



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO
INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

**ÁREA ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y
MATERIALES**

***“INNOVACIÓN DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE ORO
CONTENIDO EN RESIDUOS ELECTRÓNICOS”***

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO EN CIENCIA DE LOS MATERIALES

PRESENTA:

Yajhayra Zuriely Hernández Vega

DIRECTORES:

Dra. María Isabel Reyes Valderrama

Dra. Magda Gabriela Sánchez Trujillo

Dr. Juan Hernández Ávila

MINERAL DE LA REFORMA, HIDALGO; AGOSTO 2018.



Mineral de la Reforma, Hgo., a 6 de agosto de 2018.

Número de Control: ICBI-D674//2018
 Asunto: Autorización de tesis.

MTRO. JULIO CÉSAR LEINES MEDÉCIGO
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR DE LA
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

Por este conducto le comunico que el Jurado asignado al pasante de la Licenciatura en Ingeniería en Ciencia de los Materiales: **Yajhaya Zuriely Hernández Vega**, quien presenta el trabajo de **“Innovación del proceso de recuperación de oro contenido en los residuos electrónicos”**, después de revisar el trabajo ha decidido autorizar la impresión del mismo, hechas las correcciones que fueron acordadas.

A continuación se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del Jurado:

- PRESIDENTE: Dr. Eleazar Salinas Rodríguez
 PRIMER VOCAL: Dra. María Isabel Reyes Valderrama
 SEGUNDO VOCAL: Dr. Juan Hernández Ávila
 TERCER VOCAL: Dra. Magda Gabriela Sánchez Trujillo
 SECRETARIO: M. en C. Alberto Arenas Flores
 PRIMER SUPLENTE: Dr. Eduardo Cerecedo Sáenz
 SEGUNDO SUPLENTE: Dr. Ventura Rodríguez Lugo

Sin otro particular, le reitero a usted la seguridad de mi atenta consideración.

Atentamente
 “Amor, Orden y Progreso”

Dr. Oscar Rodolfo Suárez Castillo
 Director del ICBI



ORSC/MMM

Ciudad del Conocimiento
 Carretera Pachuca - Tlaxianguillo km. 4.5
 Colonia Carboneras
 Mineral de la Reforma, Hidalgo, México, C.P. 42184
 Tel. +52 771 7172000 exts. 2280 y 2273
 isareyv@hotmail.com



www.uaeh.edu.mx

RESUMEN

La producción y generación de nuevas tecnologías ha generado un desmedido consumo de aparatos eléctricos y electrónicos debido a su corta vida útil, provocando una tasa de crecimiento anual del 3% al 5% de residuos de éste tipo. Lo que ha provocado un problema de carácter ambiental y de seguridad para la salud humana debido a la toxicidad que poseen algunos de sus componentes.

Sin embargo, a pesar de su impacto negativo, los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos contienen una gran cantidad de metales nobles y no nobles, considerando a las placas de circuitos impresos que los conforman, una fuente secundaria variable de estos recursos. Sabiendo que cada placa de circuitos impresos presenta de 0.1 a 0.5 gramos de oro, dependiendo del equipo de procedencia y su época, frente a una extracción de 1 a 5 gramos de oro por tonelada de desechos, es decir, las fuentes secundarias de éste metal pueden ser comercialmente más atractivas.

Para hacer posible la recuperación de metales nobles y no nobles que están contenidos en matrices poliméricas que conforman las placas de circuitos impresos, se realizara la caracterización correspondiente de los componentes sólidos de interés en este caso los pines de contacto presentes en dichas placas, por Difracción de Rayos X (DRX), Microscopia Electrónica de Barrido en conjunción con Microanálisis por Dispersión de Energías (MEB-EDS). Posteriormente se realizará un desprendimiento manual de los pines de interés de las placas de circuitos impresos, para lixiviar y tener referencia del ozono como agente oxidante.

Dichos componentes se lixiviarán dinámicamente en medio ácido con ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ozono (O_3). Para ello se determinarán parámetros y condiciones cinéticas que intervienen en la reacción, en este caso la velocidad de agitación. Las soluciones obtenidas a los diferentes intervalos de la lixiviación dinámica ácida se analizarán por Espectroscopia de Acoplamiento Inducido (ICP). Con base a los resultados se obtendrá la ruta óptima de recuperación de los metales presentes en las placas de circuitos impresos que constituyen la chatarra electrónica.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	6
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	9
JUSTIFICACIÓN.....	10
OBJETIVO GENERAL.....	11
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
CAPÍTULO I.- ANTECEDENTES.....	12
1.1.- METALURGIA EXTRACTIVA.....	12
1.2.- LIXIVIACIÓN.....	14
1.3.- OZONO COMO AGENTE OXIDANTE.....	16
1.3.1.- APLICACIONES GENERALES DEL OZONO.....	19
1.4.- ELECTRÓLISIS.....	21
CAPÍTULO II.- DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	24
2.1.- METODOLOGÍA.....	24
CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	30
3.1.- TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN.....	30
3.1.1.- DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX).....	30
3.1.2.- MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB/SEM) Y MICROANÁLISIS POR DISPERSIÓN DE ENERGÍAS (EDS).....	31
3.1.3.- ESPECTROMETRÍA DE PLASMA DE ACOPLAMIENTO INDUCIDO (ICP).....	41
3.2.- ESTUDIO CINÉTICO DE LA LIXIVIACIÓN DE Au, Cu, Ni y Zn CONTENIDOS EN LOS COMPONENTES PRESENTES EN LOS DE CIRCUITOS IMPRESOS.....	43
3.2.1.- EFECTO DE LA VELOCIDAD DE AGITACIÓN.....	43
3.2.2.- CARACTERIZACIÓN POR ESPECTROMETRÍA DE PLASMA DE ACOMPLAMIENTO INDUCIDO (ICP).....	45
CONCLUSIONES.....	53
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.- ESTRUCTURA MOLECULAR DEL OZONO, FORMAS RESONANTES.....	17
FIGURA 2.- REPRESENTACIÓN DE LA GENERACIÓN DEL OZONO.	18
FIGURA 3.- REPRESENTACIÓN DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA.	21
FIGURA 4.- DIAGRAMA DEL DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL PROYECTO.....	24
FIGURA 5.- CIRCUITO IMPRESO DE COMPUTADORA.....	26
FIGURA 6.- PINES DE CONTACTO UBICADOS EN LOS CIRCUITOS IMPRESOS.	26
FIGURA 7.- PIEZAS SELECCIONADAS COMO MUESTRA PARA LIXIVIACIÓN.	27
FIGURA 8.- GENERADOR DE OZONO DE MARCA OZONE ECOLOGICAL EQUIPAMENTS, MODELO BIO-30 LAB.	28
FIGURA 9.- SISTEMA PARA EL CÁLCULO DE OZONO GENERADO.....	29
FIGURA 10. IMAGEN DE LA MUESTRA 1A OBTENIDA POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.	33
FIGURA 11.- ESPECTRO DE EDS DE LA MUESTRA 1A.....	33
FIGURA 12.- IMAGEN DE LA MUESTRA 1B OBTENIDA POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.	34
FIGURA 13.- ESPECTRO DE EDS DE LA MUESTRA 1B.....	35
FIGURA 14.- IMAGEN DE LA MUESTRA 2 OBTENIDA POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.	36
FIGURA 15.- ESPECTRO DE EDS DE LA MUESTRA 2.	36
FIGURA 16.- IMAGEN DE LA MUESTRA 3 OBTENIDA POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.	37
FIGURA 17.- ESPECTRO DE EDS DE LA MUESTRA 3.	38
FIGURA 18.- IMAGEN DE LA MUESTRA 4 OBTENIDA POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO.	39
FIGURA 19.- ESPECTRO DE EDS DE LA MUESTRA 4.	39
FIGURA 20.- SISTEMA PARA LLEVAR ACABO LA LIXIVIACIÓN.	44
FIGURA 21.- GRÁFICA DE LAS CONCENTRACIONES EN PPM OBTENIDAS EN ICP PARA LA VELOCIDAD DE 400 RPM.	45
FIGURA 22.- GRÁFICA DE LAS CONCENTRACIONES EN PPM OBTENIDAS EN ICP PARA LA VELOCIDAD DE 500 RPM.	46
FIGURA 23.- GRÁFICA DE LAS CONCENTRACIONES EN PPM OBTENIDAS EN ICP PARA LA VELOCIDAD DE 600 RPM.	47
FIGURA 24.- GRÁFICA DE LAS CONCENTRACIONES EN PPM OBTENIDAS EN ICP PARA LA VELOCIDAD DE 700 RPM.	48
FIGURA 25.- GRÁFICA DE LAS CONCENTRACIONES EN PPM OBTENIDAS EN ICP PARA LA VELOCIDAD DE 800 RPM.	49
FIGURA 26.- GRÁFICA DE LAS CONCENTRACIONES EN PPM OBTENIDAS EN ICP PARA LA VELOCIDAD DE 900 RPM.	50
FIGURA 27.- GRÁFICA DE LAS CONCENTRACIONES EN PPM OBTENIDAS EN ICP PARA LA VELOCIDAD DE 1000 RPM.	51
FIGURA 28. MUESTRA FILTRADA PREVIAMENTE UTILIZADA EN LA LIXIVIACIÓN A 800 RPM.....	52
FIGURA 29. MUESTRA FILTRADA PREVIAMENTE UTILIZADA EN LA LIXIVIACIÓN A 400 RPM.....	52

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.- VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA HIDROMETALURGIA.	13
TABLA 2.- PROPIEDADES FÍSICAS DEL OZONO.	16
TABLA 3.- TABLA COMPARATIVA DE METALES RECUPERADOS A PARTIR DE CELDAS ELECTROLÍTICAS.	23
TABLA 4.- PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS REACTIVOS UTILIZADOS.	25
TABLA 5. CATEGORIZACIÓN DE MUESTRAS.	27
TABLA 6.- DATOS DEL ANÁLISIS POR DISPERSIÓN DE ENERGÍAS DE LA MUESTRA 1A.	34
TABLA 7.- DATOS DEL ANÁLISIS POR DISPERSIÓN DE ENERGÍAS DE LA MUESTRA 1B.	35
TABLA 8.- DATOS DEL ANÁLISIS POR DISPERSIÓN DE ENERGÍAS DE LA MUESTRA 2.	37
TABLA 9.- DATOS DEL ANÁLISIS POR DISPERSIÓN DE ENERGÍAS DE LA MUESTRA 3.	38
TABLA 10.- DATOS DEL ANÁLISIS POR DISPERSIÓN DE ENERGÍAS DE LA MUESTRA 4.	40
TABLA 11.- RELACIÓN DE TIEMPO EN LA TOMA DE MUESTRAS.	44
TABLA 12.- CONCENTRACIÓN OBTENIDA EN PPM DE LA LIXIVIACIÓN A 400 RPM.	45
TABLA 13.- CONCENTRACIÓN OBTENIDA EN PPM DE LA LIXIVIACIÓN A 500 RPM.	46
TABLA 14.- CONCENTRACIÓN OBTENIDA EN PPM DE LA LIXIVIACIÓN A 600 RPM.	47
TABLA 15.- CONCENTRACIÓN OBTENIDA EN PPM DE LA LIXIVIACIÓN A 700 RPM.	48
TABLA 16.- CONCENTRACIÓN OBTENIDA EN PPM DE LA LIXIVIACIÓN A 800 RPM.	49
TABLA 17.- CONCENTRACIÓN OBTENIDA EN PPM DE LA LIXIVIACIÓN A 900 RPM.	50
TABLA 18.- CONCENTRACIÓN OBTENIDA EN PPM DE LA LIXIVIACIÓN A 1000 RPM.	51

INTRODUCCIÓN

Los circuitos impresos (CI's) son la parte integral de los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE's), cuya acelerada evolución provocada por la necesidad de nuevos aparatos, más veloces, eficientes y económicos reducen su vida útil, pasando a convertirse en un simple desecho que incrementa la acumulación de "chatarra electrónica" (Reyes Amador, 2013). En donde, componentes constituidos de metales base como cobre (Cu), hierro (Fe), aluminio (Al) y estaño (Sn), metales nobles como oro (Au), plata (Ag) y platino (Pt) y metales peligrosos como el cromo (Cr), plomo (Pb), berilio (Be), mercurio (Hg), cadmio (Cd), zinc (Zn), níquel (Ni). Estos materiales representan un valor económico y ecológico considerable en cuanto a la escala de producción de estos desperdicios, que al día de hoy ha logrado consolidar una industria de recuperación de materiales de importancia industrial, priorizando el reciclado de oro depositado sobre el sustrato de un metal no noble de níquel, zinc y/o cobre insertado sobre una base polimérica (*placas*), esto presente en una mezcla heterogénea que contiene generalmente polímeros, cerámicos de sílice y alúmina, metales base y nobles (Jianzhi, 2016) (Montiel Hernández, 2013).

Hoy en día vivimos en una era donde la atención hacia el reciclado de materiales ha tomado mucha relevancia y el reciclado de desperdicio industrial no queda fuera de este interés. El oro y la plata son un ejemplo de materiales industriales que pueden ser reciclados (Rivera, 2004) (Rivera, 2003). No obstante, esto, grandes cantidades de oro no son recicladas óptimamente y algunas otras, no son aún tratadas, creando consecuencias tanto económicas como ecológicas y de control estratégico (Kimbrough, 1996). Mientras tanto, los países desarrollados incrementan rápida y considerablemente su industria y el reciclaje del desperdicio industrial tiende también al crecimiento. Sin embargo, durante cierto tiempo, su principal foco de atención fue en el reciclaje sobre productos post-consumidos.

Si bien hace algunos lustros, se pensaba que al igual que en el caso de la promesa del uso pacífico del átomo, la esperanza inicial era que la revolución de las computadoras desterrara una de las plagas de la primera revolución industrial al eliminar el problema de los ríos y paisajes contaminados por los desechos de las fábricas; la realidad demostró que esta revolución informática, respaldada por una industria silenciosa y "limpia" impulsada por chips, tiene su lado oscuro. Fuera de la vista y la repercusión pública, están los vertederos de basura para cientos de millones de computadoras, televisores, teléfonos celulares,

equipos estereofónicos, refrigeradores y otros aparatos electrónicos son desechados con una velocidad cada vez mayor (Ullman, 1993).

A medida que se desarrollan nuevas generaciones de aparatos electrónicos, sus capacidades tienden a cambiar, por lo que su vida útil se acorta. Así que desde los años 80, fue cuando el desarrollo y producción de equipos electrónicos se orientó a incrementar su consumo entre la población, y su vida útil se ha reducido a un ritmo exponencial. Por lo que un aspecto que ha llevado a la producción de desechos electrónicos es el aumento constante de la industria de la computación, por lo que, se estima que han sido retiradas mil millones de computadoras (Lovegrove, 2008).

Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, o residuos electrónicos, han sido tomados en consideración por la mayoría de los gobiernos. Ya que aumentan a distinto ritmo pero de forma rápida, por ejemplo, en la Unión Europea el crecimiento es del 3 al 5% anualmente (Schwarzer, 2005), en Estados Unidos de América alrededor de un 120% a partir de los niveles de 1990 (U.S.E.P, 2011), y un informe reciente publicado por la Naciones Unidas (Schluep, 2009), predice que para el 2020 los desechos electrónicos de las computadoras de modelos antiguos presentes en África y el Sur de China alcanzarán de 200 a 400% y en la India a 500% en comparación con los niveles de 2007. Además, cabe destacar que el 80% de la pequeña parte de desechos recogidos se envía a los países pobres (Schmidt, 2006). Estos desechos electrónicos se reciben en forma de “donaciones bien intencionadas” por parte de algunas organizaciones de países ricos, pero simplemente se trata de una forma de deshacerse de esos equipos electrónicos considerados obsoletos y de cierta manera no romper así el Convenio de Basilea que regula exportaciones. Siendo el 70% del total de los desechos electrónicos enviados a China (Liu, 2006) otros países que reciben cantidades significativas son: Pakistán, Vietnam, Filipinas, Malasia, Nigeria y Ghana (Network, 2005), mientras que en el continente americano la mayor parte es recibida por Brasil y México. Debido a la falta de una infraestructura adecuada para manejar los desechos de forma segura, estos residuos son enterrados, quemados al aire libre o vertidos en los depósitos de agua superficiales, convirtiéndose en una enorme fuente de contaminación, en estos países, y en cambio la mayoría de los países desarrollados tienen una legislación para los fabricantes de electrónica e impartidores de los productos electrónicos, basado en el principio de responsabilidad extendida del productor. La aplicación de este tipo de política en los países en desarrollo se ha convertido en una

necesidad, principalmente para la técnica y las instalaciones de eliminación de residuos (Sánchez, 2010).

En el Capítulo I, se presenta el estado del arte relativo a la recuperación de metales nobles y no nobles, para la selección de técnicas que sean sustentables y amigables con el medio ambiente.

En el Capítulo II se incluye la metodología del proceso de obtención de metales nobles y no nobles de las placas de circuitos impresos, mediante lixiviación dinámica ácida usando como medio oxidante ozono.

En el Capítulo III se muestran los resultados obtenidos en la recuperación de metales por el método lixiviación dinámica ácida en el sistema $H_2SO_4-O_3$ y se caracterizan por las técnicas de Difracción de Rayos X (DRX), Microscopia Electrónica de Barrido en conjunción con Microanálisis de dispersión de Energías (MEB-EDS) y Espectrometría de Plasma de Acoplamiento Inducido (ICP).

Finalmente se presentan las conclusiones sobre cuál es la velocidad de agitación ideal para la recuperación de metales mediante lixiviación, manteniendo parámetros constantes.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La chatarra electrónica consiste básicamente de componentes de computadoras, tarjetas electrónicas, electrodomésticos, celulares, equipos de audio, etc. Entre los más abundantes comprenden principalmente a los equipos de cómputo y los teléfonos celulares debido a su corto tiempo de vida, la producción mundial actual de los desechos electrónicos se estima en 20 o 25 millones de toneladas por año. La chatarra contiene importantes cantidades de valores metálicos de interés económico y ambiental.

Desafortunadamente los procesos para la recuperación de metales preciosos actualmente desarrollados en general, presentan serias dificultades, ya sea técnicas, económicas y ecológicas.

En este marco contextual podemos decir que es indispensable el desarrollo de nuevas tecnologías que coadyuven a optimizar la recuperación de oro y plata contenidos en efluentes industriales y licores de lixiviación. Sin embargo, para proponer una nueva tecnología es indispensable realizar estudios científicos, para analizar las variables que intervienen en las reacciones químicas, por tal motivo, en este trabajo se propone realizar un estudio de *“Innovación del proceso de recuperación de oro contenido en residuos electrónicos”*.

JUSTIFICACIÓN

Los países desarrollados se mueven rápidamente a incrementar considerablemente el reciclaje. El oro y plata son un ejemplo de materiales industriales que pueden ser reciclados. De hecho, la industria del reciclaje de oro y plata ha existido desde hace unas dos décadas. No obstante, esto, grandes cantidades de dichos metales no son recicladas óptimamente y algunas otras no son aún tratadas, creando consecuencias importantes tanto económicas, ecológicas y de control estratégico. En aplicaciones donde el oro y la plata se usan y/o terminan en forma sólida, sus desperdicios consisten básicamente en lo que se conoce como chatarra electrónica y donde, si bien una parte del oro y plata son recuperados, lo cierto es que una importante cantidad de dichos metales preciosos no son recuperados óptimamente. Específicamente la chatarra electrónica que contiene oro la constituyen las placas o circuitos impresos de las computadoras en donde, en amplias zonas, una capa de oro es depositada sobre un substrato de un metal menos noble como el níquel, cobre, estaño y zinc insertados a su vez a una base polimérica. El oro presente en dichas placas de computadora es de alto interés comercial, estando presente desde 0.1 a 0.5 gramos de oro por cada circuito impreso. Si tan sólo en nuestro país cada año se desechan alrededor de 5 millones de computadoras, es evidente la enorme fuente potencial de oro y de otros metales como cobre, níquel y zinc, que actualmente se está desechando o recuperando sólo parcialmente por muy escasos procesos importados y caros. Tales procesos incluyen operaciones mecánicas y pirometalúrgicas las cuales en general, generan importantes cantidades de gases contaminantes. La gestión de residuos, basada en un alto nivel de protección del medio ambiente, constituye un objetivo prioritario en todo el mundo y debe ser atendido especialmente en México, que va adaptando su normatividad en función de las experiencias adquiridas y del progreso científico y técnico alcanzado. Esta gestión no se ha logrado aún en su totalidad de los objetivos propios de una política ambiental dirigida a la protección del medio y a la mejora de la calidad de vida.

OBJETIVO GENERAL

Mediante lixiviación ácida dinámica por ozonación proponer basándose en los resultados experimentales, un proceso novedoso y óptimo de recuperación total de los componentes metálicos contenidos en la chatarra electrónica.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recolectar 50 placas de circuitos impresos de computadora.
- Cortar y seccionar los pines de interés.
- Caracterizar la chatarra electrónica de las computadoras mediante Microscopía Electrónica de Barrido en conjunción con Dispersión de Energías y Difracción de Rayos X.
- Estudiar la cinética de lixiviación variando la velocidad de agitación.
- Caracterizar los productos acuosos obtenidos por Espectrometría de Plasma de Acoplamiento Inducido (ICP).
- Establecer las condiciones de precipitación de los iones metálicos por vía electrolítica.

CAPÍTULO I.- ANTECEDENTES

1.1.- METALURGIA EXTRACTIVA

Es la parte de la metalurgia que estudia los métodos químicos necesarios para tratar una mena mineral o un material que se va a reciclar de tal forma que se pueda obtener, a partir de cualquiera de ellos, el metal, más o menos puro, o alguno de sus compuestos. (Ballester, Verdeja, & Sancho, 2007)

Esto se hace a partir de una serie de operaciones del mineral tratado, más conocidas como “Preparación del mineral” o también como “Mineralurgia”, esto permite una separación fácil de las diferentes fases del material, después se realizan operaciones de clasificación y concentración para separar las partículas minerales valiosas del resto de partículas basándose en alguna propiedad física.

Después de las operaciones de concentración se continúa con las de extracción, las cuales se pueden realizar por pirometalurgia e hidrometalurgia:

- Pirometalurgia: Incluye operaciones por vía seca con calentamiento a temperaturas, entre ellas se puede mencionar la calcinación y la tostación que tienen lugar a temperaturas en donde el mineral no funde, y las distintas operaciones de fusión en las que el mineral es fundido, separándose en dos o más líquidos que contienen material valioso, también posteriormente se pueden ocupar operaciones metalurgias como la conversión y volatilización.
- Hidrometalurgia o extracción por vía húmeda: Por lo general se efectúan una secuencia de etapas que contempla; la lixiviación del metal valioso a partir del mineral utilizado un reactivo acuoso, la purificación y/o concentración de la disolución y la precipitación del mediate métodos químicos o electroquímicos.

Según el Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Santiago de Chile, la hidrometalurgia se subdivide en tres ramas importantes, las cuales son:

- a. Lixiviación
- b. Concentración y Purificación
- c. Precipitación

En lo general, la Hidrometalurgia requiere de las siguientes etapas: chancado, molienda, aglomeración, lixiviación, extracción por solventes y electro obtención, sin embargo, nos centraremos en el proceso de lixiviación. (Cárdenas, Díaz, Guajardo, & Oliva, 2010).

Tabla 1.- Ventajas y desventajas de la hidrometalurgia.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Posibilidad de tratar minerales pobres o incluso marginales • Alta selectividad y alto grado de separación en las reacciones químicas • Alta pureza de los productos • Fácil control y optimación • Ausencia de polución por gases 	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidades de reacción lentas • Poca producción por reactor o unidad productiva • Sensible a variaciones en la composición de la alimentación • Problemas en la eliminación y almacenamiento de los residuos sólidos generados • Problemas con las aguas generadas

1.2.- LIXIVIACIÓN

En este trabajo se utilizará el método de lixiviación que, en minería, se define como un proceso hidro-metalúrgico. Esto significa que, con la ayuda del agua como medio de transporte, se usan químicos específicos para separar los minerales valiosos (y solubles en dichos líquidos) de los no valiosos. Cuando se realiza la recuperación de los metales lixiviados por medio de la electrólisis o reducción con H_2 , regenera el ácido consumido. Este proceso es muy efectivo y de bajo impacto ambiental para una gran variedad de materias primas. Este proceso permite trabajar yacimientos que suelen ser calificados de baja ley (y por tanto de más alto costo de producción por tonelada) siempre que la operación minera involucre una actividad a gran escala. Es decir, que la lixiviación es un proceso de recuperación que hará económico un proyecto conforme se trabajen mayores volúmenes de material. (SNMPE, 2007)

Ballester, Verdeja, y Sancho (2007) definen la lixiviación como una operación en la que tiene lugar el ataque químico, en fase acuosa, del metal valioso contenido en una mena mineral.

Se puede definir el objetivo de método de lixiviación como el disolver en forma parcial o total un sólido con el fin de recuperar algunas especies metálicas contenidas en él y, a continuación, se detallan diferentes tipos de lixiviación, presentados por el Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Santiago de Chile:

- Disolución de Sales: se aplica principalmente a sales minerales que se disuelven fácilmente en agua. En la naturaleza es difícil encontrar yacimientos con minerales de este tipo, pero, la mena puede ser sometida a algún proceso previo que transforme los minerales a sales solubles en agua.
- Disolución Ácida: se aplica a gran parte de los óxidos metálicos existentes en la naturaleza. Generalmente, se utiliza ácido sulfúrico por su bajo costo, disponibilidad, fácil manipulación y características químicas. También se utiliza ácido clorhídrico, ácido nítrico y mezclas entre ellos.
- Disolución Alcalina: se aplica a menas consumidoras de ácido sulfúrico, como por ejemplo menas con carbonatos de calcio.
- Intercambio Básico: este tipo de reacciones produce un nuevo sólido insoluble en los residuos.

- Disolución Con Formación de Iones Complejos: la formación de iones complejos aumenta la solubilidad de sales poco solubles con una gran selectividad. Se aplica industrialmente en la lixiviación de concentrados de cobre sulfurados.
- Lixiviación con Oxidación: los agentes oxidantes más empleados son Fe^{3+} y O_2 , empleándose para la lixiviación de sulfuros y algunos metales.
- Lixiviación con Reducción: este tipo de lixiviación puede usarse con minerales que son más solubles en sus estados de valencia inferiores.

Es importante dar el significado del término “mena”, ya que pudiera ser empleado en lo posterior, que se describe como una acumulación de mineral en cantidad suficiente para permitir una extracción económica. La mayor parte de las menas son mezclas de minerales que es posible extraer y de material rocoso descrito como ganga. (Ruíz Velasco & Guillén Méndez, 2010)

1.3.- OZONO COMO AGENTE OXIDANTE

El ozono es una forma alotrópica del oxígeno de fórmula O₃. La geometría es de tipo angular. Es un gas de color azul pálido, irritante, explosivo y tóxico incluso a muy bajas concentraciones, pero la característica que nos da la respuesta del porqué lo emplearemos para nuestro proceso de lixiviación es por la gran virtud que tiene de ser un agente súper oxidante.

Es de participar en muchas reacciones químicas ya sean de origen orgánico o inorgánico. El poder oxidante del ozono es claramente superior al del oxígeno. Si bien el oxígeno se combina con todos los elementos, lo hace a temperaturas altas, mientras que el ozono reacciona con numerosas sustancias en condiciones en las que el oxígeno sería inactivo.

Propiedades físicas

Tabla 2.- Propiedades físicas del ozono.

Masa molecular	48 g/mol
Punto de ebullición (101 kPa)	-111.9 °C
Punto de fusión	-192.7 °C
Temperatura crítica	-12.1 °C
Presión crítica	5.53 MPa
Densidad crítica	437 kg/m ³
Volumen crítico	1.471*10 ⁻⁴ m ³ /mol
Densidad gas (0°C, 101 kPa)	2.144 kg/m ³
Densidad del líquido (-112°C)	1358 kg/m ³
Tensión superficial (-183°C)	3.84 *10 ⁻² N/m
Viscosidad del líquido -183°C	1.57*10 ⁻³ Pa s
Calor de vaporización	15.2 kJmol

Estructura molecular del ozono

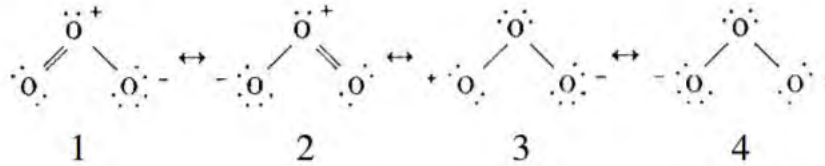
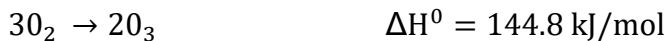


Figura 1.- Estructura molecular del ozono, formas resonantes.

Formación de ozono

La formación del ozono es una reacción endotérmica:



El ozono se puede formar de forma natural o artificialmente.

En la estratósfera, se forma naturalmente por la acción de la luz solar y en la troposfera se forma durante las lluvias o tormentas eléctricas (el ozono es el responsable del olor fresco luego de lluvias).

Una de las formas artificiales de generar ozono, es hacer saltar una chispa que permita la conversión del oxígeno presente en el aire a ozono. Esta es la forma en que se trabaja mucho ozonizadores y con uso de estos equipos se puede fabricar ozono en cualquier ambiente, otra de las formas es usando lámparas de rayos ultravioletas. Este gas es termodinámicamente inestable y de forma espontánea descompone dando oxígeno. Este proceso es promovido por la presencia de metales de transición o de sus óxidos. La principal consecuencia de la inestabilidad del ozono es que no puede ser almacenado ni transportado por distancias que impliquen un largo periodo de tiempo, por lo tanto, su producción deberá de efectuarse en el momento y en el lugar de utilización tarda como máximo 20 minutos sin descomponerse (dependiendo de la temperatura) y consecuentemente no puede ser almacenado, por esta cuestión es la necesidad de su fabricación en el mismo lugar de su uso.

El ozono que será utilizado se obtendrá por medio de un generador de ozono que lo producirá a través de una descarga eléctrica controlada. El uso del ozono es benéfico pues erradica el gasto y uso en materiales sintéticos o químicos nocivos, de manera que, obtendremos metales preciosos y no nobles sin poner en peligro el medio ambiente y nuestros bolsillos. (Biozon, s.f.)



Figura 2.- Representación de la generación del ozono.

1.3.1.- APLICACIONES GENERALES DEL OZONO

- *Separación de metales pesados*

El ozono también puedes oxidar metales pesados como hierro, cadmio, cromo, cobalto entre otros. Una vez que han sido oxidados, estos metales forman compuestos menos solubles y precipitan pueden ser separados por filtración.

- *Potabilización*

El ozono se usa para facilitar los procesos de filtración y como agente desinfectante. El principal efecto de la ozonización del agua es la oxidación de sustancias orgánicas e inorgánicas, y eliminación de la turbidez o suspensión de sólidos por microfloculación; eliminando de esta forma olores y color sin generar ningún tipo de residuo. La principal ventaja del ozono frente el cloro -que se ha venido utilizando hasta ahora- es que no solo elimina las bacterias, sino que también destruye los virus y parásitos.

- *Tratamiento de aguas residuales*

Durante años el cloro ha sido el gas más utilizando para el tratamiento de este tipo de aguas. La presencia de compuestos orgánicos carcinógenos en aguas tratadas, atribuidos a vertidos clorados de plantas de tratamiento de aguas residuales, ha hecho reconsiderar el uso en beneficio del ozono que ha visto muy aumentada su demanda. El tratamiento de aguas residuales con ozono evita la formación de este tipo de compuestos. A parte de sus cualidades como desinfectante, disminuye la turbidez y mejora el color del agua.

- *Blanqueo*

El impacto ambiental del uso del cloro y derivados clorados en el blanqueo de la pulpa de papel ha hecho considerar seriamente el uso de ozono como una vía alternativa. Estudios realizados en este campo, demuestran que las reacciones de blanqueo con ozono transcurren a velocidades elevadas, proporcionando un grado de blanqueo considerable para las cantidades de ozono aplicadas.

- *Eliminación de olores*

La forma en que el ozono elimina los olores es igual a la forma en que actúan con los microorganismos mediante la oxidación (en este caso de los compuestos que dan origen a los olores). El ozono elimina los olores provenientes de pintura fresca, cigarrillo, basura etc.;

resumiendo, el ozono actúa prácticamente con todos los olores ya sean provenientes de sustancias orgánicas o inorgánicas. El ozono ataca directamente la causa de los olores, cambiando la composición química de las sustancias responsables de los mismos.

- *Eliminación del monóxido de carbono*

El monóxido de carbono es gas muy tóxico se forma a partir que ocurre una combustión en un lugar con poco oxígeno, en condiciones normales se formaría dióxido de carbono. El ozono es una molécula con tres átomos de oxígeno y puede perder fácilmente uno de sus átomos, el cual se combina con el monóxido de carbono y forma dióxido de carbono un gas no tóxico.

- *Otros usos*

El ozono también es usado en la industria de la bebida para eliminar compuestos orgánicos que podrían ocasionar problemas de gusto y olor. La industria microelectrónica también necesita de agua altamente purificada para lavado en distintas etapas del proceso. El ozono protege estos sistemas de la suciedad biológica, sin causar contaminación iónica. No menos importante es el uso del ozono en el campo de la química orgánica, basado principalmente en la ozonólisis (Morera, 2004).

1.4.- ELECTRÓLISIS

La electrólisis es la descomposición de una sustancia o solución electrolítica por medio de la corriente eléctrica. Se puede realizar por vía seca y por vía húmeda.

- *Electrólisis por vía seca:*

En estos casos la electrólisis se realiza en ausencia de agua, se trabaja con electrolitos anhidros y para realizar la electrólisis es necesario fundir el electrolito.

- *Electrólisis por vía húmeda:*

En este caso la electrólisis se realiza para electrolitos disueltos en agua, es decir, son procesos electrolíticos que tienen lugar en disolución acuosa. Cuando se usa una solución acuosa en una celda electrolítica, se debe analizar los valores de potenciales normales de reducción para decidir qué especie química se va a oxidar o reducir en los electrodos, si es el agua o el soluto. Este proceso se utiliza para descomponer una sustancia en sus elementos, para purificar metales y para aplicar una capa metálica externa a un objeto.

La energía eléctrica que induce a la descomposición de una sustancia o solución electrolítica se lleva a cabo en una celda electrolítica.

Celdas Electrolíticas (Irene Vera)

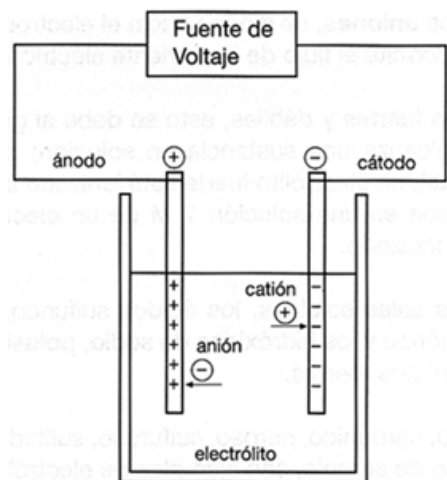


Figura 3.- Representación de una celda electrolítica.

Las celdas electrolíticas se usan cuando la energía eléctrica procedente de una fuente externa hace que tenga lugar una reacción química no espontánea.

Constan de:

- Un recipiente con el material de reacción y los electrodos sumergidos en dicho material y conectados a una fuente de corriente continúa.
- Celda o cuba electrónica: recipiente donde se realiza el proceso electrolítico, contienen electrolitos
- Electrolito: sustancia que permite la conducción eléctrica a través de sus iones en movimiento, generalmente se descomponen en el proceso. Son principalmente compuestos iónicos fundidos o disueltos en agua
- Electrodos: son barras solidas conductoras de la electricidad, sobre las que tienen lugar las semi-reacciones de oxidación y de reducción. Pueden o no participar en las reacciones. Aquellos que no reaccionan se llaman electrodos inertes.

Se identifican de la manera siguiente.

- El cátodo es el electrodo en el que tiene lugar la reducción.
- El ánodo es el electrodo en el que tiene lugar la oxidación.

El tipo de electrólisis empleado es por vía húmeda, ya que, este proceso se utiliza para descomponer una sustancia en sus elementos, para purificar metales y para aplicar una capa metálica externa a un objeto. De esta forma, nos ayudará a la separación de los licores. Aún no se tiene una conclusión exacta de los metales que se obtendrán, sin embargo, existen diversas fuentes que se han adelantado a esta investigación.

Un estudio realizado por Sean Magaan (1999) mostró los metales recobrados (en toneladas) de la basura electrónica, tomando como referencia los años de 1997 y 1998.

Tabla 3.- Tabla comparativa de metales recuperados a partir de celdas electrolíticas.

Metal	1997	1998
Aluminio	3.9	4.5
Acero (aleación de hierro)	14.5	19.9
Cobre	4.3	4.6
Metales preciosos (oro, paladio, platino y plata)	0.001	0.001
Otros	3.1	3.6

CAPÍTULO II.- DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1.- METODOLOGÍA

Diagrama de Flujo

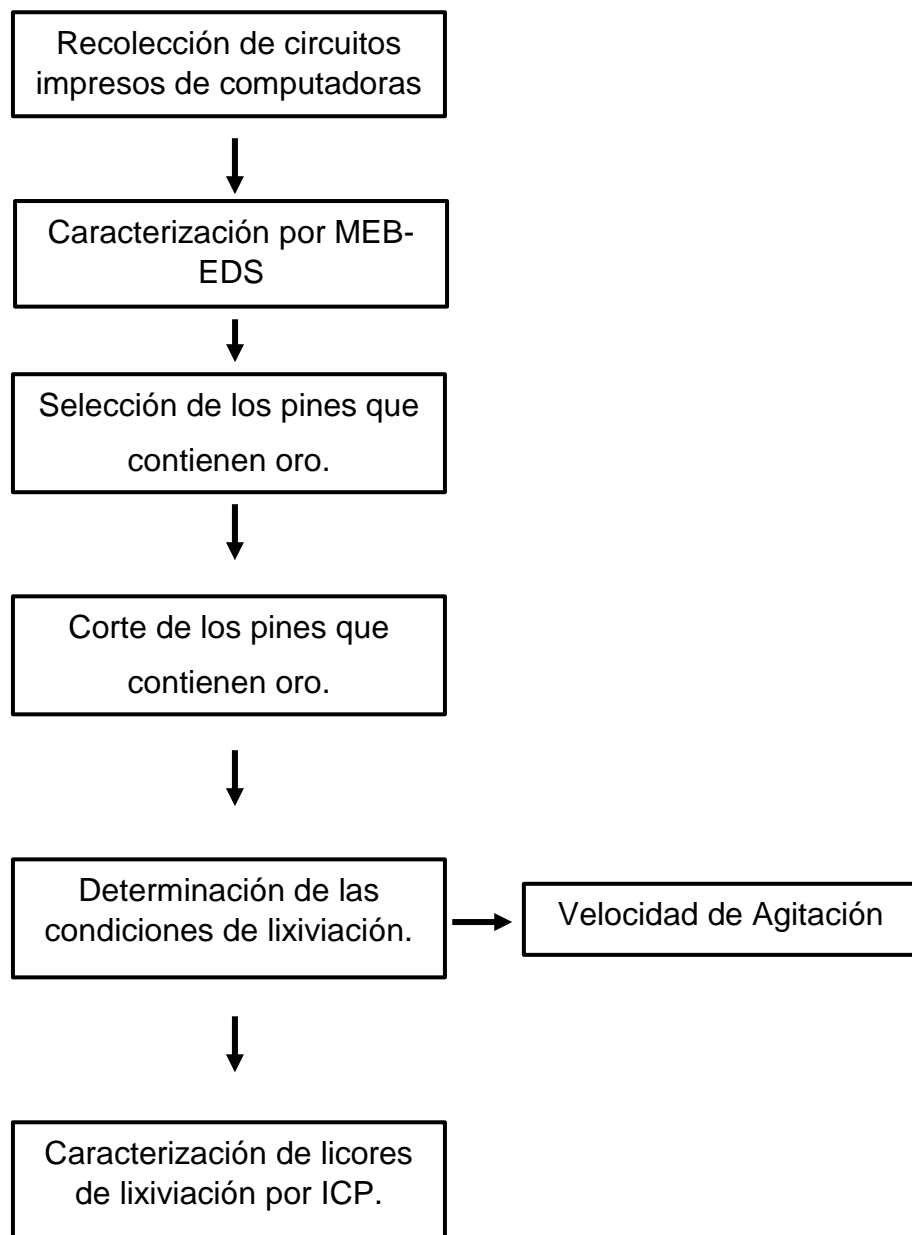


Figura 4.- Diagrama del desarrollo experimental del proyecto

Reactivos

En la tabla 4 se muestran las características de los reactivos que se utilizaron durante el desarrollo experimental para tener un control y uso adecuado de los mismos.

Tabla 4.- Propiedades físicas de los reactivos utilizados.

Reactivo	Fórmula	Estado	Punto de Ebullición	Punto de Fusión	Solubilidad
Ácido Sulfúrico	H ₂ SO ₄	Líquido	274°C	3°C	Agua Alcohol Etilico
Yoduro de Potasio	KI	Sólido	1330°C	680°C	Agua
Hidróxido de Sodio	NaOH	Sólido	1390°C	318°C	Agua Alcohol Glicerol

El presente trabajo comprende el estudio del efecto de la velocidad de agitación para la recuperación de oro, cobre, níquel y zinc, contenidos en desechos electrónicos. Lixiviación metálica en el sistema (Au-Cu-Ni-Zn)H₂SO₄-O₃. La metodología de trabajo de esta investigación, comprende realizar una serie de experimentos desarrollados bajo la siguiente secuencia:

- 1.- Recolección de circuitos impresos de computadoras. Es necesario tener al menos 50 tarjetas de circuitos impresos, que sean representativos de las diferentes generaciones de computadoras.
- 2.- Caracterización por Microscopía Electrónica de Barrido de las partes metálicas (pines) que conforman las tarjetas de circuitos impresos.
- 3.- Selección de los pines que contienen oro.
- 4.- Corte de los pines que contiene oro.

5.- Determinación de las condiciones de lixiviación, a fin de estudiar la naturaleza de la reacción de lixiviación de cobre, zinc y níquel que forman el substrato metálico del oro.

6.- Determinar los factores que afectan la velocidad de lixiviación de dichos metales, en este caso, la velocidad de agitación.

Una vez realizada la recolección de circuitos impresos de computadora, procedimos a la selección y sección de las partes de interés a estudiar, los cuales se muestran en las figuras 5 y 6.

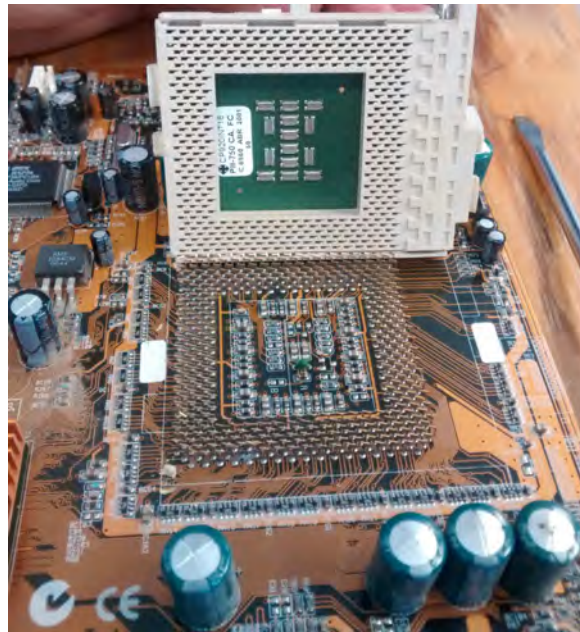


Figura 5.- Circuito impreso de computadora.



Figura 6.- Pines de contacto ubicados en los circuitos impresos.

Una vez que fueron seleccionadas las partes de interés, separamos los pines de contacto, etiquetadas como se muestra en la tabla 5 y en la figura 7.

Tabla 5. Categorización de muestras.

Pieza	Muestra
Pines de contacto de puertos USB.	1 A
Pines de contacto de teclado y mouse.	1 B
Pines internos	2, 3, 4



Figura 7.- Piezas seleccionadas como muestra para lixiviación.

Posterior a la selección de los múltiples pines de contacto se realizó un análisis por Microscopia Electrónica de Barrido en conjunción con Dispersión de Energías y Difracción de Rayos X, una vez hecho esto seleccionamos cuatro de las cinco muestras para desarrollar la experimentación.

El objetivo principal del presente trabajo, ha sido analizar y determinar los factores y variables para mejorar la obtención de oro.

La primera etapa experimental, consistió en calibrar, regular y medir el flujo de ozono (O_3) para cuantificar sus efectos en el proceso experimenta; utilizando un equipo generador de ozono de marca *Ozone Ecological Equipments, modelo Bio-30 LAB*.



Figura 8.- Generador de ozono de marca *Ozone Ecological Equipments, modelo Bio-30 LAB*.

- **Determinación del flujo de ozono generado**



Figura 9.- Sistema para el cálculo de ozono generado.

En dos matraces se agregan 500 mL de agua destilada y se adicionan 1.33g de KI 2%, conectados en serie, se aplica la inyección de ozono, tomando en cuenta el tiempo que tardan en oxidarse las soluciones para así calcular el flujo de ozono generado en el sistema.

CAPÍTULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

En este capítulo se describirán las técnicas utilizadas para caracterizar los elementos de interés para el presente trabajo, es decir los pines de contacto, así mismo para los resultados obtenidos en el desarrollo de la parte experimental,

3.1.1.- DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)

Los rayos X son una radiación electromagnética de longitud de onda corta producida por el frenado de electrones de elevada energía o por transiciones de electrones que se encuentran en los orbitales internos de los átomos. El intervalo de longitudes de onda de los rayos X comprende desde aproximadamente 10⁻⁶ nm hasta 10 nm, sin embargo, la espectroscopía de rayos X convencional se limita, en su mayor parte, a la región de aproximadamente 0,01 nm a 2,5 nm.

La técnica consiste en hacer incidir un haz de rayos X sobre el sólido sujeto a estudio. La interacción entre el vector eléctrico de la radiación X y los electrones de la materia que atraviesa dan lugar a una dispersión. Al producirse la dispersión tienen lugar interferencias (tanto constructivas como destructivas) entre los rayos dispersados, ya que las distancias entre los centros de dispersión son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de la radiación. El resultado es la difracción, que da lugar a un patrón de intensidades que puede interpretarse según la ubicación de los átomos en el cristal, por medio de la ley de Bragg. La misma postula que cuando un haz de rayos X incide sobre la superficie de un cristal formando un ángulo θ una porción del haz es dispersada por la capa de átomos de la superficie; la porción no dispersada del haz penetra en la segunda capa de átomos donde, nuevamente una fracción es dispersada y así sucesivamente con cada capa hasta la profundidad de aproximadamente 1000 nm, lo que lo hace una técnica másica. El efecto acumulativo de esta dispersión producida por los centros regularmente espaciados del cristal es la difracción del haz. (Skoog, 2001)

3.1.2.- MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB/SEM) Y MICROANÁLISIS POR DISPERSIÓN DE ENERGÍAS (EDS).

Los circuitos impresos de computadora serán debidamente caracterizados, así como todos los sólidos que sean obtenidos durante el estudio de la lixiviación dinámica ácida, por microscopía electrónica de barrido. Para llevar a efecto esto, se utilizará un Microscopio Electrónico de Barrido marca JEOL, modelo JSM-6300, con una corriente de sonda de 10^{-2} a 10^{-5} Amperes y un voltaje de 2 a 30 kV para un alcance de 300000 ampliificaciones.

Las imágenes que se obtienen en el microscopio electrónico de barrido corresponden a electrones secundarios o electrones retrodispersados emitidos tras la interacción con la muestra de un haz incidente de entre 5 y 30 KeV.

El haz de electrones se desplaza sobre la muestra realizando un barrido en las direcciones X e Y de tal modo que la posición en la que se encuentra el haz en cada momento coincide con la aparición de brillo, proporcionalmente a la señal emitida, en un determinado punto de la pantalla.

La señal de electrones secundarios se forma en una delgada capa superficial, del orden de 50 a 100 Å. Son electrones de baja energía, menos de 50 eV, que pueden ser desviados fácilmente de su trayectoria emergente inicial y permiten obtener información de zonas que no están a la vista del detector. Esta particularidad otorga a esta señal la posibilidad de aportar información “en relieve”.

La emisión de electrones retrodispersados depende fuertemente del número atómico de la muestra. Esto implica que dos partes de la muestra que tengan distinta composición se revelan con distinta intensidad, aunque no exista ninguna diferencia de topografía entre ellas.

Los rayos X que se generan en una muestra sometida a bombardeo electrónico permiten identificar los elementos presentes y establecer su concentración.

Los circuitos impresos de computadora fueron debidamente caracterizados, para identificar los componentes ricos en metales nobles para su posterior lixiviación óptima y representativa por Microscopía Electrónica de Barrido y Microanálisis por Dispersión de Energías (SEM-EDS). Empleando para tal efecto un Microscopio Electrónico de Barrido

marca JEOL modelo JSM-6300, aplicando para el análisis de morfología (Micrografías) las siguientes condiciones de uso:

- Voltaje de aceleración $E_0 = 30$ keV.
- Corriente de la condensadora = $9 [1 \times 10^{-9} \text{ \AA}]$
- Modo de imagen en SEI (Electrones Secundarios)
- Distancia de trabajo (WD) = 9.9 mm.
- Apertura = 1 (200 μm)

El Equipo cuenta con un detector de estado sólido (discriminador de energía de rayos X), que permite realizar Microanálisis Semicuantitativos por Dispersión de Energías (EDS), proporcionando un espectro de microanálisis químico localizado bajo las siguientes condiciones:

- Voltaje de aceleración $E_0 = 30$ keV.
- Corriente de la condensadora = $12 [1 \times 10^{-10} \text{ \AA}]$
- Distancia de trabajo (WD) = 9.9 mm.
- Apertura = 1 (200 μm)

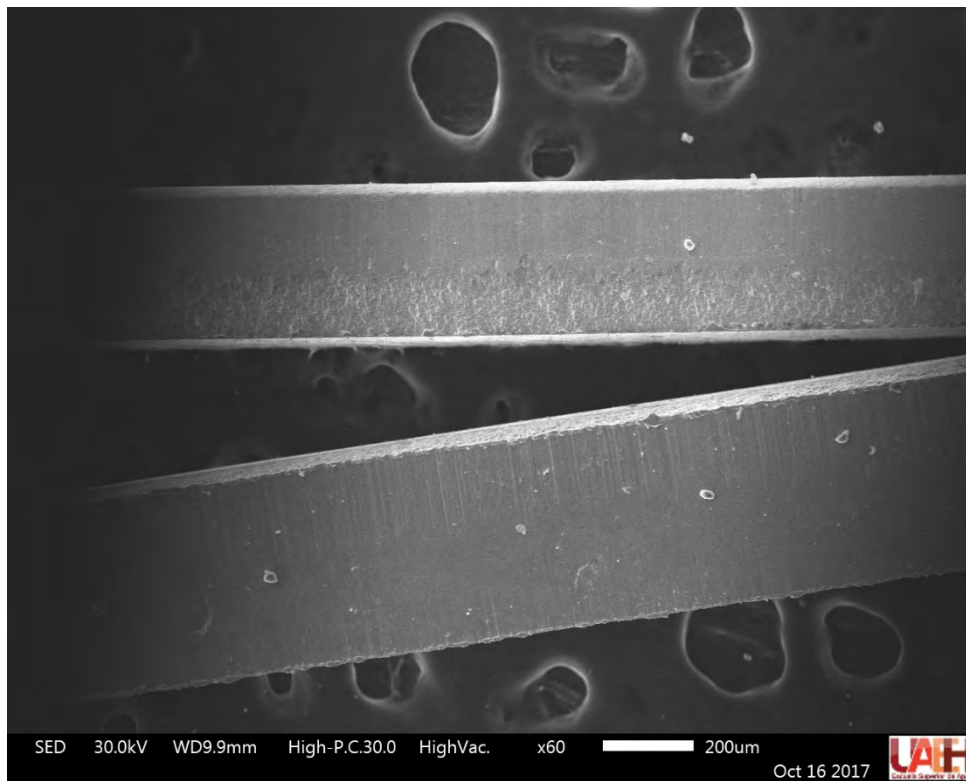


Figura 10. Imagen de la muestra 1A obtenida por Microscopía Electrónica de Barrido.

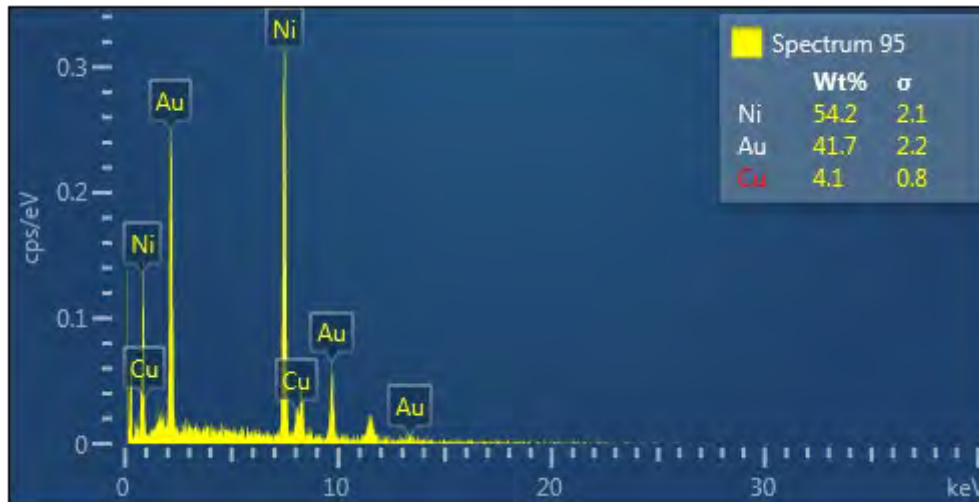


Figura 11.- Espectro de EDS de la muestra 1A.

Tabla 6.- Datos del Análisis por Dispersión de Energías de la muestra 1A.

Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Atomic %
Ni	K series	44.45	0.44449	54.17	76.95
Cu	K series	3.31	0.03313	4.11	5.39
Au	L series	26.39	0.26386	41.72	17.67
Total:				100.00	100.00

En la figura 10 podemos observar la morfología de la muestra 1A correspondiente a los pines de contacto de los puertos USB de los circuitos impresos de computadoras, a partir del cual se obtuvo la figura 11 que es el resultado del microanálisis por dispersión de energías y la información se concentra en la tabla 6. En el cual encontramos los porcentajes en peso de la concentración de Au, Ni, Cu contenidos en esta muestra.

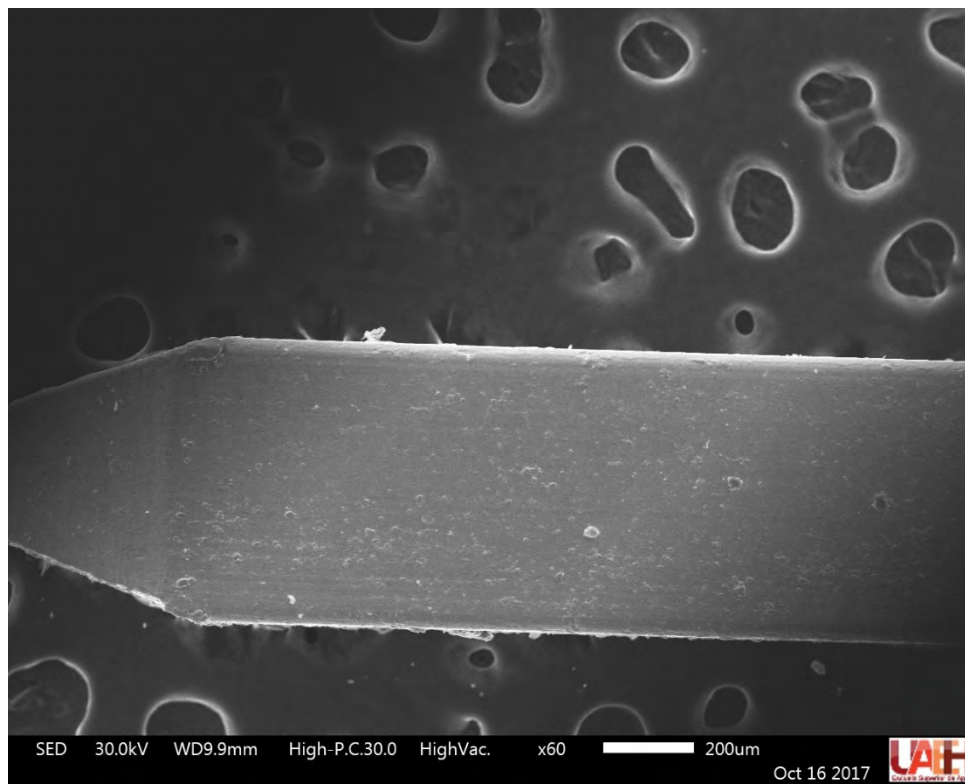


Figura 12.- Imagen de la muestra 1B obtenida por Microscopía Electrónica de Barrido.

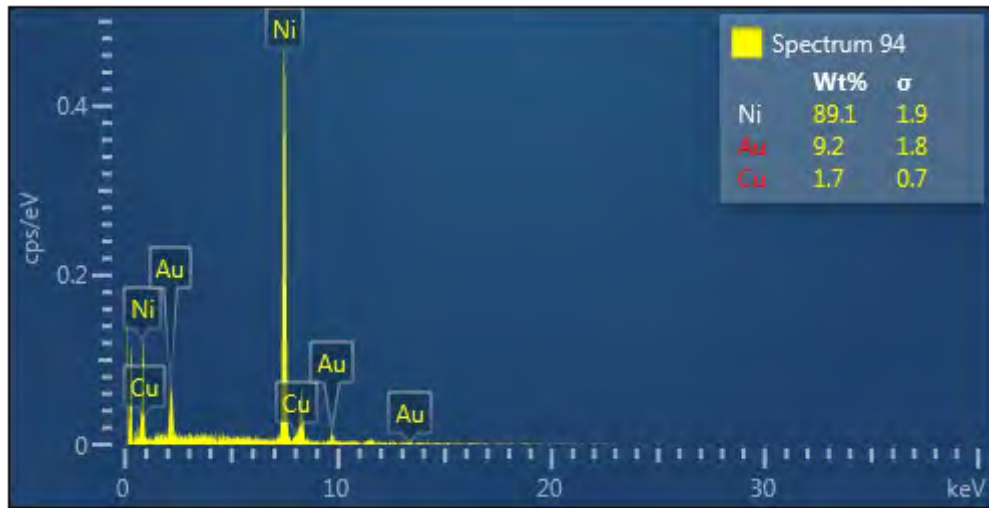


Figura 13.- Espectro de EDS de la muestra 1B.

Tabla 7.- Datos del Análisis por Dispersión de Energías de la muestra 1B.

Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Atomic %
Ni	K series	65.49	0.65493	89.10	95.38
Cu	K series	1.21	0.01214	1.71	1.69
Au	L series	4.84	0.04841	9.19	2.93
Total:				100.00	100.00

En la figura 12 podemos observar la morfología de la muestra 1B correspondiente a los pines de contacto de los circuitos impresos de computadoras, a partir del cual se obtuvo la figura 13 que es el resultado del microanálisis por dispersión de energías y la información se concentra en la tabla 7. En el cual encontramos los porcentajes en peso de la concentración de Au, Ni, Cu contenidos en esta muestra.

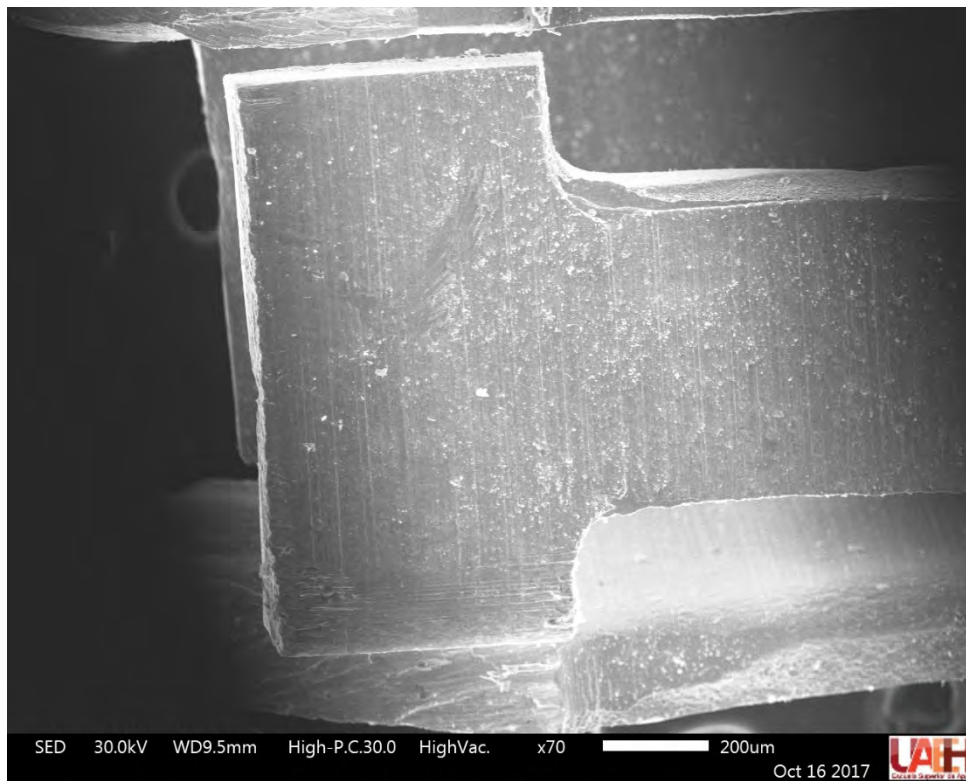


Figura 14.- Imagen de la muestra 2 obtenida por Microscopía Electrónica de Barrido.

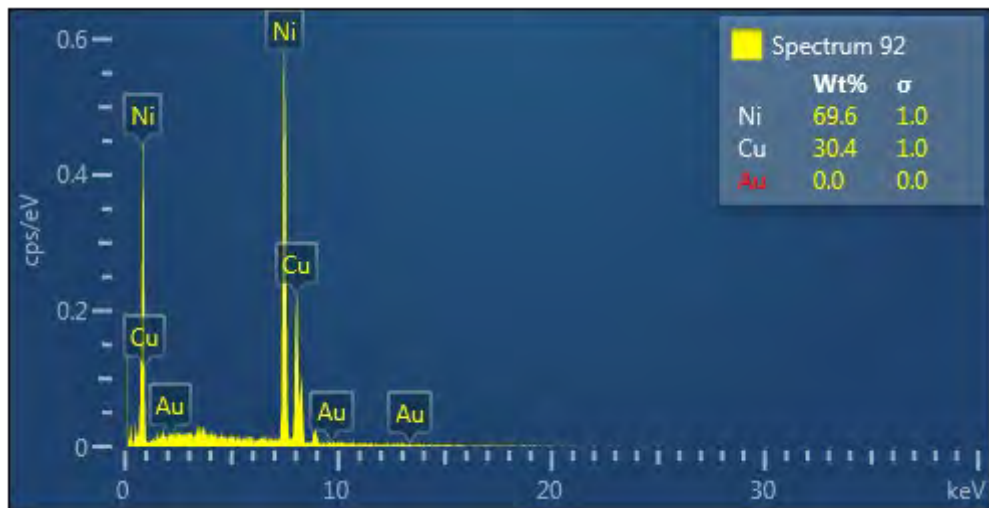


Figura 15.- Espectro de EDS de la muestra 2.

Tabla 8.- Datos del Análisis por Dispersión de Energías de la muestra 2.

Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Atomic %
Ni	K series	79.28	0.79276	69.58	71.23
Cu	K series	33.25	0.33248	30.42	28.77
Au	L series	0.00	0.00000	0.00	0.00
Total:				100.00	100.00

En este caso la muestra 2 fue realizada a una distancia de trabajo (WD) de 9.5mm y se puede observar en la figura 14 la morfología de la muestra 2 correspondiente a los pines de contacto de los circuitos impresos de computadoras, a partir del cual se obtuvo la figura 15 que es el resultado de microanálisis por dispersión de energías y la información se concentra en la tabla 8. En el cual encontramos los porcentajes en peso de la concentración de Ni, Cu contenidos en esta muestra, ya que ésta muestra no presenta contenido de Au.

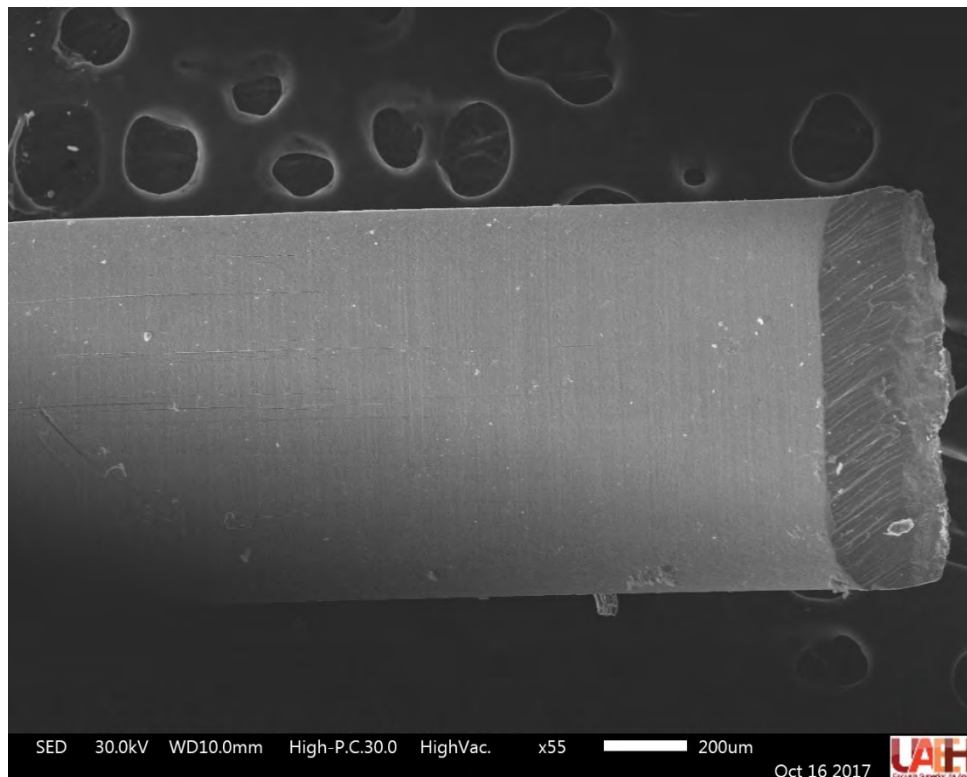


Figura 16.- Imagen de la muestra 3 obtenida por Microscopía Electrónica de Barrido.

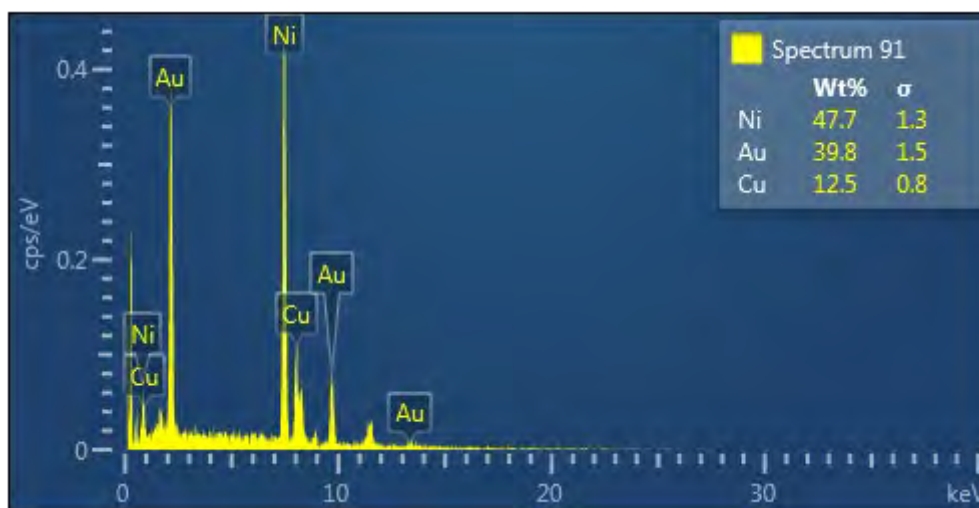


Figura 17.- Espectro de EDS de la muestra 3.

Tabla 9.- Datos del Análisis por Dispersión de Energías de la muestra 3.

Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Atomic %
Ni	K series	58.49	0.58493	47.66	67.04
Cu	K series	15.09	0.15086	12.51	16.26
Au	L series	37.49	0.37493	39.82	16.70
Total:				100.00	100.00

En este caso la muestra 3 fue realizada a una distancia de trabajo (WD) de 10 mm y se puede observar en la figura 16 la morfología de la muestra 3 correspondiente a los pines de contacto de los circuitos impresos de computadoras, a partir del cual se obtuvo la figura 17 que es el resultado del microanálisis por dispersión de energías y la información se concentra en la tabla 9. En el cual encontramos los porcentajes en peso de la concentración de Ni, Cu y Au contenidos en esta muestra.

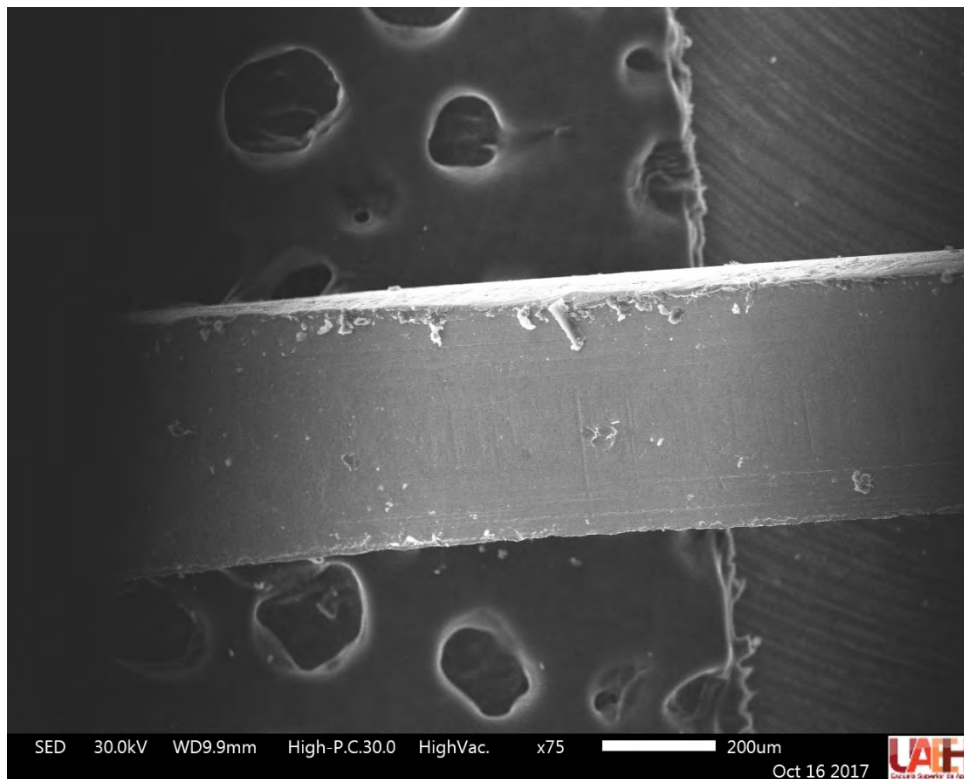


Figura 18.- Imagen de la muestra 4 obtenida por Microscopía Electrónica de Barrido.

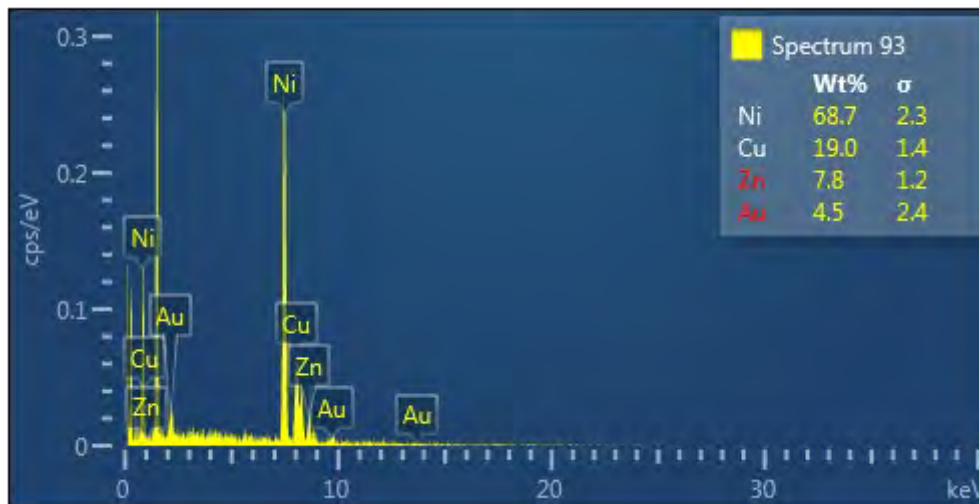


Figura 19.- Espectro de EDS de la muestra 4.

Tabla 10.- Datos del Análisis por Dispersión de Energías de la muestra 4.

Element	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Atomic %
Ni	K series	34.51	0.34507	68.74	72.67
Cu	K series	9.04	0.09042	18.98	18.54
Zn	K series	3.13	0.03135	7.76	7.37
Au	L series	1.58	0.01582	4.52	1.42
Total:				100.00	100.00

En este caso la muestra 4 fue realizada a una distancia de trabajo (WD) de 9.9mm y se puede observar en la figura 18 la morfología de la muestra 4 correspondiente a los pines de contacto de los circuitos impresos de computadoras, a partir del cual se obtuvo la figura 19 que es el resultado del microanálisis por dispersión de energías y la información se concentra en la tabla 10. En el cual encontramos los porcentajes en peso de la concentración de Ni, Cu y Au, contenidos en esta muestra, en la cual también se encontró contenido Zn.

3.1.3.- ESPECTROMETRÍA DE PLASMA DE ACOPLAMIENTO INDUCIDO (ICP)

Los líquidos que sean obtenidos durante el estudio de la lixiviación dinámica ácida, por espectrometría de plasma de acoplamiento inducido. Para llevar a efecto esto, se utilizará un Espectrómetro de Plasma de Acoplamiento Inducido, que utiliza como gas argón.

El plasma es un gas ionizado, eléctricamente neutro, confinado en un tubo de descarga. En su aplicación espectroscópica se denomina plasma a un gas parcialmente ionizado (basta con que lo estén el 1 % de sus átomos o moléculas), eléctricamente neutro en su conjunto y confinado en un campo electromagnético, existiendo un equilibrio entre partículas cargadas y neutras.

Existen diferentes tipos de plasma en función de la forma de conseguir dicho equilibrio.

Los campos magnéticos pueden interaccionar con los plasmas. Una de estas interacciones es un acoplamiento inductivo de campos magnéticos variantes en el tiempo con el plasma.

En el plasma ICP (Inductively Coupled Plasma), la ionización se realiza mediante una corriente inducida de alta frecuencia.

Las temperaturas en un plasma ICP son muy elevadas (4.000-10.000 K) y son suficientes para disociar las combinaciones químicas estables, incluso los óxidos refractarios, eliminándose las interferencias químicas. Estos plasmas pueden estar o no en equilibrio termodinámico.

Para conseguir la ionización se hace circular el gas por una serie de tubos concéntricos, que constituyen la "antorcha", pieza clave en un equipo de plasma. Al final de la misma se encuentra una bobina de inducción, alimentada por un generador de alta frecuencia.

En principio, es necesario iniciar la ionización del gas utilizando un medio auxiliar, chispa Tesla que luego se mantiene por la corriente de alta frecuencia que fluye a través de la bobina de inducción. El efecto es la aparición de un campo magnético, cuyas líneas de fuerza se orientan axialmente a la bobina, e induce a los iones y electrones a moverse en órbitas circulares, creando corrientes eléctricas, que a causa del efecto Joule ocasionan un calentamiento de los gases, alcanzándose temperaturas de hasta 10.000 K, y proporcionan la continuidad del plasma.

En el extremo de la antorcha aparece, debido a los átomos ionizados, una especie de "llama" que se observa durante todo el proceso de ensayo.

Como consecuencia de este diseño de la antorcha, las zonas axiales son relativamente frías, si se comparan con las circundantes y es, por tanto, a través de ellas por donde se inyectan las muestras dentro de la fuente de excitación y atomización, en forma de aerosol.

El sistema se basa en la observación de los espectros de emisión; los átomos excitados o ionizados emiten radiaciones (características para cada elemento) que, una vez focalizadas sobre un monocromador, se transforman eléctricamente en datos, de los que se obtendrán resultados cualitativos y cuantitativos.

3.2.- ESTUDIO CINÉTICO DE LA LIXIVIACIÓN DE Au, Cu, Ni y Zn CONTENIDOS EN LOS COMPONENTES PRESENTES EN LOS DE CIRCUITOS IMPRESOS.

3.2.1.- EFECTO DE LA VELOCIDAD DE AGITACIÓN.

Se evaluó la influencia de la velocidad de agitación (parámetro variable), en la lixiviación dinámica ácida, variando la velocidad de agitación, y manteniendo los demás parámetros constantes. Las condiciones experimentales del estudio son las siguientes:

PARÁMETRO VARIABLE:

- **Velocidad de agitación (rpm):** 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000.

PARÁMETROS CONSTANTES:

- **Volumen de solución:** 250 mL.
- **Masa de muestra:** 5 g.
- **[H₂SO₄]:** 0.03 M.
- **Presión parcial de oxígeno [O₂]:** 1 atm.
- **pH:** 1.5.
- **Temperatura:** ambiente.

Para lograr evaluar este efecto, se empleó una parrilla de agitación magnética con una velocidad mínima de 400 rpm y máxima de 1000 rpm.

Se realizó a temperatura ambiente durante todo el experimento y el pH se mantuvo a 1.5.

Los resultados obtenidos en los experimentos para las distintas velocidades de agitación se muestran en las tablas 55, 56, 57 y 58, así como la distribución a través del tiempo en las figuras 88, 89, 90 y 91 donde se representan las concentraciones en cada etapa del proceso de lixiviación (ppm) y el porcentaje de lixiviado para el Cu, Au, Ni y Zn respectivamente, para las diferentes velocidades de agitación.



Figura 20.- Sistema para llevar a cabo la lixiviación.

1. En un reactor se agregan 250 mL de agua destilada, adicionamos .775 mL de H_2SO_4 0.03M y 5 gr de la muestra, chatarra electrónica previamente caracterizada.
2. Conectamos en serie un matraz con 500 mL de agua destilada y a la cual se le han adicionado 1.33g de KI 2%.
3. Seguido de un vaso de precipitado con 400mL de agua y NaOH.
4. Se inyecta ozono durante 4 horas, con agitación magnética constante.

Se realizaron pruebas con diferentes velocidades de agitación, desde 400 rpm hasta 1000 rpm, así mismo se tomaron muestras en diferentes tiempos durante el proceso de lixiviación.

Tabla 11.- Relación de tiempo en la toma de muestras.

Tiempo	0	5	10	15	20	25	30	60	90	120	180	240
10mL												

3.2.2.- CARACTERIZACIÓN POR ESPECTROMETRÍA DE PLASMA DE ACOMPLAMIENTO INDUCIDO (ICP)

El efecto de velocidad de agitación fue caracterizado mediante Espectrometría de Plasma de Acoplamiento Inducido (ICP), obteniendo las concentraciones de Cobre, Níquel, Zinc y Oro. De tal manera que se realizó un análisis de cada muestra tomada en cada una de las lixiviaciones realizadas con la variación de la velocidad de agitación.

Se muestran las tablas de los resultados obtenidos mediante Espectrometría de Plasma de Acoplamiento Inducido (ICP).

Tabla 12.- Concentración obtenida en ppm de la lixiviación a 400 rpm.

Elemento	0	5	10	15	20	25	30	60	90	120	180	240
Cu	0.0028	0.0049	0.0014	0.0046	0.0007	0.0009	0.0011	0.0012	0.0027	0.0023	0.233	0.948
Ni	0.0065	0.0462	0.0252	0.102	0.115	0.175	0.262	0.414	0.73	0.61	1.13	2.44
Zn	0.0094	0.0071	0.0113	0.0046	0.0052	0.0024	0.0025	0.0067	0.0099	0.002	0.0237	0.086
Au	0.0038	0.0031	0.0063	0.0047	0.0043	0.002	0.0028	0.0028	0.0024	0.0011	0.0036	0.0047

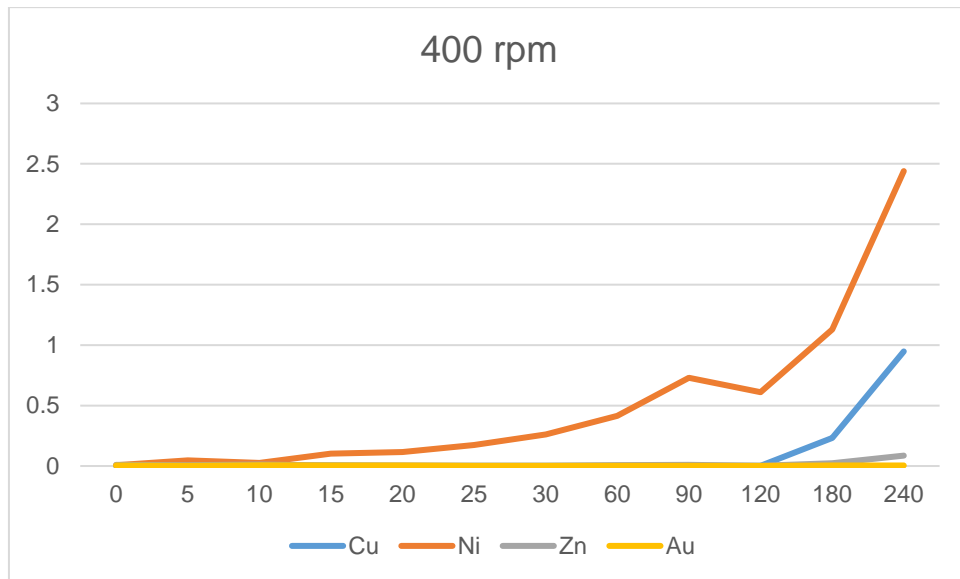


Figura 21.- Gráfica de las concentraciones en ppm obtenidas en ICP para la velocidad de 400 rpm.

En la lixiviación con velocidad de 400 rpm se puede observar que la concentración en ppm de los elementos analizados se mantiene constante e incrementa proporcionalmente con el tiempo de lixiviación.

Tabla 13.- Concentración obtenida en ppm de la lixiviación a 500 rpm.

Elemento	0	5	10	15	20	25	30	60	90	120	180	240
Cu	0.0019	0.0039	0.0017	0.0015	0.0064	0.0031	0.0025	0.0032	0.0446	0.272	2.54	0.5
Ni	0.0073	0.0247	0.049	0.057	0.537	0.364	0.185	1.51	2.77	1.67	4.04	0.25
Zn	0.0148	0.0185	0.0103	0.0048	0.0096	0.0053	0.0059	0.0123	0.0089	0.0294	0.565	0.34
Au	0.005	0.0043	0.0022	0.0029	0.0032	0.0045	0.0021	0.0008	0.0026	0.0076	0.0044	0.0024

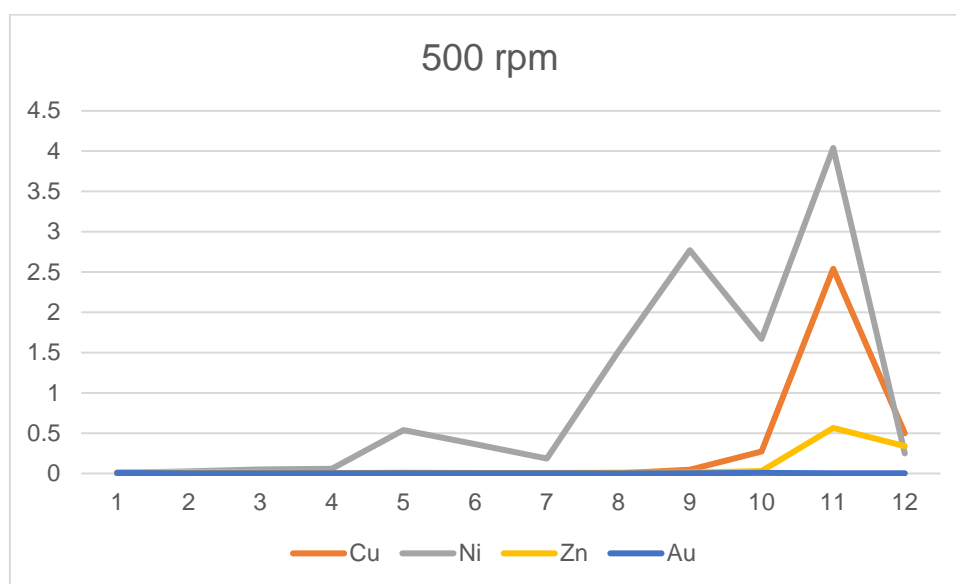


Figura 22.- Gráfica de las concentraciones en ppm obtenidas en ICP para la velocidad de 500 rpm.

Se puede observar en la lixiviación de 500 rpm que con el paso del tiempo los elementos sufren aumentos y disminuciones en la concentración, alcanzando la máxima concentración a los 180 minutos.

Tabla 14.- Concentración obtenida en ppm de la lixiviación a 600 rpm.

Elemento	0	5	10	15	20	25	30	60	90	120	180	240
Cu	0.0069	0.0038	0.0016	0.0035	0.004	0.001	0.0018	5.9	5.44	2.25	7.56	11.18
Ni	0.0114	0.0192	0.023	0.095	0.081	0.149	0.031	0.82	2.66	0.57	0.53	4.75
Zn	0.0051	0.0276	0.0024	0.0069	0.0114	0.0274	0.0034	7.73	3.58	6.04	7.76	0.5
Au	0.0029	0.0026	0.0017	0.0045	0.0064	0.0058	0.0022	0.0073	0.0041	0.0113	0.0029	0.0024

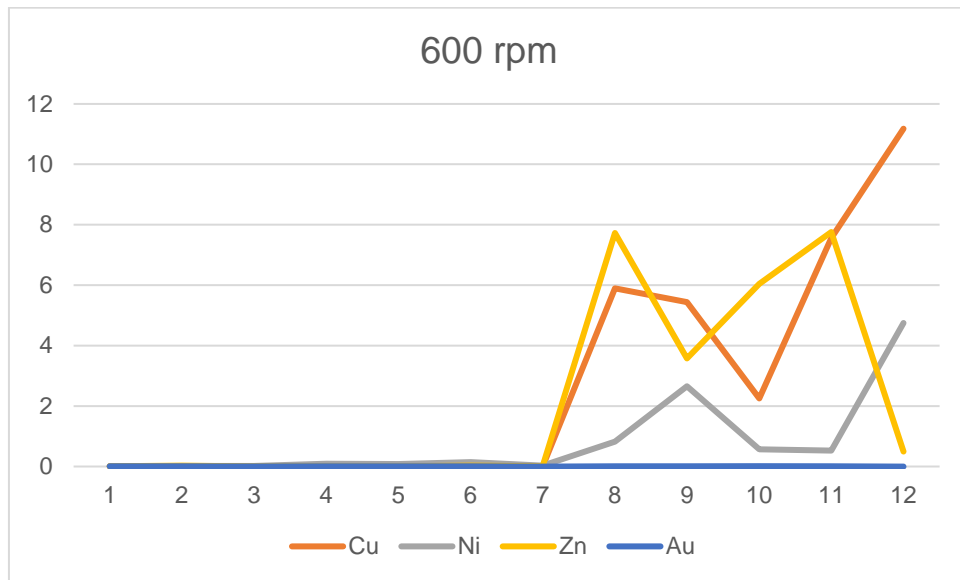


Figura 23.- Gráfica de las concentraciones en ppm obtenidas en ICP para la velocidad de 600 rpm.

En la lixiviación a 600 rpm observamos que con el paso del tiempo los elementos sufren aumentos y disminuciones en la concentración, en este caso presentan sus máximas concentraciones en diferentes tiempos.

Tabla 15.- Concentración obtenida en ppm de la lixiviación a 700 rpm.

Elemento	0	5	10	15	20	25	30	60	90	120	180	240
Cu	0.3681	0.0452	0.0513	0.0112	0.1211	0.136	0.0817	0.0957	0.273	0.072	0.635	0.028
Ni	0.0133	0.0363	0.0709	0.049	0.162	0.321	0.353	0.185	0.257	0.19	0.567	0.216
Zn	0.1613	0.0109	0.0457	0.0021	0.0155	0.0063	0.0187	0.019	0.0539	0.0469	0.1	0.156
Au	0.0068	0.0051	0.0038	0.0007	0.0027	0.0046	0.0005	0.0012	0.0006	0.0041	0.0041	0.002

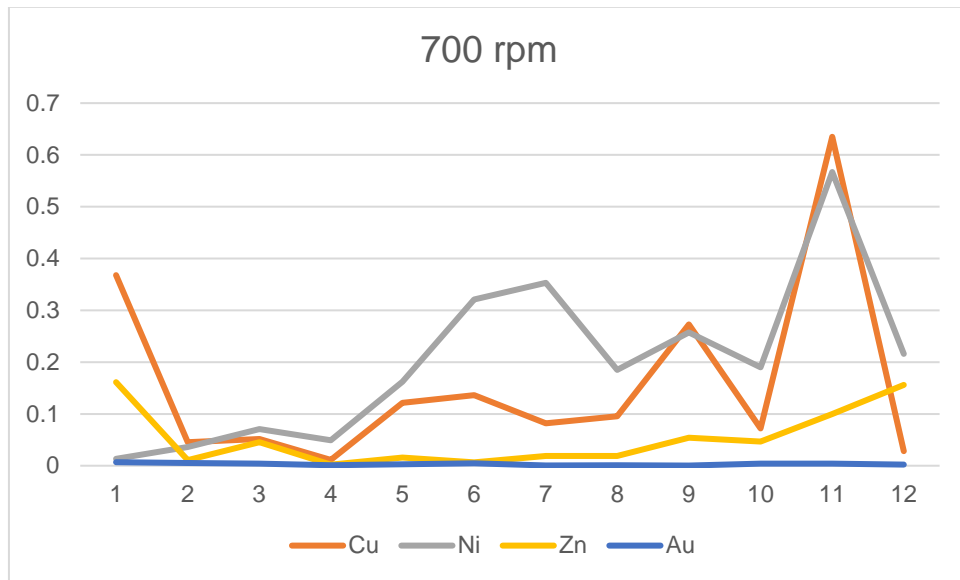


Figura 24.- Gráfica de las concentraciones en ppm obtenidas en ICP para la velocidad de 700 rpm.

En la lixiviación a 700 rpm el cobre inicia en el tiempo cero con alta concentración y al inyectar el ozono disminuye la concentración y alcanza la máxima concentración a los 180 minutos; mientras el níquel inicia en el tiempo cero con baja concentración y al inyectar el ozono presenta aumentos y disminuciones, pero alcanza la máxima concentración a los 180 minutos; por otra parte el zinc inicia y termina con altas concentraciones pero en el proceso sufre disminuciones de concentración y el oro en este caso presentó una disminución constante a lo largo de la experimentación.

Tabla 16.- Concentración obtenida en ppm de la lixiviación a 800 rpm.

Elemento	0	5	10	15	20	25	30	60	90	120	180	240
Cu	0.0025	0.002	0.0031	0.0015	0.0029	0.0025	0.0036	0.0085	0.14	0.28	3.383	1.31
Ni	0.0126	0.0433	0.062	0.247	0.37	0.359	0.474	0.363	0.414	0.43	2.26	1.1
Zn	0.0054	0.012	0.0033	0.0179	0.0194	0.0093	0.0092	0.009	0.0629	0.066	0.228	0.294
Au	0.002	0.0035	0.0104	0.0043	0.0054	0.0006	0.0083	0.007	0.0046	0.0077	0.0076	0.0074

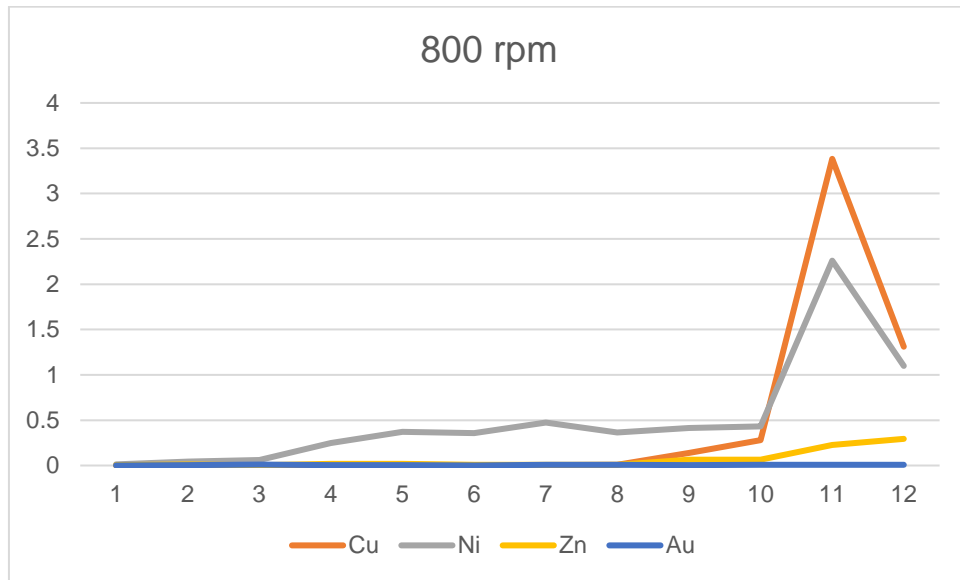


Figura 25.- Gráfica de las concentraciones en ppm obtenidas en ICP para la velocidad de 800 rpm.

En la lixiviación a 800 rpm, podemos observar que el cobre presenta un incremento gradual hasta alcanzar su máxima concentración a los 180 minutos; mientras el níquel presenta aumentos y disminuciones durante la experimentación alcanzando su máxima concentración también a los 180 minutos; el zinc inicia con bajas concentraciones para alcanzar su máxima concentración al finalizar la experimentación a los 240 minutos; y el oro presenta su máxima concentración en el minuto 10.

Tabla 17.- Concentración obtenida en ppm de la lixiviación a 900 rpm.

Elemento	0	5	10	15	20	25	30	60	90	120	180	240
Cu	0.0035	0.0028	0.0061	0.0024	0.0044	0.0016	0.0005	0.174	0.177	1.129	2.68	7.12
Ni	0.0089	0.0178	0.143	0.107	0.057	0.333	0.096	1.45	0.51	1.32	1.13	1.29
Zn	0.008	0.0138	0.0089	0.0021	0.0109	0.0033	0.0082	0.0209	0.041	0.293	0.606	0.749
Au	0.0024	0.0056	0.003	0.0007	0.0026	0.0066	0.0067	0.0054	0.0015	0.0031	0.0008	0.0027

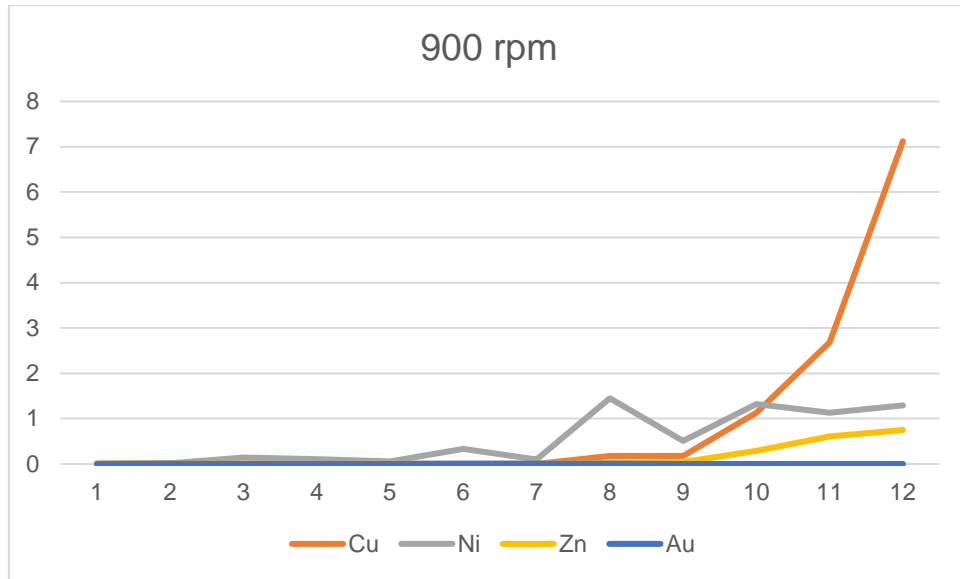


Figura 26.- Gráfica de las concentraciones en ppm obtenidas en ICP para la velocidad de 900 rpm.

En la lixiviación a 900 rpm, el cobre presenta variación en las concentraciones, para alcanzar la mayor concentración después de 240 minutos, esto es al finalizar el experimento; el níquel bajo estas condiciones presenta su mayor concentración una hora después de la inyección de ozono; por otra parte el zinc presenta el mismo comportamiento que a 800 rpm, inicia con bajas concentraciones para alcanzar su máxima concentración al finalizar la experimentación a los 240 minutos; y finalmente el oro alcanza su máxima concentración a los 30 minutos después de iniciado el experimento.

Tabla 18.- Concentración obtenida en ppm de la lixiviación a 1000 rpm.

Elemento	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Cu	0.0129	0.0107	0.0152	0.0074	0.0324	0.0053	0.0075	0.0057	0.0017	0.153	0.886	2.67
Ni	0.0178	0.0222	0.0967	0.028	0.262	0.141	0.174	0.63	0.717	0.2	1.09	3.27
Zn	0.0127	0.0031	0.0061	0.0136	0.0195	0.0091	0.0008	0.0249	0.0077	0.017	0.01	0.666
Au	0.0015	0.0052	0.0034	0.001	0.0043	0.0016	0.0037	0.0053	0.0022	0.018	0.0211	0.0092

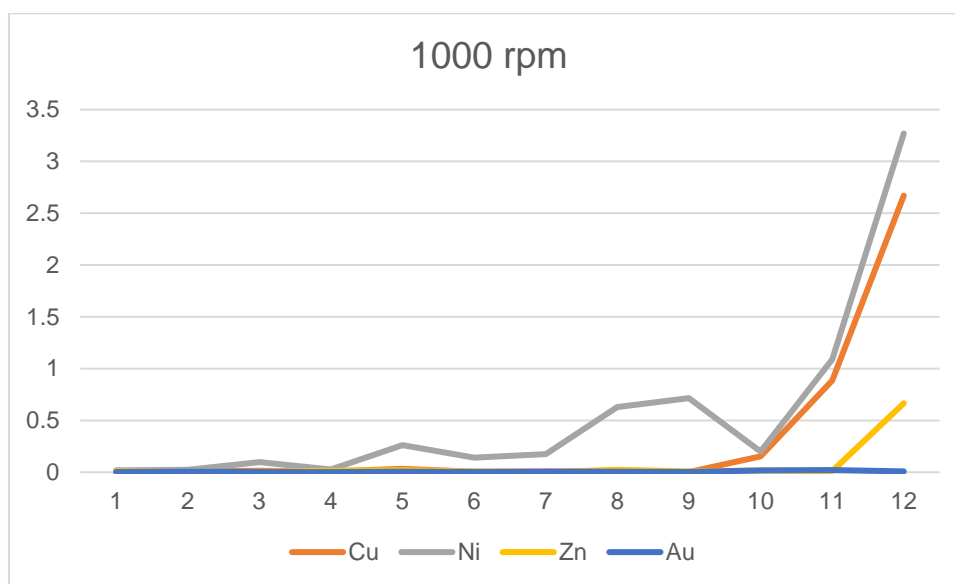


Figura 27.- Gráfica de las concentraciones en ppm obtenidas en ICP para la velocidad de 1000 rpm.

Podemos observar que, en la lixiviación a 1000 rpm, el cobre, níquel y zinc han alcanzado la máxima concentración a los 240 minutos; mientras el oro alcanza su mayor concentración tres horas después de haber iniciado el experimento.

Podemos observar que después de lixiviar y filtrar la muestra se obtienen residuos sólidos a 800 rpm.



Figura 28. Muestra filtrada previamente utilizada en la lixiviación a 800 rpm.

De tal manera podemos observar que la muestra que se sometió a 800 rpm ha sufrido mayor desgaste y abrasión en comparación con otras muestras sometidas a otras velocidades de agitación.



Figura 29. Muestra filtrada previamente utilizada en la lixiviación a 400 rpm.

CONCLUSIONES

Se recolectaron 50 placas de circuitos impresos de computadora, se cortaron y seccionaron los pines de interés.

Posteriormente se caracterizó la chatarra electrónica de las computadoras mediante Microscopía Electrónica de Barrido en conjunción con Dispersión de Energías y Difracción de Rayos X, para obtener información de la composición de los pines seleccionados, donde se pudo corroborar la existencia de Au, Cu, Zn y Ni en dichas muestras.

En la caracterización realizada por MEB-EDS de los circuitos impresos previos a la lixiviación, se determinaron que el máximo porcentaje de oro se encontró en las piezas provenientes del procesador con un 41.7% de Au presente, siendo el principal agente de interés. Con esta información se pudo definir cuáles de las zonas serán las óptimas en el estudio de extracción de este material, además de obtener imágenes referentes a la morfología de dichas piezas caracterizadas.

Los pines de los circuitos impresos de computadoras se consideran una estructura multielemental es debido a eso que se identificaron estructuras complejas en el análisis efectuado por difracción de rayos X; dicha composición está directamente relacionada con su aplicación.

Se realizaron los estudios de la cinética de lixiviación inyectando ozono al sistema, variando la velocidad de agitación

Caracterización de los productos acuosos obtenidos por Espectrometría de Plasma de Acoplamiento Inducido (ICP).

Al realizar el análisis de los resultados obtenidos por ICP podemos corroborar que la mayor concentración de cobre, níquel y oro se obtiene a 800 rpm, dos horas después de haberse iniciado la lixiviación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ballester, A., Verdeja, L. F., & Sancho, J. (2007). *Metalurgia extractiva; fundamentos* (Vol. 1). España: Sistesis, S. A.
- Biozon. (s.f.). *Acerca del Ozono*. Obtenido de Biozon: <http://generadordeozono.com.mx/ozono.html>
- Cárdenas, F., Díaz, M., Guajardo, C., & Oliva, M. B. (2010). *Lixiviación de minerales mediante pilas y bateas*. Obtenido de U-cursos: https://www.u-cursos.cl/usuario/27d1b90415d4029652708fa347c18e40/mi_blog/r/1_LIXIVIACION_DE_MINERALES_MEDIANTE_PILAS_Y_BATEA1.pdf
- Irene Vera, M. (s.f.). *Química general*. Obtenido de Electroquímica: http://exa.unne.edu.ar/quimica/quimgeneral/temas_parciales/unidad_10_Electroquimica2007.pdf
- Jianzhi, L. (2016). Printed Circuit Board Recycling: A State of the Art Survey. *IEEE transactions on electronics packaging manufacturing*, Vol. 27, No. 1, 33-42.
- Kimbrough, D. (1996). A critical review of photographic silver recycling. *Journal of solid waste technology and management*, págs. 197-2007.
- Liu, X. (2006). Generation amount prediction and material flow analysis of electronic waste: a case study in Beijing, China. *Waste Management & Research*, págs. 434-445.
- Lovegrove, J. L. (2008). Export of electronics equipment waste. *Int J Occup Environ Health*, págs. 1-10.
- Montiel Hernández, J. F. (2013). Recuperación de Au, Cu, Ni Y Zn contenidos en desechos electrónicos. Lixiviación dinámica ácida en el sistema H₂SO₄-O₂. Efecto de la concentración de H₃O⁺. *Memorias de 48° Congreso Mexicano de Química.*, 13-15.
- Morera, E. J. (24 de Marzo de 2004). *Lixiviación de metales con ozono acuoso: cinética de la plata y oro*. Obtenido de Diposit Digital: <http://diposit.ub.edu/dspace/handle/2445/35399>
- Network, B. A. (October de 2005). The digital dump: exporting re-use and abuse to Africa. *Seattle*.
- Reyes Amador, P. C. (2013). Recuperación de Cu, Ni y Au contenidos en los desechos electrónicos, vía lixiviación en el sistema H₂SO₄-O₂. *Encuentro de Investigación del Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales.*, 220-224.
- Rivera, I. (2003). Estudio cinético de la precipitación/lixiviación de plata en el sistema O₂. *Aplicación de Efluentes Industriales*.
- Rivera, I. (2004). Precipitación de plata de efluentes electrolíticos. *Revista de Metalurgia*, págs. 369-373.
- Robinson, B. H. (2009). E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Science of The Total Environment*, págs. 183-191.
- Ruiz Velasco, J. F., & Guillén Méndez, A. N. (2010). *Procesos de extracción y concentración de minerales*. Obtenido de Galeon: <http://galeon.com/quimica3cch/MINEROMET/Sepcon.pdf>
- Sánchez, M. (2010). Cinética de lixiviación de Cu, Zn y Ni, contenidos en circuitos impresos de computadora. Recuperación de oro.
- Schluep, M. (2009). Recycling: from E-waste to Resource. *UNEP and United Nations University*.

- Schmidt, C. W. (2006). Unfair trade: e-waste in Africa. *Environ Health Perspect.*
- Schwarzer, S. (2005). E-Waste, the Hidden Side of IT Equipment's Manufacturing and use. *Environmental Alert Bulletin UNEP.*
- Skoog, D. (2001). *Analisis Instrumental.* Madrid: Mc Graw Hill.
- SNMPE. (2da. Quincena de Agosto de 2007). *La lixiviación.* Recuperado el 25 de Septiembre de 2016, de Informe quincenal de la SNMPE:
http://confiep.org.pe/facipub/upload/publicaciones/1/1152/la_lixivacion_snmpe.pdf
- U.S.E.P, A. (20 de July de 2011). National Strategy For Electronics Stewardship.
- Ullman, F. (1993). Ullman's encyclopedia of industrial chemistry.
- A. López Fernández, Metales Preciosos: el oro, Córdoba, Argentina: Real Academia de Córdoba, de Ciencias, Bellas Letras y Nobles Artes, 2007.
- S. Almazán Esqueda, «Informe anual cámara minera de México,» Cámara minera de México LXXVIII asamblea gral. ordinaria, México, 2015.
- J. P. Facuy Delgado y G. Salazar Bustos, «Viabilidad Financiera de una Empresa Recuperadora de Materiales (oro, plata y cobre) en la Chatarra Electronica,» de Tesis para obtener el grado de Magíster en Finanzas y Proyectos Corporativos., Guayaquil Ecuador, Facultad de Ciencias Económicas, Universidad de Guayaquil, 2014, p. 10.
- D. E. Chaverra Aria y O. J. Restrepo Baena, «Metodología para la recuperación de cobre de tarjetas de circuitos impresos de computadoras,» de Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2011.
- F. Pino Perez y D. Perez Bendito, Análisis de elementos-traza por espectrofotometría de absorción molecular ultravioleta visible, Monte de piedad y Universidad de Sevilla: Universidad de Sevilla, 1983.
- P. L. Lopez de Alva, L. Lopez Martinez y J. Amador Hernández, «Determinacion espectrofotometrica de cobre en formulaciones medicas, salvado de trigo y aguas potables,» Boletin de la sociedad chilena de química, vol. 44 , nº 4, pp. 0366-1644, 1999.