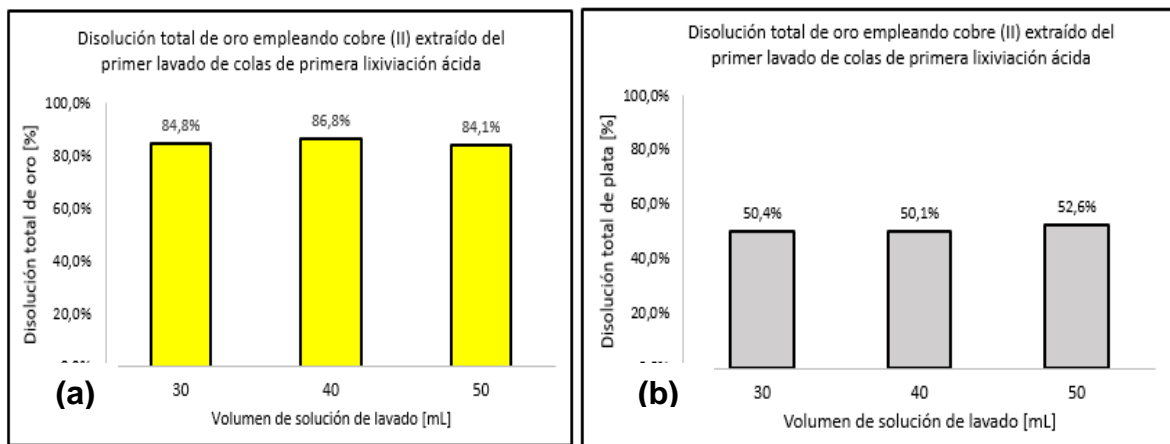
3.5. DISOLUCIÓN DE ORO Y PLATA CON SOLUCIONES DE TIOSULFATO EMPLEANDO EL COBRE (II) EXTRAÍDO CON EL PRIMER LAVADO DE LA PRIMERA LIXIVIACIÓN ÁCIDA.

Los resultados de esta experimentación se presentan en la Figura 13. Disoluciones del 84,8%, 86,8%, y 84,1% del oro fueron conseguidas con 0,4 M de tiosulfato de amonio, 1 mL de amoníaco para ajustar el pH a 10,5, a 4 horas de disolución. El cobre (II) utilizado fue el contenido en las soluciones del primer lavado con 30, 40 y 50 mL de las colas de la primera lixiviación ácida, respectivamente, soluciones que contenían una concentración cercana a 20 mM (mejor condición sugerida en el estudio de RONDÓN, O. [22]) tal como fue indicado al final del Numeral 3.4.2. Comparando estos resultados con los del proceso de lixiviación haciendo uso del cobre (II) adicionado como sulfato de cobre analítico, se presentó una efectividad de alrededor del 90,0% en la disolución del oro utilizando el cobre de las soluciones de lavado.

Por su parte, la plata fue igualmente disuelta por las soluciones básicas de tiosulfato más cobre (II) en las soluciones de lavado, Figura 10(b). Para este

metal, disoluciones del 50,4%, 50,11% y 52,6% fueron presentadas bajo la misma experimentación expuesta para el oro. Comparado con el proceso de adición sintética de cobre (II) la efectividad presentada en estos ensayos fue del 82,2%. Teniendo en cuenta las disoluciones ácidas y las básicas, para estas últimas pruebas experimentales, se puede decir que la disolución total de la plata fue del orden del 80,33%.

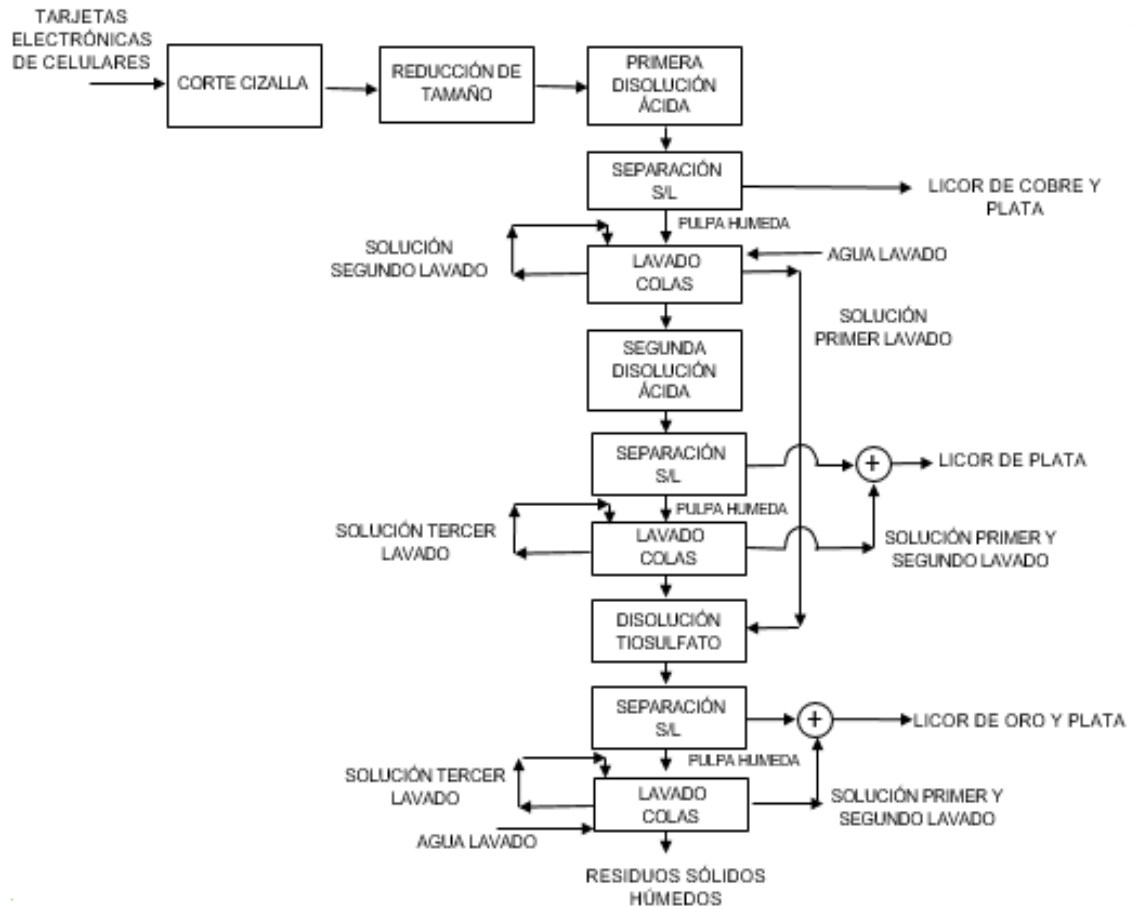
Figura 13. Disolución total de metales preciosos empleando el cobre (II) extraído con el primer lavado de la primera etapa de lixiviación ácida, (a) oro, (b) plata.



3.6. PROPUESTA DE UN DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL PROCESO DE LIXIVIACIÓN DE COBRE, PLATA Y ORO DE RESIDUOS DE TARJETAS ELECTRÓNICAS DE CELULARES.

Como resultado de toda la experimentación, se propone el diagrama de flujo de la Figura 14, con el objeto de extraer mediante lixivaciones ácidas y básicas sucesivas la disolución de los metales contenido en el material de experimentación.

Figura 14. Propuesta de un diagrama de flujo del proceso de lixiviación de metales contenidos en las tarjetas electrónicas de celulares desechados.



4. CONCLUSIONES

El contenido de metales en el material de experimentación de las tarjetas de los teléfonos celulares fue 38,98% de cobre, 0,177% de plata, 0,57% de hierro y 684,19 ppm de oro. La concentración de oro se determinó, después de seguir una metodología para separarlo del hierro que actúa como interferente en la lectura por Espectroscopía de Absorción Atómica, mediante su acomplejamiento con ácido fosfórico, y la posterior extracción del oro con Éter Dietílico y Metil Isobutil Cetona; y haciendo uso del método de adiciones estándar.

Con una primera lixiviación ácida se logró disolver el cobre en más del 99,0%, y un 73,0% de plata con una segunda lixiviación ácida consecutiva; bajo las mismas condiciones de operación para las 2 etapas de lixiviación, tamaño de partícula D80 malla 100#, relación sólido/solución 1/20 (g/mL), solución de ácido sulfúrico 2,5 M más 20% en volumen de peróxido de hidrógeno al 35,0%, con 3 horas de disolución.

Mediante una lixiviación con tiosulfato de los residuos de las lixivitaciones ácidas, se alcanzó una disolución del 95,0% de oro y un total del 77,0% de plata, en 4 horas de reacción; utilizando soluciones de tiosulfato de amonio 0.4 M, de cobre (II) 20 mM y cantidades suficientes de amoniaco para ajustar a 10,5 el pH. Con la implementación de la segunda etapa ácida, la disolución del oro con tiosulfato fue considerablemente mejorada.

Se determinó que, para obtener un eficiente lavado de las colas en las lixivitaciones ácidas, dos lavados sucesivos son suficientes, empleando volúmenes de agua equivalentes aproximadamente a 62 veces el líquido retenido por estos residuos (16,0%). Para las colas de la lixiviación de oro y plata con tiosulfato, se deben efectuar tres lavados, utilizando el mismo volumen de agua que para las

colas de lixiviación ácida. Las aguas de los diferentes lavados, dependiendo del contenido metálico pueden unirse a los licores, utilizarse en posteriores etapas o recircularse para lavados posteriores, como se muestra en la propuesta de diagrama de flujo.

La solución del primer lavado de las colas de lixiviación ácida, que sale con aproximadamente 20 mM de cobre (II), se puede utilizar como proveedora del cobre en la lixiviación del oro y plata con tiosulfato. Al emplear estas soluciones se obtuvieron disoluciones del 86,0% y 53,0% para el oro y la plata, respectivamente.

5. RECOMENDACIONES

Hacer estudios adicionales de la segunda etapa de lixiviación ácida que permitan obtener disoluciones completas de la plata contenida en las tarjetas electrónicas antes de aplicar la lixiviación del oro con tiosulfato.

Estudiar el proceso de disolución de otros metales contenidos en estos residuos (Sn, Nb, W, Ti, Sr, Al, Ba, Pd, etc.) puesto que su valor comercial ofrece altos márgenes de ganancia con fines de industrialización.

BIBLIOGRAFÍA

[1] AYLMORE, M. MUIR, D. Thiosulfate leaching of gold—a review. Australia: *Minerales Engineering*, 2001. Vol. 14. p. 135-174.

[2] YU, N. TIE, Z. WANG, F. The methods for recycling of waste printed circuit boards. China: *Resource Comprehensive Utilization*, 2010. Vol. 29. p. 21-24.

[3] GUAN, J. LI, Y. LU, M. Product characterization of waste printed circuit board by pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2008. Vol. 83. p. 185-189.

[4] SYED, S. Recovery of gold from secondary sources-a review. Arabia Saudita: *Hydrometallurgy*, 2012. p. 30-51.

[5] LI, J. XU, X. LIU, W. Thiourea leaching gold and silver from the printed circuit boards of waste mobile phones. Qingdao: *Waste Management*, 2012. Vol. 32. p. 1209-1212.

[6] HA, V. LEE, J. JEONG, J. HAI, H. JHA, M. Thiosulfate leaching of gold from waste mobile phones. *Journal of Hazardous Material*, 2010. Vol. 179. p. 1115-1119.

[7] XU, Yong. SCHOONEN, Martin. The stability of thiosulfate in the presence of pyrite in low-temperature aqueous solutions. *Geochim et Cosmochim Acta*, 1995. Vol. 59. p. 4605-4622.

[8] LANGHANS, J. LEI, K. CARNAHAN, T. Copper-catalyzed thiosulphate leaching of low-grade gold ores. Reno, USA: *Hydrometallurgy*, 1992. Vol. 29. p. 191–203.

- [9] YANG, T., Xu, Z., WEN, J., YANG, L. Factors influencing bioleaching copper from waste printed circuit boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Beijing, China: Hydrometallurgy, 2009. Vol. 97. p. 29–32.
- [10] JIANG, T. CHEN, J. XU, S. A kinetic study of gold leaching with thiosulphate. Colorado, USA: Fundamentals, Technology and Innovations, 1993. p. 119–126.
- [11] SADEGUI, N. ALAMDARI, E. FATMEHSARI, D. Solvent Extraction of Gold from Chloride Solution by Tri-Butyl Phosphate (TBP). Turkey: 23rd International Mining Congress & Exhibition of Turkey, 2016. Vol. 23.
- [12] BAHARUN, N. ONG, P. CHAN, C. Minimizing Matrix Interferences in the Analytical Determination of Gold. Malaysia: Procedia Chemistry, 2016. Vol. 19. p. 709-714.
- [13] ERTAS, Gulay. ATAMAN, Yavuz. Interference Effect of Iron on Determination of Gold in Geological Samples Using the Vapor Generation Technique and Preconcentration in a Graphite Furnace. Ankara, Turkey: Departamento de Química, Middle East Technical University, 2006. Vol. 60. p. 423-429.
- [14] BROOKS, Dean. FLATT, James. Copper, iron and sodium interferences in the determination of gold by atomic absorption spectrometry with particular reference to cyanide solutions. Australia: Metallurgy Department, University of South Australia, The Levels Campus, 2001. Vol 264. p. 107-114.
- [15] BABA, A. ADEKOLA, F. OJUTEMIEDEN, D. DADA, F. Solvent Extraccion of Gold Hydrochloric Acid-Leached Nigerian Gold Ore by Trybutylphosphate. Romania: Chemical Bulletin of “Politehnica” University of Timisoara, 2011. Vol. 56. p. 29-37.

- [16] YOKOYAMA, Takushi. YOKOTA, Tetsuya. HAYASHI, Shu. IZAWA, Eiji. Determination of trace gold in rock samples by a combination of two-stage solvent extraction and graphite furnace atomic absorption spectrometry: The problema of iron interference and its solution. Kyushu, Japón: Geochemical Journal, 1996. Vol 30. p. 175-181.
- [17] MUIR, D. AYLMORE, M. Thiosulfate as an alternative lixiviant to cyanide for gold ores. Wester, Australia: Advances in Gold Ore Processing, 2005. p. 541-556.
- [18] PEREZ, A. GARAVIZ, H. Method for recovery of precious metals from difficult ores with copper ammonium thiosulfate, U.S. Patent 4,654,078 (1987).
- [19] OISHI, T. KOYA, A. KONISHI, H. Influence of ammonium salt on electrowinning of copper from ammoniacal alkaline solutions, Electrochim Acta: 2007. Vol. 53. p. 127–132.
- [20] MCCASLIN, M. JOHNSON, J. Liquid-Solid Separation in Gold Processing. Salt Lake City, UT, USA: WesTech Engineering, 2016. p. 279-298.
- [21] BALLESTER, A. VERDEJA, L. SANCHO, J. Metalurgia Extractiva. Fundamentos: 2014. p. 121-153.
- [22] RONDON ESTUPIÑAN, Oscar Andrés. Evaluación del proceso de disolución del cobre, el oro y la plata contenidos en tarjetas electrónicas de celulares desechados empleando soluciones ácidas y tiosulfato de amonio. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.
- [23] RICE, E. BAIRD, R. EATON, A. CLESCERI, L. Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater. 2012. Edición 22, cap. 3-21.

[24] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM) International
ASTM D2216-10. Standard test method for laboratory determination of water
(Moisture) content of soil and rock by mass, 2010.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AYLMORE, M. MUIR, D. Thiosulfate leaching of gold—a review. Australia: *Minerales Engineering*, 2001. Vol. 14. p. 135–174.

BABA, A. ADEKOLA, F. OJUTEMIEDEN, D. DADA, F. Solvent Extraccion of Gold Hydrochloric Acid-Leached Nigerian Gold Ore by Trybutylphosphate. Romania: *Chemical Bulletin of “Politehnica” University of Timisoara*, 2011. Vol. 56. p. 29-37.

BAHARUN, N. ONG, P. CHAN, C. Minimizing Matrix Interferences in the Analytical Determination of Gold. Malaysia: *Procedia Chemistry*, 2016. Vol. 19. p. 709-714.

BALLESTER, A. VERDEJA, L. SANCHO, J. *Metalurgia Extractiva. Fundamentos*: 2014. p. 121-153.

BROOKS, Dean. FLATT, James. Copper, iron and sodium interferences in the determination of gold by atomic absorption spectrometry with particular reference to cyanide solutions. Australia: Metallurgy Department, University of South Australia, The Levels Campus, 2001. Vol 264. p. 107-114.

ERTAS, Gulay. ATAMAN, Yavuz. Interference Effect of Iron on Determination of Gold in Geological Samples Using the Vapor Generation Technique and Preconcentration in a Graphite Furnace. Ankara, Turkey: *Departamento de Quimica*. 2006. Vol. 60, p. 423-429.

GUAN, J. LI, Y. LU, M. Product characterization of waste printed circuit board by pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2008. Vol. 83. p. 185-189.

HA, V. LEE, J. JEONG, J. HAI, H. JHA, M. Thiosulfate leaching of gold from waste mobile phones. *Journal of Hazardous Material*, 2010. Vol. 179. p. 1115-1119.

JIANG, T. CHEN, J. XU, S. A kinetic study of gold leaching with thiosulphate. Colorado, USA: *Fundamentals, Technology and Innovations*, 1993. p. 119–126.

LANGHANS, J. LEI, K. CARNAHAN, T. Copper-catalyzed thiosulphate leaching of low-grade gold ores. Reno, USA: *Hydrometallurgy*, 1992. Vol. 29. p. 191–203.

LI, J. XU, X. LIU, W. Thiourea leaching gold and silver from the printed circuit boards of waste mobile phones. Qingdao: *Waste Management*, 2012. Vol. 32. p. 1209-1212.

MCCASLIN, M. JOHNSON, J. *Liquid-Solid Separation in Gold Processing*. Salt Lake City, UT, USA: *WesTech Engineering*, 2016. p. 279-298.

MUIR, D. AYLMOORE, M. Thiosulfate as an alternative lixiviant to cyanide for gold ores. Wester, Australia: *Advances in Gold Ore Processing*, 2005. p. 541-556.

OISHI, T. KOYA, A. KONISHI, H. Influence of ammonium salt on electrowinning of copper from ammoniacal alkaline solutions, *Electrochim Acta*: 2007. Vol. 53. p. 127–132.

PEREZ, A. GARAVIZ, H. Method for recovery of precious metals from difficult ores with copper ammonium thiosulfate, U.S. Patent 4,654,078 (1987).

RICE, E. BAIRD, R. EATON, A. CLESCERI, L. *Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater*. 2012. Edición 22, cap. 3-21.

RONDON ESTUPIÑAN, Oscar Andrés. Evaluación del proceso de disolución del cobre, el oro y la plata contenidos en tarjetas electrónicas de celulares

desechados empleando soluciones ácidas y tiosulfato de amonio. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química.

SADEGUI, N. ALAMDARI, E. FATMEHSARI, D. Solvent Extraction of Gold from Chloride Solution by Tri-Butyl Phosphate (TBP). Turkey: 23rd International Mining Congress & Exhibition of Turkey, 2016. Vol. 23.

SYED, S. Recovery of gold from secondary sources-a review. Arabia Saudita: Hydrometallurgy, 2012. p. 30-51.

XU, Yong. SCHOONEN, Martin. The stability of thiosulfate in the presence of pyrite in low-temperature aqueous solutions. Geochim et Cosmochim Acta, 1995. Vol. 59. p. 4605–4622.

YANG, T., Xu, Z., WEN, J., YANG, L. Factors influencing bioleaching copper from waste printed circuit boards by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. Beijing. China: Hydrometallurgy, 2009. Vol. 97. p. 29–32.

YOKOYAMA, Takushi. YOKOTA, Tetsuya. HAYASHI, Shu. IZAWA, Eiji. Determination of trace gold in rock samples by a combination of two-stage solvent extraction and graphite furnace atomic absorption spectrometry: The problema of iron interference and its solution. Kyushu, Japón: Geochemical Journal, 1996. Vol 30. p. 175-181.

YU, N. TIE, Z. WANG, F. The methods for recycling of waste printed circuit boards. China: Resource Comprehensive Utilization, 2010. Vol. 29. p. 21-24.

ANEXOS

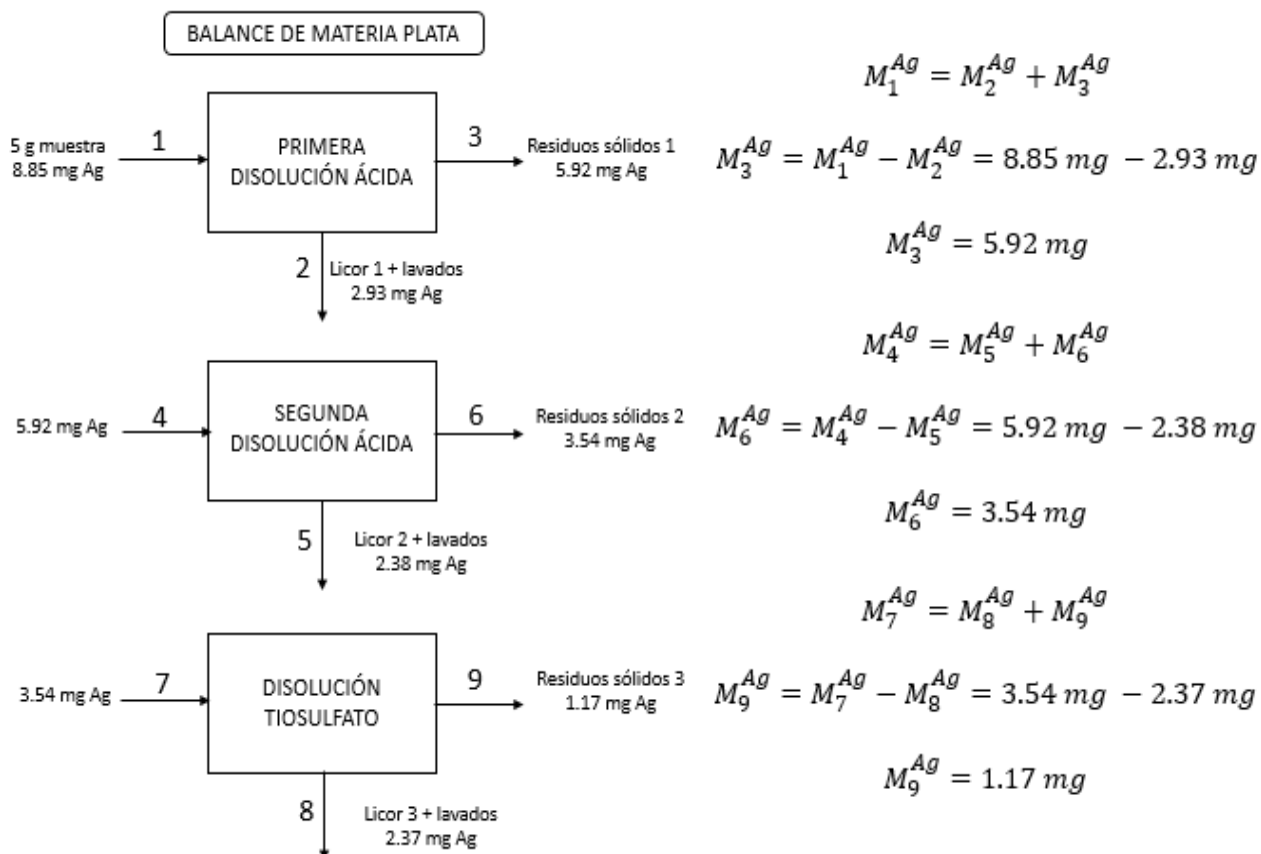
ANEXO A. REACTIVOS UTILIZADOS DURANTE EL PROCESO.

Reactivo	Formula química	Especificación
Ácido clorhídrico	HCl	Merck - 37%
Ácido nítrico	HNO ₃	Merck - 65%
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	Merck - 95-98%
Ácido fosfórico	H ₃ PO ₄	Merck - 85%
Ácido fluorhídrico	HF	Merck - 72 %
Ácido bromhídrico	HBr	Merck - 32%
Amoniaco	NH ₄	Merck - 30%
Peróxido de hidrógeno	H ₂ O ₂	Tecnoquímicas - 50%
Sulfato de cobre	CuSO ₄ •5H ₂ O	Merck - 99%
Tiosulfato de amonio	NH ₄ (S ₂ O ₃)	Merck - 98%
Metil Isobutil Cetona	(CH ₃) ₂ CHCH ₂ C(O)CH ₃	Merck - 98%
Éter Dietílico	(C ₂ H ₅) ₂ O	Merck - 99%

ANEXO B. PRINCIPALES EQUIPOS UTILIZADOS.

	<p>Estufa de secado</p> <p>Aplicación: Retirar humedad al material. Tomado de: Autor.</p>
	<p>Embudo de decantación</p> <p>Aplicación: Extracción liquido-liquido. Tomado de: Autor</p>
	<p>Espectroscopia de Absorción Atómica.</p> <p>Aplicación: Determinación de metales. Tomado de: Autor</p>
	<p>Agitador mecánico de rodillos</p> <p>Aplicación: Agitación constante de botellas con soluciones lixiviantes. Tomado de: Autor</p>

ANEXO C. BALANCE DE MASA PARA LA PLATA EN LA LIXIVIAICIÓN DE TARJETAS ELECTRONICAS DE CELUALRES.



ANEXO D. ENSAYOS PARA DETERMINACIÓN ANALITICA DE ORO.

D1. RESULTADO EXPERIMENTACIÓN MEDOLOGIA DE CARACTERIZACIÓN.

	ORGANICA CARGADA (digestión base artículo; HCl, HF, Agua regia y HBr)						
	LECTURA EAA [mg/L]	Concentración [mg/L]	Cantidad mg	Adición de oro mg	Cantidad real mg	Cantidad real µg	Au [ppm]
ENSAYO A (1 rep, 2 rep)	1,83	45,75	0,684	0	0,684	683,96	683,96
	1,88	47,00	0,686	0	0,686	686,20	686,20
ENSAYO B (1 rep, 2 rep))	1,41	35,25	0,687	0	0,687	687,38	687,38
	1,36	34,00	0,687	0	0,687	686,80	686,80
ORIGINAL (1 rep, 2 rep)	2,55	63,75	0,683	0	0,683	683,08	683,08
	2,49	62,25	0,684	0	0,684	683,51	683,51
ENSAYO C (1 rep, 2 rep)	3,20	160,00	1,680	1	0,680	680,00	680,00
	3,19	159,50	1,683	1	0,683	682,73	682,73
ENSAYO D (1 rep, 2 rep)	4,57	228,50	2,685	2	0,685	684,88	684,88
	4,45	222,50	2,683	2	0,683	683,35	683,35

D2. EXPERIMENTACIÓN SOLUCIONES SINTETICAS DE Au-HBr

		Extracción con Éter Dietílico de Au en soluciones sintenticas entre patrones y HBr			
		Lectura Au EAA [mg/L]	Concentración real Au [mg/L]	Cantidad Au extraída µg	Cantidad esperada Au en la extracción µg
Ensayo 1	Solución patrón de Au con adición de HBr	1,82	45,50	698,65	700
	Solución patrón de Au sin adición de HBr	1,61	40,25	600,73	
Ensayo 2	Solución patrón de Au con adición de HBr	1,23	30,75	299,81	300
	Solución patrón de Au sin adición de HBr	0,66	16,50	173,17	
Ensayo 3	Solución patrón de Au con adición de HBr	2,58	64,50	999,11	1000
	Solución patrón de Au sin adición de HBr	1,35	33,75	506,25	

ANEXO E. PREPARACIÓN DE ETAPAS DE ESTUDIO.

E1. Ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno.

1. Pesar 5 gramos de material de tamaño de partícula D80 malla 100# y depositar en botella plástica de tapa atornillada.
2. Agregar agua destilada, peróxido de hidrógeno y ácido sulfúrico, respectivamente, en función del ensayo a estudiar.
3. Mantener la botella tapada en el agitador de rodillos en el tiempo de disolución a estudiar.
4. Separación S/L por filtración de la solución lixiviante, depositar en balones aforados, realizando lavados de los sólidos remanentes en la botella.
5. Leer por EAA cada uno de los metales en licores, soluciones de lavado.

E2. Tiosulfato de amonio, cobre(II) y amoniaco.

1. Pesar los residuos solidos restantes de las etapas de solución ácida despositando el contenido dentro de una botella plástica atornillada.
2. Agregar agua, cobre(II) y amoniaco en un recipiente de vidrio, según las concentraciones a trabajar. Agitar la solución por 10 segundos.
3. Agregar tiosulfato de amonio a la solución anterior según la cantidad que corresponda y agregar la solución preparada a la botella de reacción.
4. Mantener la botella en el agitador de rodillos el tiempo de disolución.
5. Filtrar la solución lixiviante en balones aforados, realizando tres lavados de los sólidos remanentes en la botella.

E3. Lavado de material sólido.

1. Disolver material con soluciones acidas indicadas.
2. Filtrar el material en embudos de filtración.

3. Una vez el material sólido y la fase líquida estén separadas agregar volumen de agua en las proporciones de interés.

ANEXO F. RESULTADOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX) PARA TARJETAS DE CELULARES.

FECHA	DIA	MES	AÑO	INFORME	INF-17245
	17	08	2017		

DATOS DEL CLIENTE			
Empresa	GIMBA-UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
Nombre	Julio Elías Pedraza Rosas		
Dirección	Km 2, vía el Refugio, Gautiguará	Nit o C.C	890201213-4
Ciudad	Piedecuesta- Santander	Orden de Compra	No aplica
E-mail	jpedraza@uis.edu.co	Teléfono	634400 Ext: 3504

METODOLOGIA DE TRABAJO															
Preparación de las muestras	<p>Los especímenes seleccionados de las muestras identificadas con códigos internos</p> <p><input type="checkbox"/> 17245006 y 17245007 fueron molturados en un mortero de ágata. Posteriormente, los especímenes seleccionados fueron montados en un portamuestra de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal.</p>														
Condiciones de medición	<p><input type="checkbox"/></p> <p>Se realizó en un difractómetro de polvo Geometría DaVinci bajo las siguientes marca BRUKER modelo D8 ADVANCE condiciones:</p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 60%;">Voltaje</td> <td>40 (kV)</td> </tr> <tr> <td>Corriente</td> <td>40 (mA)</td> </tr> <tr> <td>Rendija de Divergencia</td> <td>0,6 mm</td> </tr> <tr> <td>Rendijas Soller Primario y Secundario</td> <td>2,5°</td> </tr> <tr> <td>Muestreo</td> <td>0,02035° 2Theta</td> </tr> <tr> <td>Rango de Medición</td> <td>3,5°-70,0° 2Theta</td> </tr> <tr> <td>Radiación</td> <td>CuKα1</td> </tr> </table>	Voltaje	40 (kV)	Corriente	40 (mA)	Rendija de Divergencia	0,6 mm	Rendijas Soller Primario y Secundario	2,5°	Muestreo	0,02035° 2Theta	Rango de Medición	3,5°-70,0° 2Theta	Radiación	CuK α 1
Voltaje	40 (kV)														
Corriente	40 (mA)														
Rendija de Divergencia	0,6 mm														
Rendijas Soller Primario y Secundario	2,5°														
Muestreo	0,02035° 2Theta														
Rango de Medición	3,5°-70,0° 2Theta														
Radiación	CuK α 1														

	Filtro Uso de Anti-dispersor de Aire Detector Tipo de barrido Tiempo de muestreo	Níquel Si Lineal LynxEye A pasos 0,6 segundos
Ensayo	<input type="checkbox"/> Análisis Cualitativo Los análisis cualitativos de las fases presentes en los especímenes seleccionados de las muestras se realizaron mediante la comparación de los perfiles observados con los perfiles de difracción reportados en la base de datos PDF-2 (2014) del International Centre for Diffraction Data (ICDD). <input type="checkbox"/> Análisis Cuantitativo Los análisis cuantitativos de las fases encontradas se realizaron mediante el refinamiento	
	por el Método de Rietveld entre los perfiles observados y los perfiles de difracción reportados en la base de datos. Los porcentajes reportados corresponden a la relación entre las fases policristalinas refinadas sin considerar el porcentaje de material amorfo. El porcentaje de las fases adicionales que no pudieron ser identificadas o refinadas se encuentran dentro del material amorfo no determinado.	
Tratamiento de las muestras	Químico <input type="checkbox"/> Térmico <input type="checkbox"/> Ninguno <input checked="" type="checkbox"/>	

TOMA Y ANÁLISIS DE DATOS

Fecha de recepción de las muestras	2017-07-17	Fecha de medición	2017-07-25
Tipo de muestras	Inorgánicos	Fecha análisis de resultados	2017-08-14 2017-08-15

RESULTADOS OBTENIDOS

En las Tablas 1 y 2, se describen cada una de las fases cristalinas presentes en los especímenes seleccionados de las muestras con códigos internos 17245006 y 17245007. Estas fases fueron identificadas con la base de datos PDF-2 (2014) del International Centre for Diffraction Data (ICDD). En las Figuras 1 y 2, se muestran los perfiles de difracción obtenidos con los análisis comparativos de las fases encontradas.

Código interno de laboratorio	Referencia cliente
17245006	D80 DRX
17245007	M5 DRX

1. 17245006

Tabla 1. Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 (2014) del International Centre for Diffraction Data (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno 17245006.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	Cu	010-71-4609	Cobre	65,4%
	Ba (S O4)	010-73-6401	Barita	7,6%
	Si O2	010-85-0865	Cuarzo	4,5%
	Si	010-89-2955	Silicio	1,7%
	Sn	010-86-2265	Estaño	2,4%
	Ba (Ti O3)	010-75-1608	Barioperovskita	1,8%
	Au	010-71-4615	Oro	0,7%
	Sr (Nb O3)	010-89-8400	Óxido de estroncio y niobio	1,1%
	Al (O H)3	010-74-1775	Gibbsita	13,2%
	Fe3 O4	010-76-7165	Magnetita	1,6%

2. 17245007

Tabla 2. Fases cristalinas identificadas con ayuda de la base de datos PDF-2 (2014) del International Centre for Diffraction Data (ICDD) en el espécimen seleccionado de la muestra con código interno 17245007.

	FASE	PDF No.	NOMBRE	CUANTITATIVO
Cristalino	Ba (S O4)	010-73-6401	Barita	14,1%
	Sn	010-86-2265	Estaño	2,6%
	Cu	010-70-3039	Cobre	41,3%
	Si O2	010-85-0796	Cuarzo	8,0%
	Si	010-89-2955	Silicio	5,2%
	Ba (Ti O3)	010-75-1608	Barioperovskita	2,9%
	Al (O H)3	010-74-1775	Gibbsita	20,5%
	Fe3 O4	010-75-1372	Magnetita	1,6%
	Au	010-71-4073	Oro	0,6%
	Sr (Nb O3)	010-89-8400	Óxido de estroncio y niobio	2,2%
	Ba (W O4)	010-75-7666	Óxido de bario y tungsteno	0,9%

- No se debe reproducir el informe de ensayo excepto en su totalidad, sin la aprobación escrita del laboratorio.

Atentamente;

Elaboró:

John D. Bonilla Jaimes
Profesional Analista
Laboratorio de rayos-X
PQ-4175

Revisó:

José A. Henao Martínez
Director del Laboratorio
de rayos-X
PQ-0321

Aprobó:

José A. Henao Martínez
Director del Laboratorio
de rayos-X
PQ-0321