

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA**

**DISEÑO DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE METALES DE
PROCESADORES Y TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS DE
COMPUTADORAS DESCARTADAS MEDIANTE LIXIVIACIÓN EN
COLUMNA**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
QUÍMICO**

RICARDO ANDRÉS MONTERO BERMÚDEZ

rick101095@hotmail.com

DIRECTOR: ING. ERNESTO HALE DE LA TORRE CHAUVÍN

enesto.delatorre@epn.edu.ec

Quito, diciembre 2012

© Escuela Politécnica Nacional (2012)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Ricardo Andrés Montero Bermúdez, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Ricardo Andrés Montero Bermúdez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Ricardo Andrés Montero Bermúdez, bajo mi supervisión.

Ing. Ernesto de la Torre Msc.
DIRECTOR DE PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto (DEMEX-05/PIS09-04), que se ejecutó en el Departamento de Metalurgia Extractiva.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	xx
INTRODUCCIÓN	xxii
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1. Los residuos electrónicos y sus implicaciones ambientales	1
1.1.1. Generalidades de los residuos electrónicos	1
1.1.2. Clasificación de los residuos electrónicos	3
1.1.3. Composición de los residuos electrónicos	4
1.1.4. Problemática e implicaciones ambientales	8
1.2. Estructura y composición de procesadores y tarjetas de circuitos impresos	13
1.2.1. Generalidades de los procesadores y tarjetas de circuitos impresos	13
1.2.2. Estructura de procesadores y tarjetas de circuitos impresos	14
1.2.2.1. Estructura de los procesadores	14
1.2.2.2. Estructura de las tarjetas de circuitos impresos	15
1.2.3. Composición de tarjetas de circuitos impresos	17
1.3. Técnicas de recuperación de oro, plata y cobre de tarjetas de circuitos impresos	18
1.3.1. Procesos hidrometalúrgicos	19
1.3.1.1. Cianuración	19
1.3.1.2. Lixiviaciones ácidas	26
1.3.2. Procesos pirometalúrgico	30
1.4. Técnicas de recuperación de niobio de minerales	32
1.4.1. PROCESO CONVENCIONAL	32
1.4.2. Lixiviación básica	33
2. METODOLOGÍA	35
2.1. Caracterización física y química de procesadores y tarjetas de circuitos impresos	37
2.1.1. Caracterización física de los procesadores y tarjetas de circuitos impresos	37
2.1.1.1. Reducción de tamaño	38
2.1.1.2. Determinación del tamaño de partícula de los procesadores y tarjetas de circuitos impresos molidos	40
2.1.1.3. Caracterización física de los procesadores y tarjetas de circuitos impresos con microscopía electrónica de barrido	41
2.1.2. Caracterización química de los procesadores y tarjetas de circuitos impresos	42
2.1.2.1. Determinación de la concentración de oro, plata y niobio en los procesadores y tarjetas de circuitos impresos	42

2.1.2.2. Determinación de la concentración de cobre, hierro y níquel en los procesadores y tarjetas de circuitos impresos	45
2.2. Ensayos de cianuración directa agitada y en columna para recuperación de oro, plata, cobre y niobio de procesadores y tarjetas de circuitos impresos	46
2.2.1. Definición de los parámetros para la cianuración directa y en columna de procesadores y tarjetas de circuitos impresos	46
2.2.2. Determinación del rango de tamaño de partícula a usarse en el proceso de cianuración en columna	47
2.2.3. Ensayos de cianuración directa agitada para recuperación de oro, plata, cobre y niobio de procesadores	48
2.2.4. Ensayos de cianuración en columna para recuperación de oro, plata, cobre y niobio de procesadores	49
2.3. Ensayos de cianuración en columna con pretratamientos de reducción de tamaño, lixiviación ácida y básica	52
2.4. Definición del diagrama de flujo del proceso y análisis económico preliminar	55
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
3.1. Caracterización de procesadores y tarjetas de circuitos impresos	57
3.1.1. Caracterización física	57
3.1.1.1. Análisis de procesadores con microscopía electrónica de barrido	57
3.1.1.2. Análisis de tarjetas de circuitos impresos con microscopía electrónica de barrido	62
3.1.1.2. Determinación del tamaño de partícula obtenido luego de la molienda con molino de martillos	65
3.1.2. Caracterización química	67
3.1.2.1. Determinación de la concentración de oro, plata y niobio	67
3.1.2.2. Determinación del contenido de metales base	70
3.2. Cianuración directa agitada y en columna para recuperación de oro, plata, cobre y niobio de procesadores y tarjetas de circuitos impresos	71
3.2.1. Ensayo de cianuración directa agitada para recuperación de oro, plata, cobre y niobio de procesadores	75
3.2.2. Ensayo de cianuración directa en columna para recuperación de oro, plata, cobre y niobio de procesadores	79
3.2.2.1. Determinación del mejor flujo para la cianuración directa en columna	79
3.2.2.2. Cianuración directa en columna	80
3.3. Cianuración en columna con pretratamientos de reducción de tamaño, lixiviación ácida y básica	81
3.4. Diagrama de flujo del proceso y análisis económico preliminar	90
3.4.1. Cianuración en columna de tarjetas de circuitos impresos	91
3.4.2. Diseño conceptual	93

3.4.3. Análisis económico preliminar	101
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	106
4.1. Conclusiones	106
4.2. Recomendaciones	108
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
ANEXOS	115

ÍNDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Objetivos de recuperación según la sección 7 de la Directiva WEEE	3
Tabla 1.2	Valor versus distribución del peso para típicos aparatos electrónicos	5
Tabla 1.3	Componentes de una computadora tipo	6
Tabla 1.4	Relación entre los materiales presente en los aparatos electrónicos y el daño que estos pueden provocar en la salud humana y el medio ambiente	11
Tabla 1.5	Tipos de sustratos de tarjetas de circuitos impresos y su composición	16
Tabla 1.6	Composiciones de material representativo de tarjetas de circuitos impresos	18
Tabla 2.1	Tamices empleados para la realización del ensayo granulométrico de los materiales molido	40
Tabla 2.2	Carga fundente utilizada para la fusión de procesadores y tarjetas de circuitos impresos	43
Tabla 2.3	Niveles mínimos detección de metales analizados por Absorción Atómica	45
Tabla 3.1	Tratamiento de datos para ensayo de granulometría de procesadores luego del proceso de reducción de tamaño con molino de martillos	66
Tabla 3.2	Tratamiento de datos para ensayo de granulometría de tarjetas de circuitos impresos luego del proceso reducción de tamaño con molino de martillos	66
Tabla 3.3	Contenido de oro, plata y niobio en procesadores determinado por ensayo al fuego	68
Tabla 3.4	Contenido de oro, plata y niobio en tarjetas de circuitos impresos determinado por ensayo al fuego	69
Tabla 3.5	Contenido de metales base en procesadores de computadoras descartadas	70
Tabla 3.6	Contenido de metales base en tarjetas de circuitos impresos de computadoras descartadas	70

Tabla 3.7	Análisis de permeabilidad de las diferentes fracciones obtenidas de la molienda de procesadores	73
Tabla 3.8	Contenido de metales de interés en tarjetas de circuitos impresos y procesadores de computadoras descartadas	76
Tabla 3.9	Recuperación de los metales de interés para el ensayo de cianuración agitada	77
Tabla 3.10	Recuperación de los metales de interés obtenidos con flujos de 1 y 3 L/d. Condiciones: [CN]=4 g/L, pH 11, tiempo 15 días	79
Tabla 3.11	Recuperación de cobre, hierro y níquel con diferentes agentes lixiviantes. Condiciones: Concentración 1M, volumen 1 L, tiempo 8 días, flujo 1 L/d	85
Tabla 3.12	Recuperación global de los metales de interés con y sin pretratamientos de lixiviación	89
Tabla 3.13	Condiciones de operación en el proceso de cianuración en columna de tarjetas de circuitos impresos.	91
Tabla 3.14	Recuperaciones oro, plata y cobre en solución y en carbón activado para ensayo de cianuración en columna de tarjetas de circuitos impresos	93
Tabla 3.15	Zonas presentes en la planta	99
Tabla 3.16	Condiciones de operación para el proceso de cianuración y adsorción	99
Tabla 3.17	Datos del balance de masa para las corrientes sólidas del proceso de reciclaje de tarjetas de circuitos impresos	100
Tabla 3.18	Datos de peso de las corrientes que ingresan a cada proceso en el reciclaje de tarjetas de circuitos impresos	100
Tabla 3.19	Equipos usados en el proceso y sus especificaciones	101
Tabla 3.20	Consumo y costo de los reactivos y materia prima usados en la planta de tratamiento de tarjetas de circuitos impresos	101
Tabla 3.21	Consumo y costo de los reactivos y materia prima usados en la planta de tratamiento de tarjetas de circuitos impresos	102
Tabla 3.22	Gastos de inversión	102
Tabla 3.23	Costos operativos mensuales	102

Tabla 3.24	Ingresos mensuales	103
Tabla 3.25	Flujo de caja mensual	103
Tabla 3.26	Flujo de caja anual	104
Tabla 3.27	Indicadores económicos obtenidos evaluados a diferentes tasas de recolección de tarjetas de circuitos impresos	104
Tabla AI.1	Partes de un CPU	116
Tabla AI.2	Composición de las mezclas de materiales presentes en un CPU	117
Tabla AI.3	Evaluación de desensamblaje	117
Tabla AI.4	Composición general de un CPU	118
Tabla AII.1	Ensayo granulométrico de procesadores plásticos molidos	120
Tabla AII.2	Ensayo granulométrico de tarjetas de circuitos impresos molidas	121
Tabla AIV.1	Control de cianuración PM0	123
Tabla AIV.2	Resultados de cianuración (análisis de oro) PM0	124
Tabla AIV.3	Resultados de cianuración (análisis de plata) PM0	124
Tabla AIV.4	Cinética de cianuración PM0	124
Tabla AIV.5	Control de cianuración PM1	126
Tabla AIV.6	Resultados de cianuración (análisis de oro) PM1	127
Tabla AIV.7	Resultados de cianuración (análisis de plata) PM1	127
Tabla AIV.8	Cinética de cianuración PM1	127
Tabla AIV.9	Control de cianuración PM2	129
Tabla AIV.10	Resultados de cianuración (análisis de oro) PM2	130
Tabla AIV.11	Resultados de cianuración (análisis de plata) PM2	130
Tabla AIV.12	Cinética de cianuración PM2	130
Tabla AIV.13	Control de cianuración PM3	133
Tabla AIV.14	Resultados de cianuración (análisis de oro) PM3	133

Tabla AIV.15	Resultados de cianuración (análisis de plata) PM3	133
Tabla AIV.16	Cinética de cianuración PM3	134
Tabla AIV.17	Control de cianuración PM4	136
Tabla AIV.18	Resultados de cianuración (análisis de oro) PM4	136
Tabla AIV.19	Resultados de cianuración (análisis de plata) PM4	136
Tabla AIV.20	Cinética de cianuración PM4	137
Tabla AIV.21	Control de cianuración PM5	139
Tabla AIV.22	Resultados de cianuración (análisis de oro) PM5	139
Tabla AIV.23	Resultados de cianuración (análisis de plata) PM5	139
Tabla AIV.24	Cinética de cianuración PM5	140
Tabla AIV.25	Control de cianuración PM6	142
Tabla AIV.26	Resultados de cianuración (análisis de oro) PM6	142
Tabla AIV.27	Resultados de cianuración (análisis de plata) PM6	142
Tabla AIV.28	Cinética de cianuración PM6	143
Tabla AIV.29	Control de cianuración PM7	145
Tabla AIV.30	Resultados de cianuración (análisis de oro) PM7	145
Tabla AIV.31	Resultados de cianuración (análisis de plata) PM7	145
Tabla AIV.32	Cinética de cianuración PM7	146
Tabla AIV.33	Control de cianuración TM1	148
Tabla AIV.34	Resultados de cianuración (análisis de oro) TM1	148
Tabla AIV.35	Resultados de cianuración (análisis de plata) TM1	148
Tabla AIV.36	Cinética de cianuración TM1	149
Tabla AV.1	Control de lixiviación PM4	151
Tabla AV.2	Cinética de lixiviación PM4	151
Tabla AV.3	Control de lixiviación PM5	152

Tabla AV.4	Cinética de lixiviación PM5	153
Tabla AV.5	Control de lixiviación PM6	154
Tabla AV.6	Cinética de lixiviación PM6	155
Tabla AV.7	Control de lixiviación PM7	156
Tabla AV.8	Cinética de lixiviación PM7	157
Tabla AVI.1	Datos de Adsorción TM1	158
Tabla AVI.2	Resultados de Adsorción TM1	159

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1	Tipo de equipos eléctricos y electrónicos presentes en los RAEE	4
Figura 1.2	Materiales presentes en una computadora	6
Figura 1.3	Principales países en desarrollo donde se “recicla” residuos electrónicos	10
Figura 1.4	Procesos de quema de cables (a) y desensamblaje manual de residuos electrónicos para recuperaciones de metales	10
Figura 1.5	Procesadores de sustrato cerámico (a) y sustrato plástico (b)	14
Figura 1.6	Componentes presentes en los procesadores	15
Figura 1.7	Estructura de un sustrato de tarjeta de circuito impreso de doble lado con revestimiento de cobre	16
Figura 1.8	Estructura de una tarjeta de circuitos impresos multicapa	16
Figura 1.9	Componentes comunes en las tarjetas de circuitos impresos	17
Figura 1.10	Diagrama de Pourbaix para el sistema Au-H ₂ O-CN ⁻ a 25°C	21
Figura 1.11	Diagrama de Pourbaix para el sistema Ag-H ₂ O-CN ⁻ a 25°C	22
Figura 1.12	Diagrama de Pourbaix para el sistema Cu-H ₂ O-CN ⁻ a 25°C	23
Figura 1.13	Porcentaje de recuperación de oro y plata obtenidos en el proceso de cianuración en función de la concentración de NaCN	24
Figura 1.14	Variación de los porcentajes de recuperación de oro y plata obtenidos al variar el tiempo de cianuración.	24
Figura 1.15	Diagrama de flujo del proceso de recuperación de oro, plata y paladio de tarjetas de circuito impreso de teléfonos celulares descartados mediante cianuración agitada	25
Figura 1.16	Diagrama de flujo para recuperación de metales preciosos propuesta por Quinet	26
Figura 1.17	Diagrama de proceso hidrometalúrgicos para recuperación de oro	28
Figura 1.18	Recuperación de metales base en función del tiempo con una solución de [NH ₃]= 5M, [(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈] = 0.5M	29

Figura 1.19	Proceso hidrometalúrgico para recuperación de cobre a partir de chatarra electrónica	29
Figura 1.20	Diagrama de proceso de la compañía UMICORE	31
Figura 1.21	Diagrama de proceso de recuperación de niobio	33
Figura 1.22	Diagrama de proceso de recuperación de niobio con KOH	34
Figura 2.1	Metodología empleada para la recuperación de los metales de interés de procesadores y tarjetas de circuitos impresos	36
Figura 2.2	Procesador y tarjeta de circuitos impresos	37
Figura 2.3	Fotografía del molino de matillos usado en la reducción de tamaño	38
Figura 2.4	Fotografía de procesadores después de la reducción de tamaño en el molino de martillos	39
Figura 2.5	Fotografía de una muestra de tarjeta de circuitos impresos pulverizada	39
Figura 2.6	Microscopio electrónica de barrido, TESCAN con analizador de rayos x (EDX), empleado en el análisis de elementos	41
Figura 2.7	Esquema del horno de crisol a gas, empleado en la investigación	43
Figura 2.8	Esquema de cianuración en lecho agitado	48
Figura 2.9	Sistema de lixiviación en columna usado en la investigación para la recuperación de los metales de interés de procesadores	50
Figura 2.10	Sistema de lixiviación en columna usado en la investigación para la recuperación de los metales de interés de tarjetas de circuitos impresos	52
Figura 3.1	Fotografía MEB del interior de un chip de tarjeta de circuitos impresos a 700 aumentos	58
Figura 3.2	Imagen del análisis químico del interior de un chip de tarjeta de circuitos impresos por microscopía electrónica a 515 aumentos	59
Figura 3.3	Fotografía MEB de un pin de procesador a 120 aumentos	59
Figura 3.4	Imagen del análisis químico de la superficie de la cabeza de un pin de procesador por microscopía electrónica a 500 aumentos	60

Figura 3.5	Espectro del análisis químico de la superficie del pin recubierta de la aleación oro-niobio	61
Figura 3.6	Espectro del análisis químico de la superficie de un doré proveniente del ensayo al fuego de un procesador cerámico	62
Figura 3.7	Fotografía de los elementos de la tarjeta de circuitos impresos analizados	63
Figura 3.8	Imagen del análisis químico de la superficie del núcleo de un chip de tarjeta de circuitos impresos por microscopía electrónica a 800 aumentos	63
Figura 3.9	Imagen del análisis químico de la superficie de un pin de tarjeta de circuitos impresos por microscopía electrónica a 1000 aumentos	64
Figura 3.10	Imagen del análisis químico de la superficie de un pin de tarjeta de circuitos impresos por microscopía electrónica a 1000 aumentos	65
Figura 3.11	Imagen de procesador de sustrato plástico con cubierta de cobre	71
Figura 3.12	Imagen de procesadores usados en los ensayos de cianuración directa agitada y en columna	72
Figura 3.13	Porcentajes de metales preciosos presentes en las diferentes fracciones obtenidas de la molienda de prosadores	74
Figura 3.14	Porcentajes de metales preciosos presentes en las diferentes fracciones obtenidas de la molienda de tarjetas de circuitos impresos	75
Figura 3.15	Recuperación de los metales de interés en función del tiempo para el proceso de cianuración agitada, $[CN]= 4 \text{ g/L}$	76
Figura 3.16	Análisis químico de la cabeza de un pin de procesador antes (a) y después (b) del proceso de cianuración	77
Figura 3.17	Esquema de aleaciones presentes en el pin de un procesador	78
Figura 3.18	Variación del porcentaje de recuperación de los metales de interés obtenidos por cianuración en columna en función del flujo lixivante	80
Figura 3.19	Recuperación de oro, plata y cobre en función del tiempo	81
Figura 3.20	Recuperación de cobre, hierro y níquel en función del tiempo con una solución de NaOH.	82

Figura 3.21	Recuperación de cobre, hierro y níquel en función del tiempo con una solución de H_2SO_4	83
Figura 3.22	Recuperación de cobre, hierro y níquel en función del tiempo con una solución de NH_3	84
Figura 3.23	Recuperación de cobre, hierro y níquel en función del tiempo con una solución de $NH_3-(NH_3)_2SO_4$	84
Figura 3.24	Recuperación de cobre, hierro y níquel en función de cada agente lixiviante	86
Figura 3.25	Recuperación de oro, plata y cobre en función del tiempo. Condiciones: $[CN]= 4$ g/L, tiempo 15 días, flujo 1 L/d, lixiviación previa con H_2SO_4	86
Figura 3.26	Recuperación de oro, plata y cobre en función del tiempo. Condiciones: $[CN]= 4$ g/L, tiempo 15 días, flujo 1 L/d, lixiviación previa con NH_3	87
Figura 3.27	Recuperación de oro, plata y cobre en función del tiempo. Condiciones: $[CN]= 4$ g/L, tiempo 15 días, flujo 1 L/d, lixiviación previa con $NH_3 + (NH_4)_2SO_4$	88
Figura 3.28	Recuperación de oro, plata y cobre en función del tiempo. Condiciones: $[CN]= 4$ g/L, tiempo 15 días, flujo 1 L/d, lixiviación previa con NaOH	88
Figura 3.29	Recuperación global de los metales de interés con y sin pretratamientos de lixiviación	89
Figura 3.30	Recuperación oro, plata y cobre del proceso de cianuración en columna de tarjetas de circuitos impresos.	92
Figura 3.31	Diagrama de bloques del proceso de recuperación de oro, plata, cobre y niobio de tarjetas de circuitos impresos de computadoras descartadas	95
Figura 3.32	Diagrama de flujo de proceso de recuperación de oro, plata, cobre y niobio de tarjetas de circuitos impresos de computadoras descartadas	96
Figura 3.33	Plano de implementación de la planta	98
Figura AI.1	Materiales presentes en un CPU	118
Figura AI.2	Componentes electrónicos que presentan metales preciosos	119

Figura AII.1	Curva granulométrica para procesadores plásticos molidos	120
Figura AII.2	Curva granulométrica para tarjetas de circuito impreso molidas	121
Figura AIV.1	Cinética de cianuración PM0	125
Figura AIV.2	Cinética de cianuración PM1	128
Figura AIV.3	Cinética de cianuración PM2	131
Figura AIV.4	Cinética de cianuración PM3	134
Figura AIV.5	Cinética de cianuración PM4	137
Figura AIV.6	Cinética de cianuración PM5	140
Figura AIV.7	Cinética de cianuración PM6	143
Figura AIV.8	Cinética de cianuración PM7	146
Figura AIV.9	Cinética de cianuración TM1	149
Figura AV.1	Cinética de lixiviación PM4	151
Figura AV.2	Cinética de lixiviación PM5	153
Figura AV.3	Cinética de lixiviación PM6	155
Figura AV.4	Cinética de lixiviación PM7	157

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
ANEXO I	
Determinación de la composición de computadoras descartadas	116
ANEXO II	
Determinación del d_{80} para las muestras molidas en molino de martillos	120
ANEXO III	
Determinación de la concentración de cianuro libre	122
ANEXO IV	
Fichas técnicas de cianuración	123
ANEXO V	
Fichas técnicas de lixiviación	150
ANEXO VI	
Fichas técnicas de adsorción	158
ANEXO VII	
Análisis económico	160

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue recuperar oro, plata, cobre y niobio (metales de interés) de procesadores y tarjetas de circuitos impresos de computadoras descartadas. Para esto, se utilizó las técnicas de cianuración agitada y cianuración en columna con pretratamientos de reducción de tamaño y lixiviaciones ácido sulfúrico (H_2SO_4), amoníaco (NH_3), hidróxido de sodio ($NaOH$) y sulfato de amonio ($(NH_4)_2SO_4$)

Se determinó el contenido de cada metal en los dos tipos de residuos electrónicos utilizados. Se realizaron ensayos de cianuración en columna con tratamientos preliminares de reducción de tamaño, lixiviación con soluciones de: amoníaco de concentración 1 molar ([1 M]), ácido sulfúrico [1 M], hidróxido de sodio [1 M] y amoníaco-sulfato de amonio [1 M] (1 M para cada uno de los reactivos), para determinar aquellos que permitan alcanzar las mayores recuperaciones de los metales de interés.

Se obtuvo una recuperación de 7,9 % de plata, 53,66 % de oro, 52,48 % de niobio y 74,14 % de cobre con procesadores cianurados (cianuración en columna) a las siguientes condiciones: tamaño de partícula entre 3 350 y 425 μm , concentración de cianuro de 4 g/L, pH entre 10,5 y 11,5, flujo de 2 L/d \cdot kg_{muestra} y tiempo de 15 d.

Con base en las condiciones operatorias antes señaladas, se realizó la cianuración en columna de tarjetas de circuitos impresos y posteriormente se sometió a la solución cargada a un proceso de adsorción en columna con carbón activado (los procesos de cianuración y adsorción se realizaron en circuito cerrado, recirculando la solución al finalizar cada día de operación). Obteniéndose recuperaciones de 46,6 % de oro, 51,3 % de plata, 47,2 % de niobio y 62,3 % de cobre.

Se realizó un estudio económico preliminar de la implementación de una planta con capacidad para procesar 1 000 kg de tarjetas de circuitos impresos mensualmente, se determinó que con una inversión de 149 302 USD, se tendría

una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 27 % con un valor actual neto (VAN) de 105 925 USD, calculados en un horizonte de operación de 10 años.

INTRODUCCIÓN

Los residuos electrónicos, son una fracción de los residuos sólidos que ha evidenciado un gran crecimiento en los últimos años. Esto se debe a que la tasa de recambio (tiempo en el cual se renuevan estos aparatos) es relativamente corta, para el caso de las computadoras personales y de las computadoras portátiles es 5 y 3 años respectivamente (Chancerel, 2010, p. 35).

En la actualidad más del 27 % de los hogares en Ecuador tienen una computadora, 80 % tiene al menos un teléfono celular y 85,1 % una televisión. Además el Ecuador recibe anualmente cerca de 20 000 toneladas de equipos eléctricos y electrónicos. Se estimó que la demanda de computadoras personales a nivel mundial será de 387,8 millones de unidades para el año 2011 y que para el año 2012 tendría un crecimiento del 13,6 %, hasta un total de 440,6 millones de unidades (Rosales, 2011, p. 1; Garther, 2011, p. 1).

Los materiales presentes en una computadora son: metales 41 %, sílice y vidrio 26 %, plásticos 23 % y otros 10 %. Existen componentes contaminantes tales como: metales pesados, entre los que se encuentran: cobre, plomo, mercurio, cadmio, berilio, bario, y cromo hexavalente; PVC y retardantes de flama bromados. Pero es importante recalcar que el contenido de metales estratégicos (usados ampliamente en el desarrollo tecnológico de nuevos equipos) como: oro, plata, paladio, platino y niobio es bastante superior al existente en fuentes convencionales de extracción. Investigaciones previas han determinado contenidos promedio de plata, oro y paladio es de 27,3 g/t, 6,83 g/t y 3 g/t respectivamente; con el análisis de una computadora completa como referencia (Statistics Canada, 2009, p. 1; Chancerel, Meskers, Hagelüken. y Rotter, 2009, p. 800; Greenpeace, 201, p. 10).

Aunque el reciclaje de este tipo de materiales se enfoca principalmente en la recuperación de metales preciosos, existe un interés generalizado en crear procesos de reciclaje integral que permitan la recuperación de otros metales y materiales tales como: aluminio, estaño, cobalto, plomo y plásticos (Castro y

Martins, 2009, p. 649).

El reciclaje de residuos electrónicos constituye una alternativa a la extracción de metales estratégicos, provee beneficios ambientales tales como: ahorro de energía, reducción en el volumen de los desechos, reducción de emisiones atmosféricas y reducción de la explotación de metales vírgenes (Autoridad de Desperdicios Sólidos, 2010, p. 1).

Adicionalmente la recuperación de oro y plata a partir de procesadores y tarjetas de circuitos impresos de computadoras descartadas permite considerar al reciclaje de residuos electrónicos como una opción económicamente atractiva para la creación nuevas industrias en el país. Actualmente, el precio de la onza troy (aproximadamente 31,1 gramos) de oro y de plata es USD 1802,6 y USD 40,2 respectivamente (Bolsa de Metales de Londres -LME-, 2011)

El objetivo general del presente proyecto de titulación consiste en el diseño del proceso de recuperación de metales de procesadores y tarjetas de circuitos impresos de computadoras descartadas mediante lixiviación en columna. El proceso de lixiviación en columna a diferencia de los procesos de lixiviación agitada usualmente usados en la recuperación de metales preciosos, requiere un bajo capital de inversión y operación. Debido a las ventajas de este proceso, se lo considera como una opción para la recuperación de metales de residuos electrónicos en países en desarrollo.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este capítulo se presenta la información obtenida de la investigación bibliográfica realizada acerca de los residuos electrónicos, su composición e implicaciones ambientales; así como también los procesos que existen para la recuperación de metales a partir de este tipo de material.

1.1. LOS RESIDUOS ELECTRÓNICOS Y SUS IMPLICACIONES AMBIENTALES

Según los Lineamientos para la gestión de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) en Latinoamérica, se define a los residuos electrónicos de la siguiente manera:

“Los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos son residuos derivados de los Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE) descartados por el consumidor al final de su vida útil, cuyas características hacen que sea necesario ser sometidos a un manejo especial y que deberán ser entregados a un sistema de gestión ambientalmente adecuado” (Plataforma RELAC, 2011, p. 6),

1.1.1. GENERALIDADES DE LOS RESIDUOS ELECTRÓNICOS

El consumo a nivel mundial de aparatos eléctricos y electrónicos (EEE) ha sufrido un gran incremento en los últimos años, debido a la alta tasa de renovación de dicho equipos. Al terminar su tiempo de vida útil estos aparatos se transforman en residuos. Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), conocidos como “ewaste”, presentan dentro de su estructura metales valiosos como: oro, plata, paladio, platino, etc.; metales estratégicos como: niobio, tantalio, galio, etc.

y compuestos peligrosos como metales pesados y retardantes de flama bromados (Lee, Song y Yoo, 2007, p. 391).

Anualmente se utilizan más de 300 toneladas de oro en la fabricación de equipos electrónicos. Al transformarse en RAEE después de su vida útil, estos se convierten en una potencial fuente secundaria de materias primas. El reciclaje de este tipo de residuos se presenta como una buena opción para evitar el desaprovechamiento de materiales de gran valor comercial (Corti y Hagelüken, 2010, p. 10)

En este contexto se puede considerar a los RAEE como “Minas Urbanas” que puede complementar al sistema de extracción de oro para hacerlo más sustentable, debido a que este tipo de extracción tiene menores costos ambientales (una menor generación de CO₂ y un menor impacto ambiental) (Corti y Hagelüken, 2010, p. 11).

Por otra parte, los RAEE contienen contaminantes altamente tóxicos entre los que tenemos metales pesados como: plomo, mercurio, berilio, bario y cadmio que puede ser nocivos para el medio ambiente, ya que si son dispuestos en rellenos sanitarios, los lixiviados producidos pueden contaminar el suelo y las fuentes de agua cercanas (Pinto y Patil, 2008, p. 65).

El potencial contaminante de este tipo de material aumenta en la medida que se trabaja con procesos poco técnicos, como los usados en el sector informal de reciclaje para extraer los metales valiosos. Sin embargo en países desarrollados el reciclaje de estos residuos se considera como un negocio rentable, ya que con la tecnología adecuada se puede recuperar todos los componentes valiosos (Chatterjee y Kumar, 2009, p. 893).

Un factor importante en la correcta gestión de los RAEE es el desarrollo de alternativas para la recuperación de metales preciosos de forma rentable y ambientalmente adecuada.

1.1.2. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS ELECTRÓNICOS

La Directiva WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment), desarrollada por la Unión Europea, a través del Parlamento Europeo presenta una clasificación general de los RAEE (Hester y Harrison, 2009, p. 56).

- Categoría 1 – Grandes aparatos doméstico
- Categoría 2 – Pequeños aparatos doméstico
- Categoría 3 – Equipos de telecomunicación
- Categoría 4 – Equipos del consumidor
- Categoría 5 – Alumbrado
- Categoría 6 – Herramientas eléctricas y electrónicas
- Categoría 7 – Juguetes y ocio
- Categoría 8 – Aparatos médicos
- Categoría 9 – Equipos de monitoreo
- Categoría 10 – Dispensadores Automáticos

En la Tabla 1.1. se presentan los objetivos de recuperación y reciclaje de materiales en función del tipo de categoría definidos en la Directiva WEEE.

Tabla 1.1. Objetivos de recuperación según la sección 7 de la Directiva WEEE

Categoría de residuos eléctrico y electrónico	Porcentaje de recuperación	Porcentaje de reciclaje
1, 10	80 %	75 %
3, 4	80 %	65 %
5	-	80 %
2, 5, 6, 7, 9	70 %	50 %

(Chancerel, 2010, pp. 25,26)

Es importante mencionar que el reciclaje abarca a componentes, materiales y sustancias que se reciclen o reúsen y para el caso del porcentaje de recuperación se toma en cuenta la recuperación energética en el proceso. En la Figura 1.1 se presentan el aporte de los diferentes equipos eléctricos y electrónicos en los RAEE.

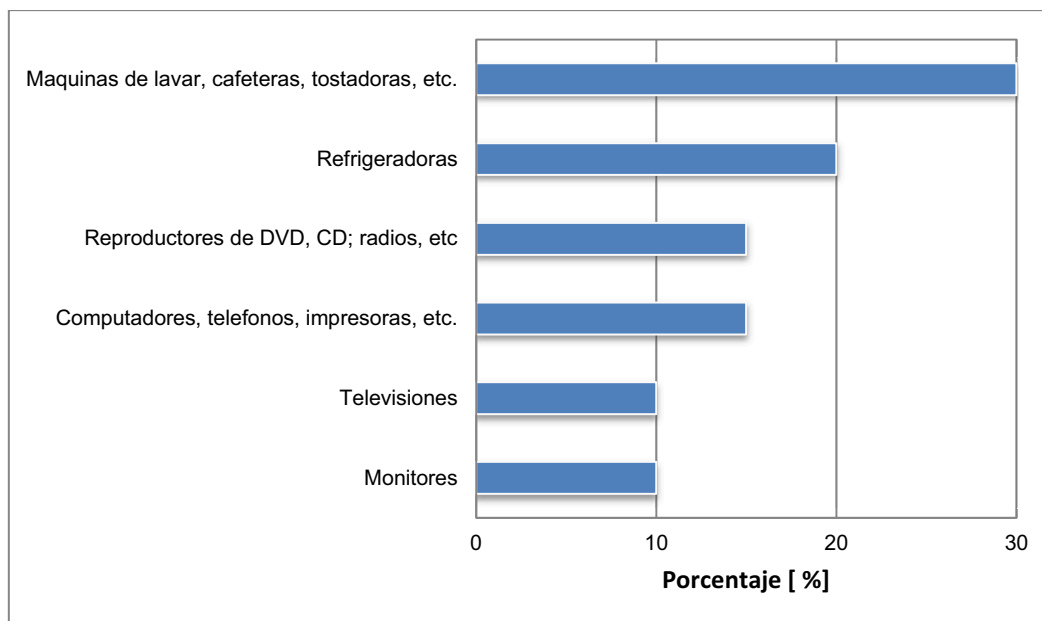


Figura 1.1 Tipo de equipos eléctricos y electrónicos presentes en los RAEE
(Bournay, Heberlein, Bovet, Rekacewicz, y Rizzolio, 2006, p. 22)

Como se aprecia en la Figura anterior, el 50 % de los RAEE están constituidos por los residuos eléctricos (refrigeradoras, máquina de lavar, cafeteras, tostadoras, etc.) cuyo porcentaje de metales preciosos es considerablemente menor al presente en los residuos electrónicos. Los residuos electrónicos al contener en su estructura tarjetas de circuitos impresos (Printed circuit boards - PCB), poseen un contenido considerable de metales preciosos (Bournay, 2006, p. 22).

1.1.3 COMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS ELECTRÓNICOS

Los residuos electrónicos carecen de una composición estándar. La composición de los mismos está dada en función del tipo de aplicación para la cual están diseñados. Generalmente poseen tres tipos de componentes: metales (base, preciosos, etc.), óxidos refractarios y material plástico (Kulandaisamy, Prabhakar, Adaikkalam, Srinivasan y Raghavan, 2003, p. 35). En la Tabla 1.2 se presenta el aporte en peso y en valor de los componentes presente en los residuos electrónicos.

Tabla 1.2 Valor versus distribución del peso para típicos aparatos electrónicos

Componente	% en peso	Valor (£/kg)	Valor intrínseco PCB	
			(£/kg of PCB)	(%)
Au	0,025	14 200	3,55	65,4
Pd	0,010	6 200	0,62	11,4
Ag	0,100	250	0,25	4,6
Cu	16,0	3,30	0,53	9,7
Al	5,0	1,20	0,06	1,1
Fe	5,0	0,10	0,01	0,1
Sn	3,0	8,10	0,24	4,5
Pb	2,0	1,30	0,03	0,5
Ni	1,0	13,20	0,13	2,4
Zn	1,0	1,20	0,01	0,2

^a Valores de los metales basados en la cotización de diciembre 2007 de London Metal Exchange (LME) (Park y Fray, 2009, p. 1153)

Como se puede apreciar en la Tabla 1.2, aunque el aporte en peso de los metales preciosos es inferior al 1 %, su aporte en el valor para el caso de las tarjetas de circuitos impresos, teléfonos celulares y calculadoras es superior al 80 %. Esto permite confirmar la importancia del reciclaje de este tipo de aparatos y componentes electrónicos.

Dentro de los residuos electrónicos, las computadoras descartadas son uno de los equipos más ampliamente gestionados en los sistemas de reciclaje de RAEE, debido a sus cortos periodos de obsolescencia (tiempo de renovación del equipo) y a la amplia utilización de este tipo de equipos a nivel industrial, empresarial y doméstico (Rosales, 2011, p.1). En la Figura 1.2 se presenta la composición general de una computadora.

Como se puede observar en la Figura 1.2, aproximadamente un 12 % en peso de la computadora corresponde a tarjetas electrónicas. Las tarjetas electrónicas o tarjetas de circuitos impresos contienen metales preciosos, metales del grupo del paladio y metales estratégicos como (niobio, tantalio y galio).

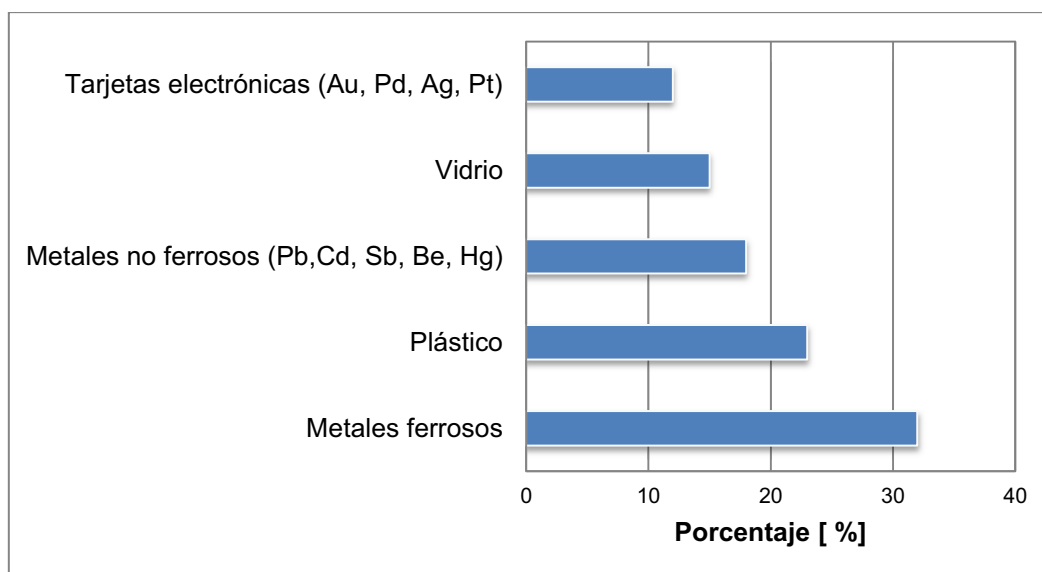


Figura 1.2 Materiales presentes en una computadora
(Baker, Bournay, Heberlein, Harayama, y Rekacewicz, 2004, p. 36)

Una computadora personal contiene en promedio 27,3 g/ton de plata y 6,8 g/ton de oro, lo que permite considerarla como una fuente alternativa de metales preciosos, que permitiría reducir la extracción de estos de fuentes naturales y el gasto energético asociado a la misma (Chancerel et al., 2009, p. 800).

Además de los metales mencionados existe una gran gama de metales presentes en los diferentes elementos electrónicos de una computadora. En la Tabla 1.3 se presentan los componentes de una computadora tipo y la ubicación de mismos.

Tabla 1.3 Componentes de una computadora tipo

Nombre	% Respecto al total	Uso / Emplazamiento
Plástico	22,991	Con elementos orgánicos y óxidos distintos de la sílice
Plomo	6,299	Juntas metálicas, escudo anti radiación/tubo catódico (TC), PCB
Aluminio	14,172	Estructura, conductividad/carcasa, TC, PCB, conectores
Germanio	0,002	Semiconductor/ PCB
Galio	0,001	Semiconductor/ PCB
Hierro	20,471	Estructura, magnetismo/carcasa (acero), TC, PCB
Estaño	1,008	Juntas de metal/PCB, tubo catódico
Cobre	6,929	Conductividad/ tubo catódico, PCB, conectores
Bario	0,032	Tubo de vacío/ tubo catódico

(RECYCLA Chile S.A., 2007, p. 17)

Tabla 1.3 Componentes de una computadora tipo (continuación...)

Nombre	% Respecto al total	Uso / Emplazamiento
Níquel	0,850	Estructura, magnetismo/carcasa (acero), TC, PCB
Cinc	2,205	Pilas, emisor de fósforo/ PCB, tubo catódico
Tantalio	0,016	Condensador/ PCB, alimentación
Indio	0,002	Transistor, rectificadores/ PCB
Vanadio	0,000	Emisor de fósforo rojo/ tubo catódico
Terbio	0,000	Activador de fósforo verde, impurificadora/ TC, PCB
Berilio	0,016	Conductividad térmica/ PCB, conectores
Oro	0,002	Conectividad, conductividad/ PCB, conectores
Europio	0,000	Activador de fósforo/PCB
Titanio	0,016	Pigmento; agente de aleación/ carcasa (aluminio)
Rutenio	0,002	Circuito de resistividad / PCB
Cobalto	0,016	Estructura, magnetismo/ carcasa (acero), TC, PCB
Paladio	0,000	Conectividad, conductividad/ PCB, conectores
Manganeso	0,032	Estructura, magnetismo/ carcasa (acero), TC, PCB
Plata	0,019	Conductividad / PCB, conectores
Antimonio	0,009	Diodos/ carcasa, PCB, tubo catódico
Bismuto	0,006	Agente humectante en película gruesa / PCB
Cromo	0,006	Decoración, endurecedor/ carcasa (acero)
Cadmio	0,009	Pilas, emisor de fósforo glugreen/ carcasa, PCB, TC
Selenio	0,002	Rectificadores / PCB
Niobio	0,000	Elemento soldador / carcasa
Platino	0,000	Conductor de película gruesa / PCB
Mercurio	0,002	Pilas, interruptores/ carcasa, PCB
Arsénico	0,001	Agentes impurificadores en transistores / PCB
Sílice	24,880	Cristal, dispositivos en estado sólido/ TC, PCB

(RECYCLA Chile S.A., 2007, p. 17)

Como se muestra en la Tabla 1.3 existe una gran variedad de metales presentes en un computador, entre los que tenemos metales estratégicos como: indio, rutenio, tantalio, galio, etc. Este tipo de metales recibe este calificativo debido a su limitada presencia dentro de la superficie terrestre. Es importante señalar que también existen cantidades considerables metales pesados como plomo y cobre, estos se encuentran principalmente en los tubos catódicos (TC) y en las tarjetas de circuitos impresos (PCB).

Dentro de las computadoras también se puede encontrar otro metal estratégico como es el niobio (Nb). Este metal es usado en superaleaciones por sus propiedades conductoras y anticorrosivas. Se lo emplea en la fabricación de chip y procesadores. Actualmente la tasa de reciclaje de niobio está en el orden del 20 %, lo que a los componentes electrónicos como una fuente de recuperación alterna con un gran potencial (Tahara, Numata, Yorozu, Hashimoto y Nagasawa, 2000, p. 68; Kooroshy, Korteweg, y de Ridder., 2010, p. 102).

1.1.4 PROBLEMÁTICA E IMPLICACIONES AMBIENTALES

Como se mencionó en la parte inicial de este capítulo, los residuos electrónicos como parte de los residuos sólidos urbanos, han evidenciado un gran incremento durante los últimos años, no solo en países desarrollados sino también en latinoamericana (Boeni, Silva, y Ott, 2008, p. 2). Uno de los factores determinante en este proceso de generación de residuos es el corto tiempo requerido para la renovación de los aparatos electrónicos. Para el caso de las computadoras personales, se considera que a nivel de Sudamérica la tasa de recambio o tiempo de vida útil de las mismas es de aproximadamente 5,4 años (Yu, Williams, Ju y Yang, 2010, p. 3233).

Actualmente más del 27 % de los hogares en Ecuador tienen una computadora, 80 % tiene al menos un teléfono celular y 85,1 % una televisión. Además el Ecuador recibe anualmente cerca de 20 000 toneladas de equipos eléctricos y electrónicos (Rosales, 2011, p.1).

Se estima que la demanda de computadoras personales a nivel mundial será de 387,8 millones de unidades para el 2011 y que para el 2012 tenga un crecimiento del 13,6 %, hasta un total de 440,6 millones de unidades (Garther, 2011, p. 1).

Existen estudios que predicen que antes del año 2018 existirá una mayor cantidad de computadoras obsoletas en los países en desarrollo que en los países desarrollados, debido a que estos últimos exportan estos residuos, ya que esto le

permite ahorrar el costo asociado al correcto reciclaje de los mismos (Yu et al., 2010, p. 3232). El problema se agrava ya que los procesos realizados por el sector informal de reciclaje de RAEE en países en desarrollo, para recuperar metales tales como oro y cobre, han demostrado ser nocivos tanto para las personas que los realizan como para el medio ambiente (Betts, 2010, p. 3204).

Esta generación de RAEE plantea la necesidad de crear alternativas económicas viables y ambientalmente responsables para su manejo. Teniendo como objetivo emular los sistemas de reciclaje de países desarrollados, donde el reciclaje de estos residuos se considera como un negocio rentable, ya que con la tecnología adecuada se puede recuperar todos los componentes valiosos (Chatterjee y Kumar, 2009, p. 893).

Anualmente se exportan cientos de toneladas de residuos electrónicos a países en desarrollo. La exportación de estos residuos se da desde Estados Unidos y algunos países de la Unión Europea. Teniendo como objetivo principal evadir los procesos de reciclaje a los que deben someter los RAEE en dichos países y que presentan un costo mucho mayor que el destinarlos a países en desarrollo. Habitualmente se los exporta como equipos de segunda mano, pero en realidad el porcentaje de equipos no obsoletos es mínimo (Baker et al., 2004, p. 36). En la Figura 1.3 se presentan los países a los cuales se exportan los residuos electrónicos.

Como muestra la Figura 1.3 los principales países a los que se exporta residuos electrónicos son: China, Pakistán e India. El principal problema radica en los ineficientes y altamente perjudiciales procesos de reciclaje que se practican en el sector informal dentro de estos países.



Figura 1.3 Principales países en desarrollo donde se "recicla" residuos electrónicos (Baker et al., 2004, p. 36)

Los procesos más usados para recuperación de metales y componentes de electrónicos de alto valor son: quema de tarjetas de circuitos impresos, desensamblaje manual y remoción de chip electrónicos mediante fusión de puntos de soldadura (Basel Convention, 2011, p. 25).



Figura 1.4 Procesos de quema de cables (a) y desensamblaje manual de residuos electrónicos para recuperaciones de metales (Basel Convention, 2011, pp. 25, 29)

En países de África como Ghana y en otros países de Asia, el proceso de recuperación de cobre a partir de cables está constituido básicamente por la quema de este material a condiciones ambientales, como se ve en la Figura 1.4. Las personas que reciclan esperan a que finalice la quema del plástico para retirar el metal. Un problema asociado a la quema de este tipo de material se debe a la presencia de retardantes de flama bromados que al ser sometidos a temperaturas menores a 1 000 °C producen dioxinas y furanos, compuestos altamente tóxicos (Wäger, Schluep, Müller y Gloor, 2011, p. 628; Basel Convention, 2011, p. 16).

Un problema igual de grave es el proceso de desarmado manual de los residuos electrónicos. Debido a que se realiza en muchos de los casos en forma anti técnica, como se observa en la Figura 1.4, lo que ocasiona un contacto directo con los metales pesados presentes en los RAEE (Basel Convention, 2011, pp. 29). En Tabla 1.4 se presentan un listado de la relación de los componentes presentes en los aparatos electrónicos con los daños que provocan en la salud humana y el medio ambiente.

Tabla 1.4 Relación entre los materiales presente en los aparatos electrónicos y el daño que estos pueden provocar en la salud humana y el medio ambiente

Material	Daño Potencial a la Salud Humana	Daños Potenciales al Medio Ambiente
Ba	Edema cerebral, debilidad muscular, aumento de la presión sanguínea daño hepático.	El Bario permanece en la superficie del suelo o en los sedimentos de agua. Si organismos acuáticos lo absorben puede acumularse en sus cuerpos.
Be	Las sales del Berilio son tóxicas y la exposición prolongada podría generar cáncer. La Beriliosis ataca los pulmones.	Algunos compuestos de Berilio se disuelven en el agua, pero la mayor se adhiere al suelo
Ca	Daños irreversibles en los riñones y en los huesos.	Bioacumulativo, persistente y tóxico para el medio ambiente.
Cr VI	Reacciones, bronquitis asmáticas y alteraciones en el ADN.	Las células lo absorben muy fácilmente. Tiene efectos tóxicos

(RECYCLA Chile S.A., 2007, p. 44)

Tabla 1.4 Relación entre los materiales presente en los aparatos electrónicos y el daño que estos pueden provocar en la salud humana y el medio ambiente (continuación...)

Material	Daño Potencial a la Salud Humana	Daños Potenciales al Medio Ambiente
Hg	Posibles daños cerebrales y tiene impactos acumulativos	Disuelto en el agua, se va acumulando en los organismos vivos
Ni	Puede afectar a los sistemas endocrinos, inmunológicos y respiratorios	Puede dañar los microorganismos si éstos exceden la cantidad tolerable
Pb	Posibles daños en el sistema nervioso, endocrino y cardiovascular, también en los riñones	Acumulación en el ecosistema. Efectos tóxicos en la flora, la fauna y los microorganismos
Retardantes de flama bromados	Cancerígenos y neurotóxicos. También pueden interferir con la función reproductora	En los vertederos son solubles, en cierta medida volátiles, bioacumulativos y persistentes. Al incinerarlos se generan dioxinas y furanos.

(RECYCLA Chile S.A., 2007, p. 44)

Como se muestra en la Tabla 1.4 los daños potenciales en salud humana y el en medio ambiente son considerables si no se gestiona a los residuos electrónicos de una manera adecuada.

El caso de Latinoamérica presenta grandes diferencia en comparación con Asia y África, ya que aunque no se recibe residuos electrónicos de países desarrollados, la generación de RAEE a nivel local se ha incrementado en los últimos años. Un ejemplo de esto es Chile, donde se estima que la cantidad de computadores, monitores y pantallas de cristal líquido (LCD) obsoletos se incrementara de 10 000 toneladas en el año 2010 hasta 20 000 toneladas para el año 2020 (Steubing, Böni, Schlupe, Silva y Ludwig, 2010, p. 473). Esto permite evidenciar la importancia de desarrollar sistemas de gestión para los RAEE en nuestra región.

Existen algunas empresas gestoras de residuos electrónicos a nivel de América Latina, cuyo proceso de reciclaje consiste básicamente en la recolección,

almacenaje, desarmado y exportación de los componentes electrónicos. Actualmente no existe ninguna empresa que brinde una gestión integral de estos residuos en la región. Pese a la existencia de este tipo de empresas, predomina el desconocimiento sobre la correcta gestión de los RAEE y un gran porcentaje de este tipo de residuo es destinado a rellenos sanitarios, generándose lixiviados altamente contaminantes ya que estos contienen metales pesado y retardantes de flama bromados (Boeni et al., 2008, p. 5).

1.2 ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN DE PROCESADORES Y TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

En esta sección se presenta la estructura y composición de los componentes electrónicos empleados en el proceso de investigación. Los procesadores y tarjetas de circuitos impresos de las cuales se tratará en esta sección provienen de computadoras. Para el caso de las tarjetas de circuitos impresos, se consideró para esta investigación a las tarjetas madre o Mainboards.

1.2.1 GENERALIDADES DE LOS PROCESADORES Y TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

Las tarjetas madre son la principal tarjeta de circuitos impresos dentro de las computadoras moderna. En ella se encuentran las conexiones para los diferentes dispositivos periféricos como son: tarjetas de memoria RAM, tarjetas de sonido, discos duros, fuente de poder, etc. Los PCBs poseen la mayor cantidad de chip o circuitos integrados, y por ende la mayor cantidad de metales preciosos (Mueller, 2012, p. 175).

El procesador es un circuito integrado que está constituido por millones de componentes electrónicos. Se lo considera el cerebro de la computadora. Y se encuentra conectado a la tarjeta madre (Mueller, 2012, p. 31).

1.2.2 ESTRUCTURA DE PROCESADORES Y TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

Algunos aspectos de la estructura de los procesadores son similares a la de las tarjetas de circuitos impresos. Sin embargo cada uno presenta características propias, como se detalla a continuación.

1.2.2.1 Estructura de los procesadores

Los la estructura de los procesadores han evolucionado a los largo de la historia, desde aquellos diseñados con un sustrato cerámico hasta los actuales que esta fabricados en un sustrato plástico (Mueller, 2012). En la Figura 1.5 se presenta una imagen de procesadores de sustrato cerámico y plástico.



Figura 1.5 Procesadores de sustrato cerámico (a) y sustrato plástico (b)
(Mueller, 2012, p. 83)

Como se aprecia en la Figura 1.5, los procesadores poseen diferentes dimensiones, sin embargo en la mayoría de estos existe la presencia de componentes similares como son: pines, chips y el o los dados (llamado en inglés die) donde se encuentran los núcleos de procesamiento (Mueller, 2012, p. 83). Esto componentes se muestran en la Figura 1.6.

Como se puede observar en la Figura 1.6 existen procesadores que tiene una tapa de cobre como cubierta de los dados. Actualmente los procesadores de

última generación carecen de pines, estos han sido sustituidos por puntos de conexión recubiertos de oro como agente superconductor.

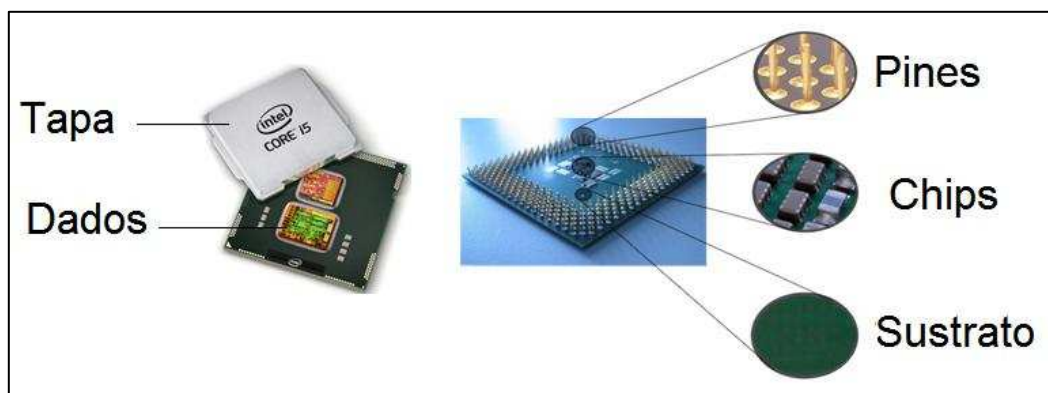


Figura 1.6 Componentes presentes en los procesadores

Para los procesadores de sustrato cerámico existe muy poca información sobre los diferentes componentes dentro de su estructura. Y para los procesadores de sustrato plástico, su estructura es muy similar a la de las tarjetas de circuitos impresos, misma que se detalla a continuación (Mueller, 2012, p. 83).

1.2.2.2 Estructura de las tarjetas de circuitos impresos

Los principales componentes de una tarjeta de circuitos impresos son: un sustrato y una lámina de cobre que sirve como conector para todos los elementos acoplado a la tarjeta. El sustrato le provee de las características físicas (resistencia a la humedad, estabilidad dimensional, resistencia la impacto, etc.) en función del tipo de aplicación para cual está diseñada En la Figura 1.7 se presenta la estructura del sustrato de una tarjeta de circuitos impresos.

En la Tabla 1.5 se muestran los diferentes tipos de sustratos usados en la fabricación de tarjetas de circuitos impresos y su composición. Se puede notar la gran variedad de componentes usados en los sustratos. Es importante mencionar que todos los sustratos tipos FR poseen retardantes de flama bromados, lo que ocasiona que se considere residuos peligroso a las tarjetas de circuitos impresos fabricadas con ese sustrato (Khandpur, 2006, p. 262).

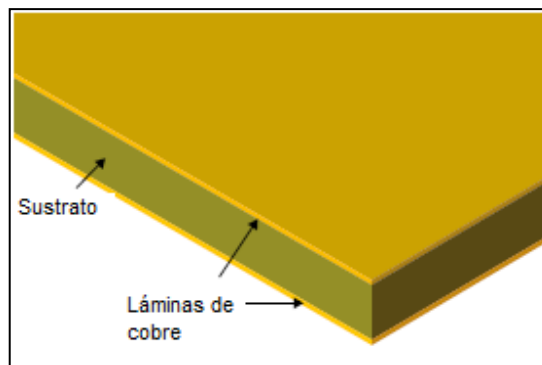


Figura 1.7 Estructura de un sustrato de tarjeta de circuito impreso de doble lado con revestimiento de cobre
(Mitzner, 2009, p. 3)

Tabla 1.5 Tipos de sustratos de tarjetas de circuitos impresos y su composición

Tipo	Composición
XXXPC	Papel/compuestos fenólicos
FR-2	Papel/compuestos fenólicos
FR-3	Papel/resina Epóxica
FR-4	Fibra de vidrio/resina Epóxica
G-3	Fibra de vidrio/resina Epóxica
G-5	Fibra de vidrio/melamina
G-9	Fibra de vidrio/melamina
G-10	Fibra de vidrio/resina Epóxica
G-11	Fibra de vidrio/resina Epóxica
G-30	Fibra de vidrio/poliamida

(Khandpur, 2006, p. 262)

En función de la aplicación, las tarjetas están constituidas por más de un sustrato denominado núcleos o plataforma C. Estos núcleos son sustratos rígidos y están constituidos por resina Epóxica totalmente curada. En la Figura 1.8 se muestra la estructura de una tarjeta de circuitos impresos multicapa.



Figura 1.8 Estructura de una tarjeta de circuitos impresos multicapa
(Mitzner, 2009, p. 3)

Además de los sustratos y las láminas de cobre presentes en la estructura de las tarjetas de circuitos impresos, existen elementos electrónicos acoplados a la tarjeta de circuitos impresos. En la Figura 1.9 se muestran componentes pasivos: (i) resistores, (ii) capacitores y componentes activos: (iii) transistores y (iv) circuito integrado, ampliamente usados en las tarjetas de circuitos impresos.

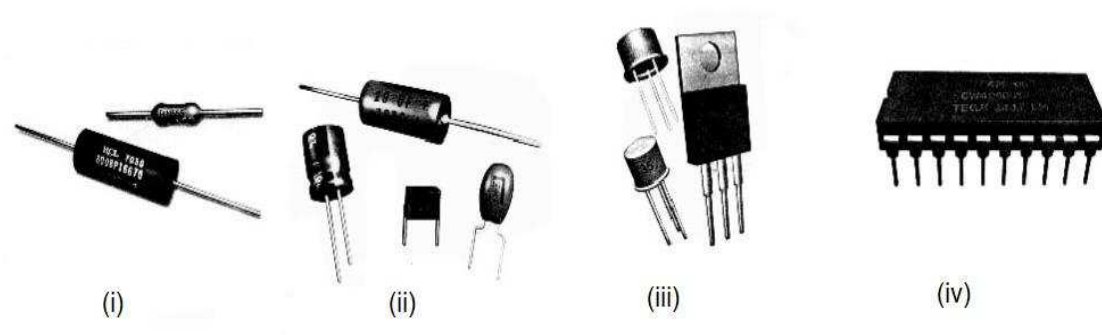


Figura 1.9 Componentes comunes en las tarjetas de circuitos impresos
(Khandpur, 2006, p. 25)

1.2.3 COMPOSICIÓN DE TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

Las tarjetas de circuitos impresos o PCBs (Printed circuit boards), constituyen del 3 al 5 % en peso del total de RAEE, no obstante, la mayor concentración de metales preciosos y metales estratégicos se encuentran dentro de este componente electrónico. Las concentraciones de metales preciosos superan en más de 10 veces que la presente en minerales de alta ley (Chatterjee y Kumar, 2009, p. 898; Li, Lu, Guo, Xu y Zhou, 2007, p. 1995).

Las tarjetas de circuitos impresos están contribuidas por tres componentes principales: metales en un 40 %, cerámico en un 40 % y material plástico en un 30 % (Williams, 2010, p. 109). En la Tabla 1.6 se presentan los materiales más importantes en la composición de las tarjetas de circuitos impresos.

Tabla 1.6 Composiciones de material representativo de tarjetas de circuitos impresos

Materiales	Composición % peso
Sílice	15–41,86
Óxido de aluminio	6–6,97
Óxidos alcalinos	6–9,95
Titanatos, mica, etc.,	3
Polietileno	9,9–16
Polipropileno	4,8
Poliésteres	4,8
Resina Epóxica	4,8
Policloruro de vinilo	2,4
Politetrafluoroetileno	2,4
Cu	10–26,8
Al	1,33–4,78
Pb	0,99–4,19
Zn	0,16–2,17
Ni	0,28–2,35
Fe	1,22–8,0
Cu	10–26,8
Au	80–1 000
Pt	4,6–30
Ag	110–3 301
Pd	10–294

(Williams, 2010, p. 110)

Como se observa en a Tabla 1.6, la concentración de la mayoría de componentes es muy amplia, debido principalmente por las diferencia entre los modelos y años de fabricaciones de este tipo de componente electrónico.

1.3 TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DE ORO, PLATA Y COBRE DE TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

Los procesos de recuperación de metales a partir de residuos electrónicos se pueden dividir en dos tipos: hidrometalúrgicos y pirometalúrgicos. Los procesos

hidrometalúrgicos tienen como limitante el número de metales que se puede recuperar y el grado de pureza obtenido al final del proceso. Este tipo de procesos se utilizan normalmente en países en desarrollo y se enfocan en la recuperación de metales preciosos y algunos metales base como, cobre estaño, etc. (Cui y Zhang, 2008, p. 228).

Los procesos pirometalúrgicos por otra parte han sido históricamente usados para recuperar metales a partir de residuos electrónicos. Este tipo de procesos se realizan en países desarrollados como Estados Unidos, Canadá, Suecia, Bélgica, Alemania, Japón entre otros (Cui y Zhang, 2008, p. 231)

1.3.1 PROCESOS HIDROMETALÚRGICOS

Dentro de los procesos hidrometalúrgicos, la cianuración, lixiviaciones ácidas y básicas son algunas de las alternativas de recuperación de oro, plata y cobre de los residuos electrónicos.

1.3.1.1 Cianuración

La cianuración ha sido tradicionalmente el proceso más usado para la recuperación de oro y plata a partir de minerales. Las principales ventajas que presenta este proceso son el relativo bajo costo y su efectividad para disolver oro. Trabajos previos han demostrado la factibilidad de emplear cianuro para la recuperación de oro y plata de los residuos electrónicos (de la Torre, Espinoza, Guevara y Lucion, 2011, p. 5; Espinoza, 2010, p. 139 y Kulandaisamy et al. 2003, p. 36).

El cianuro de sodio, es una de las sales usadas ampliamente con agente lixivante. Esta sal se disocia totalmente en agua y forma iones libre como se muestra en la reacción 1.1.

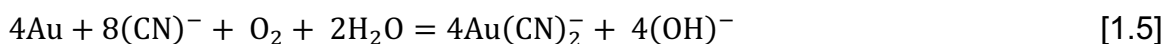


A valores de pH de la solución menores a 10,5, los iones cianuro se hidrolizan en la solución y forman ácido cianhídrico (HCN) e iones hidroxilo (OH⁻). Cuando el pH de la solución alcanza un valor de 9,3, la mitad de cianuro total esta como cianuro libre (capas de lixiviar oro) y la otra mitad está en forma de ácido cianhídrico.

Dentro del proceso de cianuración, la formación de ácido cianhídrico e ion cianato (CNO⁻) son reacciones no deseadas. Debido a que el ácido cianhídrico afecta la salud de los operarios y en caso de encontrarse en concentraciones elevada puede provocar la muerte. Y el ion cianato no disuelve el oro, lo que produce una reducción de la recuperación del mismo en solución. A continuación las ecuaciones 1.2, 1.3 y 1.4 presentan las reacciones de formación de los compuestos antes mencionados (Kulandaisamy et al., 2003, p. 36; Marsden y House, 2006, p. 234).



El proceso de disolución de oro es básicamente un proceso electrolítico, donde se produce una oxidación de oro previo a la disolución del mismo en la solución alcalina de cianuro. El oro se oxida y forma el ion dicianuroauroso [Au (CN)₂]⁻, este ion presenta una gran estabilidad permaneciendo en la solución cuando la concentración de cianuro libre es cero. La ecuación 1.5 representa la reacción anódica propuesta por Elsner, misma que describe disolución de oro (Marsden y House, 2006, p. 241).



En el diagrama de Pourbaix para el sistema Au-H₂O-CN⁻ presentado en la Figura 1.10, se muestra los diferentes productos obtenidos en las reacciones del sistema al variar el potencial y el pH de la solución. Se considera que la reacción de disolución de oro se da en un rango de potencial de -0,4 a -0,7 mV.

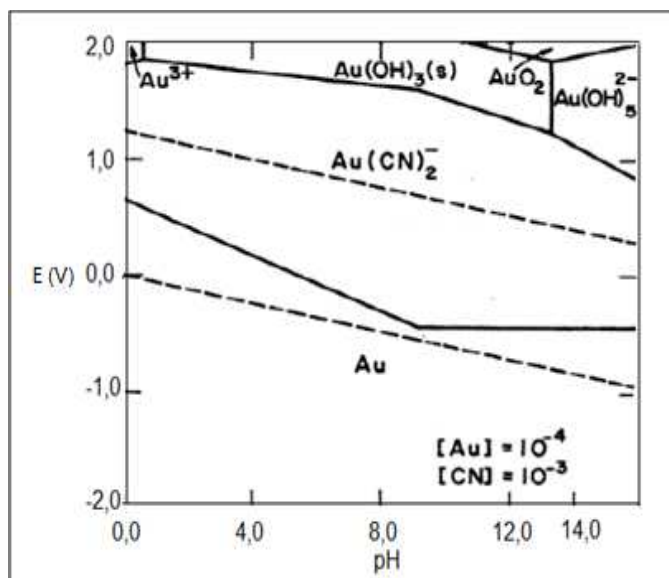


Figura 1.10 Diagrama de Pourbaix para el sistema Au-H₂O-CN⁻ a 25°C
(Marsden y House, 2006, p.239)

En la Figura 1.10 se puede apreciar que la línea de oxidación de oro y reducción de oxígeno se máxima a un valor de pH cercano a 9,5.

La plata metálica tiene un comportamiento similar al oro en soluciones cianuradas. Su proceso de disolución se da según la siguiente reacción anódica.



En la disolución de la plata no existe producción peróxido de hidrógeno como en el caso del oro. (Marsden y House, 2006, p. 241)



En la Figura 1.11 se presenta el diagrama de Pourbaix para el sistema Ag-H₂O-CN⁻ y se puede apreciar la formación del ion [Ag (CN)²⁻ se da mayoritariamente a potenciales positivos.

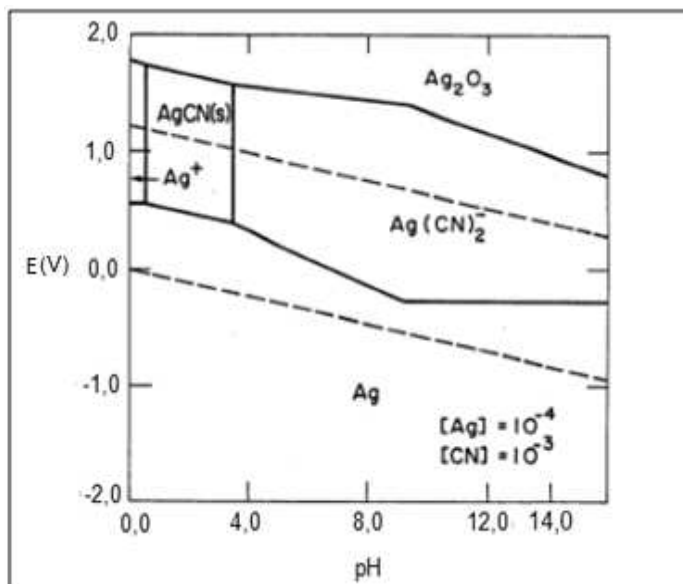


Figura 1.11 Diagrama de Pourbaix para el sistema Ag-H₂O-CN⁻ a 25°C
(Marsden y House, 2006, p. 253)

A nivel industrial, la disolución de cobre en el proceso de cianuración es poco deseada, puesto que al ser el cobre un cianicida fuerte consume una gran cantidad de reactivo y oxígeno disuelto. Consecuentemente se da una disminución en la recuperación de oro y se contamina el producto final.

En la Figura 1.12 se muestra el diagrama de Pourbaix para el sistema Cu-H₂O-CN⁻ y se puede apreciar que el complejo Cu (CN)³⁻₄ es predominante en condiciones de potencial y pH utilizadas en la disolución de oro.

Existen algunas variables que deben ser controladas en el proceso de cianuración para obtener altas tasas de recuperación. Entre las variables más importantes tenemos concentración de cianuro, pH, tamaño de partícula, temperatura entre otras (Cui y Zhang, 2008, p. 235).

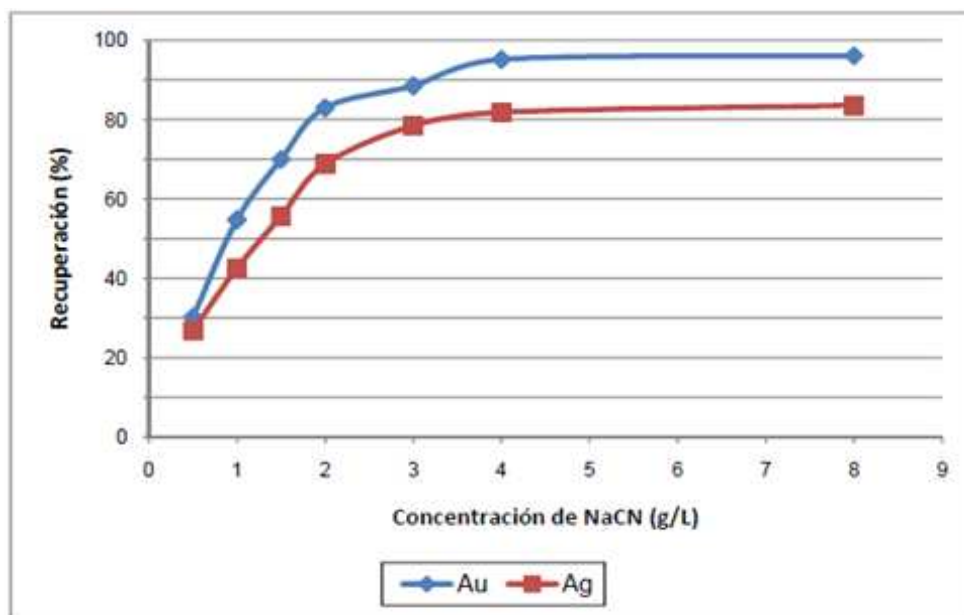


Figura 1.13 Porcentaje de recuperación de oro y plata obtenidos en el proceso de cianuración en función de la concentración de NaCN. Condiciones pH 10,5; tiempo 24 h (Espinoza, 2010, p. 104)

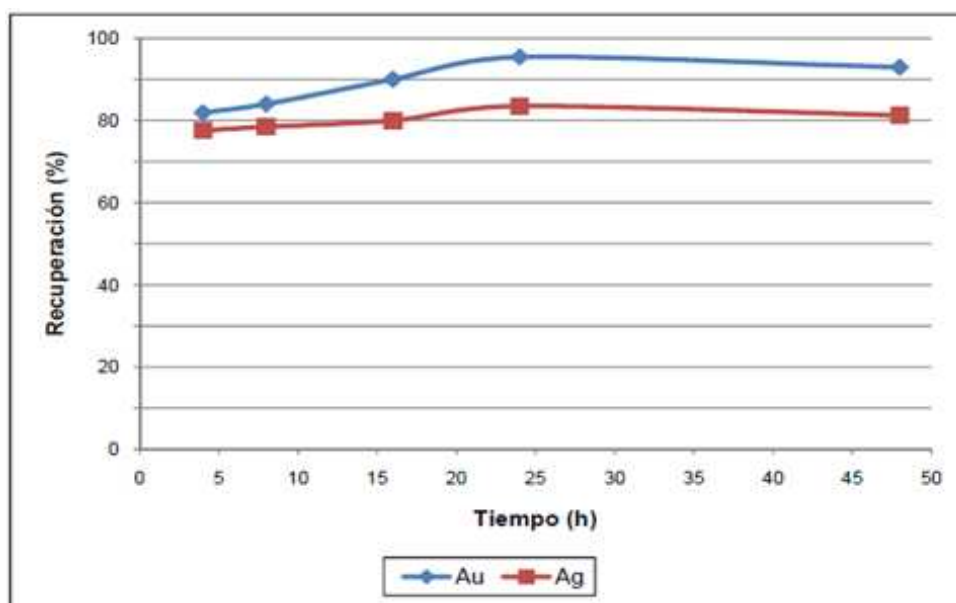


Figura 1.14 Variación de los porcentajes de recuperación de oro y plata obtenidos al variar el tiempo de cianuración. Condiciones: concentración de NaCN 4 g/L, pH 10 -10,5 (Espinoza, 2010, p. 110)

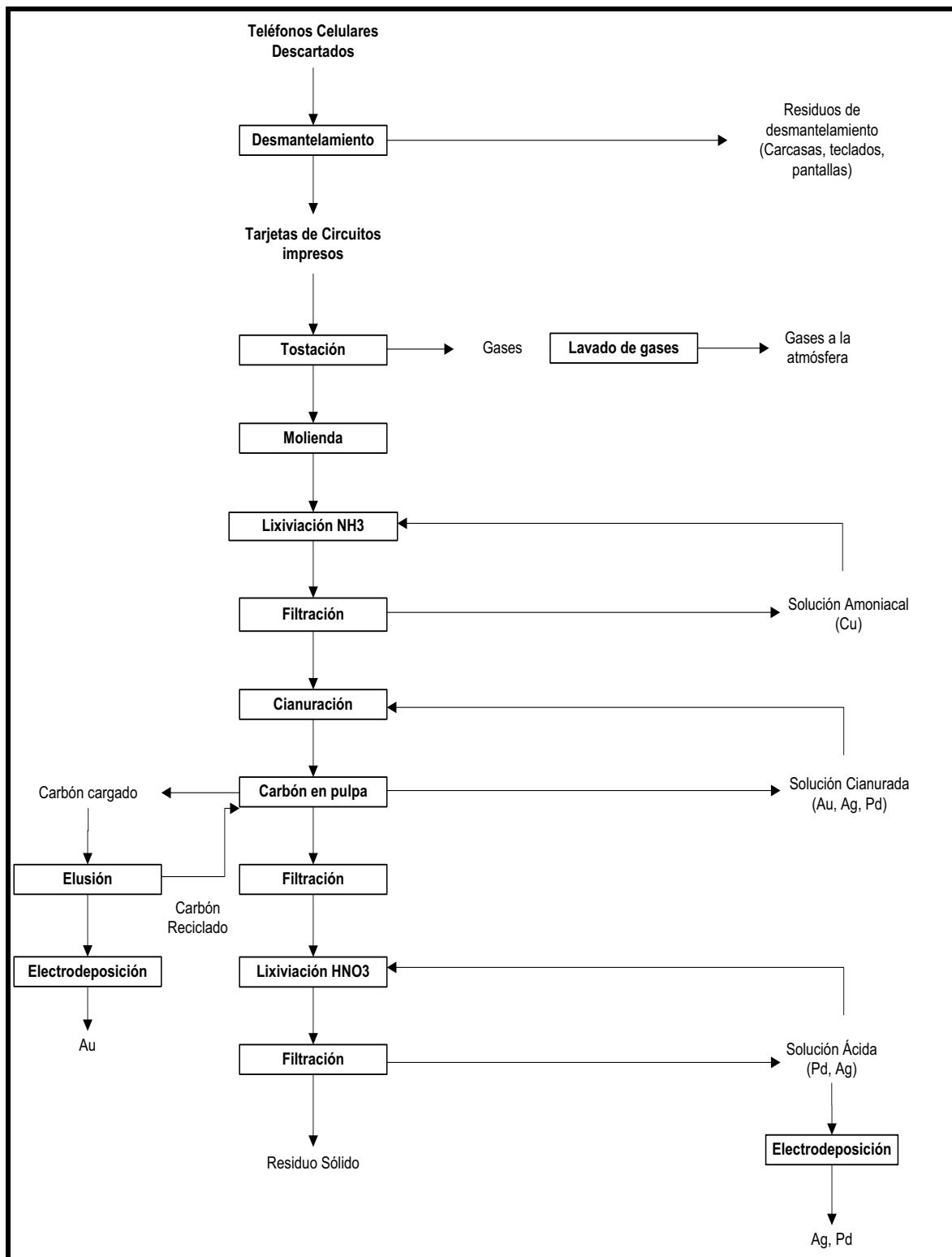


Figura 1.15 Diagrama de flujo del proceso de recuperación de oro, plata y paladio de tarjetas de circuito impreso de teléfonos celulares descartados mediante cianuración agitada (Espinoza, 2010, p. 131)

1.3.1.2 Lixiviaciones ácidas

Los agentes lixiviantes más usado en estudios la recuperación de cobre de tarjetas de circuitos impresos son: ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido nítrico y agua regia. En la Figura 1.16 se presenta el diagrama de flujo de un proceso de recuperación de metales preciosos con lixivitaciones con ácido sulfúrico y clorhídrico.

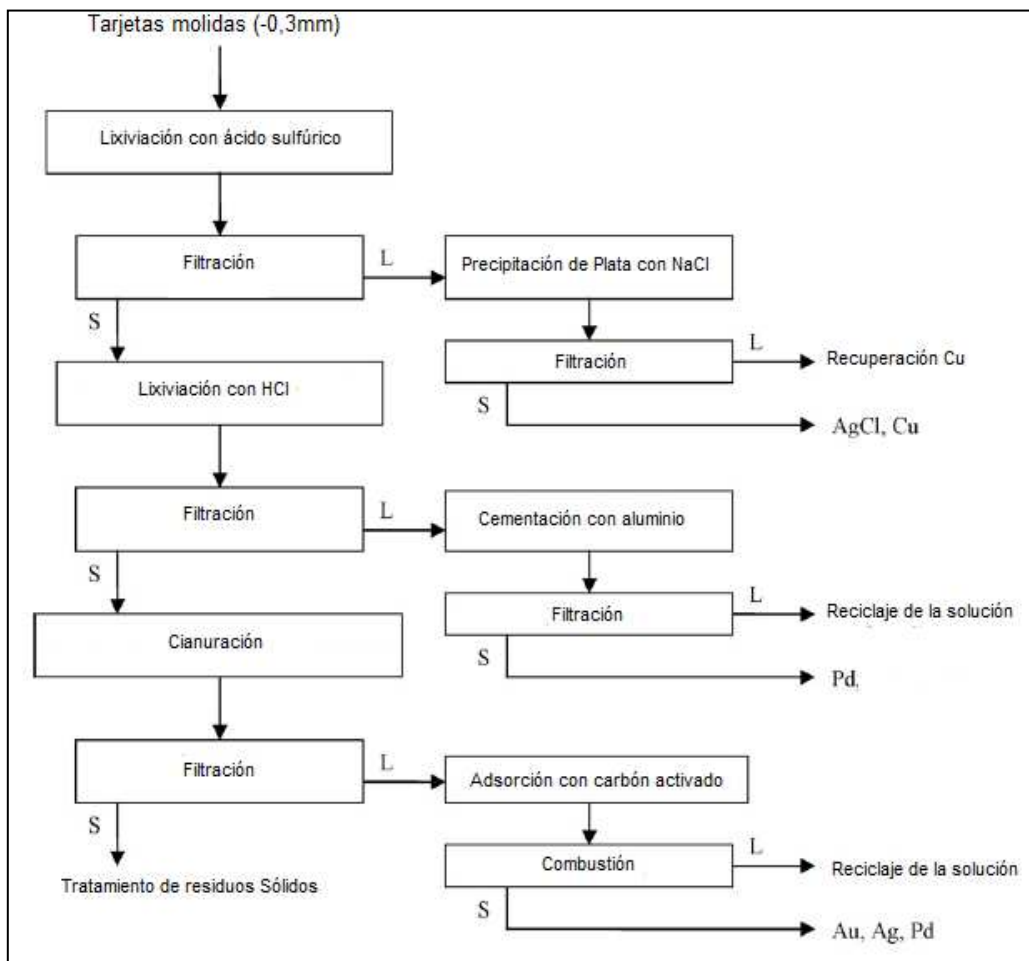


Figura 1.16 Diagrama de flujo para recuperación de metales preciosos propuesta por Quinet
(Quinet *et al*, 2006, p. 19)

Como se aprecia en la Figura 1.16, la reducción de tamaño es un pretratamiento usado para mejorar la remoción de los metales contenidos en las tarjetas de circuitos impresos. Para el proceso en cuestión se trabajó con un tamaño de partícula de 300 μm . El primer agente lixivante usado es el ácido sulfúrico y

permite remover parte de contenido de cobre y plata. Es importante mencionar que existen trabajos que refutan la eficiencia del ácido sulfúrico en la remoción de cobre (Quinet, Proost y Lierde, 2006, p. 22). Según Castro y Martins (Castro y Martins, 2009, p.653), la remoción de cobre obtenida de las tarjetas de circuitos impresos al lixiviar por 120 min con una solución de ácido sulfúrico 2,18 N es menor al 0,01 %.

Luego de la lixiviación con ácido sulfúrico se filtra y se precipita cloruro de plata y cobre con cloruro de sodio. El residuo pasa a una segunda lixiviación con ácido clorhídrico para obtener paladio mediante cementación con aluminio.

El residuo final es sometido a cianuración para recuperar oro, plata y paladio. Para lo cual la solución cargada pasa por un proceso de adsorción con carbón activado. En este sistema se obtiene las siguientes recuperaciones globales: 95 % de oro, 93 % de plata y 99 % de paladio. Se evidencia la que la cianuración presenta una recuperación de oro cercana al 100 % al trabajar con tarjetas de circuitos impresos molidas y pretratadas.

En la Figura 1.17 se presenta uno de los procesos hidrometalúrgicos para la recuperación de oro a proveniente de las industrias de residuos electrónicos y joyería. El proceso consiste de las siguientes etapas: (i) carbonización a baja temperatura y tostación del material, (ii) lixiviación con ácido nítrico para remover plata y otros metales, (iii) lixiviación con agua regia, (iv) extracción selectiva con dietil malonato y (v) separación de oro metálico de la fase orgánica por reducción. Se puede apreciar la generación de agua residual en tres etapas del proceso de recuperación de oro, lo que implica un manejo de los efluentes líquido debido a los remanentes de ácido presentes en los mismos. En este proceso se obtiene una recuperación de 92 % de oro (Cui y Zhang, 2008, p. 241).

Las lixivitaciones básicas se enfocan en la remoción del contenido de cobre de los residuos electrónicos. El objetivo principal es eliminar el contenido de para evitar el consumo de cianuro en el proceso de recuperación oro. Los agentes lixiviantes más usado para la remoción de cobre son: sulfato de cobre (CuSO_4), amoníaco

(NH_3) y sulfato de amonio ($(\text{NH}_4)_2\text{CuSO}_4$). Para la recuperación de cobre se somete a las soluciones cargadas a electrodeposición. Y se puede obtener cobre catódico con un contenido de impurezas menores a 25 ppm (Oishi, Koyama, Alam, Tanaka, y Lee, 2007, p. 88; Ramachandra, 2006, p. 194; Fazlul, Noorzahan, Shamsul y Kamarudin, 2010, p. 4)

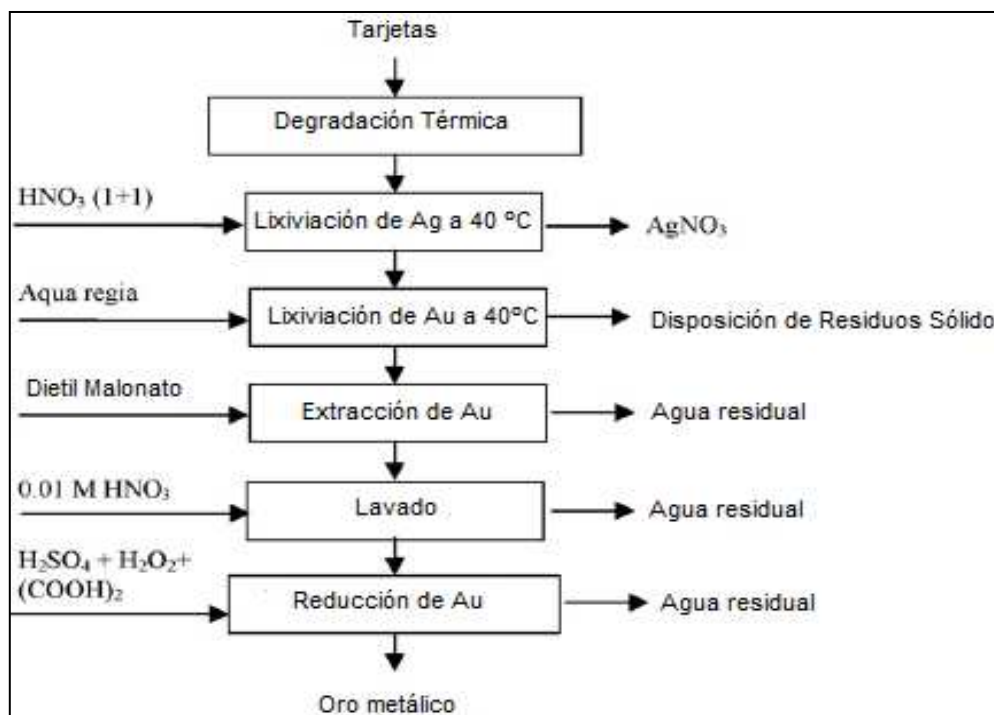


Figura 1.17 Diagrama de proceso hidrometalúrgico para recuperación de oro (Cui y Zhang, 2008, p. 241)

En la Figura 1.18 se muestra la recuperación de cobre, níquel, zinc y hierro en función del tiempo, con una solución de $[\text{NH}_3]= 5\text{M}$, $[(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8] = 0.5\text{M}$ y tarjetas de circuitos impresos de tamaño de partícula menor a 0,06 mm. Se puede apreciar la afinidad que existe entre las soluciones amoniacaes y el cobre, obteniéndose una recuperación del 99 % a las 10 horas de lixiviación. A partir de esta solución se puede obtener cobre electrodepositado con un 99,97 % de pureza.

En la Figura 1.19 se muestra el proceso hidrometalúrgico para la recuperación de cobre mediante la lixiviación con amónico, sulfato de amonio y sulfato de cobre. Los procesos usados para la remoción del resto de metales lixiviados

(plata, níquel, zinc y cobalto) son: cementación para recuperar plata, añadiendo cobre metálico elimina con extracción por solventes y extracción por solventes para recuperar los metales base.

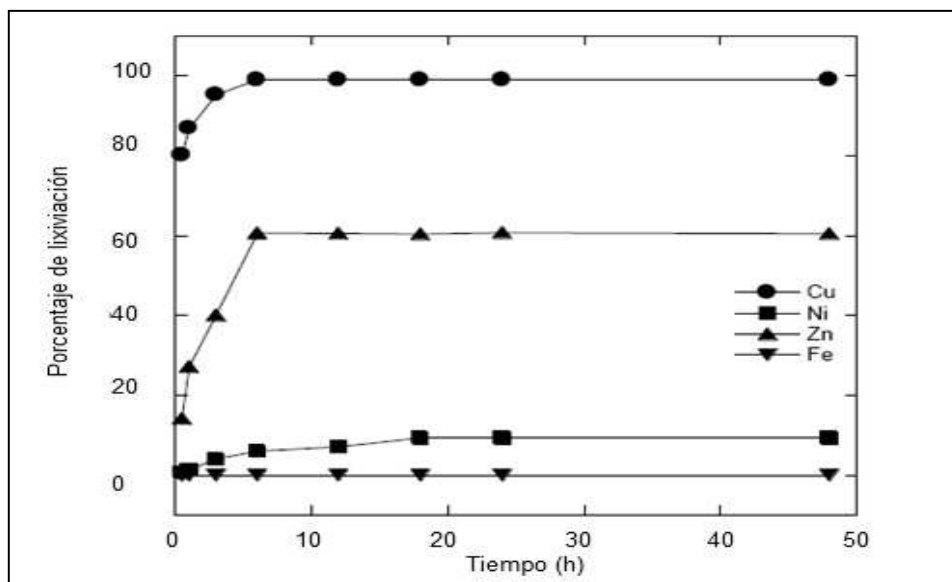


Figura 1.18 Recuperación de metales base en función del tiempo con una solución de $[\text{NH}_3]= 5\text{M}$, $[(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8] = 0.5\text{M}$ (Fazlul *et al.*, 2010)

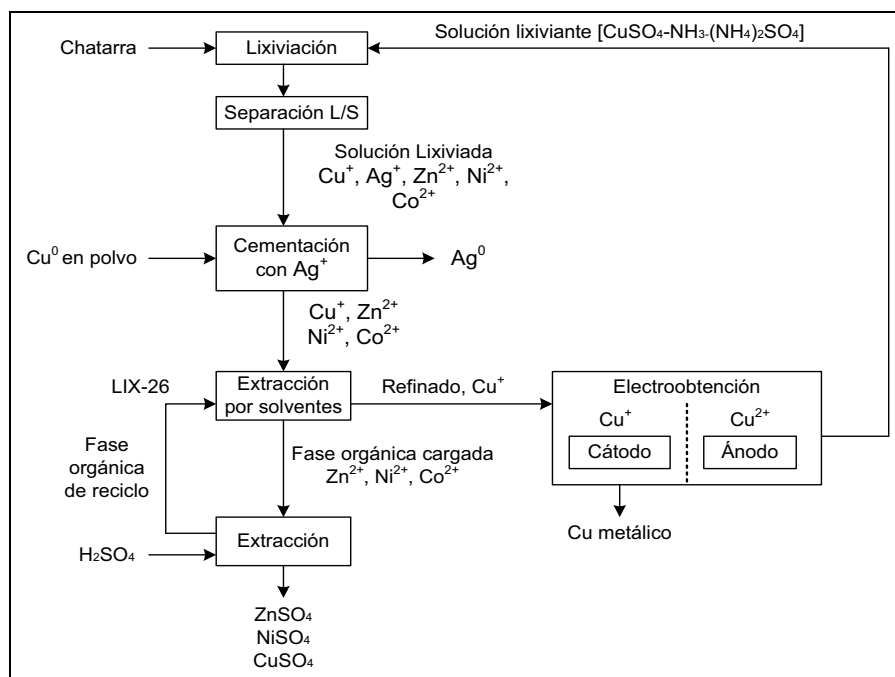


Figura 1.19 Proceso hidrometalúrgico para recuperación de cobre a partir de chatarra electrónica (Ramachandra, 2006, p. 194)

El proceso propuesto por Ramachandra permite obtener cobre de alta pureza después de la etapa de electro-obtención, así como la recirculación de los agentes lixiviantes. Esto aumenta la eficiencia del proceso y reduce el consumo de reactivos requeridos para la recuperación de cobre.

1.3.2 PROCESOS PIROMETALÚRGICO

Los procesos pirometalúrgicos han sido la tecnología tradicionalmente usada para la recuperación de metales a partir de los residuos electrónicos. Una de limitantes de este tipo de proceso es el alto costo de inversión en el desarrollo de tecnología de para la fundición y refinación. Actualmente existen pocas empresas con la capacidad de refinar los metales obtenidos del proceso de reciclaje de residuos electrónicos. Entre esas empresas se encuentran Xtracta en Canadá, UMICORE en Bélgica, Aurubis en Alemania, Boliden en Suecia y DOWA en Japón (Boliden, 2010, p. 18).

El proceso de la empresa UMICORE integra hornos de fundición, procesos de lixiviación y electro-obtención para recuperar 17 metales a partir de los residuos electrónicos. En la Figura 1.20 se muestra el diagrama de flujo de proceso de esta empresa.

Se distinguen las diferentes etapas de los procesos de refinación, comienza con la fundición de las tarjetas previamente trituradas. El horno trabaja con tarjetas trituradas de tamaño de partícula de 5x5 mm y se inyecta aire enriquecido con oxígeno, combustible y carbón como agente reductor para la fundición.

Después del proceso de fusión los metales se dividen en dos corriente. Los metales preciosos se disuelven en el cobre fundido y forman un bullón de cobre. Y los metales base se colectan en una escoria de plomo.

El bullón de cobre pasa a un proceso de lixiviación en ácido sulfúrico y electro-obtención. Como resultados se obtienen cobre metálico y una solución cargada de

1.4 TÉCNICAS DE RECUPERACIÓN DE NIOBIO DE MINERALES

El niobio es un metal refractario que presenta excelentes propiedades conductoras y anticorrosivas, su temperatura de fusión es de 2 468 °C. Debido a sus propiedades anticorrosivas el niobio es resistente a la mayoría de ácidos orgánicos e inorgánicos, a excepción del ácido fluorhídrico (HF) a temperaturas superiores a los 100 °C (Habashi, 1997, p. 1407).

1.4.1 PROCESO CONVENCIONAL

Para el proceso convencional de recuperación de niobio las materias primas usadas son la columbita (FeNb_2O_6), tantalita ($(\text{Fe},\text{Mn})\text{Ta}_2\text{O}_6$), pirocloro ($(\text{Na},\text{Ca})_2\text{Nb}_2\text{O}_6(\text{OH},\text{F})$) y escoria de estaño con presencia de niobio. En la Figura 1.21 se presenta el diagrama de flujo para el proceso de recuperación de niobio.

Como se muestra en la Figura 1.21, el proceso de recuperación de niobio a partir de columbita, tantalita y escoria de estaño consiste en la digestión del mineral con ácido fluorhídrico y sulfúrico a temperaturas superiores a los 100 °C. Se realiza una separación por solventes con metil isobutil cetona (MIBK) y tributil fosfato (TBP). Se usa hidróxido de amonio y agua para precipitar el óxido de niobio de la fase cargada. Una vez obtenido el óxido de niobio se lo somete a reducción carbotérmica o aluminotérmica para obtener niobio crudo.

Para el caso de mineral pirocloro cambian las etapas del proceso. No se realiza una digestión ácida sino que se da un proceso de cloración, en el cual se añade una corriente de cloro gaseoso, después de este proceso se da una separación, obteniendo pentacloruro de niobio. Se realiza una reducción con magnesio y una destilación al vacío para obtener niobio crudo. Finalmente se somete a una fusión con haz de electrones para obtener niobio purificado.

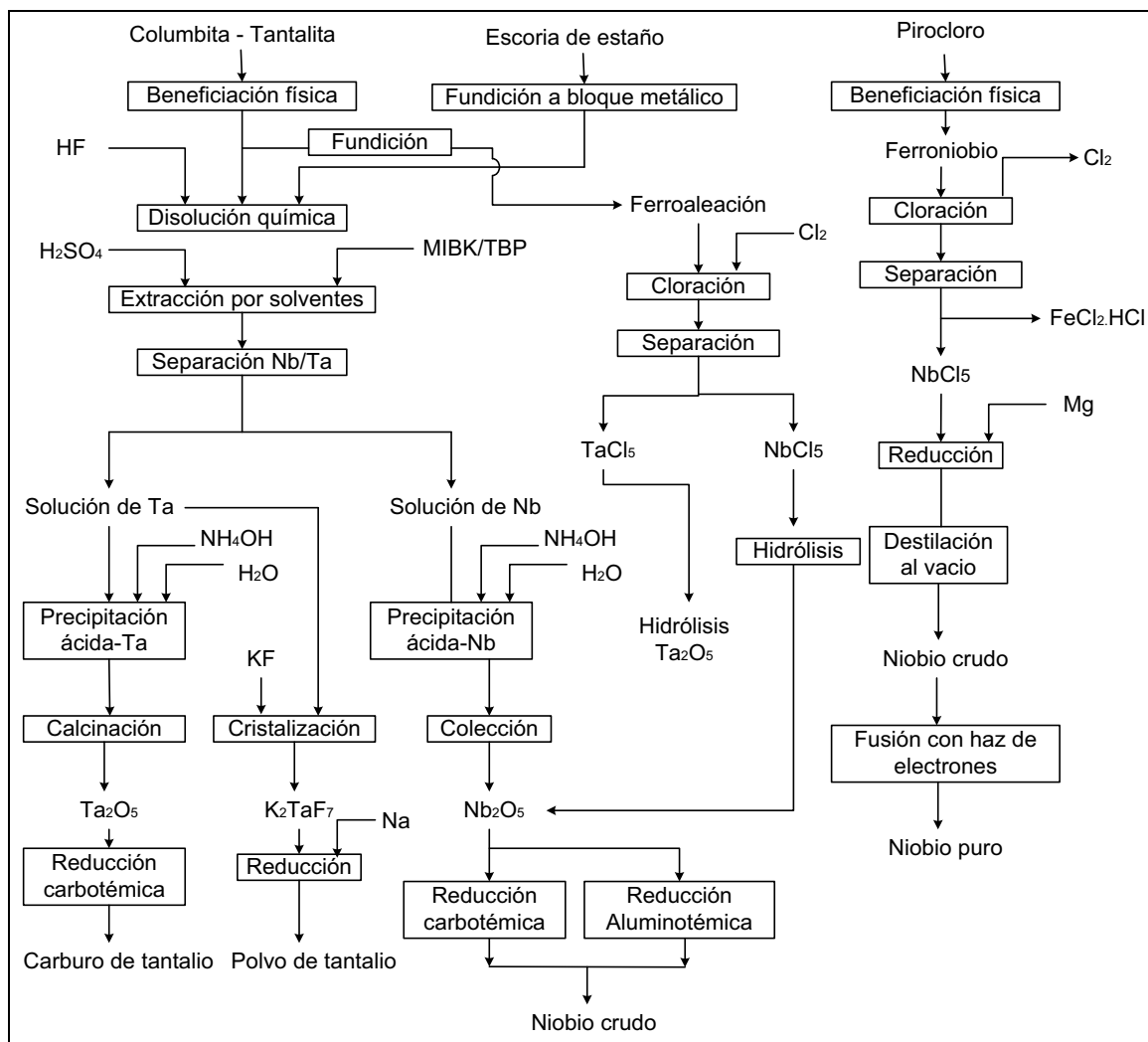


Figura 1.21 Diagrama de proceso de recuperación de niobio
(Gupta, 2003, p. 528)

1.4.2 LIXIVIACIÓN BÁSICA

Para el caso de minerales de niobio y tantalio de baja ley (baja concentración) se han investigado mecanismos alternativos a la digestión ácida o la cloración. Uno de ellos es la lixiviación con hidróxido de potasio (KOH). En la Figura 1.22 se muestra el diagrama de proceso de recuperación de niobio con KOH.

Como se aprecia en la Figura 1.22 se requiere una mineral pretratado, por lo que se debe modificar la relación entre la concentración de niobio y tantalio hasta alcanzar un valor de 2,33:1. Luego este mineral es sometido a descomposición

con hidróxido de sodio, manteniendo una relación KOH a mineral de 2:1. La reacción se da durante 60 minutos a 400 °C. Obteniéndose una recuperación del 95 % de niobio y 94 % de tantalio aproximadamente.

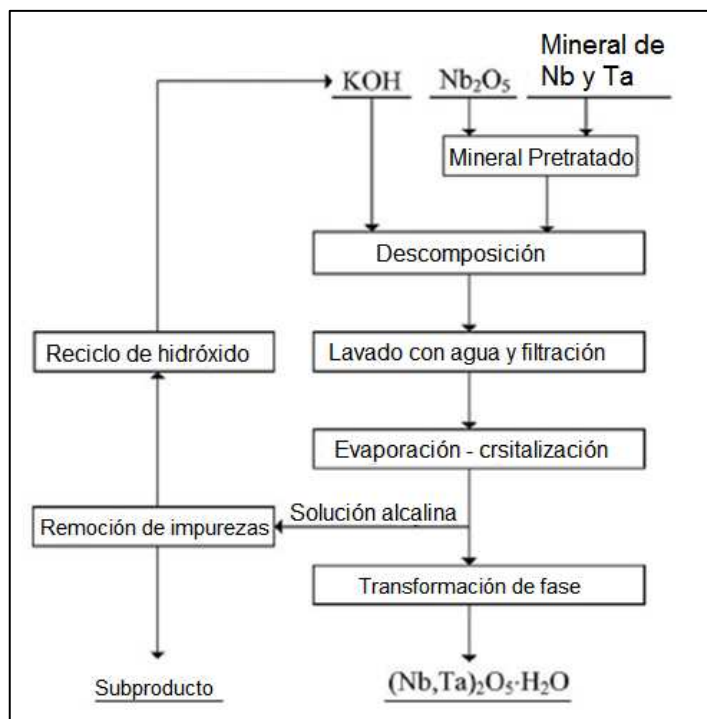


Figura 1.22 Diagrama de proceso de recuperación de niobio con KOH
(Wang, Zheng, Xu y Zhang., 2009, p. 220)

2. METODOLOGÍA

El presente proyecto de investigación tuvo como objetivo recuperar oro, plata, cobre y niobio (metales de interés) de procesadores y tarjetas de circuitos impresos mediante el proceso de cianuración en columna. Se evaluó pretratamientos como reducción de tamaño, lixiviación básica y lixiviación ácida. A continuación, se presenta la metodología experimental utilizada.

Se realizó la caracterización física de los procesadores y las tarjetas de circuitos impresos con microscopía electrónica de barrido, con un equipo Tescan con analizador Rayos X Quantax (EDX).

Para la caracterización química se sometió a las muestras de procesadores y tarjetas a un proceso de tostación oxidante para eliminar la parte plástica del material y se redujo de tamaño ($d_{80} \approx 130 \mu\text{m}$). Se realizó el análisis de los metales preciosos por ensayo al fuego y disgregación ácida, el material disgregado se analizó por espectrofotometría de absorción atómica con un equipo de Espectrofotometría, modelo AAnalyst 300. Para el caso del cobre se realizó disgregación ácida y análisis por espectrofotometría de absorción atómica.

Inicialmente se realizó ensayos de cianuración directa para verificar la factibilidad de usar al cianuro como agente lixivante para la recuperación de los metales de interés.

Se realizó ensayos de permeabilidad con diferentes granulometrías de procesadores molidos. Una vez seleccionado el rango de tamaño, se realizaron ensayos de cianuración en columna a los procesadores con lixivaciones básicas y ácidas como pretratamientos. Se usó como agentes lixivantes ácido sulfúrico, amoníaco, hidróxido de sodio y una mezcla de amoníaco - sulfato de amonio. El objetivo de realizar éstos tratamientos preliminares fue determinar la contribución de los mismos en la recuperación de los metales de interés y la remoción de metales base como hierro y níquel.

Los parámetros de concentración de cianuro y pH empleados en esta investigación fueron tomados de la tesis “RECUPERACIÓN DE METALES DE LAS TARJETAS DE CIRCUITO DE CELULARES DESCARTADOS” realizada por el Ing. Sebastián Espinoza (2010). Este trabajo determinó el flujo de lixiviante y el tiempo de cianuración para su aplicación conjunta en el proceso de lixiviación en columna. Una vez definidas las condiciones anteriormente mencionadas se realizó un ensayo de cianuración en columna en circuito cerrado con tarjetas de circuitos impresos como materia prima. El circuito cerrado consta de la siguiente secuencia: (a) cianuración en columna, (b) adsorción en carbón activado en columna, (c) recirculación de la solución. En la Figura 2.1 se presenta un esquema de la metodología usada en este trabajo.

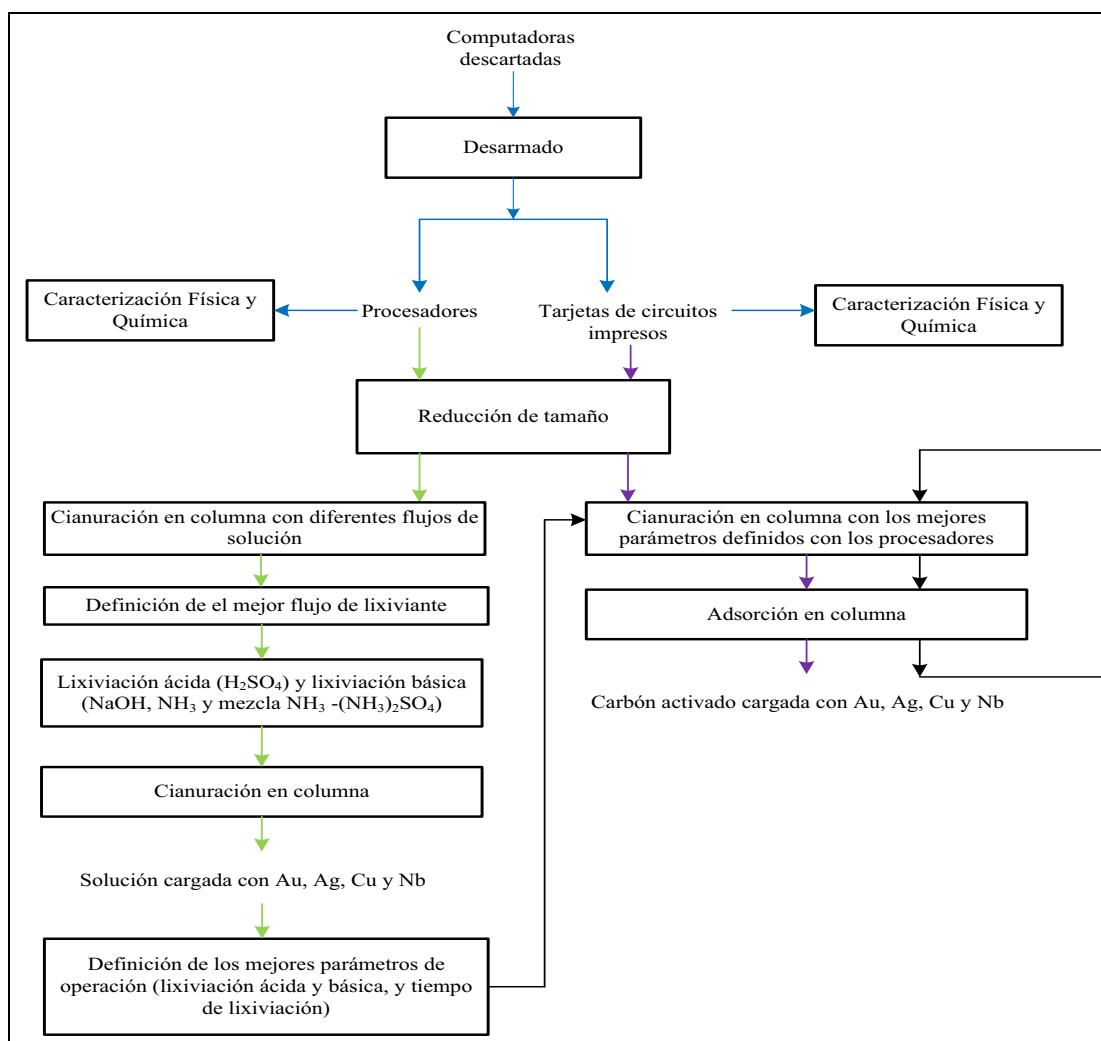


Figura 2.1 Metodología empleada para la recuperación de los metales de interés de procesadores y tarjetas de circuitos impresos

2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE PROCESADORES Y TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

En la presente investigación se utilizaron procesadores y tarjetas de circuitos impresos de computadoras descartadas. Debido a que estos componentes provienen de diferentes tipos de computadores poseen diversos tamaños, para el caso de los procesadores entre 3,7 a 4,9 cm de lado y entre 4 a 7 mm de espesor, y para el caso de la tarjetas de circuitos impresos las dimensiones varían entre 26,2 a 34,6 cm de largo, entre 19,2 a 23,5 cm de ancho y de 3,3 a 5,1 cm de espesor. En la Figura 2.2 se presenta un ejemplo la materia prima usada en el presente trabajo.

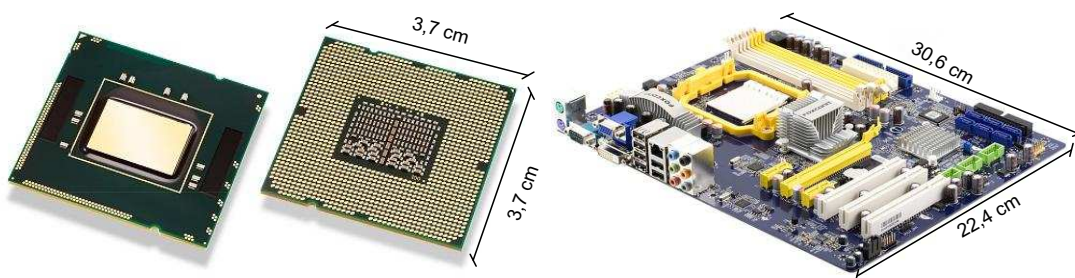


Figura 2.2 Procesador y tarjeta de circuitos impresos

Estos elementos electrónicos fueron sometidos a reducción de tamaño (para facilitar la manipulación), tostación oxidante (para eliminar el contenido de plástico en las muestras) y pulverización (para mejorar la homogeneidad en el proceso de ensayo al fuego), debido a que la red como tratamientos previos a los procesos de caracterización y los ensayos de recuperación de los metales de interés.

2.1.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS PROCESADORES Y TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

Para la caracterización de los procesadores se realizó como pretratamiento un proceso de reducción de tamaño del material en dos etapas. La primera en un molino de martillos y la segunda en un pulverizador. El material molido fue

sometido a caracterización física con microscopía electrónica y caracterización química con absorción atómica.

2.1.1.1 Reducción de tamaño

Los procesadores y las tarjetas de circuitos impresos fueron reducidos de tamaño de dos formas. La primera con el uso de un molino de martillos modelo D6431 marca CONDUX, con capacidad de 500 g, este equipo consta de una tolva de alimentación rectangular de 31,2 cm de longitud y 16,1 cm de ancho; debido a que fue diseñado para molienda de granos, la materia prima fue previamente cortada con sierra para que el tamaño del material a ingresar no sea mayor a 6x6 cm y de esa forma facilitar la molienda.

Adicionalmente este molino consta de una malla metálica con agujeros de 2 mm de diámetro y de un juego de cuchillas metálicas de 5,9 cm de longitud, 2,5 cm de ancho y 1,3 cm de espesor. En la Figura 2.2 y 2.3 se presentan fotografías del molino y del material pulverizado obtenido del mismo.

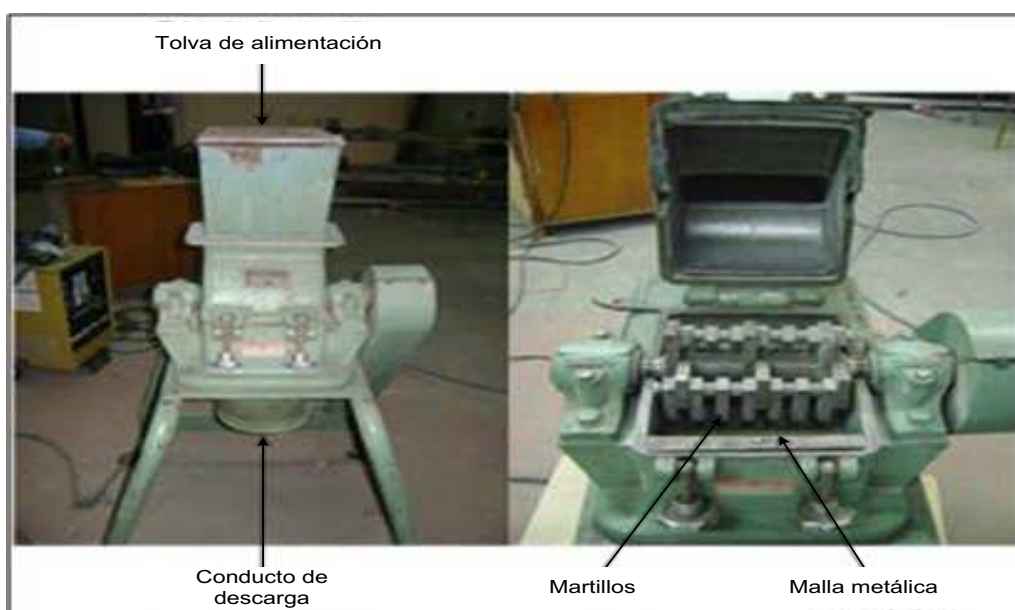


Figura 2.3 Fotografía del molino de martillos usado en la reducción de tamaño (Equipo del Departamento de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional)



Figura 2.4 Fotografía de procesadores después de la reducción de tamaño en el molino de martillos

Para la segunda forma de reducción de tamaño se usó un pulverizador NAEF, cuya capacidad es de 100 g. El pulverizador tiene una cámara cilíndrica de 14 cm de diámetro y una altura de 4,4 cm. Consta de dos partes móviles un cilindro de hueco de diámetro externo 12 cm, espesor de 1,2 cm y un altura de 4,2 cm. La otra es un cilindro de 7 cm de diámetro y altura 4 cm. El pulverizador genera un movimiento centrífugo de los componentes móviles, lo que permite el proceso de reducción de tamaño. Los procesadores y las tarjetas tuvieron previamente un proceso de tostación oxidante en una mufla SEPOR INC desde temperatura ambiente hasta 800 °C durante dos horas. En la Figura 2.5 se presenta las tarjetas pulverizadas respectivamente.



Figura 2.5 Fotografía de una muestra de tarjeta de circuitos impresos pulverizada

2.1.1.2 Determinación del tamaño de partícula de los procesadores y tarjetas de circuitos impresos molidos

Luego del proceso de molienda y pulverización se procedió a la determinación del tamaño de partícula (d_{80}) del material mediante el análisis granulométrico, para lo cual se empleó un sistema de tamices Tyler y un agitador Rot-Tap, con capacidad para 7 tamices y recipiente que cumple la función de fondo. El equipo genera agitación centrífuga y golpes verticales sobre los tamices usados. El procedimiento para determinación del tamaño de partícula se describe a continuación:

- Se cargó en los tamices un peso de 250 g de procesadores posterior a la reducción de tamaño. La numeración y abertura de los tamices usados se muestra en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Tamices empleados para la realización del ensayo granulométrico de los materiales molido

Malla (#) Tyler	Abertura (μm)
3,5	3 350
6	2 000
16	1 180
40	850
80	600
80	180
100	150
140	125
150	104
Fondo	-

- Se tamizó durante 15 min, se apagó el equipo y se retiraron los tamices.
- Se pesó el contenido de cada tamiz y se procedió a repetir el procedimiento hasta completar la cantidad completa de procesadores con previa reducción de tamaño.

- Se procedió a tratar los datos de pesos retenidos en cada tamiz para determinar el tamaño de partícula (d_{80}) de la muestra.

El procedimiento antes descrito se empleó también para la determinación del d_{80} de las tarjetas de circuitos impresos.

2.1.1.3 Caracterización física de los procesadores y tarjetas de circuitos impresos con microscopía electrónica de barrido

Los procesadores y las tarjetas de circuitos impresos fueron analizados mediante microscopía electrónica de barrido con un equipo Tescan con analizador de Rayos X Quantax. La materia prima fue cortada con una sierra para obtener una superficie recta. Se colocaron las muestras en la cámara del microscopio y se procedió a realizar el análisis químico con el programa Esprit 1.8 (Bruker). En la Figura 2.6 se muestra el equipo empleado.



Figura 2.6 Microscopio electrónica de barrido, TESCAN con analizador de rayos x (EDX), empleado en el análisis de elementos

2.1.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE LOS PROCESADORES Y TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

La caracterización química constó de dos procesos: ensayo al fuego para determinación de la concentración de oro y plata, y absorción atómica para determinación de la concentración de los metales base considerados en este trabajo (cobre, níquel y hierro).

2.1.2.1 Determinación de la concentración de oro, plata y niobio en los procesadores y tarjetas de circuitos impresos

Para la determinación de oro, plata y niobio presentes en los procesadores y las tarjetas de circuitos impresos se utilizó el método de ensayo al fuego (oro y plata) y microscopio electrónica de barrido (niobio). El ensayo al fuego permite obtener una aleación de oro, plata y demás metales preciosos mediante el proceso de fusión – copelación. Para esto se mezcló la muestra de material con una carga fundente. Del proceso de fusión para obtuvo dos fases líquidas: una fase escoria constituida principalmente por silicatos y boratos complejos, y una fase metálica de plomo (régulo), el cual colectó los metales de interés, en éste caso oro, plata y niobio.

El régulo fue oxidado en una copela de magnesita y absorbido por ella durante 1 horas en una mufla a 960 °C, se obtiene en su superficie el doré de oro, plata y niobio. La carga fundente utilizada se presenta en la Tabla 2.2 En cada ensayo al fuego se utilizó una masa de muestra de 15 g, tanto para los procesadores como para las tarjetas de circuitos impresos.

La fusión se realizó en un horno de crisol a gas, de 9,74 L de capacidad (25,4 cm de altura y 22,1 cm de diámetro). Para los ensayos se empleó gas licuado de petróleo (GLP). La cámara del horno es de un material refractario y opera a una temperatura aproximada de 1 000 °C. La cámara del horno permite trabajar con crisoles N° 5, mismos que pueden contener 400 g de muestra. Para asegurar que

se produzca una combustión completa del GLP a la entrada de gas está acoplado un ventilado (blower) que adiciona aire al proceso. En la Figura 2.7 se muestra un esquema del horno de crisol a gas usado en este trabajo.

Tabla 2.2 Carga fundente utilizada para la fusión de procesadores y tarjetas de circuitos impresos

Nombre	Formula química	Peso [g]
Bórax	$\text{Na}_2[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4] \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	30
Carbonato de sodio	Na_2CO_3	50
Litargirio	PbO	50
Carbonato de calcio	CaCO_3	15
Nitrato de sodio	NaNO_3	4
Carbón mineral	C	3
Sílice	SiO_2	20

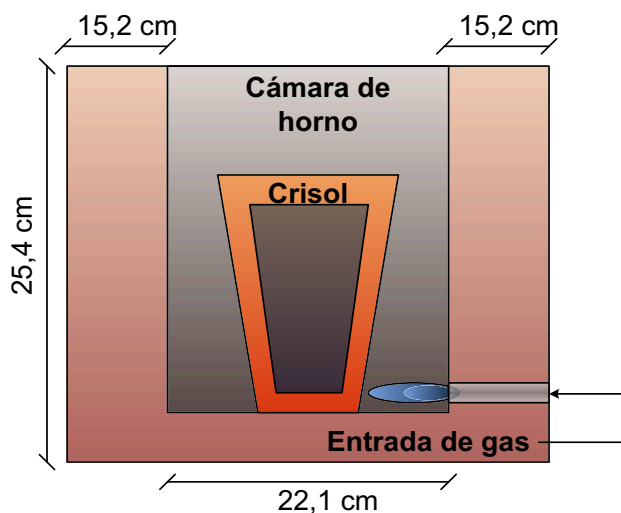


Figura 2.7 Esquema del horno de crisol a gas, empleado en la investigación

Para los ensayos de fusión se realizó el siguiente procedimiento:

- Se pesó 15 g de muestra de procesadores y tarjetas molidas.
- La muestra fue sometida a tostación oxidante en una mufla SEPOR INC durante dos horas desde tempera ambiente hasta 800 °C.
- Se pulverizó la muestra, se mezcló y homogenizó con la carga fundente especificada en la Tabla 2.1.

- Se colocó el material dentro de un crisol cerámico.
- Se introdujo el crisol en la cámara del horno.
- Se realizó la fusión de la muestra a 1000 °C aproximadamente, durante una hora.
- Se retiró el crisol y se colocó la muestra fundida en una lingotera cónica metálica con el fin de recolectar el régulo en la parte inferior.
- Se dejó enfriar y se sacó la muestra de la lingotera.
- Se separó la escoria del régulo martillando durante varios segundos.
- Se colocó al régulo en una copela precalentada a 960 °C por treinta minutos.
- Se introdujo a la copela en la mufla SEPOR INC. cuya temperatura se fijó en 960 °C.
- Se retiró la copela una vez que el plomo se fue completamente absorbido y se dejó enfriar.
- Se analizó la concentración de niobio en el doré mediante microscopia electrónica de barrido con equipo Tescan con el programa Esprit 1.8.
- Se pesó el doré en un balanza Sartorius Research con capacidad de 10 g y precisión de 0,00001 g.
- Se atacó al doré con 10 mL de ácido nítrico grado técnico y 10 mL de agua destilada en un tubo de ensayo calentado a baño maría durante 45 minutos para disolver la plata metálica presente.
- Se descartó la solución y se realizó tres lavados del precipitado presente en el tubo de ensayo con agua destilada (20 mL en cada lavado).
- Se añadieron 4 mL de agua regia en el tubo de ensayo y se calentó a baño maría al mismo hasta que el oro se disuelva.
- Se analizó el contenido de oro en la solución con un equipo de Espectrofotometría de Absorción Atómica, modelo AAnalyst 300, PERKIN ELMER.

En los ensayos en que el doré no adquirió un color negro después del ataque con ácido nítrico se realizó el proceso de encuartación, que se explica a continuación:

- Se descartó la solución de ácido nítrico y agua del tubo de ensayo.
- Se realizó tres lavados, cada uno con 20 mL de agua destilada.

- Se extrajo al doré del tubo de ensayo y se lo coloca en un crisol de porcelana.
- Se secó al doré en una estufa a 110 °C.
- Se pesó nuevamente al doré.
- Se colocó en una copela precalentada a 960 °C por treinta minutos el doré, más una cantidad de plata metálica equivalente a tres veces el peso del doré y una lámina de 10 g de plomo metálico.
- Se introdujo la copela en la mufla y realizó el procedimiento anterior desde la disolución con ácido nítrico.

2.1.2.2 DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE COBRE, HIERRO Y NÍQUEL EN LOS PROCESADORES Y TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

Para la determinación de los metales (cobre, hierro, níquel) en los procesadores y tarjetas de circuitos impresos, se empleó un equipo de Espectrofotometría de Absorción Atómica, modelo AAnalyst 300. La Tabla 2.3 presenta los límites de detección de equipo usado para los metales analizados.

Tabla 2.3 Niveles mínimos detección de metales analizados por Absorción Atómica (Equipo AAnalyst 300)

Metal	Límite de detección [mg/L]
Cobre [Cu]	0,01
Hierro [Fe]	0,01
Níquel [Ni]	0,01

Para el análisis de absorción atómica, se realizó previamente una disgregación ácida de la muestra con el siguiente procedimiento:

- Se pesó 15 g de muestra y se procedió a aplicar tratamientos preliminares de tostación oxidante y pulverización.
- Se homogeneizó a la muestra.

- Se pesó 500 mg de la muestra y se colocó en un vaso de precipitación de 250 mL.
- Se añadieron 10 mL de ácido nítrico de grado técnico y 30 mL de ácido clorhídrico de grado técnico
- Se calentó la muestra conjuntamente con los ácidos en una plancha de calentamiento, hasta que la muestra se disolvió por completo.
- Se vertió la solución en un matraz de 250 mL y se aforó con agua destilada.
- Se analizó la solución aforada mediante absorción atómica, como se especificó anteriormente.

2.2 ENSAYOS DE CIANURACIÓN DIRECTA AGITADA Y EN COLUMNA PARA RECUPERACIÓN DE ORO, PLATA, COBRE Y NIOBIO DE PROCESADORES Y TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

Para los ensayos de cianuración se controló el valor de pH inicial del agua con óxido de calcio, preparando una solución acuosa de óxido de calcio de pH 10. Para asegurar que no exista producción de ácido cianhídrico al inicio de cada ensayo.

2.2.1 DEFINICIÓN DE LOS PARAMETROS PARA LA CIANURACIÓN DIRECTA Y EN COLUMNA DE PROCESADORES Y TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

Con base en una investigación previa realizada en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional sobre recuperación de oro y plata de tarjetas de circuitos impresos realizado por Espinoza (2010), se optó por usar las siguientes condiciones: concentración de cianuro de sodio igual a 4 g/L y un pH de trabajo entre 10,5 y 11,5. Debido a las altas recuperaciones de oro y plata

(96 % y 82 % respectivamente) obtenidas trabajando en lecho agitado con las condiciones antes mencionadas.

Se realizaron pruebas de cianuración en columna con flujos de 1 L/d y 3 L/d para determinar el que presente mayor recuperación de los metales de interés según se detalla en el procedimiento de la sección 2.2.3. El tiempo de operación para los ensayos realizados fue de 15 días.

Para la realización de los ensayos presentados en esta investigación se trabajó con un peso de procesadores y tarjetas de circuitos impresos de 900 y 950 g respectivamente. Estos fueron molidos en un molino de martillos CONDUX-D6431 y separados según su tamaño de partícula (como se detalla en la sección 2.2.2) para las pruebas de cianuración en columna mediante tamizado.

Para el caso de las pruebas realizadas mediante cianuración en columna se efectuaron ensayos de permeabilidad, para determinar el rango de tamaño de partícula que permita el paso de la solución. Esto debido a que el plástico presente en las muestras tiene propiedad de impermeabilizar el lecho si se trabaja con tamaños de partículas muy pequeños (menores a 180 μm). El procedimiento se detalla en la sección 2.2.2.

2.2.2 DETERMINACIÓN DEL RANGO DE TAMAÑO DE PARTÍCULA A USARSE EN EL PROCESO DE CIANURACIÓN EN COLUMNA

La composición de las tarjetas de circuitos impresos difiere a la de los minerales usualmente empleados en cianuración en columna, ya que contiene 30 % de material plástico (Williams, 2010, p. 109). Por esa razón se realizaron ensayos de permeabilidad para determinar el rango de tamaño de partícula que permita el paso de la solución cianurada. El procedimiento seguido se detalla a continuación.

- Se pesó 50 g de muestra de las diferentes granulometrías (6680 μm , 3350 μm , 1180 μm , 425 μm , 180 μm , 104 μm y <140 μm) separadas en el proceso de tamizado.
- Se colocó en una columna de vidrio de 5,0 cm de diámetro y 22,0 cm de longitud.
- Se añadió 50 ml de agua destilada y se contabilizó 15 min.
- Se comprobó el paso del líquido a través del lecho.

2.2.3 ENSAYOS DE CIANURACIÓN DIRECTA AGITADA PARA RECUPERACIÓN DE ORO, PLATA, COBRE Y NIOBIO DE PROCESADORES

Para el presente ensayo se utilizó una solución de cianuro de sodio de concentración 4 g/L, una cantidad de muestra igual a 50 g de procesadores molidos de una muestra de aproximadamente 1000 g. El procedimiento seguido para el ensayo de cianuración directa agitada se indica a continuación:

- Se pesó 50 g de muestra de procesadores.
- Se colocó la muestra en un vaso de precipitación de 600 mL.
- Se añadieron 500 mL de agua.
- Se colocó el vaso en un agitador mecánico a 500 rpm, como se muestra en la Figura 2.8.

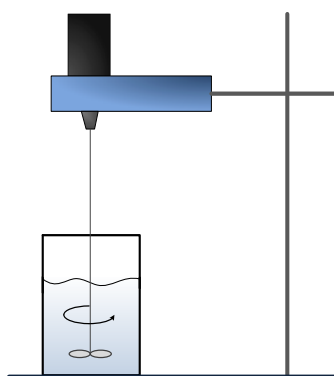


Figura 2.8 Esquema de cianuración en lecho agitado

- Se añadió al vaso el volumen de solución cianurada de 500 ml.
- Se tomaron alícuotas de 5 ml cada una durante las primeras cuatro horas y a la hora 24, para analizar los metales de interés por espectrofotometría de absorción atómica. Y se añadió un volumen de agua igual al retirado después de tomar cada alícuota.
- Se filtró el contenido del vaso con un embudo plástico y papel filtro.
- Se midió el volumen de solución luego de la filtración.
- Se lavó el material retenido en el papel filtro con 150 mL de agua destilada a 70 °C.
- Se midió el volumen de solución de lavado y se tomó una alícuota de 5 mL, para analizar la concentración de los metales de interés por espectrofotometría de absorción atómica.
- Se analizó la recuperación de los metales de interés a partir de la relación entre la cantidad de dichos metales presente en la solución cianurada y la cantidad de los mismos determinada en la caracterización química de la muestra.

2.2.4 ENSAYOS DE CIANURACIÓN EN COLUMNA PARA RECUPERACIÓN DE ORO, PLATA, COBRE Y NIOBIO DE PROCESADORES

Para los presentes ensayos se utilizó una solución de cianuro de sodio de concentración 4 g/L, una cantidad de muestra igual a 50 g de procesadores molidos de una muestra de aproximadamente 1 000 g. El procedimiento seguido para el ensayo de cianuración en columna se indica a continuación:

- Se pesó 50 g de muestra del rango de granulometría que permita el paso de la solución por el lecho.
- Se colocó la muestra en una columna de vidrio de 5,0 cm de diámetro y 22,0 cm de longitud.
- Se conectó la columna en parte superior a un recipiente de plástico de 3 L de capacidad llenos de solución cianurada de concentración 4 g/L a través de una

manguera de polietileno, misma que consta de una válvula de 3 vías, como se muestra en la Figura 2.9.

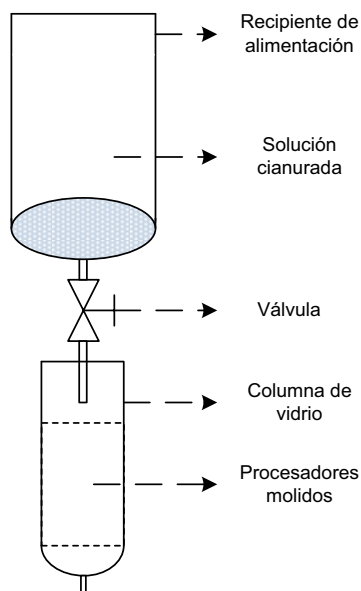


Figura 2.9 Sistema de lixiviación en columna usado en la investigación para la recuperación de los metales de interés de procesadores

- Se reguló la abertura de las válvulas para obtener flujos de 1 L/d y 3 L/d (para determinar el que provee mayor recuperación de los metales de interés, y este usarlo para el resto de ensayos).
- Se tomaron alícuotas de 5 ml al final de cada día de operación durante quince días para analizar los metales de interés por espectrofotometría de absorción atómica. Y se repuso el volumen de solución utilizado en cada ensayo con solución fresca de igual concentración que la solución inicial.
- Se filtró el contenido de la columna con un embudo plástico y papel filtro.
- Se lavó el material retenido en el papel filtro con 300 mL de agua destilada a 70 °C para ambos ensayos.
- Se midió el volumen de solución de lavado y se tomó una alícuota de 5 mL, para analizar la concentración de los metales de interés por espectrofotometría de absorción atómica.
- Se analizó la recuperación de los metales de interés a partir de la relación entre la cantidad de dichos metales presente en la solución cianurada y la

cantidad de los mismos determinada en la caracterización química de la muestra.

Para el caso de las tarjetas de circuitos impresos se trabajó con el siguiente procesamiento:

- Se pesó 500 g de muestra del rango de granulometría que permita el paso de la solución por el lecho.
- Se colocó la muestra en una columna de vidrio de 8,53 cm de diámetro y 60 cm de longitud.
- Se pesó 1 500 g de carbón activado Quimicarb malla 8x20 e índice de yodo 550 (esta cantidad de carbón activado se eligió debido a que es la máxima capacidad de la columna)
- Se conectó las columnas a un sistema de bombeo que constó de dos bombas peristálticas New Brunswick modelo PA-60.
- Se reguló los flujos hacia ambas columnas al valor que permitió las mayores recuperaciones en los ensayos realizados con procesadores.
- Se tomaron alícuotas de 5 ml al final de cada día de operación durante quince días (tanto para la columna de cianuración como para la de adsorción) para analizar los metales de interés por espectrofotometría de absorción atómica. Y se repuso el volumen total de solución utilizado en cada ensayo con solución fresca de igual concentración que la solución inicial
- Se filtró el contenido de la columna con embudos plásticos y papel filtro.
- Se lavó el material retenido en el papel filtro con 3 L de agua destilada a 70 °C para ambos ensayos.
- Se midió el volumen de solución de lavado y se tomó una alícuota de 5 mL, para analizar la concentración de los metales de interés por espectrofotometría de absorción atómica.
- Se analizó la recuperación de los metales de interés a partir de la relación entre la cantidad de dichos metales presente en la solución cianurada y la cantidad de los mismos determinada en la caracterización química de la muestra

En la Figura 2.10 se presenta el sistema de cianuración-adsorción con recirculación de la solución.

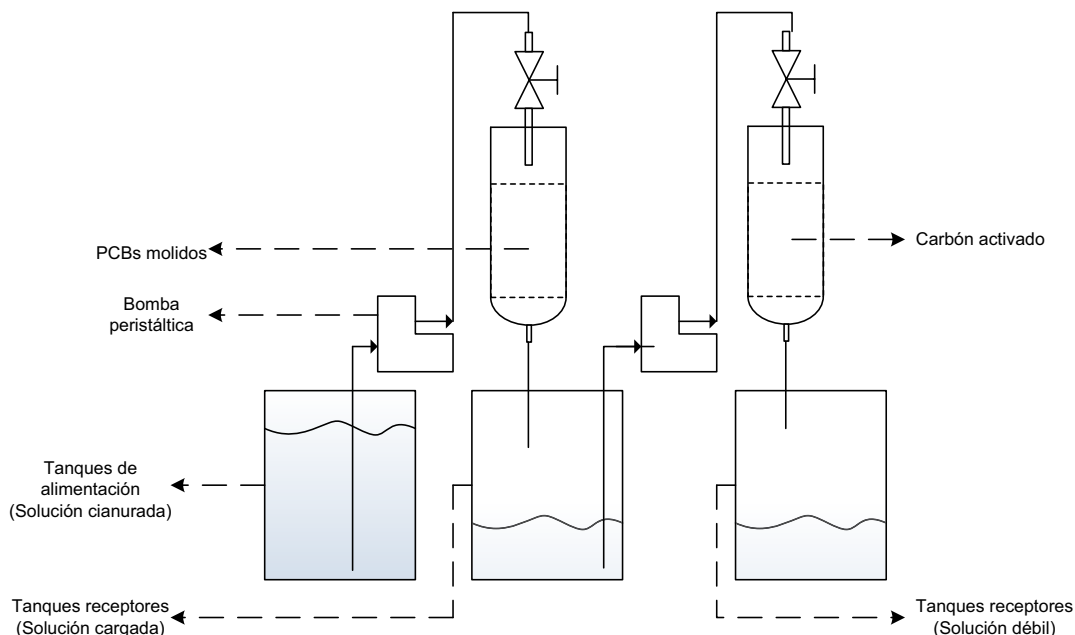


Figura 2.10 Sistema de lixiviación en columna usado en la investigación para la recuperación de los metales de interés de tarjetas de circuitos impresos

2.3 ENSAYOS DE CIANURACIÓN EN COLUMNA CON PRETRATAMIENTOS DE REDUCCIÓN DE TAMAÑO, LIXIVIACIÓN ÁCIDA Y BÁSICA

Para los presentes ensayos se utilizó ácido sulfúrico de pureza de 98 %, amoníaco 25 % en peso, sulfato de amonio e hidróxido de sodio debido a que estos compuestos han sido previamente estudiados en trabajos de investigación para la recuperación de cobre y niobio (Oishi et al, 2007, p. 83; Cui y Zhang, 2008, p. 242; Wang et al., 2009, p. 219).

Se prepararon soluciones de concentración 1 M (1 gmol del agente lixiviante en un litro de agua) con un volumen de solución igual al requerido para un día de operación con el flujo que presentó mayor recuperaciones de los metales de interés en el proceso de cianuración en columna de procesadores Se trabajó con

las siguientes soluciones en circuito cerrado (al finalizar cada día de operación se retornó la solución al proceso):

- Solución de ácidos sulfúrico 1M
- Solución de amoniaco 1M
- Solución de amoniaco y sulfato de amonio 1M (para cada uno de los agentes lixiviantes)
- Solución de hidróxido de sodio 1M.

Las concentraciones anteriormente señaladas fueron escogidas en función de que objetivo de los pretratamientos de lixiviación es determinar la influencia (aporte) en la recuperación de los metales de interés. Se realizó el siguiente procedimiento para las diferentes soluciones utilizadas:

- Se pesó 50 g de muestra (procesadores) del rango de granulometría que permita el paso de la solución por el lecho.
- Se colocó la muestra en una columna de vidrio de 5,0 cm de diámetro y 22,0 cm de longitud.
- Se conectó la columna en parte superior a un recipiente de plástico de 3 L de capacidad, a través de una manguera de polietileno, misma que consta de una válvula de 3 vías, con la solución lixiviante de concentración 1M, el volumen preparado fue el requerido para un día de lixiviación con el flujo que presentó mayor recuperación de los metales de interés en el proceso de cianuración en columna de procesadores,
- Se reguló la abertura de las válvulas para obtener el valor de flujo que presentó mayor recuperación de los metales de interés en el proceso de cianuración en columna de procesadores.
- Se tomaron alícuotas de 5 ml al final de cada día de operación durante ocho días para analizar los metales de interés por espectrofotometría de absorción atómica. Después de cada día de operación se recicló la solución previamente reacondicionada.
- Se lavó el material dentro de la columna con una solución que permita obtener un pH del flujo de salida cercano al valor de 10,5.

Después de estos ensayos se sometieron a las muestras al proceso de cianuración en columna con el siguiente procedimiento:

- Se colocó la muestra en una columna de vidrio de 5,0 cm de diámetro y 22,0 cm de longitud.
- Se conectó la columna en parte superior a un recipiente de plástico de 3 L de capacidad llenos de solución cianurada de concentración 4 g/L a través de una manguera de polietileno, misma que consta de una válvula de 3 vías, como se muestra en la Figura 2.10.
- Se reguló la abertura de las válvulas para obtener flujos de 1 L/d y 3 L/d (para determinar el que provee mayor recuperación de los metales de interés, y este usarlo para el resto de ensayos).
- Se tomaron alícuotas de 5 ml al final de cada día de operación durante quince días para analizar los metales de interés por espectrofotometría de absorción atómica. Y se reponió el volumen de solución utilizado en cada ensayo con solución fresca de igual concentración que la solución inicial.
- Se filtró el contenido de la columna con un embudo plástico y papel filtro.
- Se lavó el material retenido en el papel filtro con 300 mL de agua destilada a 70 °C para ambos ensayos.
- Se midió el volumen de solución de lavado y se tomó una alícuota de 5 mL, para analizar la concentración de los metales de interés por espectrofotometría de absorción atómica.
- Se analizó la recuperación de los metales de interés a partir de la relación entre la cantidad de dichos metales presente en la solución cianurada y la cantidad de los mismos determinada en la caracterización química de la muestra

2.4 DEFINICIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO Y ANÁLISIS ECONÓMICO PRELIMINAR

Para la definición del diagrama de flujo del proceso de recuperación de oro, plata, cobre y niobio que presenta en este subcapítulo se consideró como materia prima únicamente a las tarjetas de circuitos impresos, debido el porcentaje promedio de este tipo de componentes en computadoras descartadas es del 5,77 % (Anexo I), mientras que la concentración de procesadores es menor 0,25 % del peso de un CPU (Anexo I).

Dentro del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) existen algunas compañías que reciclan y venden de manera formal este material, este permite la factibilidad de crear una planta a escala piloto para la recuperación de los metales de interés.

A partir de los mejores resultados obtenidos en las pruebas a nivel laboratorio se definieron los parámetros y las operaciones imprescindibles que permiten las mayores recuperaciones de los metales de interés

El diagrama flujo se lo determinó con base en los datos conseguidos en la caracterización de las tarjetas de circuitos impresos, los parámetros experimentales que permitieron las mayores recuperaciones de los metales de interés y las especificaciones del material de salida del proceso (carbón activado carga y solución carga).

Se tomó como referencia de la alimentación mensual al proceso 1 000 kg/mes, equivalente al 50 % de la producción de una de empresas recicladoras de residuos electrónicos en el DMQ (Consultora Vertmonde S.A.).

Mediante los balances de masa y energía realizados para el proceso se determinó el tamaño de la planta.

Con base en la información técnica recopilada se elaboró una estimación de la inversión y de los costos de operación de la planta. La factibilidad de construcción

de la planta depende de los indicadores económicos del proyecto, se consideraron el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Las ecuaciones se presentan a continuación.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{BN_t}{(1+i)^t} - I_0 \quad [2.5]$$

Donde:

VAN: Valor actual neto de la inversión

*I*₀: Valor de la inversión inicial

*BN*_{*t*}: Beneficio neto del periodo *t*.

i: Tasa de retorno del período

n: Número de periodos considerados

Cuando el Valor actual neto se iguala a 0, *i* pasa a llamarse TIR (tasa interna de retorno). La TIR nos indica la rentabilidad del proyecto.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{BN_t}{(1+TIR)^t} - I_0 = 0 \quad [2.6]$$

El análisis económico se elaboró con un horizonte de 10 años de operación de la planta y una tasa de amortización del 10 %. Adicionalmente se consideraron las siguientes variaciones en los parámetros de operación:

- Alimentación de PCBs del 100, 50 y 25 % del valor estimado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la investigación y el diagrama de flujo de proceso para la implantación las mejores condiciones operatorias en la recuperación de los metales de interés.

3.1 CARACTERIZACIÓN DE PROCESADORES Y TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

La caracterización consta de dos etapas. La primera es la caracterización física, donde se determinó el tamaño de partícula del material molido y el análisis cualitativo de los metales de los procesadores y las tarjetas de circuitos impresos. Y la segunda donde se determinó la contracción de los metales de interés en el material.

3.1.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA

Para la caracterización física se realizó un análisis por microscopía electrónica de barrido. Previamente se identificaron zonas en la cuales se emplea metales precioso para su elaboración debido a sus propiedades conductoras. Se determinaron zonas específicas tanto para el caso de los procesadores como para las tarjetas de circuitos impresos. Finalmente se realizó un análisis químico elemental de la superficie del material con la ayuda del software Esprit 1.8 Bruker.

3.1.1.1 Análisis de procesadores con microscopia electrónica de barrido

La primeras dos imágenes tomadas con el microscopio electrónicos de barrido corresponden a elementos presentes en los procesadores. En la Figura 3.1 se muestra una fotografía del interior de uno de los procesadores y en la Figura 3.3 se presenta una fotografía de un pin (perno) de un procesador.

La primera imagen se tomó con 700 aumentos (700x), 20,0 kV de voltaje y 26 mm de distancia. En la Figura 3.1 se puede apreciar en interior de un chip.

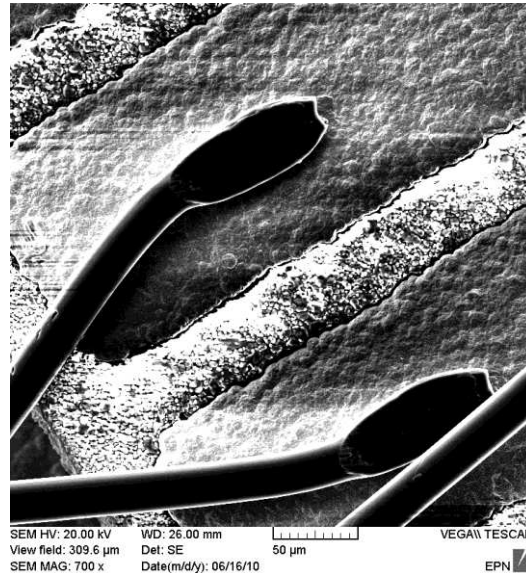


Figura 3.1 Fotografía MEB del interior de un chip de tarjeta de circuitos impresos a 700 aumentos

El análisis químico realizado a esta sección permitió identificar la presencia de oro y niobio en las placas conectoras. Para el análisis químico se usó en programa Esprit 1.8, que permite colorear las diferentes secciones de la imagen asignándoles un color definido para cada uno de los metales encontrados en el análisis. En la Figura 3.2 se puede observar los metales presentes y su distribución dentro del interior del chip. Se puede apreciar que las placas están recubiertas de oro (color rojo) y niobio (color amarillo) y que la superficie que abarcan cada metal es la misma. Los filamentos están recubiertos de aluminio (color azul) y el sustrato sobre el cual están estos componentes está compuesto de oxígeno (color celeste) y aluminio. Se puede apreciar que la ubicación del oxígeno y el aluminio en el sustrato es la misma, lo que permite presumir que se encuentran formando una capa de óxido de aluminio.

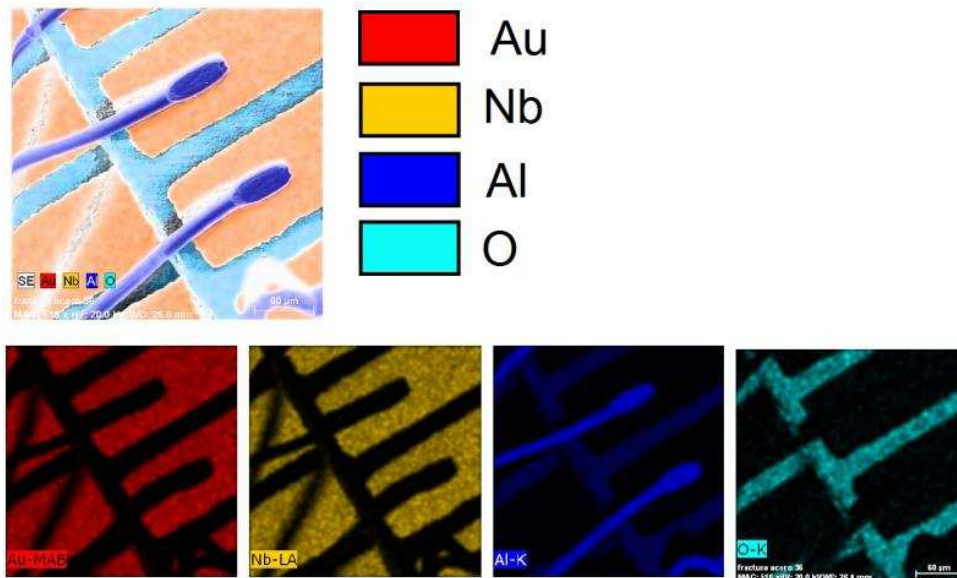


Figura 3.2 Imagen del análisis químico del interior de un chip de tarjeta de circuitos impresos por microscopía electrónica a 515 aumentos

La segunda imagen obtenida con el microscopio corresponde a un pin (perno) de un procesador, los pines son estructuras presentes tanto en los procesadores como en las tarjetas de circuitos impresos (tarjetas madre o mainboards) de computadoras y permiten la transferencia de información hacia el resto de componentes electrónicos. En la Figura 3.3 se presenta una fotografía del pin tomada a 120 aumentos (120x), 20,0 kV de voltaje y 26 mm.

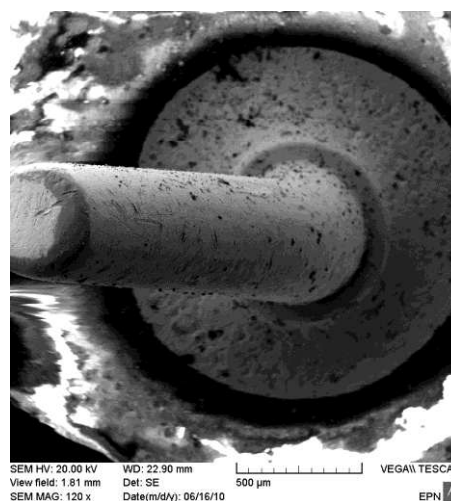


Figura 3.3 Fotografía MEB de un pin de procesador a 120 aumentos

Se puede visualizar un ligero desgaste en la parte superior, en la zona que corresponde a la cabeza del pin, además se realizó el análisis químico semicuantitativo de esta zona para terminar los metales presentes. En la Figura 3.4 se presenta un mapeo de la superficie, en el que se puede observar que la misma está recubierta de una capa de oro (color rojo) y niobio (color amarillo) que al igual que en la Figura 3.2, lo que permite suponer que están como aleación.

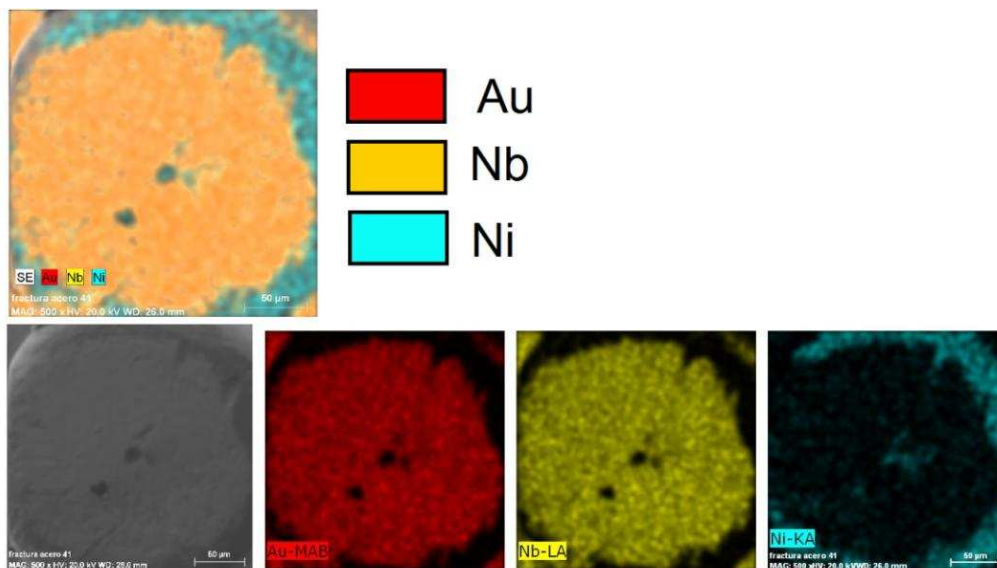


Figura 3.4 Imagen del análisis químico de la superficie de la cabeza de un pin de procesador por microscopía electrónica a 500 aumentos

Además, el desgaste en el borde de la cabeza del pin permite identificar al níquel (color celeste) como uno de los componentes de la estructura del pin. Es importante recalcar que el análisis químico realizado con el microscopio electrónico de barrido permite obtener información de la composición a nivel superficial. En el caso de que existieran capas intermedias o inferiores a las detectadas, el presente método de análisis no permitiría obtener datos de composición.

En la Figura 3.5 se muestra el espectro del análisis químico de la superficie de pin, este análisis se hizo con un microanalizador de rayos X Bruker. Mediante el programa Esprit 1,8 se determinó que la aleación tiene un 93,59 % de oro y un 6,41 % de niobio. Esto implica que el niobio está dentro de una matriz de oro.

Debido a que la solubilidad del oro en solución cianurada, se estima que al disolverse en la solución liberará al niobio contenido en la aleación. De esta forma el proceso de cianuración permitiría la recuperación en solución de oro y niobio.

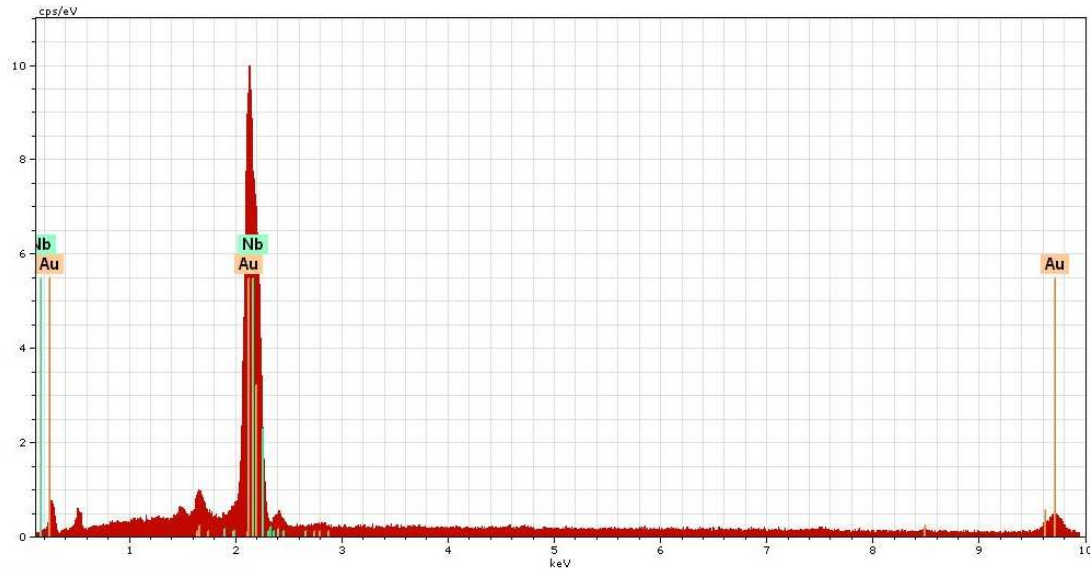


Figura 3.5 Espectro del análisis químico de la superficie del pin recubierta de la aleación oro-niobio

El espectro que se observa en la Figura 3.6 muestra el análisis químico de la superficie de un doré proveniente de un procesador cerámico sin ningún tratamiento de lixiviación previo. Se puede identificar la presencia de plata, oro y niobio dentro de la composición superficial del doré con las siguientes concentraciones: 77,49 % de plata, 19,21 % de oro y 3,30 % de niobio.

Con base en el resultado del espectro mostrado en la Figura 3.6, se demuestra que método de microscopía electrónica de barrido permite la detección de niobio en el doré proveniente del ensayo al fuego de las muestras de procesadores (y por ende de las muestras de tarjetas de circuitos impresos debido a que este material tiene una composición similar). Este análisis permitirá determinar el contenido de niobio de la muestra inicial (sin tratamiento de lixiviación) y final (después del proceso de lixiviación). Asumiendo que el doré es una aleación homogénea, se considerará que la composición superficial es la misma para toda la masa.

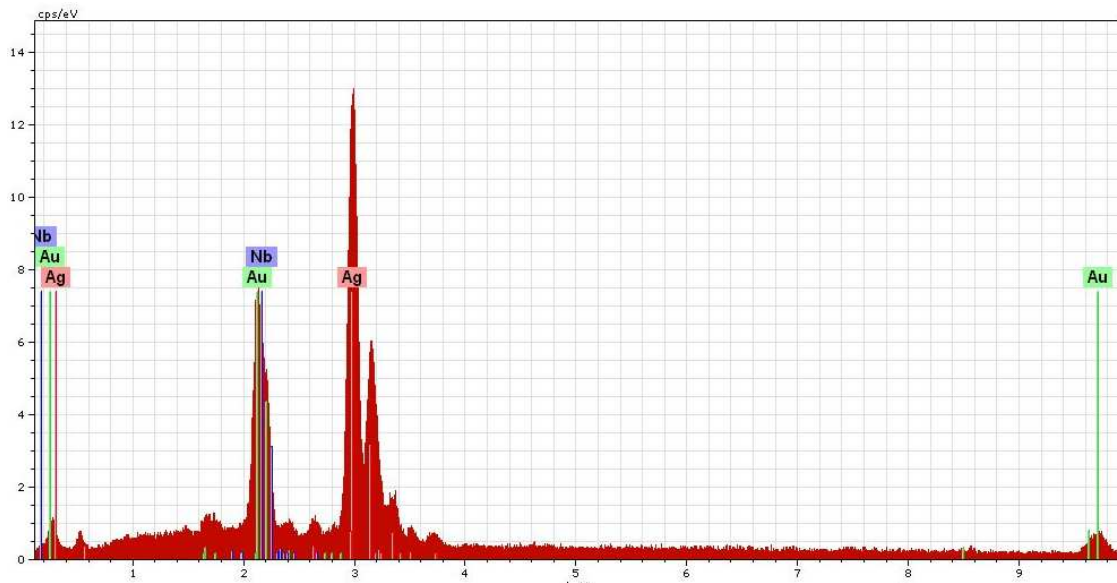


Figura 3.6 Espectro del análisis químico de la superficie de un doré proveniente del ensayo al fuego de un procesador cerámico

3.1.1.2 Análisis de tarjetas de circuitos impresos con microscopía electrónica de barrido

Los elementos analizados para el caso de las tarjetas de circuitos impresos fueron el núcleo de uno de los chips de la tarjeta y uno de los pines presentes en la misma. Estos elementos se muestran en la Figura 3.7. La superficie de los elementos anteriormente mencionados fue analizada con un microanalizador de rayos X Bruker y el software Esprit 1.8 Bruker, para identificar los elementos presentes con el método de mapeo.

En la Figura 3.8 se presenta al costado izquierdo una fotografía de la superficie de núcleo del chip de tarjeta de circuitos impresos tomada a 800 aumentos, 15,0 kV de voltaje de aceleración y 26 mm WD (Working Distance – Distancia de trabajo). Adicionalmente al costado derecho se muestra el análisis químico de la superficie. Se puede apreciar que la superficie está cubierta únicamente de plata metálica (color rojo).

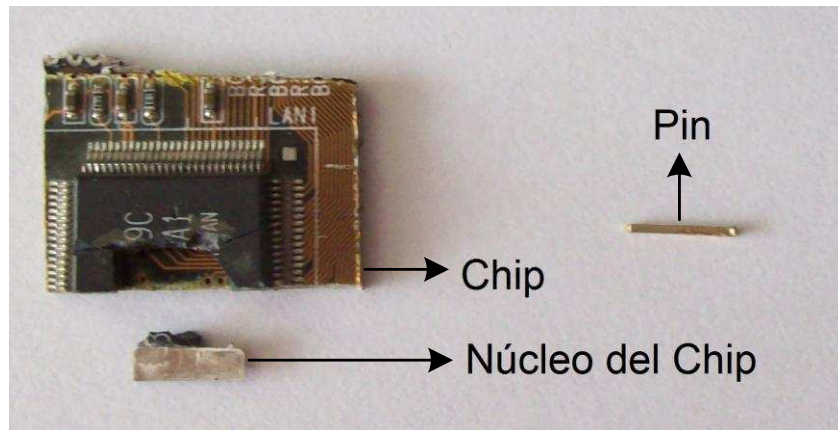


Figura 3.7 Fotografía de los elementos de la tarjeta de circuitos impresos analizados

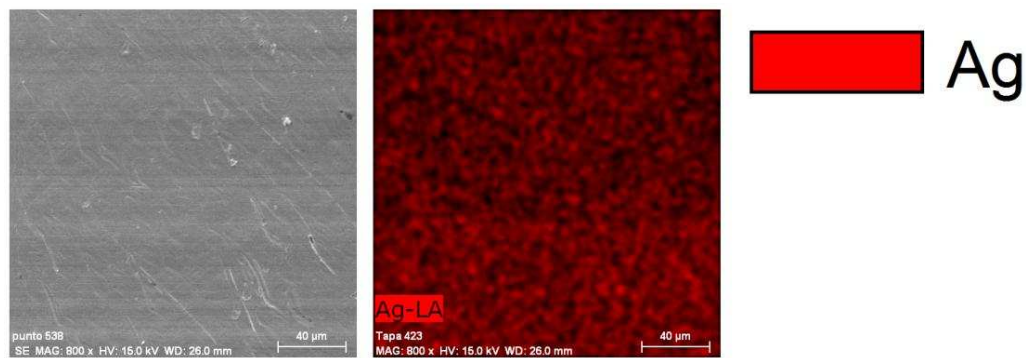


Figura 3.8 Imagen del análisis químico de la superficie del núcleo de un chip de tarjeta de circuitos impresos por microscopía electrónica a 800 aumentos

La existencia de elementos que contenga en su superficie únicamente plata permite estimar que la recuperación de este metal se producirá de mejor forma en aquellas estructuras donde no se logró aumentar la superficie de contacto entre el metal y la solución lixiviante (para esto se requiere un adecuado proceso de molienda).

En la Figura 3.9 se presenta el análisis químico de la superficie de un pin de tarjeta de circuitos impresos. Se puede apreciar que la superficie está cubierta por una aleación constituida por níquel (color rojo), niobio (color verde) y oro (color azul).

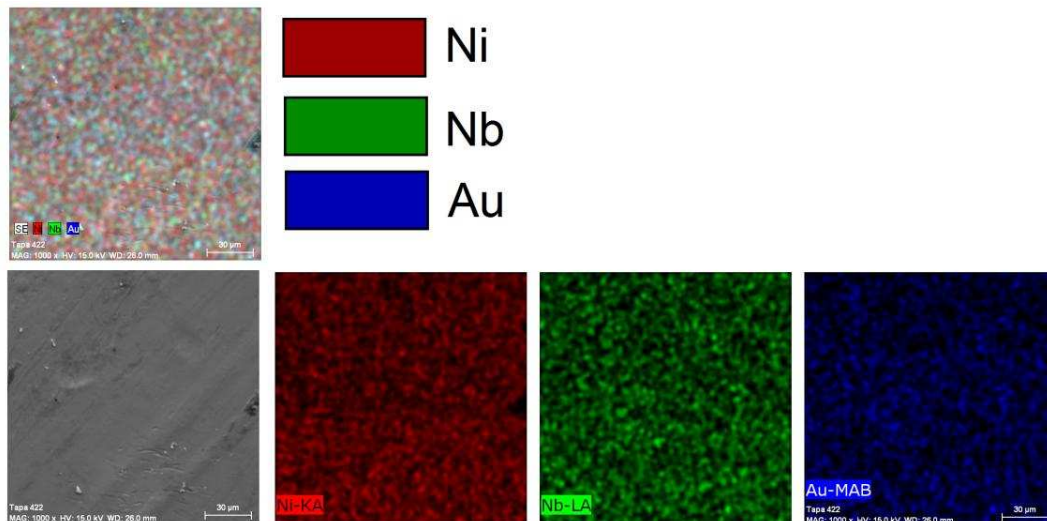


Figura 3.9 Imagen del análisis químico de la superficie de un pin de tarjeta de circuitos impresos por microscopía electrónica a 1000 aumentos

En la Figura 3.10 se muestra el espectro del análisis químico de la superficie de pin de una tarjeta de circuitos impresos. Mediante el programa Esprit 1,8 se determinó que la aleación tiene un 90,34 % de níquel, 9,21 % de oro y un 0,44 % de niobio.

Es importante recalcar la diferencia que existe entre la composición superficial del pin de una tarjeta de circuitos impresos con la del pin de un procesador. Esta diferencia en la composición determinará la cantidad de metales preciosos que se podrán recuperar de cada uno de estos residuos electrónicos.

Para el caso de las tarjetas de circuitos impresos, la existencia níquel en aleación con oro y niobio presente en los pines, será determinante en la recuperación de estos metales. Debido a que es necesario disolver todo el níquel para obtener en solución al oro y niobio.

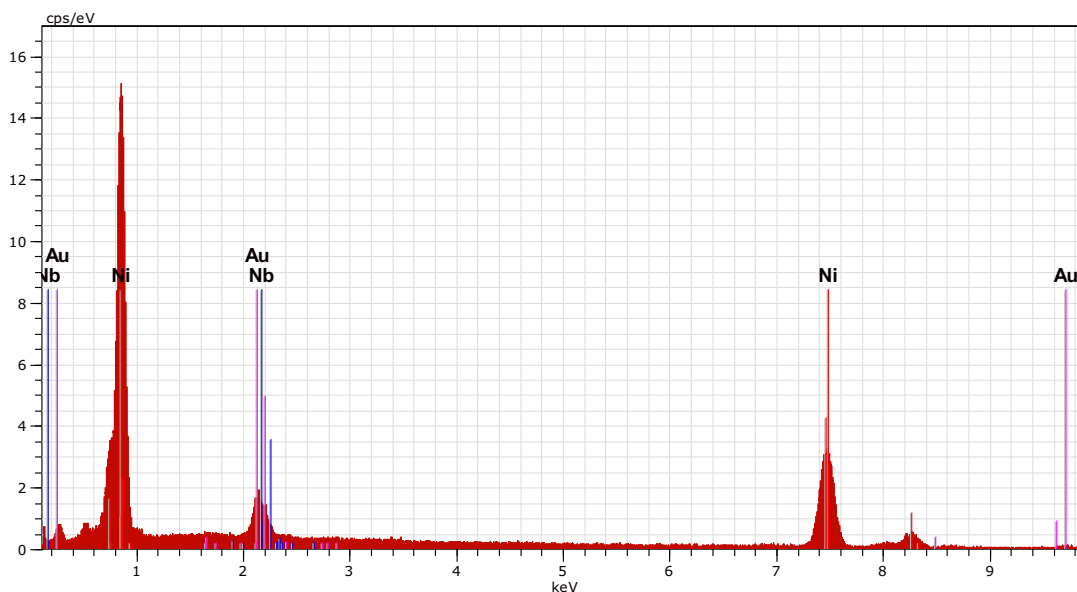


Figura 3.10 Imagen del análisis químico de la superficie de un pin de tarjeta de circuitos impresos por microscopía electrónica a 1000 aumentos

3.1.1.2 Determinación del tamaño de partícula obtenido luego de la molienda con molino de martillos

En la Figura 3.7 se presentó un chip fraccionado de una tarjeta de circuitos impresos, en cuyo interior se encuentra una pequeña placa cubierta de plata metálica. La reducción de tamaño permite la liberación de los metales de interés del sustrato en el que se encuentra y adicionalmente aumenta el área superficial lo que facilita el contacto entre el sólido y el líquido. A mayor área de contacto se produce una mayor recuperación de los metales de interés en el proceso de lixiviación.

En las Tablas 3.1 y 3.2 se presentan los datos obtenidos del ensayo de granulometría realizado para la reducción de tamaño con molino de martillos realizados a las muestras de procesadores y tarjetas de circuitos impresos usadas en los ensayos de recuperación de los metales de interés. El procesamiento gráfico usado para la determinación del tamaño de partícula se muestra en el Anexo II.

Tabla 3.1 Tratamiento de datos para ensayo de granulometría de procesadores luego del proceso de reducción de tamaño con molino de martillos

Malla #	Abertura (µm)	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasado Acumulado
3,5	5 660	45,8	4,42	4,42	95,58
6	3 350	115	11,10	15,53	84,47
16	1 180	92,3	8,91	24,44	75,56
40	425	412,3	39,81	64,25	35,75
80	180	201,5	19,46	83,71	16,29
150	104	89,20	8,61	92,32	7,68
-150	-104	79,5	7,68	100,00	0,00
Peso total retenido		1035,60	100,00	d₈₀	1 600 µm

En el caso de la muestra de procesadores molidos con molino de martillos, el d_{80} o tamaño de grano fue de 1 600 µm, lo que permite afirmar que el 80 % de las partículas tienen un tamaño menor o igual al valor antes señalado.

Tabla 3.2 Tratamiento de datos para ensayo de granulometría de tarjetas de circuitos impresos luego del proceso reducción de tamaño con molino de martillos

Malla #	Abertura (µm)	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasado Acumulado
3,5	5 660	62,40	20,10	20,10	79,90
6	3 350	38,45	12,38	32,48	67,52
16	1 180	82,90	26,70	59,19	40,81
40	425	60,23	19,40	78,59	21,41
80	180	37,86	12,19	90,78	9,22
150	104	10,63	3,42	94,21	5,79
-150	-104	17,99	5,79	100,00	0,00
Peso total retenido		310,46	100,00	d₈₀	6 700 µm

En el caso de la muestra pulverizada, se obtuvo un d_{80} de 6 700 µm, el cual es cuatro veces superior al obtenido en la reducción de los procesadores, esto se debe a que el sustrato plástico de las tarjetas de circuitos impresos posee una dureza superior. Las tarjetas de circuitos impresos o tarjetas madre de

computadoras descartadas sirven como base de soporte para conectar de algunos otros componentes electrónicos como: procesadores, tarjetas de memoria RAM, tarjetas de sonido y video, etc., es por esto que su estructura posee una mayor rigidez y dureza que la de los procesadores.

3.1.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

La caracterización química nos permite obtener las concentraciones iniciales de los metales base y de los metales de interés. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

3.1.2.1 Determinación de la concentración de oro, plata y niobio

Para la determinación de oro, plata y niobio se usaron diez procesadores plásticos y tres tarjetas de circuitos impresos, para el caso de las tarjetas se prepararon diez muestras de un peso de 15 g cada una para el análisis. Las muestras fueron tratadas por el métodos se ensayó al fuego detallado en la sección 2.1.3.1. Las concentraciones de obtenidas se presentan en la Tabla 3.3 y 3.4.

Para el caso de los procesadores las concentraciones de oro, plata y niobio estuvieron en los rangos de 341 a 2 813 g/t, 715 a 6 987 g/t y 17 a 159 g/t respectivamente. Se puede apreciar una gran variación de las concentraciones de los metales de interés. Si comparamos valores concentración de oro obtenidos a partir de los procesadores con los de una mena apta para su explotación (5 g/t), se puede afirmar a este tipo de residuo electrónico debe considerarse como una fuente secundaria para recuperación de este metal precioso.

Aunque la concentración oro puede ser cientos de veces superior a la obtenida en minerales auríferos (materia prima virgen), no se puede considerar a este residuo electrónico por separado como fuente secundaria de este metal y otros metales preciosos debido al bajo porcentaje de este componente en los residuos

electrónicos. Los procesadores corresponden al 1 % en peso del total os componentes electrónicos dentro del CPU que posee metales preciosos, como se indica en el Anexo I.

Tabla 3.3 Contenido de oro, plata y niobio en procesadores determinado por ensayo al fuego

Muestras	Concentración Au [g/t]	Concentración Ag [g/t]	Concentración Nb [g/t]	Relación Au/Nb	Relación Ag/Au
1	2 745	6 798	178	15,41	2,48
2	2 551	6 423	157	16,26	2,52
3	1 763	3 982	111	15,83	2,26
4	341	843	20	16,69	2,47
5	1 817	4 765	137	13,26	2,62
6	387	715	25	15,47	1,85
7	538	1 302	38	14,20	2,42
8	2 616	6 225	172	15,18	2,38
9	2 792	6 581	213	13,08	2,36
10	2 813	6 987	191	14,70	2,48
Promedio	1 836	4 462	124	15,01	2,43

Para la determinación de oro, plata y niobio en tarjetas de circuitos impresos se molieron 3 tarjetas. El material molido se cuarteo para obtener diez muestras de 15 g cada uno. Esto se hizo debido a su gran tamaño de las tarjetas en comparación con el de los procesadores (50 veces superior), su peso (entre 240 a 310 g) y la diversidad de componentes presentes en el mismo (disipadores de calor compuestos básicamente de aluminio, condensadores, conectores etc.). El proceso de molienda permite obtener una muestra más homogénea.

Es importante mencionar que algunos de los componentes presentes en la tarjeta de circuitos impresos fueron removidos previamente. Debido a que el molino empleado en esta investigación no fue diseñado para este tipo de material. Las estructuras metálicas requieren un proceso de molienda previo que consiste en la utilización de un shredder (tritadora de rodillos dentados), mismo que es capaz de fraccionar este tipos de estructuras.

Tabla 3.4 Contenido de oro, plata y niobio en tarjetas de circuitos impresos determinado por ensayo al fuego

Muestras	Concentración Au [g/t]	Concentración Ag [g/t]	Concentración Nb [g/t]	Relación Au/Nb	Relación Ag/Au
1	731	1 758	48,5	15,09	2,40
2	763	1 837	54,7	13,96	2,41
3	636	1 614	41,2	15,45	2,54
4	700	1 675	41,5	16,13	2,39
5	763	1 834	48,3	15,81	2,40
6	731	1 758	49,2	14,85	2,40
7	700	1 773	46,2	15,16	2,53
8	636	1 626	53,9	13,41	2,56
9	700	1 739	47,1	14,85	2,49
10	763	2 025	51,9	14,71	2,65
Promedio	712	1 764	48,2	14,94	2,48

En la Tabla 3.4 se puede apreciar el amplio rango de concentraciones de los metales de interés. Si consideramos las tarjetas de circuitos impresos de computadoras descartadas (tarjetas madre) equivalen al 15 % del peso de los componentes electrónicos que posee metales preciosos (Anexo I) y a la amplia comercialización de estos residuos electrónicos a nivel nacional e internacional, se los puede considerar como una fuente secundaria de metales preciosos.

Las relaciones de concentración oro/niobio y plata/oro para los dos componentes electrónicos analizados son muy cercanas entre ellas 20,11 y 19,80 para el caso oro/niobio, 2,43 y 2,48 para la relación plata/oro.

Los valores obtenidos no se pueden considerar representativos debido a la gran heterogeneidad en la concentración de metales preciosos presentes. Existe una notable disminución de la cantidad de metales preciosos usados en los productos electrónicos en las últimas décadas, esto se debe a que los avances tecnológicos van acompañados de un proceso de optimización de los materiales empleados en los nuevos equipos y dispositivos.

3.1.2.2 Determinación del contenido de metales base

Para la determinación de los metales base se realizaron veinte ensayos, diez con muestra de procesadores y diez con muestra de tarjetas de circuitos impresos, los resultados obtenidos se muestra en las Tablas 3.5 y 3.6.

Tabla 3.5 Contenido de metales base en procesadores de computadoras descartadas

Muestra	Cu (%)	Fe (%)	Ni (%)	Zn (%)
1	34,06	3,28	2,08	2,59
2	87,90	4,01	2,43	3,12
3	43,50	3,77	2,46	3,02
4	41,32	3,49	2,12	2,72
5	37,86	3,34	2,14	2,66
6	39,76	3,57	2,23	2,81
7	44,14	3,97	2,47	3,12
8	81,79	4,25	2,67	3,36
9	43,23	3,85	2,42	3,04
10	36,89	3,26	2,17	2,63
Promedio	48,76	3,68	2,32	2,91

Tabla 3.6 Contenido de metales base en tarjetas de circuitos impresos de computadoras descartadas

Muestra	Cu (%)	Fe (%)	Ni (%)	Zn (%)
1	19,39	5,10	1,42	1,26
2	24,43	5,98	1,68	1,08
3	24,77	6,61	1,83	0,98
4	23,53	6,17	1,65	1,05
5	21,56	5,55	1,48	1,16
6	22,64	5,19	1,42	1,23
7	25,13	5,43	1,66	1,20
8	27,21	5,86	1,68	1,08
9	24,61	6,24	1,44	1,05
10	21,00	5,10	1,46	1,26
Promedio	23,43	5,72	1,57	1,14

Los rangos de concentración de los metales base presentes tanto en los procesadores como en las tarjetas de circuitos impresos son pequeños en comparación los rangos de los metales preciosos presentados en la sección 3.1.2.1. La única excepción se presenta en el rango de concentración de cobre presente en los procesadores, debido a que existe procesadores que constan de una placa de cobre que sirve disipador de calor para este componente electrónico. En la Figura 3.11 se presentan los componentes de este tipo de procesador.

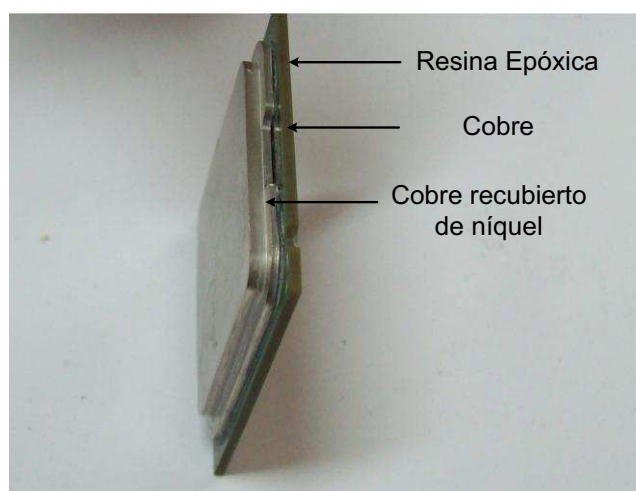


Figura 3.11 Imagen de procesador de sustrato plástico con cubierta de cobre

El alto contenido de cobre presente en los procesadores y tarjetas de circuitos impresos se debe a este metal esta presenta en hilos conductores y una lámina dentro de todo el sustrato plástico.

3.2 CIANURACIÓN DIRECTA AGITADA Y EN COLUMNA PARA RECUPERACIÓN DE ORO, PLATA, COBRE Y NIOBIO DE PROCESADORES Y TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

Para los ensayos de cianuración directa agitada y en columna, se sometió a la muestra de procesadores a reducción de tamaño. Se usaron aproximadamente un kilogramo de este material. En la Figura 3.12 se presentan los diferentes tipos de procesadores usados en esta sección de la investigación.



Figura 3.12 Imagen de procesadores usados en los ensayos de cianuración directa agitada y en columna



El material molido fue sometido a una prueba de permeabilidad, para determinar el rango de tamaño de partícula a usarse en los ensayos de cianuración cuyos resultados se presentan en esta sección. El procedimiento seguido se explica en la sección 2.2.2.

En la Tabla 3.7 se presentan los resultados de las pruebas realizadas y se aprecian las diferentes fracciones obtenidas del proceso de molienda.

Con base en el análisis realizado se determinó que el tamaño de partícula mínimo que se puede usar en los ensayos de cianuración en columna es $425\ \mu\text{m}$ (malla #40), debido a que a tamaños de partícula menor el plástico impide el paso de la solución cianurada.

Para los ensayos de cianuración directa agitada y en columna se usó el rango de tamaño de partícula entre $3\ 350$ y $425\ \mu\text{m}$. La fracción de tamaño $5660\ \mu\text{m}$ no fue utilizada debido a la escasa superficie de contacto de los metales de interés.

Tabla 3.7 Análisis de permeabilidad de las diferentes fracciones obtenidas de la molienda de procesadores

Malla #	Tamaño de partícula (µm)	Permeabilidad	Imagen de la fracción obtenida después del tamizado
3,5	5 660	Si	
6	3 350	Si	
16	1 180	Si	
40	425	Si	
80	180	No	
150	104	No	
-150	-104	No	

El rango de tamaño de partícula usado para los ensayos con procesadores fue el mismo que se empleó para las tarjetas de circuitos impresos.

Se determinó la concentración de metales preciosos en el rango de partícula usado en los ensayos de cianuración y en las fracciones que no fueron usadas. Para ellos se sometió a cada fracción a ensayo al fuego y se pesaron los dorés (aleación de metales preciosos) correspondiente a cada fracción.

Estos ensayos permiten tener una moción del porcentaje real de metales preciosos que se puede recuperar mediante el proceso de cianuración en columna. En la Figura 3.13 y 3.14 se presentan los porcentajes de doré presentes en las diferentes fracciones de los procesadores y tarjetas de circuitos molidas respectivamente.

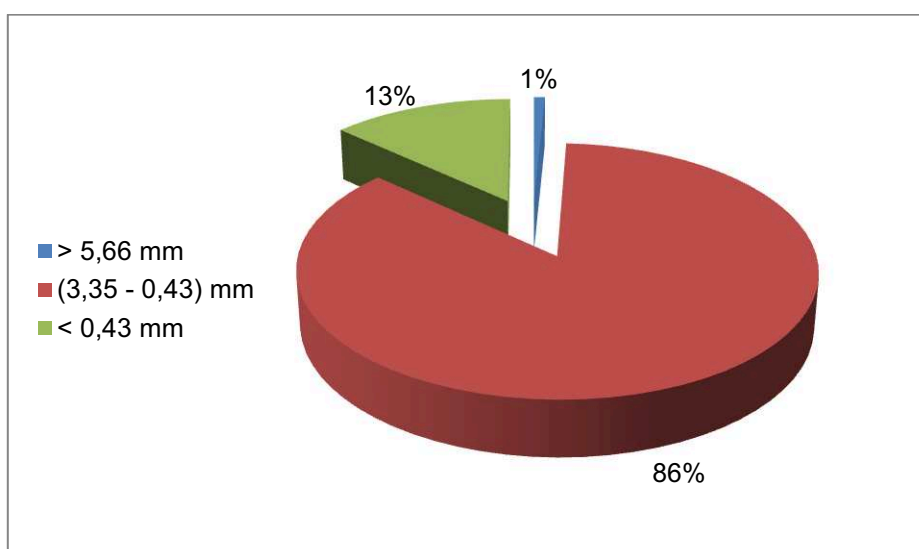


Figura 3.13 Porcentajes de metales preciosos presentes en las diferentes fracciones obtenidas de la molienda de prosadores

En la Figura 3.13 se puede apreciar que más del 85 % de los metales preciosos se encuentran en la fracción usada en los ensayos de cianuración en columna. En el caso de las tarjetas de circuitos impresos cuyos porcentajes son presentados en la Figura 3.14, se observa que el 81 % de los metales preciosos se encuentran en la fracción empleada para los ensayos de cianuración en columna. Es importante mencionar que las fracciones que no fueron usadas en el proceso de

cianuración en columna tienen cantidades considerables de metales preciosos por lo que se podrían vender como material con pretratamiento mecánico.

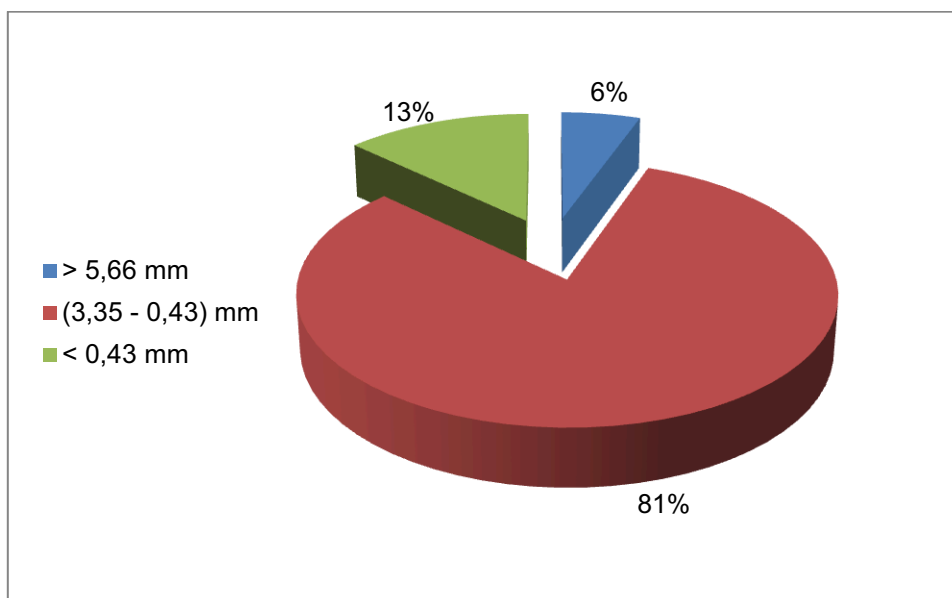


Figura 3.14 Porcentajes de metales preciosos presentes en las diferentes fracciones obtenidas de la molienda de tarjetas de circuitos impresos

El proceso de molienda se puede mejorar si se trabaja con un molino diseñado específicamente para tarjetas de circuitos impresos, ya que las pérdidas en material menor a 0,43 mm se reducirían y se podría alcanzar un mayor porcentaje de material molido en el rango útil para el proceso de cianuración en columna.

3.2.1 ENSAYO DE CIANURACIÓN DIRECTA AGITADA PARA RECUPERACIÓN DE ORO, PLATA, COBRE Y NIOBIO DE PROCESADORES

Previo a la revisión de resultados de cianuración y pretratamientos de lixiviación es importante recalcar que se usó material molido (procesadores y tarjetas de circuitos impresos) dentro del rango de permeabilidad (entre 3 350 y 425 μm) para tener homogeneidad en la materia prima usada tanto en cianuración agitada como en columna.

Debido a que la caracterización química inicial se realizó con muestras que contenían fracciones del todo el espectro de tamaño de partícula, se hizo una nueva caracterización de los procesadores y tarjetas de circuitos impresos en el rango de tamaño de partícula definido para los ensayos a realizarse. En la Tabla 3.8 se presenta los resultados de la nueva caracterización química.

Tabla 3.8 Contenido de metales de interés en tarjetas de circuitos impresos y procesadores de computadoras descartadas

Muestra	Concentración Au [g/t]	Concentración Ag [g/t]	Concentración Nb [g/t]	Concentración Cu (%)
Procesador	2 300	6 110	122,2	40,15
Tarjeta de circuitos impresos	613,2	1 515	43,4	23,37

La presente sección tiene como objetivo el comprobar la efectividad de la cianuración en la remoción todos los metales de interés. En la Figura 3.15 se presenta la recuperación de oro, plata y cobre en función del tiempo. La concentración del niobio fue analizado mediante microscopía electrónica de barrido con el análisis químico del doré obtenido del relave, como se detalla en la sección 2.1.3.1.

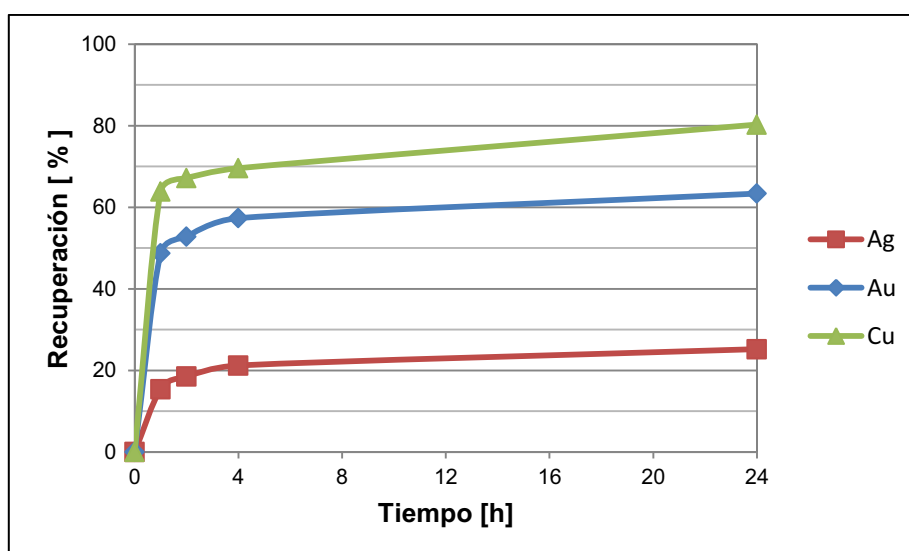


Figura 3.15 Recuperación de los metales de interés en función del tiempo para el proceso de cianuración agitada, $[CN]= 4 \text{ g/L}$

Como se observa en la Figura 3.15 el metal que presenta mayor recuperación es el cobre, esto se debe a la alta concentración de cobre en la muestra y a su carácter cianicida. La recuperación de oro y niobio es muy cercana, debido a que el niobio contenido en la aleación es liberado a medida que se disuelve el oro por efecto de la reacción que tiene con el cianuro

Tabla 3.9 Recuperación de los metales de interés para el ensayo de cianuración agitada

Muestra	Recuperación Au (%)	Recuperación Ag (%)	Recuperación Nb (%)	Recuperación Cu (%)
Procesador	63,35	25,21	62,10	80,27

En la Figura 3.16 se presenta el análisis químico de la cabeza de un pin del procesador (antes y después del proceso de cianuración). Se puede apreciar que la cubierta de aleación oro-niobio fue retirada por completo. Los metales presentes como sustrato son níquel, cobalto y hierro, y se encuentran en forma de aleación.

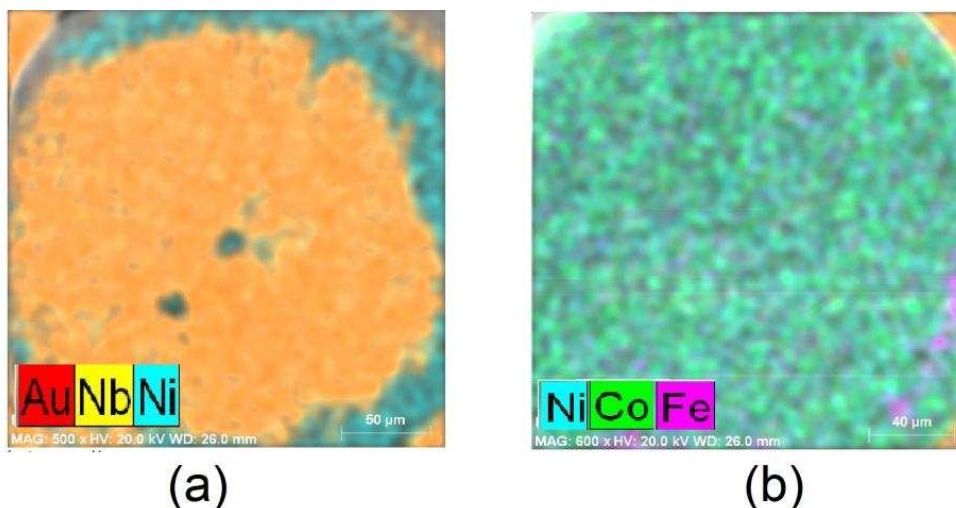


Figura 3.16 Análisis químico de la cabeza de un pin de procesador antes (a) y después (b) del proceso de cianuración

En ensayos de cianuración agitada previos a esta investigación (Anexo IV – Ficha 1) con procesadores cerámicos sin reducción de tamaño, se comprobó que existe recuperación de oro, plata y cobre, teniendo como superficie de contacto de los metales de interés únicamente a los pines del procesador. Con base en estos

resultados y los obtenidos de análisis químico realizado con microscopía electrónica, se realizó un esquema de las aleaciones presente en el pin del procesador. Este esquema se presenta en la Figura 3.17.

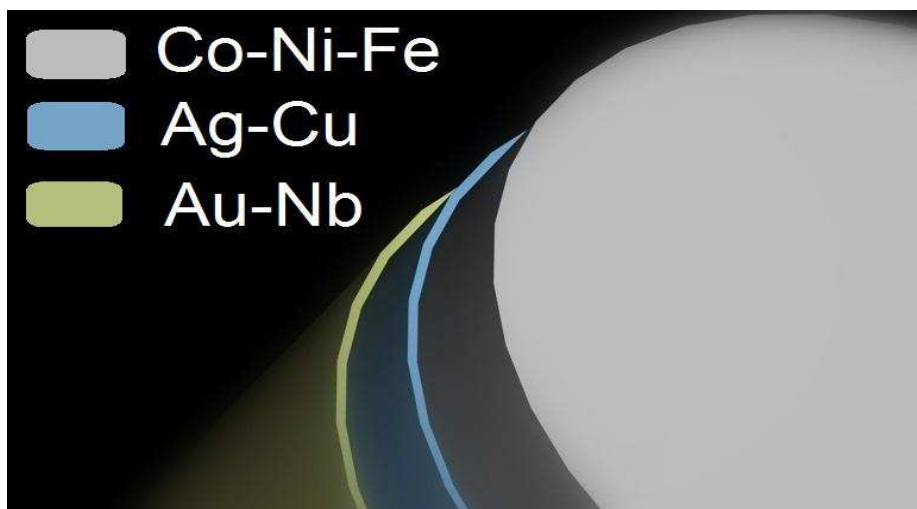


Figura 3.17 Esquema de aleaciones presentes en el pin de un procesador

Como se puede apreciar en la Figura 3.17 existe una capa intermedia en el pin del procesador constituida de una aleación cobre-plata, esta no apareció en el análisis de microscopía electrónica obtenido después del proceso de cianuración, debido a que estos dos metales son fácilmente lixiviados con cianuro de sodio.

La recuperación de plata está condicionada a la remoción de la aleación oro-niobio. En la medida que esta capa desaparece se da un mayor superficie de contacto entre la aleación plata-cobre.

Para el caso de los procesadores, esta capa intermedia presente en los pines es la única zona donde se pudo comprobar la existencia de cobre y plata. Esto limita la recuperación de estos metales, especialmente para el caso de la plata ya que este metal debería estar contenido en una matriz de cobre. Se requiere la disolución completa del cobre para que se pueda liberar el contenido de plata presente en la aleación.

Finalmente el metal que presenta mayor recuperación es el cobre debido a su alta concentración en la muestra y a su carácter cianicida (reacciona con facilidad al entrar en contacto con el cianuro).

3.2.2 ENSAYO DE CIANURACIÓN DIRECTA EN COLUMNA PARA RECUPERACIÓN DE ORO, PLATA, COBRE Y NIOBIO DE PROCESADORES

Los ensayos de cianuración directa en columna permiten obtener un patrón comparación para analizar la influencia de los pretratamientos de lixiviación ácida y básica en la recuperación de los metales de interés.

3.2.2.1 Determinación del mejor flujo para la cianuración directa en columna

Los resultados de recuperación de los metales de interés se presentan en los ensayos de cianuración directa en columna se presenta en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10 Recuperación de los metales de interés obtenidos con flujos de 1 y 3 L/d.
Condiciones: [CN]=4 g/L, pH 11, tiempo 15 días

Flujo [L/d]	Recuperación Ag (%)	Recuperación Au (%)	Recuperación Nb (%)	Recuperación Cu (%)
1	6,30	32,71	30,19	56,12
3	7,90	53,66	51,68	74,14

Los flujos usados tuvieron una desviación estándar de ± 15 %. Con base en los resultados de la Tabla 3.10., se elaboró un gráfico de la recuperación de los metales de interés en función del tiempo. En la Figura 3.18 se presenta la variación el porcentaje de recuperación obtenida con flujos solución de 1 y 3 L/d.

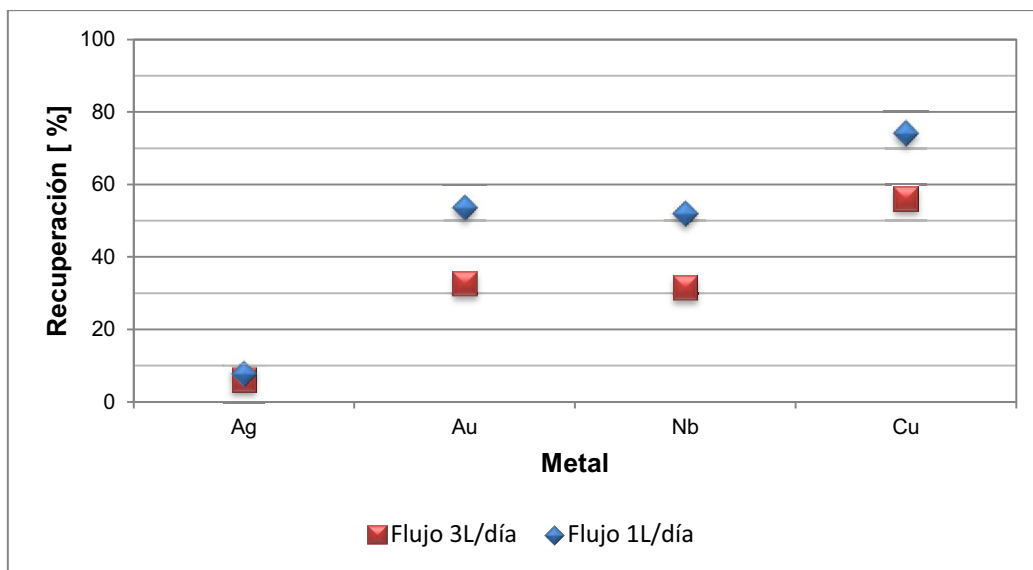


Figura 3.18 Variación del porcentaje de recuperación de los metales de interés obtenidos por cianuración en columna en función del flujo lixiviante. Condiciones: $[CN]=4$ g/L, pH 11, tiempo 15 días

Como se observa en la Figura 3.17, existe un incremento en la recuperación de todos los metales de interés. Al reducir flujo de agente lixiviante se provee de mayor tiempo de contacto entre el metal y la solución, lo que favorece la reacción de disolución.

Con base en estos resultados se procedió a trabajar con un flujo de 1 L/día para todos los ensayos de cianuración con pretratamientos de lixiviación y para el ensayo de cianuración de tarjetas de circuitos impresos.

3.2.2.2 Cianuración directa en columna

En la Figura 3.19 se presenta la recuperación de oro, plata y cobre en función del tiempo, con el flujo de 1 L/d. Se puede apreciar que la recuperación de oro en los primeros tres días presenta un valor mayor que la de cobre. Esto se da debido a que la velocidad de reacción del oro es mayor que la del cobre. Sin embargo, al estar el cobre en una concentración tan alta dentro del material, éste consume una gran cantidad de cianuro y presenta el valor más alto de recuperación.

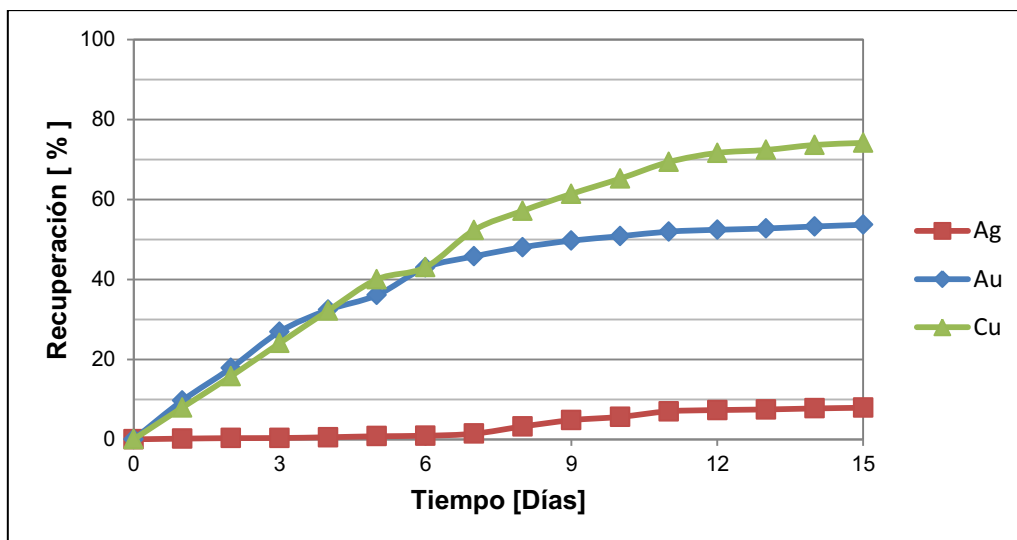


Figura 3.19 Recuperación de oro, plata y cobre en función del tiempo. Condiciones: [CN]=4 g/L, pH 11, tiempo 15 días, flujo 1 L/d

Se aprecia que la tendencia de los tres metales analizados se torna asintótica. La lixiviación en columna permite recuperaciones menores que las obtenidas en lecho agitado. La recuperación máxima de plata en el ensayo es inferior al 10 %, con base en el análisis realizado en la sección 3.2.1, se puede concluir que existe una capa de aleación oro-niobio recubriendo a una gran cantidad de la plata presente en los procesadores.

3.3 CIANURACIÓN EN COLUMNA CON PRETRATAMIENTOS DE REDUCCIÓN DE TAMAÑO, LIXIVIACIÓN ÁCIDA Y BÁSICA

El objetivo de los pretratamientos fue identificar si existe una mayor recuperación de los metales de interés al lixiviarlos previo al proceso de cianuración en columna. Los pretratamiento se realizaron en circuito cerrado, se recirculo la solución al final de cada día de operación durante ocho días. Al trabajar en este tipo de circuito los agentes lixiviantes usados se consumen en función del tiempo. Se trabajó con dos tipos de agentes lixiviantes: ácidos (ácido sulfúrico) y básicos (amoníaco, amoníaco-sulfato de amonio e hidróxido de sodio).

Se analizó la recuperación de los metales de interés en dos etapas. La primera en al finalizar los ocho días de pretratamiento y la segunda después del proceso de cianuración en columna de cada una de las muestra, cuya duración fue de 15 días.

En las Figuras 3.20, 3.21, 3.22 y 3.23 se muestran las recuperaciones de cobre, hierro y níquel en función del tiempo para cada uno de los agentes lixiviantes usados.

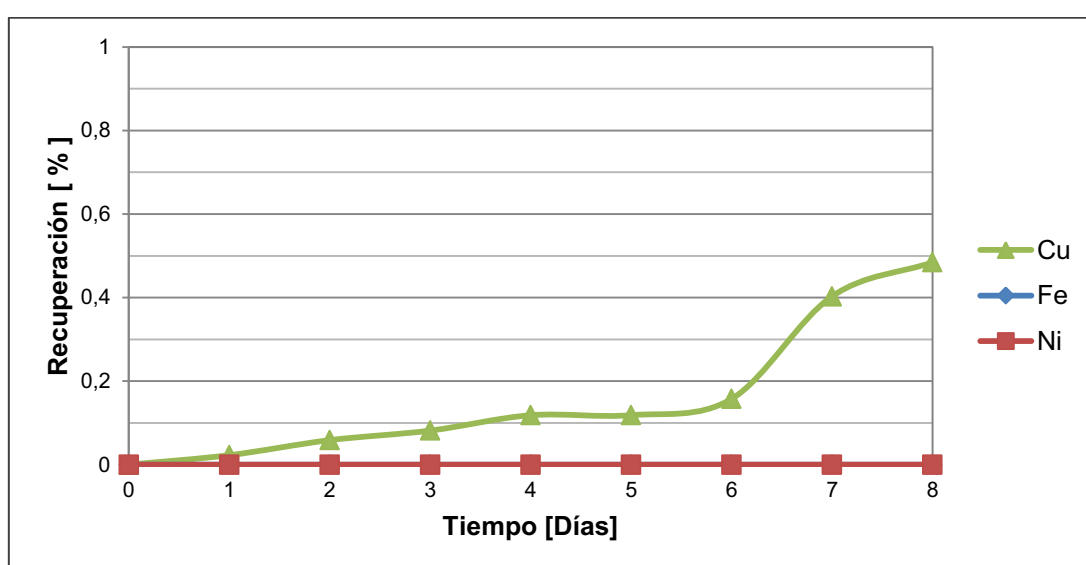


Figura 3.20 Recuperación de cobre, hierro y níquel en función del tiempo con una solución de NaOH. Condiciones: Concentración 1M, tiempo 8 días, flujo 1 L/d

Como se aprecia en la Figura 3.20, la recuperación de los tres metales analizados es menor al 1 %. La máxima recuperación obtenida fue para el caso del cobre, aproximadamente 0,5 %. Estos resultados permiten descartar el uso de hidróxidos para para recuperación de metales base. Debido a que los límites de detección de niobio en absorción atómicos con altos (superiores a 50 ppm) no se pudo determinar la recuperación de este metal en medio básico.

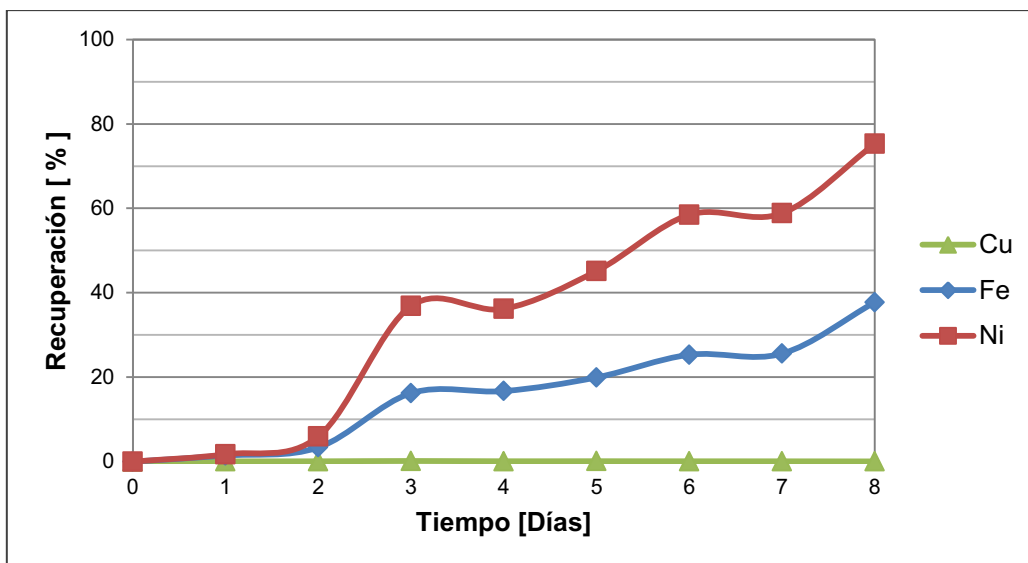


Figura 3.21 Recuperación de cobre, hierro y níquel en función del tiempo con una solución de H_2SO_4 . Condiciones: Concentración 1M, tiempo 8 días, flujo 1 L/d

En la Figura 3.21 se observa que la lixiviación con ácido sulfúrico permite remover el 75,28 % del níquel y el 37,75 % del hierro presente en los procesadores. Sin embargo la remoción de cobre es menor al 0,1 %. Este último resultado discrepa con lo reportado en investigaciones previas (Fazlul et al, 2010, p. 2) que reportan una recuperación del 29,74 % de cobre, 26,15 % de níquel y 24,26 % de hierro, con una solución 1M de ácido sulfúrico en lecho agitado. Se puede concluir que en el caso de no existe agitación el níquel presenta una mayor afinidad a reaccionar con el ácido sulfúrico que hierro y el cobre.

Es importante mencionar que al trabajar con ácidos y bases fuertes como el ácido sulfúrico y el hidróxido de sodio, la muestra debe ser lavada y su pH debe ser regulado para alcanzar un valor cercano a 10. Debido a que si el pH de la muestra es superior a 12, el proceso de cianuración se vuelve muy ineficiente y si el pH es menor a 9 al ponerse en contacto con la solución cianurada se producirá ácido cianhídrico (altamente tóxico) y se reducirá el cianuro libre que se requiere para la recuperación de los metales de interés.

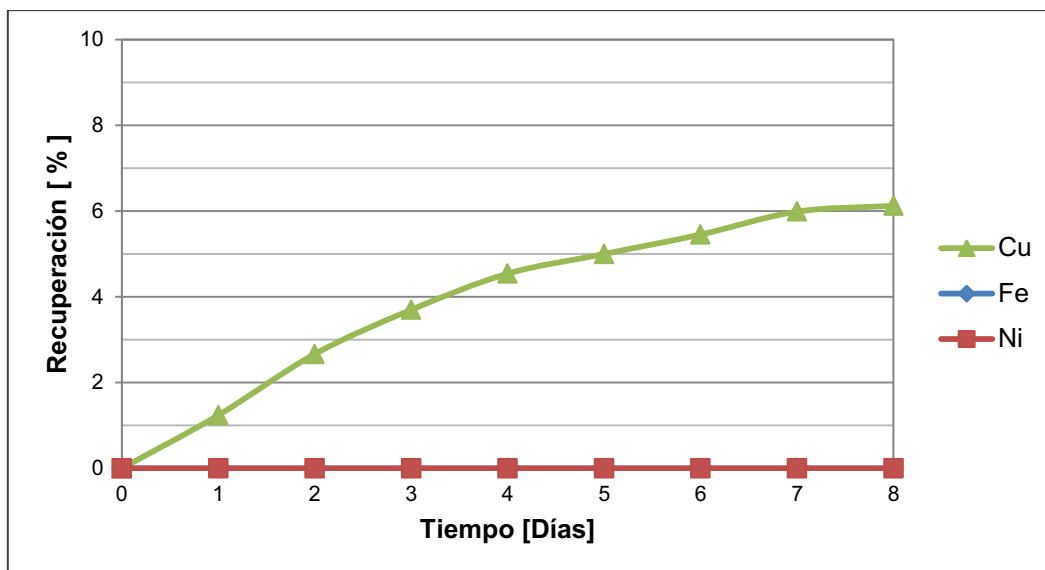


Figura 3.22 Recuperación de cobre, hierro y níquel en función del tiempo con una solución de NH_3 . Condiciones: Concentración 1M, tiempo 8 días, flujo 1 L/d

En la Figura 3.22 se evidencia la afinidad del amoníaco para la recuperación de cobre. Debido a que la concentración de este agente lixivante no se mantiene constante sino que va disminuyendo a lo largo del tiempo, la recuperación de cobre va decayendo hasta que en el día 8 parece tornarse asintótica. La recuperación de máxima de cobre obtenida con amoníaco fue de 6,12 %.

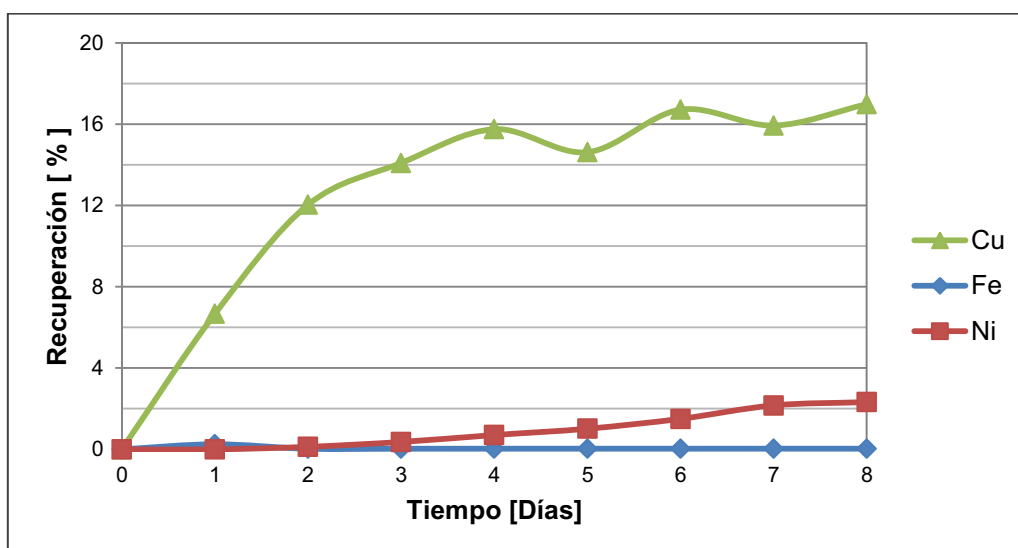


Figura 3.23 Recuperación de cobre, hierro y níquel en función del tiempo con una solución de $\text{NH}_3\text{-(NH}_3)_2\text{SO}_4$. Condiciones: Concentración 1M, tiempo 8 días, flujo 1 L/d

En la Figura 3.23 se aprecia que la mezcla amoniaco – sulfato de amonio presenta una mejor remoción que al usar únicamente amoniaco. Adicionalmente la presencia de iones sulfato en la solución permiten pequeña recuperación de níquel (2,33 %). Existe una puntos donde se evidencia una reducción en el porcentaje de recuperación después del cuarto día de operación, esto se debe a que existe un proceso de precipitación del complejo formado con el cobre y se da una reducción de la cantidad del mismo en la solución.

En la Tabla 3.11 se presentan las recuperaciones de cobre, hierro y níquel de los ensayos realizados con los diferentes agentes lixiviantes. Las recuperaciones de oro y plata fueron menores al 0,1 % en los cuatro ensayos. La recuperación de niobio se analizó al final del proceso de cianuración debido a que se requiere trabajar con el relave del ensayo.

Tabla 3.11 Recuperación de cobre, hierro y níquel con diferentes agentes lixiviantes.
Condiciones: Concentración 1M, volumen 1 L, tiempo 8 días, flujo 1 L/d

Agente lixiviante	Recuperación Cu (%)	Recuperación Fe (%)	Recuperación Ni (%)
H ₂ SO ₄	0,04	37,75	75,28
NH ₃	6,12	0,00	0,00
NH ₃ + (NH ₄) ₂ SO ₄	16,98	0,03	2,33
NaOH	0,48	0,00	0,00

Las recuperaciones de los diferentes metales analizados se presentan en la Figura 3.24. Se puede afirmar que la mezcla de amoniaco – sulfato de amonio presenta la mejor recuperación de cobre, mientras que para el caso del níquel y el hierro, el ácido sulfúrico presenta las mayores remociones. Estos resultados permitirán comprobar si se puede obtener una mejor recuperación de los metales de interés si los realiza tratamientos preliminares de lixiviación. Todas las muestra fueron lavadas y su pH fue regulado a un valor cercano a 10 antes del proceso de cianuración en columna.

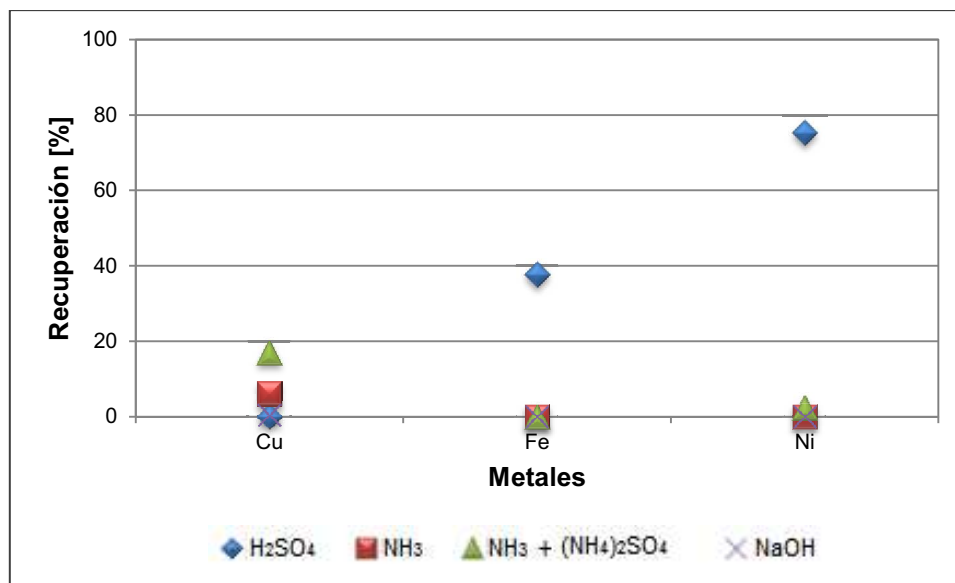


Figura 3.24 Recuperación de cobre, hierro y níquel en función de cada agente lixivante. Condiciones: Concentración 1M, volumen 1 L, tiempo 8 días, flujo 1 L/d

En las Figuras 3.25, 3.26, 3.27 y 3.28 se presentan las recuperaciones de oro, plata y cobre en el proceso de cianuración en columna realizado a las muestras pretratadas. El proceso de cianuración se realizó en circuito abierto (se añadió solución fresca al iniciar cada día de operación).

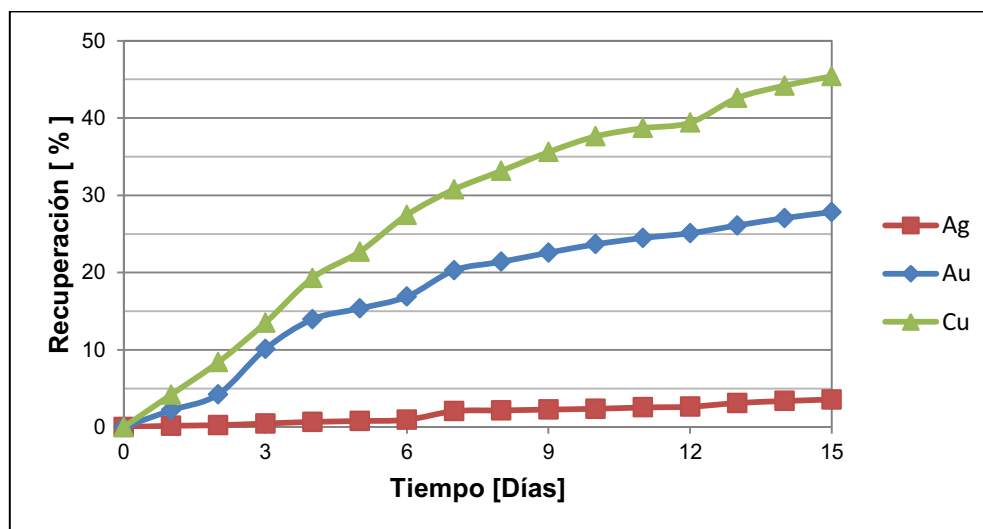


Figura 3.25 Recuperación de oro, plata y cobre en función del tiempo. Condiciones: [CN]= 4 g/L, tiempo 15 días, flujo 1 L/d, lixiviación previa con H₂SO₄

En la Figura 3.25 se puede apreciar que las pendientes de cada uno de los metales de interés se mantienen durante la fase final del proceso de lixiviación.

Esto permite suponer que si el tiempo de operación se prolonga la recuperación de los metales de interés se incrementará. El metal que presenta la máxima recuperación es el cobre, con un porcentaje de disolución del 45,40 %. La recuperación de plata en solución es inferior al 5 %.

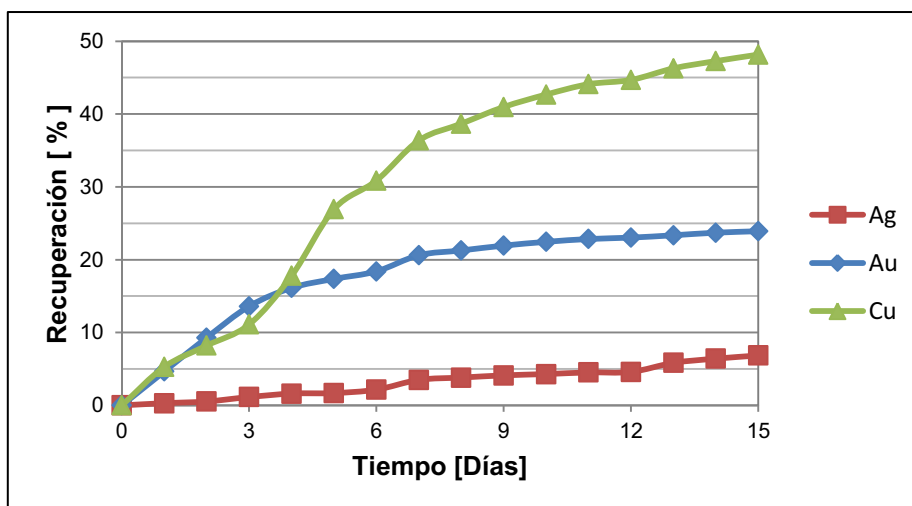


Figura 3.26 Recuperación de oro, plata y cobre en función del tiempo. Condiciones: [CN]⁻= 4 g/L, tiempo 15 días, flujo 1 L/d, lixiviación previa con NH₃

En la Figura 3.26 se evidencia el carácter cianídico del cobre presente en la muestra, con el pretratamiento de lixiviación con amoníaco se obtuvo la máxima recuperación de cobre (48,16 %) en la fase de cianuración. La plata presenta la menor recuperación de los tres metales analizados con un valor de 6,85 %.

Las recuperaciones obtenidas de la muestra pretratada con la mezcla amoníaco – sulfato de amonio presentadas en la Figura 3.27, muestran una menor remoción de cobre que en con el pretratamiento con amoníaco. Al igual que para los ensayos antes mencionados, la recuperación de plata menor al 10 %.

Un comportamiento similar se presenta en la muestra lixiviada previamente con hidróxido de sodio. Las recuperaciones se indican en la Figura 3.28. Los porcentajes de recuperación son: oro 24,89 %, plata 3,33 % y cobre 42,22 %

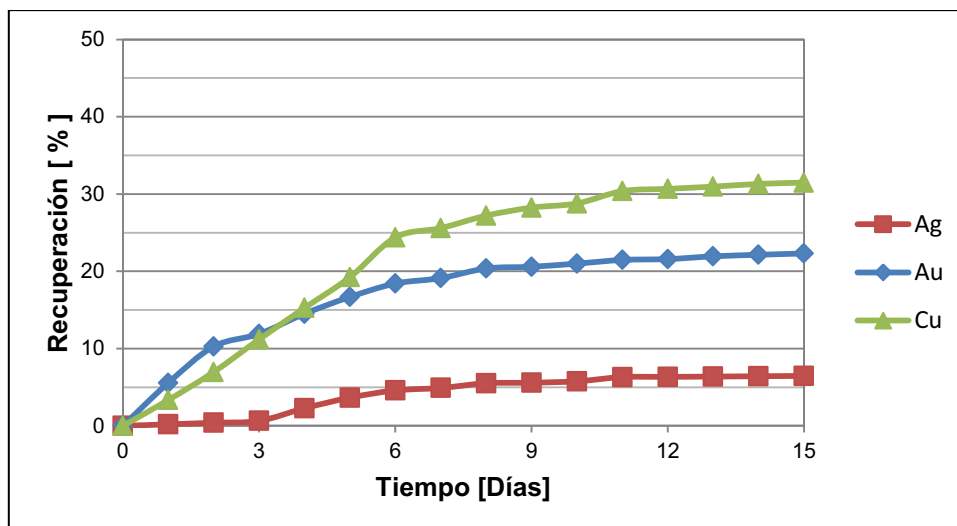


Figura 3.27 Recuperación de oro, plata y cobre en función del tiempo. Condiciones: $[\text{CN}] = 4 \text{ g/L}$, tiempo 15 días, flujo 1 L/d, lixiviación previa con $\text{NH}_3 + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

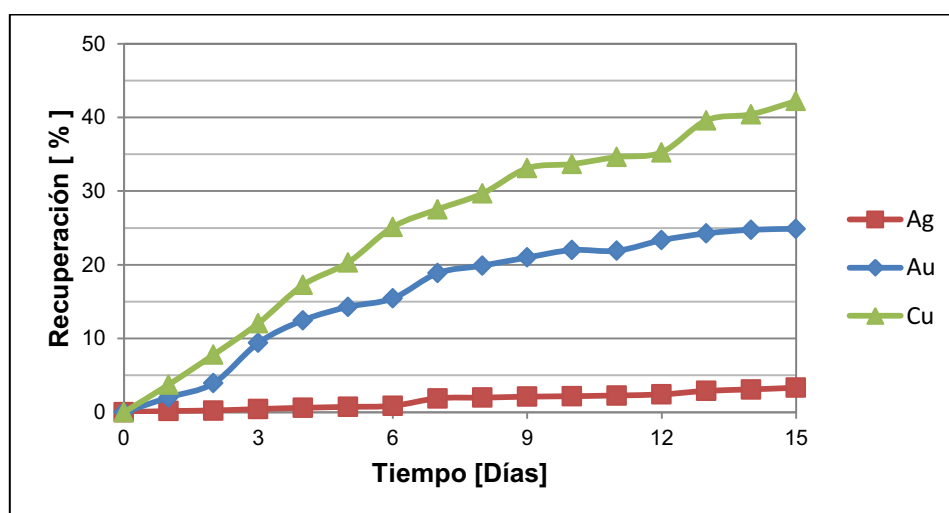


Figura 3.28 Recuperación de oro, plata y cobre en función del tiempo. Condiciones: $[\text{CN}] = 4 \text{ g/L}$, tiempo 15 días, flujo 1 L/d, lixiviación previa con NaOH

Para determinar el influencia de los pretratamientos en la recuperación de los metales interés se sumaron las recuperación en las dos etapas de lixiviación y se compraron los resultados con la muestra cianurada directamente con un flujo de 1 L/d. Los resultados se presentan en la Tabla 3.12.

Tabla 3.12 Recuperación global de los metales de interés con y sin pretratamientos de lixiviación

Pretratamiento	Recuperación Ag (%)	Recuperación Au (%)	Recuperación Nb (%)	Recuperación Cu (%)
Cianuración Directa	7,90	53,66	52,48	74,14
H ₂ SO ₄	3,58	27,83	27,50	45,40
NH ₃	6,85	23,91	23,15	54,29
NH ₃ + (NH ₄) ₂ SO ₄	6,46	22,31	21,67	48,46
NaOH	3,33	24,89	28,95	42,72

Con base en los resultados presentados en la Tabla 3.12, se elaboró un gráfico comparativo donde se presentan las recuperaciones globales de los metales de interés con y sin pretratamientos de lixiviación.

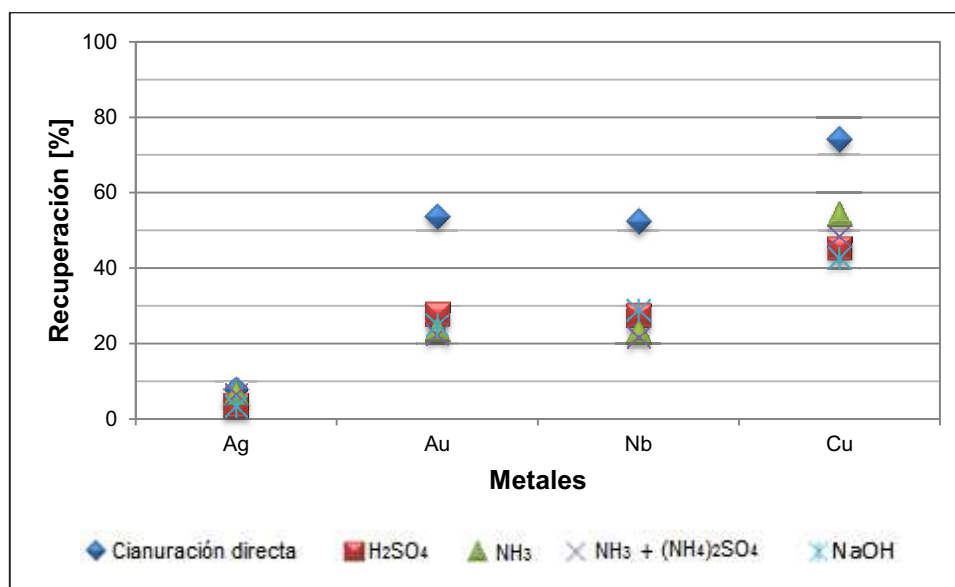


Figura 3.29 Recuperación global de los metales de interés con y sin pretratamientos de lixiviación

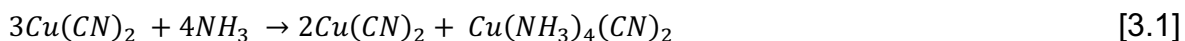
En la Figura 3.29 se observa que las mayores recuperaciones de los metales de interés se obtuvieron con cianuración directa sin pretratamientos de lixiviación. Esto permite descartar a los pretratamientos dentro del proceso de recuperación de los metales de interés y reducir los costos derivados de trabajar con dos etapas de lixiviación.

El efecto negativo de los pretratamientos en la recuperación de los metales de interés es función de los remanentes de los agentes lixiviantes en el lecho del material.

Para el caso del ácido sulfúrico y el hidróxido de sodio, la variación en el pH del material generó una baja recuperación. La existencia de remanentes de ácido dentro del lecho generó un gasto extra del cianuro de sodio, debido a que este al estar en contacto con material de pH menor al 10,5 se transforma en ácido cianhídrico.

Por otra parte la presencia de resto de hidróxido de sodio en el material le dio un carácter básico al material. Si el pH del material es mayor a 11,5 la recuperación de metales precios se reduce.

Para los casos de las soluciones de amoníaco y sulfato de amonio, aunque presentar las mayores recuperaciones de cobre en el análisis de los pretratamientos, la recuperación global de cobre en estos dos casos fue menor a la obtenida por cianuración directa. Esto se debe a que el complejo de cianuro de cobre formado reacciona con los remanentes de amoníaco en el lecho. Producto de la reacción se forma el complejo cianuro cupriamonio, el mismo que se disocia en el complejo $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ y el ion cianuro. Al tratarse de un proceso sin agitación la reacción se da de manera lenta, lo que impide una recuperación efectiva del cobre en el complejo $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$. En la ecuación 3.1 se presenta la reacción de formación del complejo cianuro cupriamonio.



3.4 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO Y ANÁLISIS ECONÓMICO PRELIMINAR

Previo al proceso de elaboración del diagrama de flujo del proceso y análisis

económico preliminar se realizó un ensayo de cianuración en columna usando tarjetas de circuitos impresos como materia prima. Debido a que el proceso de reciclaje formal a nivel local ha evidenciado un crecimiento en los últimos años.

3.4.1 CIANURACIÓN EN COLUMNA DE TARJETAS DE CIRCUITOS IMPRESOS

Previo a la elaboración del diagrama de flujo, se realizó una cianuración en columna de tarjetas de circuitos impresos (tarjetas madre), usado las condiciones que permitieron los mejores resultados en los ensayos realizados con procesadores de computadoras descartas.

Se trabajó en circuito cerrado con dos etapas: cianuración y adsorción en columna. Las condiciones de operación y las recuperaciones de oro, plata y cobre en solución se muestran en la Tabla 3.13 y Figura 3.29 respectivamente.

Tabla 3.13 Condiciones de operación en el proceso de cianuración en columna de tarjetas de circuitos impresos.

Parámetro	Valor	Unidad
pH de trabajo	11	
Masa de muestra	0,5	kg
Flujo cianuración	10	L/d
Volumen de solución	10	L
Tiempo de cianuración	15	d
Masa de carbón activado	1,5	kg
Flujo adsorción	10	L/d
Tiempo de adsorción	15	d

Como se observa en la Figura 3.30, la recuperación de oro presenta valores superiores a los otros metales durante los primeros 10 días de operación. La velocidad de reacción del oro y la plata son mayores a la del cobre. Sin embargo la gran concentración del cobre en las tarjetas se evidencia en el incremento permanente de la recuperación del mismo. Para el caso del oro y la plata se

alcanza una tendencia asintótica al finalizar los 15 días de operación. El cobre no obstante mantiene una razón de recuperación alta al final de los procesos.

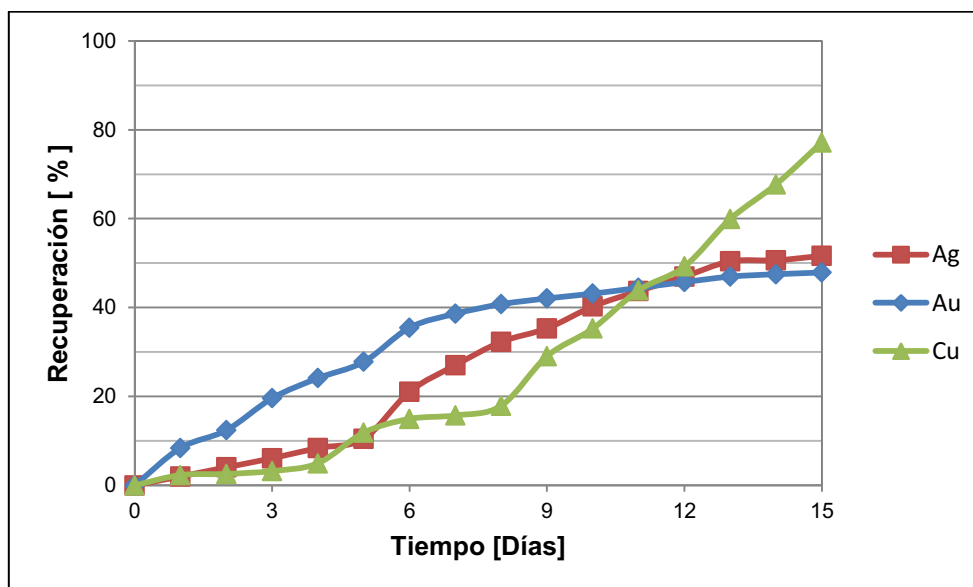


Figura 3.30 Recuperación oro, plata y cobre del proceso de cianuración en columna de tarjetas de circuitos impresos.

Es importante señalar la influencia de las diferencias entre las estructuras de los procesadores y las tarjetas de circuitos impresos ya que para estas últimas la recuperación de plata es muy cercana a la del oro. Esto permite concluir que las muchas de zonas en las que se encuentra plata metálica no están recubiertas de oro como se da en el caso de los pines. Los datos de adsorción se calcularon según la ecuación 3.2.

$$\text{Adsorción} [\%] = \frac{\text{Cantidad de metales lixiviados}}{\text{Cantidad de metales presente en la solución despues de la adsorción}} \times 100 \quad [3.2]$$

La recuperación en de oro y plata en carbón activado supera el 97 %. Estos resultados de adsorción se lograron obtener gracias a que se trabajó con una relación carbón-activado/solución de 3:1. La adsorción de cobre presenta un valor del 80,72 %. Esto se debe a que la concentración de cobre es más de 100 veces superior la concentración de oro y plata, y por ende el tiempo de residencia de la solución cargada en la columna de adsorción requerido para la recuperación cobre en carbón activado deber ser mayor que para el caso del oro y la plata.

En la Tabla 3.14., se presenta el resumen de las recuperaciones de los metales de interés en solución y el carbón activado.

Tabla 3.14 Recuperaciones oro, plata y cobre en solución y en carbón activado para ensayo de cianuración en columna de tarjetas de circuitos impresos

Recuperaciones en cada proceso	Metales analizados			
	Au	Ag	Cu	Nb
Cianuración (en solución)	47,89 %	51,64 %	77,15 %	48,07 %
Adsorción (en carbón activado)	99,34 %	97,32 %	80,72 %	98,17

Para la determinación de la cantidad de niobio recuperada en el carbón activado, se sometió al carbón cargado obtenido al final del proceso de cianuración en columna a ensayo al fuego. EL doré obtenido se analizó mediante microscopía electrónica. Es importante mencionar que no existen estudios que demuestren la solubilidad del niobio en cianuro, sin embargo esta sal es ampliamente usada para la disolución de oro. En el caso de este tipo de material, al estar el niobio contenido en una gran cantidad de oro (formando una aleación), al disolverse el oro del material las partículas de niobio pasan a la solución.

Ya se comprobó la afinidad entre el oro y niobio en el ensayo al fuego, al formar parte del doré como una aleación de oro-plata-niobio. Y adicionalmente también se demostró que tiene un comportamiento similar al del oro en el proceso de adsorción en carbón activado, debido a que los porcentajes de recuperación en carbón activados son muy cercanos (99,24 % para el oro y 98,17 % para el niobio).

3.4.2 DISEÑO CONCEPTUAL

Para el diseño conceptual de la planta se consideró los siguientes aspectos: estimación de la cantidad de PCBs para alimentación a la planta, diseño del proceso, equipos y materiales, ubicación de la planta, dimensionamiento de la

planta, análisis económico preliminar (Inche, Vergiú, Mavila, Godoy y Chung, 2004, p. 9).

3.4.2.1 Estimación de la cantidad de tarjetas de circuitos impresos a tratar

Para la estimación de la cantidad de tarjetas de circuitos impresos a tratar se consideró la información obtenida mediante entrevista personal de la Gerente Técnica de la empresa Consultora Vertmonde Cía. Ltda., misma que tiene un estimado de recolección de tarjetas de circuitos impresos de 2 toneladas mensuales para el año 2011.

Para el presente diseño, se definió que la planta de tratamiento podría captar el 50 % del material recolectado, esto permitiría una alimentación de materia prima de 1 000 kg/mes.

3.4.2.2 Dimensionamiento de la planta y especificaciones de la infraestructura

Para el dimensionamiento de la planta de tratamiento de tarjetas de circuitos impresos se consideró una operación continua de 30 días por mes. Y trabajará en dos lotes por mes, cada uno de 500 kg.

Con base en el dato anterior de alimentación de tarjetas y los resultados obtenidos en la sección 3.4.1, se realizó un balance de masa para proceso y el diagrama de bloques del mismo que se presenta en la Figura 3.31. Los datos de las condiciones de cada proceso, el balance de masa para cada corriente, y la recuperación global se presentan en las Tablas 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 y 3.20.

Se plantea como sitio de ubicación de la planta reciclaje en el parque industrial de Turubamba en el Distrito Metropolitano de Quito. El área disponible y el área de construcción de la planta serían de 174 m² y 600 m² respectivamente. El tipo de construcción debería ser industrial, de grandes luces, con estructura metálica,

mampostería de bloque, techo tipo galvalume y acabados que faciliten la limpieza. Adicionalmente debería contar con un sistema eléctrico para instalación de equipos de alta potencia. El costo estimado del terreno y obra civil es de 90 000 USD. En la Figura 3.31 se presenta el diagrama de bloques del proceso de recuperación de los metales de interés de tarjetas de circuitos impresos.

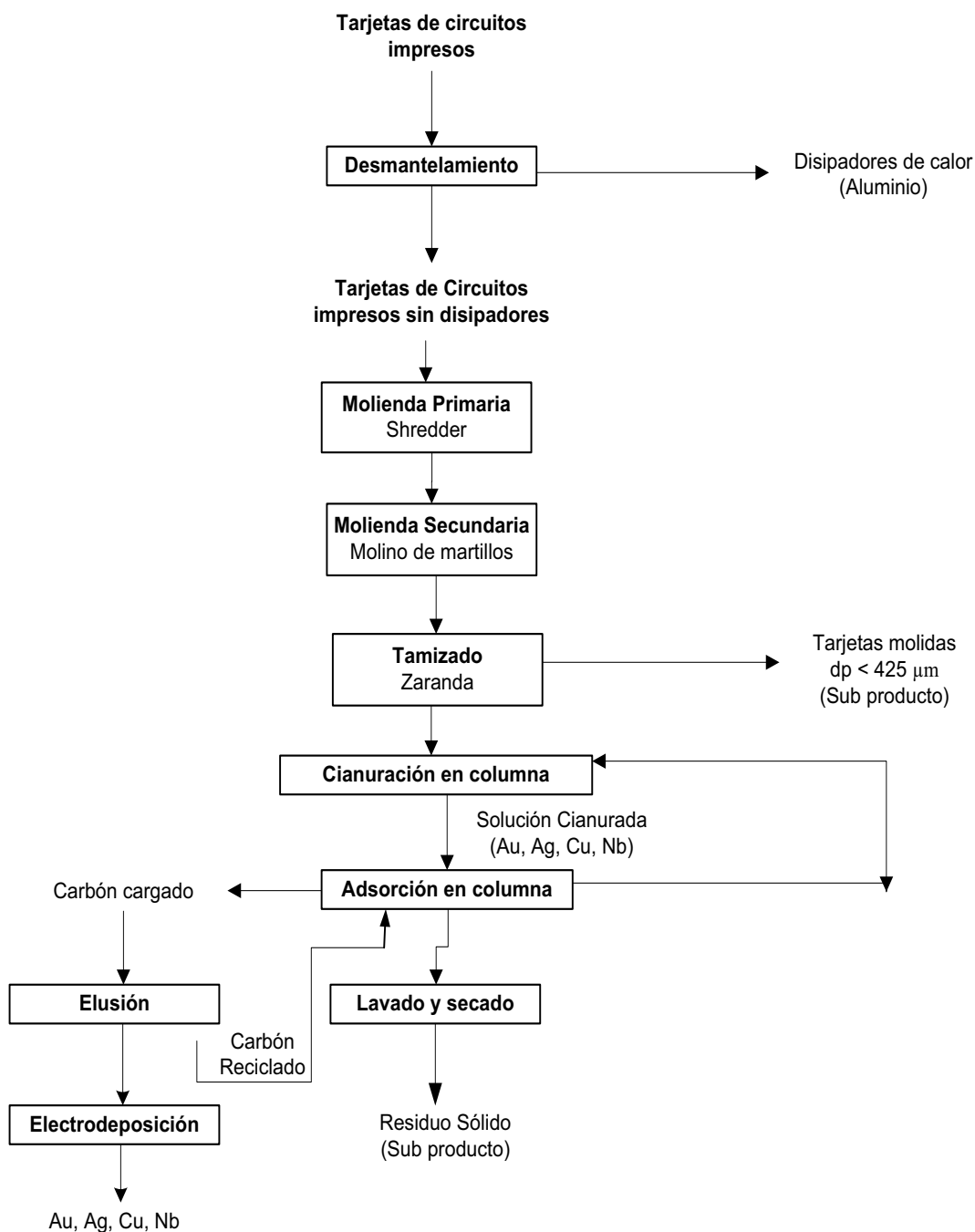


Figura 3.31 Diagrama de bloques del proceso de recuperación de oro, plata, cobre y niobio de tarjetas de circuitos impresos de computadoras descartadas

Como se aprecia en la Figura 3.31, el diagrama de boques obtenido al final de la investigación presenta algunas diferencias con relación a los diagramas citados en el primer capítulo. Las principales son: el reaprovechamiento de los residuos sólidos que se dependen del proceso (ya que tiene un suficiente contenido de metales preciosos para ser comercializado en el mercado internacional) y la recirculación de la solución cianurada después durante todo el proceso. Estas ventajas permiten considerar a este método de recuperación como ambientalmente amigable, ya que la salida de corrientes contaminantes desde el proceso al medio ambiente es mínima.

El diagrama de flujo de proceso de recuperación de los metales de interés se presenta en la Figura 3.32. Con base en el diagrama de proceso y en la estimación de materia prima disponible se dimensionó la planta. El plano de implementación y las zonas de la planta se presentan en la Figura 3.32 y en la Tabla 3.15 respectivamente.

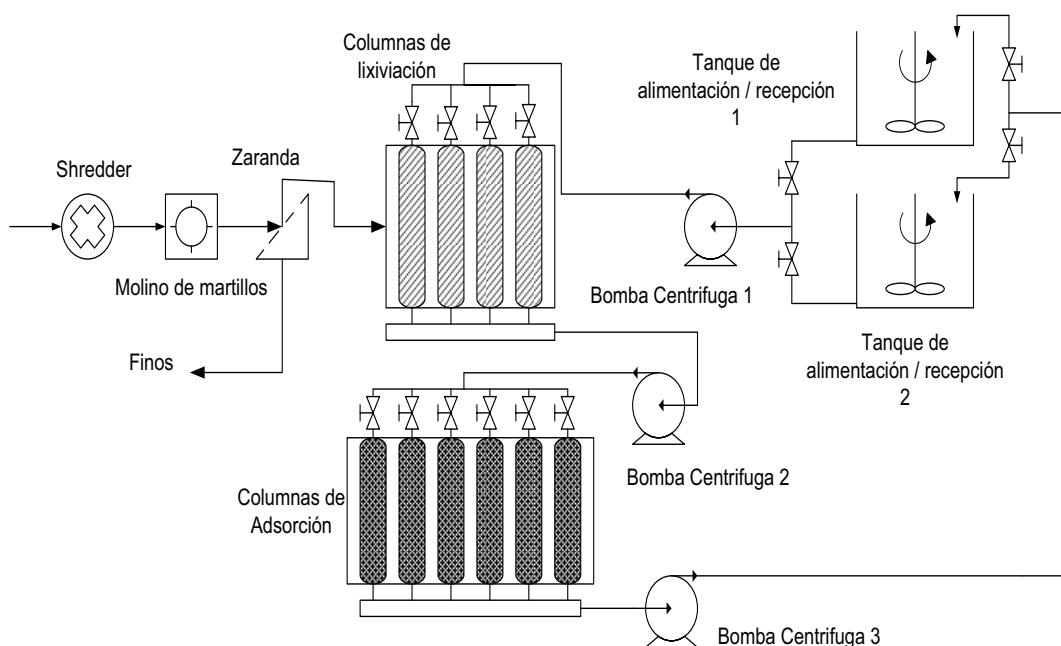


Figura 3.32 Diagrama de flujo de proceso de recuperación de oro, plata, cobre y niobio de tarjetas de circuitos impresos de computadoras descartadas

Como se muestra en la Figura 3.32, el proceso definido al final de la investigación consta de dos etapas de molienda, con equipos diseñados específicamente para

la reducción de tamaño de tarjetas de circuitos impresos. Un proceso de tamizado con una zaranda vibratorio. El proceso de cianuración en columna y asociación con carbón activado.

Adicionalmente se puede observar la utilización de dos tanques de alimentación y recepción, en desde los cuales se alimentará la solución cianurada y se retornará la solución débil después del proceso de adsorción. Y un sistema de bombeo que consta de 3 bombas centrifugas conectadas en serie.

En la Tabla 3.15 se muestra la designación de las zonas presentes en la planta. Como se aprecia en la Figura 3.33, el plano de implementación de la planta contempla todas las áreas requeridas para la operación del proceso, una recepción, oficinas para el ingeniero de turno, laboratorio y bodega.

Es importante mencionar que la zona 12, con una dimensión de 116 m², contigua a la zona destinada al proceso de recuperación está disponible a una potencial expansión de la planta. Esta expansión puede ser para incrementar la producción o para añadir procesos complementarios como: desarmado y almacenamiento de residuos electrónicos enteros.

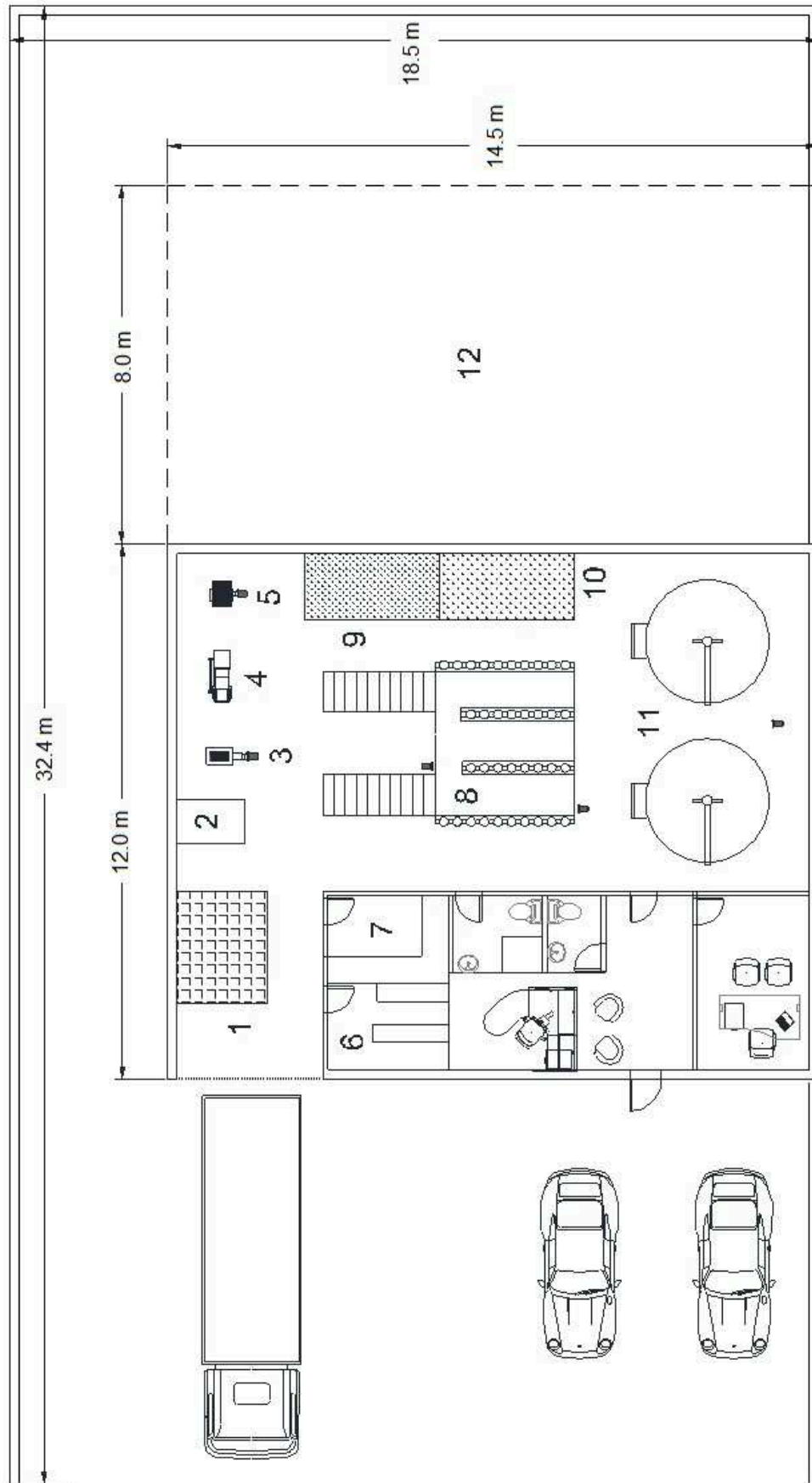


Figura 3.33 Plano de implementación de la planta

Tabla 3.15 Zonas presentes en la planta

Numero	Zona	Numero	Zona
1	Almacenaje	8	Lixiviación y Adsorción
2	Separación	9	Material molido
3, 4, 5	Molienda y tamizado	10	Secado de material
6	Bodega	11	Tanques
7	Laboratorio	12	Ampliación

Tabla 3.16 Condiciones de operación para el proceso de cianuración y adsorción

Proceso	Volumen de solución [m ³]	Flujo de solución [L/d]	Concentración	pH de trabajo	Tiempo [d]
Cianuración en columna	8	8 000	4 g/L NaCN	11	15
Adsorción en columna	8	8 000	150 g/L C.A.	11,5	15

Como se muestra en la Tabla 3.16 el tiempo requerido para la operación es de 15 días, al finalizar es tiempo el material tratado es retirado de las columnas y dispuesto en el área de secado. Inmediatamente después de haber retirado el material lixiviado se llena las columnas con nuevo material molido. El proceso de molienda se lo realiza durante los días en los que el material se encuentra en el proceso de cianuración en columna.

Tabla 3.17 Datos del balance de masa para las corrientes sólidas del proceso de reciclaje de tarjetas de circuitos impresos

Corriente	Peso [kg/mes]	Oro		Niobio		Plata		Cobre	
		Ley [mg/kg]	Total [g]	Ley [mg/kg]	Total [g]	Ley [mg/kg]	Total [g]	Ley (%)	Total [g]
Tarjetas de circuitos impresos (TIC)	1 000	-	-	-	-	-	-	-	-
Disipador de calor	118	-	-	-	-	-	-	-	-
TIC sin disipador de calor	882	712,00	627,98	46,20	40,75	1773	1564	23,43	206,65
TIC molidas previo proceso cianuración	800	613,20	490,56	43,40	34,72	1515	1212	23,40	187,20
Relave de cianuración	640	404,28	258,74	28,61	589,88	921,69	589,9	5,35	34,22

Tabla 3.18 Datos de peso de las corrientes que ingresan a cada proceso en el reciclaje de tarjetas de circuitos impresos

Proceso	Peso [kg/mes]
Desmantelamiento	882
Molienda	800
Cianuración	640

Es importante mencionar que al finalizar el proceso de desmantelamiento se obtiene como subproducto los disipados de calor, mismo que puede ser comercializado en el mercado nacional como chatarra de aluminio. Debido a la limitada cantidad que se obtiene de este material y a su bajo valor en el mercado nacional, no se lo consideró dentro del análisis económico preliminar.

Tabla 3.19 Equipos usados en el proceso y sus especificaciones

Equipo	Cantidad.	Especificaciones técnicas	Costo [USD]
Shredder	1	Molino con dos rodillos que tienen cuchilla tangentes con capacidad de 20 kg/h	8 000
Molino de martillos	1	Molino de martillos con capacidad de 20 kg por hora	8 000
Zaranda	1	Malla #40, capacidad 40 kg/h	4 000
Tanques de agitación	2	Volumen 15 m ³ , agitación mecánica, acero inoxidable	6 000
Bombas centrífugas	3	Flujo 10 L/min	210
Total			2 6610

Tabla 3.20 Consumo y costo de los reactivos y materia prima usados en la planta de tratamiento de tarjetas de circuitos impresos

Reactivo / Materia Prima	Consumo [kg/mes]	Costo [USD/kg]	Valor [USD/día]
NaCN	34	4,00	136
PCB	1 000	5,00	5 000
Total			5 136

3.4.3 ANÁLISIS ECONÓMICO PRELIMINAR

Para el análisis económico se consideró las capacidades y costos indicados en la sección 3.4.2. En la Tabla 3.21 se presentan los ingresos económicos mensuales correspondientes a la producción de los metales de interés.

Tabla 3.21 Consumo y costo de los reactivos y materia prima usados en la planta de tratamiento de tarjetas de circuitos impresos

Metal	Producción	Precio	Ingreso mensual [USD]
Oro	7,55 oz	1 600 USD/oz	1 176,30
Plata	20,13 oz	29 USD/oz	12 085,92
Cobre	144,70 kg	8,13 USD/kg	583,74
Total			13 845,96

En la Tabla 3.22 se muestran los gastos de inversión para la implementación de la planta de reciclaje.

Tabla 3.22 Gastos de inversión

Item	Valor [USD]
Terreno	30 000
Obra civil	60 000
Equipos	31 210
Capital de trabajo	27 292
Total	149 302

Se puede apreciar que el mayor porcentaje de los gastos de inversión se presentan en la adquisición del terreno y la construcción de la obra civil, aproximadamente el 60 %. Se contempló un capital de operación que puede sustentar las operaciones de la empresa durante los primeros tres meses.

Tabla 3.23 Costos operativos mensuales

Item	Costo [USD/mes]
Reactivos y material prima	7 850
Personal	2 100
Servicios (agua, electricidad)	200
Total	10 150

Tabla 3.24 Ingresos mensuales

Material	Producción (g/mes)	Precio (USD/g)	Ingreso mensual (USD/mes)
Oro	228,6	53,0	12 115,8
Plata	621,9	1,0	621,9
Cobre	116,8 (kg)	8,4 (USD/kg)	981,1
PCBs procesadas	900 (kg)	3,7 (USD/kg)	3 375
Total			17 093,8

Es importante mencionar que en el proceso desarrollado considera a las tarjetas de circuito impresas procesadas como un subproducto, ya que estas tienen un contenido de metales preciosos suficiente para ser comercializadas en el mercado internacional. Por esta razón las últimas dos etapas del proceso consisten en un lavado y secado de las tarjetas cianuradas.

En las Tabla 3.25 y 3.26 se muestran un flujo de caja mensual y anual respectivamente, donde se agrupan los ingresos, egresos y utilidades obtenidas para los dichos periodos.

Tabla 3.25 Flujo de caja mensual

Ítem	Valor (USD/mes)
Ingresos	17 094
Egresos	10 150
Utilidad bruta	6 944

En la Tabla 3.25 se muestra una utilidad bruta, debido a que para el análisis económico se consideró que la inversión inicial (que cubre los costos de construcción, equipamiento y capital de trabajo para los tres primeros meses de operación) proviene de un préstamo bancario con una tasa de interés del 10 % y una amortización lineal por diez años. La utilidad neta se reporta en la Tabla 3.26, esta utilidad se calculó restando al monto anual de amortización que se debe pagar a la entidad bancaria, la depreciación y la participación laboral.

Tabla 3.26 Flujo de caja anual

Ítem	Valor (USD/año)
Ingresos	206 651
Egresos	123 357
Amortización	25 330
Depreciación	3400
Participación Laboral	5456
Utilidad neta	48 108

Se estimó un horizonte de 10 años de operación para la planta, se definió una tasa inflación del 3 % y una tasa de oportunidad del 10 %. Con base en lo anterior se elaboró el flujo de fondos anuales para calcular los indicadores económicos: Valor actual neto (VAN), Tasa interna de retorno (TIR). Estos indicadores se elaboraron con cantidades de tarjetas recoladas equivalentes al 100, 50 y 25 % del valor estimado (1 000 kg/mes), los resultados presentan en la Tabla 3.27.

Tabla 3.27 Indicadores económicos obtenidos evaluados a diferentes tasas de recolección de tarjetas de circuitos impresos

Indicadores	Valores		
	Recolección 100 %	Recolección 50 %	Recolección 25 %
VAN	USD 105 925,6	USD - 126 757	USD - 269 488
TIR	27 %	< 0	< 0

Como se ve en la Tabla 3.25, los valores de las tasas internas de retorno para escenarios de recolección menores al estimado son negativo para el caso de recolección del 50 % e indefinido para el caso del recolección del 25 %. Esto debido a que se tiene pérdidas a partir del primer año de operación. Es importante resaltar el carácter primordial del sistema de recolección de la materia prima.

Se consideró para los análisis económicos un porcentaje del 100 % de la alimentación de tarjetas de circuitos impresos (1 000 kg/mes) debido a la facilidad que se provee a las empresas recicladoras al poder brindar un mecanismos de comercialización de PCBs en el mercado nacional. Debido a que el proceso que

comúnmente se emplea es la exportación a mercados extranjeros. Este proceso tiene como limitante la recepción del pago del material cuando éste se encuentra en el lugar de procesamiento. Al ubicar la planta de procesamiento en el DMQ la compra y pago del material es inmediato.

Es importante mencionar que el aporte del precio del oro en los ingresos obtenidos por la venta de los metales recuperados es del 93 %. La cotización del oro durante los últimos cinco años ha evidenciado una tasa de incremento permanente lo que permite suponer que el proyecto va a ser viable a lo largo del plazo estimado.

Con base en los indicadores obtenidos, con el precio actual y el 100 % de la recolección estimada se pudo terminar que el periodo de recuperación de la inversión es de 3,25 años. Lo que implica que a partir del tercer año de operación el proyecto obtendrá utilidades. En el Anexo VII se muestra la plantilla de cálculo de los indicadores económicos.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Se obtuvieron valores promedio del contenido de oro, plata y niobio en los procesadores de 1 836 g/t, 4 462 g/t y 124 g/t respectivamente. Para el caso de las tarjetas de circuitos impresos los resultados fueron 712 g/t de oro, 1 764 g/t y 48,2 g/t de niobio. Estos valores no pueden ser considerados representativos debido a la heterogeneidad de las muestras analizadas.
- El contenido promedio de cobre en procesadores y en tarjetas de circuitos impresos fue de 48,76 % y 23,43 % respectivamente. Los procesadores presentan un rango muy amplio en la concentración de cobre (entre 34,06 % hasta 87,90 %), mientras que para el caso de las tarjetas de circuitos impresos presentan un menor rango (entre 19,39 % hasta 27,21 %). Se puede considerar una cierta homogeneidad de la concentración de cobre en las tarjetas de circuitos impresos.
- Los valores de d_{80} de los procesadores y tarjetas de circuitos molidos fueron 1 600 y 6 700 μm respectivamente. El rango de tamaño apto para el proceso de cianuración en columna fue entre 3 350 y 425 μm .
- El proceso de cianuración directa sin lixiviación previa permite obtener mejores recuperaciones de oro, plata, cobre y niobio y menores tiempos de proceso.
- Los valores de los parámetros de cianuración que permitieron obtener los mayores porcentajes de extracción de oro, plata, cobre y niobio de procesadores fueron: concentración de cianuro de 4 g/L, pH entre 10,5 y 11,5, flujo de 20 L/d·kg_{muestra} y tiempo de 15 d. Con estas condiciones se alcanzó recuperaciones de 7,9 % de plata, 53,66 % de oro, 52,48 % de niobio y 74,14 % de cobre.

- La cianuración de tarjetas de circuitos impresos presentó recuperaciones de 47,89 % de plata, 51,64 % de oro, 48,07 % de niobio y 77,15 % de cobre, con los parámetros anteriores en circuito cerrado con un sistema de adsorción en columna con carbón activado.
- El proceso de adsorción en carbón activado permitió recuperaciones de: 99,34 % de plata, 97,32 % de oro, 98,17 % de niobio y 80,72 % de cobre.
- El diagrama de proceso obtenido consta de las etapas: de molienda primaria, molienda secundaria, tamizado, cianuración en columna, adsorción, lavado y secado. Este esquema permite el reciclaje de las tarjetas de circuitos impresos cianuradas, como subproducto para venta en el mercado extranjero, debido a que la concentración de oro y plata es de 319 g/t y 733 g/t respectivamente.
- El proceso de recolección de la materia prima es fundamental para la viabilidad de la implementación de la planta de reciclaje, ya que al trabajar con una alimentación igual o menor al 50 % de la estimada, el proyecto presenta pérdidas económicas a partir del primer año de operación.
- El análisis económico realizado mostro la factibilidad económica de implementar una planta de reciclaje a pequeña escala de tarjetas de circuitos impresos. Con una alimentación mensual de materia prima de 1 000 kg y un horizonte de 10 años de funcionamiento se determinó una rentabilidad del 27 % y valor actual neto de 105 925,6 USD.

4.2 RECOMENDACIONES

- Estudiar la influencia de la recirculación de la solución cianurada en el proceso de recuperación de oro, plata, cobre y niobio, al trabajar con más de un lote de tarjetas de circuitos impresos.
- Realizar ensayos de cianuración en lecho agitado del material menor a 425 μm obtenido del proceso de reducción de tamaño y que no se usó en el proceso de cianuración en columna debido a su poca permeabilidad.
- Realizar ensayos de lixiviación con ácido fluorhídrico para la recuperación de niobio con los procesos citados en la literatura.
- Realizar un estudio de mercado que permita determinar la cantidad real de tarjetas de circuitos impresos generadas por las empresas de reciclaje de residuos electrónicos en el Distrito Metropolitano de Quito.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 Autoridad de Desperdicios Sólidos. (2010). *Ventajas del reciclaje*. Recuperado de <http://www.ads.gobierno.pr/secciones/reciclaje/VENTAJASDELRECICLAJE.htm> (Octubre, 2011)
- 2 Baker, E., Bournay, E., Heberlein, C., Harayama, A. y Rekacewicz, P. (2004). *Vital Waste Graphics*. Recuperado de <http://www.grida.no/files/publications/vital-waste/waste%20report-full.pdf> (Octubre, 2010).
- 3 Basel Convention. (2011). *Where are WEEE in Africa?*. Recuperado de <http://www.basel.int/> (Enero, 2012).
- 4 Betts K., (2010). A changing e-waste equation. *Environmental Science & Technology*, 44(9) 3204.
- 5 Boeni, H., Silva, U. y Ott, D. (2008). *E-Waste Recycling in Latin America: Overview, Challenges and Potential*. Recuperado de http://ewasteguide.info/system/files/2008_Keynote_Boeni_REWAS.pdf (Marzo de 2010).
- 6 Boliden. (2010). *Expansion of e-scrap capacity at Rönnskär*. Recuperado de http://www.boliden.com/Documents/Press/Presentations/100503_e-skrot_ronn_skar_eng.pdf (Agosto de 2010)
- 7 Bolsa de Metales de Londres (LME). (2011). *Bolsa de Metales*. Recuperado de http://www.portal_minero.com/muestra_bolsa.php (Septiembre, 2011).
- 8 Bournay, E., Heberlein, C., Bovet, P., Rekacewicz, P. y Rizzolio, D. (2006). *Vital Waste Graphics 2*. http://www.grida.no/files/publications/vital-waste2/VWG2_p3to46.pdf (Octubre, 2010).

- 9 Castro, L. y Martins A. (2009). Recovery of tin and copper by recycling of printed circuit boards from obsolete computers. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 26(4), 649-657.
- 10 Chancerel, P. (2010). *Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment*, (Disertación doctoral no publicada). Technischen Universität Berlin, Berlin, Alemania.
- 11 Chancerel P., Meskers C., Hagelüken C. y Rotter V. (2009). Assessment of precious metal flows during preprocessing of waste electrical and electronic equipment. *Journal of Industrial Ecology*, 13(5), 791-810.
- 12 Chatterjee S. y Kumar K. (2009). Effective electronic waste management and recycling process involving formal and non-formal sectors. *International Journal of Physical Sciences*, 4(13), 893-905.
- 13 Corti, C. y Hagelüken C. (2010). Sustainable Recycling of Electronic Scrap. *Alchemist*, (59), 10-11
- 14 Cui, J. y Zhang, L. (2008). Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 158, 228-256.
- 15 De la Torre E., Espinoza V., Guevara A. y Lucion C. (2011). Récupération par cyanuration des métaux précieux contenus dans les cartes électroniques de téléphones portables. *Recyclage et Valorisation*, 34 56-60.
- 16 Espinoza, E. (2010). *Recuperación de metales de las tarjetas de circuito de celulares descartados*. Proyecto de titulación previa a la obtención del título de Ingeniero Químico, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- 17 Fazlul, B., Noorzahan, B., Shamsul, J. y Kamarudin, H. (2010). *Selective leaching for the recovery of Copper*. Proceedings of the Malaysian Metallurgical Conference '09, Perlis, Malaysia.

- 18 Garther. (2011). *Gartner Lowers PC Forecast as Consumers Diversify Computing Needs Across Devices*. Recuperado de <http://www.gartner.com/it/page.jsp?id=1570714> (Agosto, 2011)
- 19 Greenpeace. (2011). *Basura informática*. Recuperado de http://www.greenpeace.org/argentina/Global/argentina/report/2011/contaminacion/basura_el_electronica_otra_cara_tecnologia.pdf (Junio, 2010)
- 20 Gupta, C. (2003). *Chemical Metallurgy: Principles and Practice*. (1ª edición). Weinheim, Alemania, Editorial Wiley-VCH.
- 21 Habashi F. (1997). *Handbook of Extractive Metallurgy: Volume III*. (1ª edición). Weinheim, Alemania, Editorial Wiley-VCH.
- 22 Hagelüken, C. (2006). *Recycling of electronic scrap at Umicore's integrated metals smelter and refinery*. *World of Metallurgy*. Recuperado de http://www.preciousmetals.umicore.com/PMR/Media/e-scrap/show_recyclingOfEscrapAtUPMR.pdf (Enero, 2010).
- 23 Hester, R. y Harrison, R. (2009). *Electronic Waste Management*. (1ª edición) Cambridge, Reino Unido, Editorial Royal Society of Chemistry (RSC).
- 24 Inche, J., Vergiú, J., Mavila, D., Godoy, M. y Chung, A. (2004). Diseño y evaluación de una planta de reciclaje de envases TETRA PACK a pequeña escala. *Industrial Data*, 7(2), 07-17.
- 25 Khandpur, R. (2006). *Printed Circuit Boards: Design, Fabrication and Testing*. New York, Estados Unidos, Editorial McGraw-Hill.
- 26 Kooroshy, J., Korteweg, R. y de Ridder, M. (2010). *Rare Earth Elements And Strategic Mineral Policy*. Recuperado de <http://static.hcss.nl/files/uploads/33.pdf> (Marzo de 2011).

- 27 Kulandaisamy S., Prabhakar J., Adaikkalam P., Srinivasan G. N. y Raghavan M. (2003). The aqueous recovery of gold from electronic scrap. *Journal of the Minerals*, 55(8), 35-38
- 28 Lee J., Song H. y Yoo J. (2007). Present status of the recycling of waste electrical and electronic equipment in Korea. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(4), 380-397.
- 29 Li J., Lu H., Guo J., Xu Z y Zhou Y. (2007). Recycle Technology for Recovering Resources and Products from Waste Printed Circuit Boards. *Environmental Science & Technology*, 41(6), 1995–2000.
- 30 Marsden, J. y House, I. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction*. (2ª edición). Littleton, Estados Unidos, Editorial SME.
- 31 Mitzner, K. (2009). *Complete PCB Design Using or CAD Capture and PCB Editor*. (1ª edición). Shanghai, China, Editorial Elsevier.
- 32 Mueller, S. (2012). *UPGRADING AND REPAIRING PCs*. (20ª edición). Editorial Pearson Education, Indianapolis, Estados Unidos, pp. 31 – 177.
- 33 Oishi, T., Koyama, K., Alam S., Tanaka, M. y Lee J. (2007). Recovery of high purity copper cathode from printed circuit boards using ammoniacal sulfate or chloride solutions. *Hydrometallurgy*, (89), 82-88.
- 34 Park, Y. y Fray, D. (2009). Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards. *Journal of hazardous Materials*, 164(2-3), 1152-11581.
- 35 Pinto V. N. y Patil D. (2008). E-waste hazard: The impending challenge. *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 12, 65-70.
- 36 Plataforma Regional de Residuos Electrónicos en Latinoamérica y el Caribe. (2011). *Lineamientos para la gestión de los residuos de aparatos eléctricos*

- y electrónicos (RAEE) en Latinoamérica: Resultados de una mesa regional de trabajo público – privado*. Recuperado de <http://www.residuoselectronicos.net/documents/110410-documento-lineamientos-para-la-gestion-de-raee-en-la-mesa-de-trabajo-publico-privada.pdf> (Noviembre, 2011)
- 37 Quinet, P., Proost, J., A. y Lierde, V. (2005). Recovery of precious metals from electronic scrap by hydrometallurgical processing routes. *Mineral Metallurgical Process*, 22 (1), pp. 17–22
- 38 Ramachandra, S. (2006). Resource Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes. (1ª edición). Amsterdam, Holanda, Editorial Elsevier.
- 39 RECYCLA Chile S.A. (2007). *Residuos Electrónicos La Nueva Basura del Siglo XXI*. Santiago, Chile, Editorial Fundación Casa de la Paz.
- 40 Rosales J. (2011). Gestión integral y reciclaje de ewaste: Experiencias en Ecuador. *Manejo de Desechos Tecnológicos* (pp. 1-2). Quito, Ecuador.
- 41 Statistics Canada (2009). *Material composition of personal computers*. Recuperado de http://www41.statcan.ca/2006/1762/htm/ceb1762_003_6-eng.htm (Septiembre, 2010)
- 42 Steubing B., Böni H., Schluep M., Silva U. y Ludwig C. (2010). Assessing computer waste generation in Chile using material flow analysis. *Waste Management*, 30(3), 473-482.
- 43 Tahara ,S., Numata H., Yorozu, S., Hashimoto,Y., y Nagasawa, S. (2000). Superconducting Technology for Digital Applications Using Niobium Josephson Junctions, *IEICE Transactions on Electronics Publication*, E83(C), 60-68.

- 44 Wäger, P., Schlupe, M., Müller, E. y Gloor, R. (2011). RoHS regulated Substances in Mixed Plastics from Waste Electrical and Electronic Equipment. *Environmental Science Technology*, 46, 628 – 635.
- 45 Wang, X., Zheng, S., Xu, H. y Zhang, Y. (2009). Leaching of niobium and tantalum from a low-grade ore using a KOH roast–water leach system. *Hydrometallurgy*, (98), 219-223
- 46 Williams P. (2010). Valorization of Printed Circuit Boards from Waste Electrical and Electronic Equipment by Pyrolysis. *Waste and Biomass Valorization*, 1(1), 107-120.
- 47 Yu, J., Williams, E., Ju, M. y Yang, Y. (2010). Forecasting Global Generation of Obsolete Personal Computers. *Environmental Science & Technology*, 44(9), 3232-3237.

ANEXOS

ANEXO I

DETERMINACIÓN DE LA COMPOSICIÓN DE COMPUTADORAS DESCARTADAS

METODOLOGÍA

- Se desarmaron 20 CPU (Unidad central de procesamiento) de computadoras descartadas y se identificó los componentes dentro de los mismos según la Tabla AI.1 y AI.2
- Se registró los componentes de los CPUs desarmados según la Tabla AI.3.
- Se promedió los pesos correspondientes a cada una de los componentes del CPU.

Tabla AI.1 Partes de un CPU

Nº Parte	Nombre de parte	Material
1	Tornillos	Hierro
2	Carcasa Metálica	Hierro
3	Fuente de Poder	Mezcla Compleja
4	Tarjetas (TCI pequeñas)	Mezcla Compleja
5	Memorias RAM	Mezcla Compleja
6	Ventilador	Mezcla Simple
7	Tarjeta Madre	Mezcla Compleja
8	Disipador	Aluminio
9	Procesador	Mezcla Compleja
10	Tapa frontal	Plástico
11	Disco Duro	Mezcla Compleja
12	Disco Flexible	Mezcla Compleja
13	Unidad de CD o DVD	Mezcla Compleja
14	Cables	Mezcla Simple

Tabla AI.2 Composición de las mezclas de materiales presentes en un CPU

Mezcla	Composición
Simple	Plástico y cobre
Compleja	Metales base, metales preciosos, metales del grupo del paladio y plástico

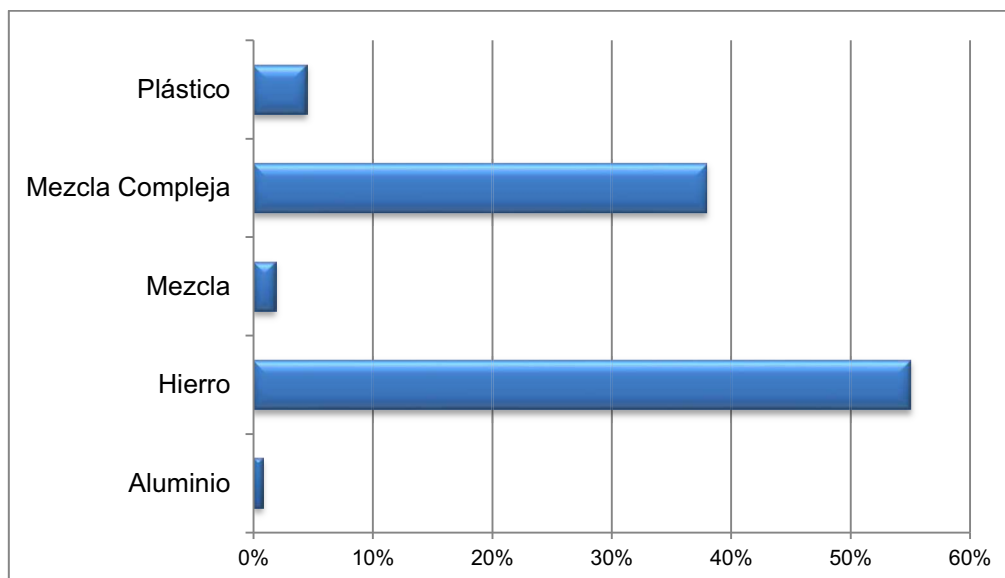
Tabla AI.3 Evaluación de desensamblaje

Producto/Tecnología: _____		Fecha: _____	
Responsable: _____			
1	2	3	4
Nº Parte	Cantidad	Peso Total [g]	Observaciones
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			

De acuerdo a las Tablas anteriores se elaboró la composición general de un CPU con los promedios de los componentes principales dentro de un CPU, a partir de los equipos utilizados, estos datos se muestran en la tabla AI.4. Adicionalmente se elaboró dos diagramas tipo barras para identificar la composición general del CPU, mismos que se presenta en la Figura AI.1 y AI.2.

Tabla AI.4 Composición general de un CPU

Componente	Peso [g]	Peso CPU [g]	Porcentaje	Material
Tornillos	24,5	8145,4	0,30 %	Hierro
Carcasa Metálica	4457,1		54,72 %	Hierro
Fuente de Poder	953,4		11,70 %	Mezcla Compleja
Tarjetas (TCI pequeñas)	88,2		1,08 %	Mezcla Compleja
Memorias RAM	21,6		0,27 %	Mezcla Compleja
Ventilador	39,5		0,48 %	Mezcla Simple
Tarjeta Madre	470,3		5,77 %	Mezcla Compleja
Disipador	63,3		0,78 %	Aluminio
Procesador	17,0		0,21 %	Mezcla Compleja
Tapa frontal	361,4		4,44 %	Plástico
Disco Duro	532,1		6,53 %	Mezcla Compleja
Disco Flexible	355,7		4,37 %	Mezcla Compleja
Unidad de CD o DVD	650,5		7,99 %	Mezcla Compleja
Cables	110,8		1,36 %	Mezcla Simple

**Figura AI.1** Materiales presentes en un CPU

De la composición obtenida se aprecia que el peso de la tarjeta madre (tarjeta de circuitos impresos) es 27,6 más que el peso del procesador.

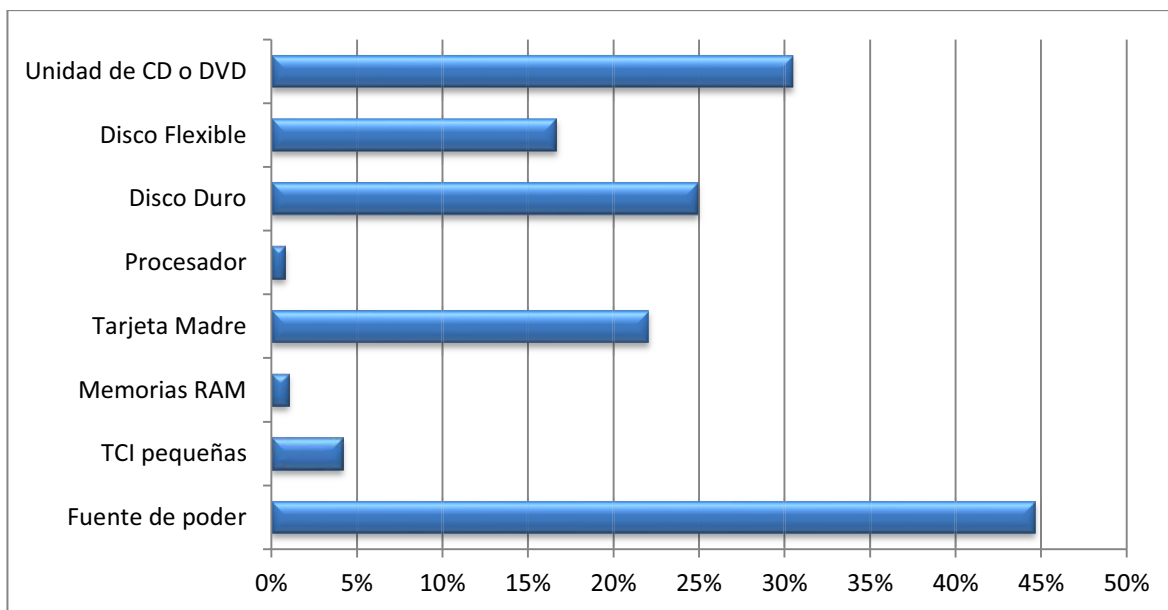


Figura AI.2 Componentes electrónicos que presentan metales preciosos

ANEXO II

DETERMINACIÓN DEL D_{80} PARA LAS MUESTRAS MOLIDAS EN MOLINO DE MARTILLOS

Tabla AII.1 Ensayo granulométrico de procesadores plásticos molidos

Malla #	Abertura (μm)	Log dp	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasado Acumulado
3,5	5 660	3,75	45,8	4,42	4,42	95,58
6	3 350	3,53	115	11,10	15,53	84,47
16	1 180	3,07	92,3	8,91	24,44	75,56
40	425	2,63	412,3	39,81	64,25	35,75
80	180	2,26	201,5	19,46	83,71	16,29
150	104	2,02	89,20	8,61	92,32	7,68
-150	-104		79,5	7,68	100,00	0,00
			1035,60	100,00		

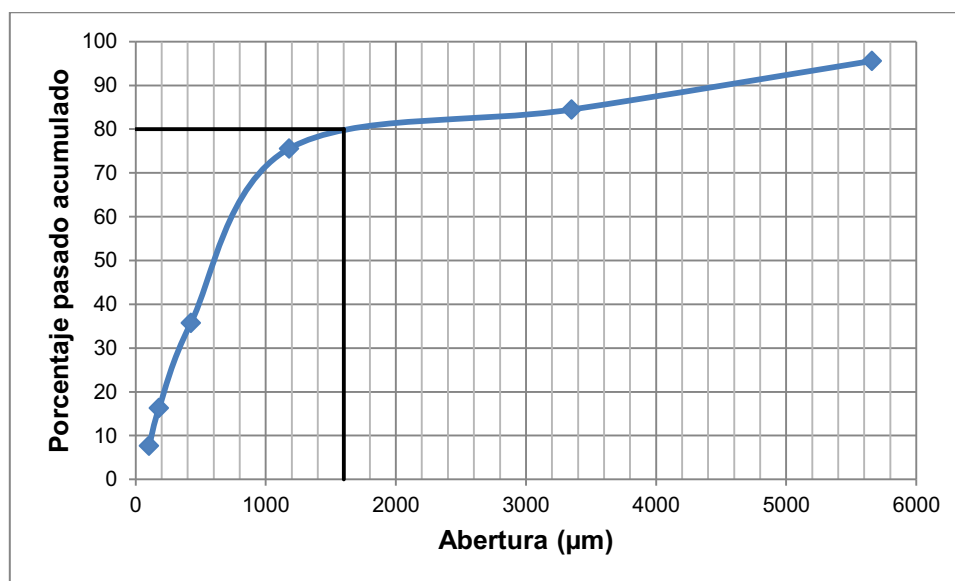
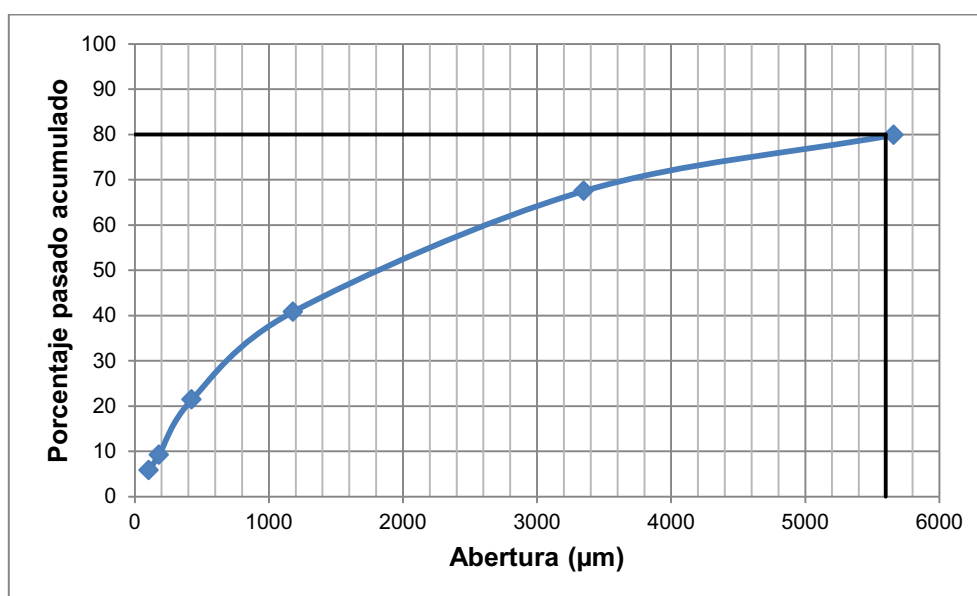


Figura AII.1 Curva granulométrica para procesadores plásticos molidos

Con base en la curva granulométrica se determinó que el d_{80} de la muestra analizada fue de 1 600 μm

Tabla AII.2 Ensayo granulométrico de tarjetas de circuitos impresos molidas

Malla #	Abertura (μm)	Log dp	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasado Acumulado
3,5	5 660	3,75	62,40	20,10	20,10	79,90
6	3 350	3,53	38,45	12,38	32,48	67,52
16	1 180	3,07	82,90	26,70	59,19	40,81
40	425	2,63	60,23	19,40	78,59	21,41
80	180	2,26	37,86	12,19	90,78	9,22
150	104	2,02	10,63	3,42	94,21	5,79
-150	-104		17,99	5,79	100,00	0,00
			310,46	100,00		

**Figura AII.2** Curva granulométrica para tarjetas de circuito impreso molidas

Con base en la curva granulométrica se determinó que el d_{80} de la muestra analizada fue de 6 700 μm

ANEXO III

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE CIANURO LIBRE

PROCEDIMIENTO

- Preparar una solución estándar de nitrato de plata (AgNO_3) de concentración 4.33 g/L.
- Tomar una alícuota de 5mL de la solución cianurada.
- Añadir dos gotas de KI al 10 % y titular con la solución estándar de nitrato de plata (el punto de final de titulación se da al momento que la solución tenga coloración amarilla).

CÁLCULOS

En el proceso de titulación se produce la siguiente reacción:



De acuerdo a la estequiometría de la reacción se tiene:

$$Y \text{ mL} \times \frac{4,33 \text{ g AgNO}_3}{1\,000 \text{ mL}} \times \frac{98 \text{ g NaCN}}{169,87 \text{ g AgNO}_3} = Y \times 0,0025 \text{ g NaCN} \quad [\text{AIII.2}]$$

Empleando la relación previamente calculada se tiene que: Y mL de solución de AgNO_3 consumen $Y \times 0,0025$ g de NaCN. La concentración de cianuro libre se obtiene al dividir los gramos de cianuro consumidos para el volumen de la alícuota.

ANEXO IV

FICHAS TÉCNICAS DE CIANURACIÓN

Ficha Técnica N° 1

Muestra PM0: Procesador cerámico sin moler

Ensayo No: 1

Objetivo: Cianurar un procesador cerámico para la recuperación de oro, plata y cobre.

Condiciones de Cianuración:

- Peso de la muestra: 29,1 g
- Volumen de solución: 1 L
- pH inicial: 10,5
- pH trabajo: 11,0
- Tiempo de lixiviación: 24 h
- Concentración de cianuro: 4 g/L
- Tipo de cianuración: Agitada
- Pretratamiento: Ninguno

En la Figura AIV.1 y Tablas AIV.1, AIV.2, AIV.3 y AIV.4 se presentan los resultados de la cianuración de la muestra PM0 con las condiciones antes mencionadas.

Tabla AIV.1 Control de cianuración PM0

Tiempo (h)	AgNO ₃ consumido (mL)	[CN ⁻] libre (g)	[CN ⁻] añadido (g)	pH
1	1,0	3,5	0,5	11,1
2	0,8	3,6	0,4	11,1
4	0,8	3,6	0,4	11,1
24	0,4	3,8	0,2	11,4
Total de NaCN añadido (g): 5,5				
Consumo de NaCN (kg/t): 110				

Tabla AIV.2 Resultados de cianuración (análisis de oro) PM0

Fracción	Peso (g)	Volumen (L)	Contenido de Au		Peso de Au (mg)	Repartición (%)
			(mg/g)	(mg/L)		
Relave	29	-	0,61	-	17,69	27,28
Solución Fuerte	-	0,50	-	93,21	46,61	71,88
Solución Lavado	-	0,15	-	3,64	0,55	0,84
Totales	-	-	-	-	64,84	100,00

Tabla AIV.3 Resultados de cianuración (análisis de plata) PM0

Fracción	Peso (g)	Volumen (L)	Contenido de Ag		Peso de Ag (mg)	Repartición (%)
			(mg/g)	(mg/L)		
Relave	29	-	1,41	-	40,89	29,35
Solución Fuerte	-	0,50	-	194,60	97,30	69,84
Solución Lavado	-	0,15	-	7,59	1,14	0,82
Totales	-	-	-	-	139,33	100,00

Recuperación de oro en solución (Sol. Fuerte + Sol. Lavado) = 72,72 %

Recuperación de plata en solución (Sol. Fuerte + Sol. Lavado) = 70,64 %

Alimentación recalculada de oro: 2 235 g/t

Alimentación recalculada de plata: 4 804 g/t

Tabla AIV.4 Cinética de cianuración PM0

Tiempo (h)	Recuperación Au (%)	Recuperación Ag (%)	Recuperación Cu (%)
1	41,2	19,34	9,76
2	47,63	27,89	14,51
4	54,85	38,41	21,34
24	65,23	59,33	31,80

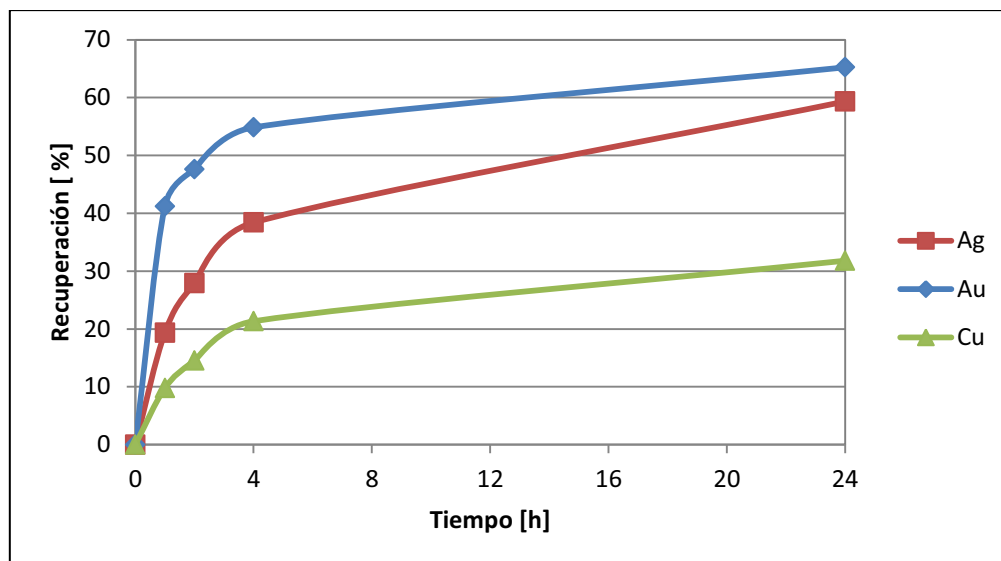


Figura AIV.1 Cinética de cianuración PM0

Ficha Técnica N° 2

Muestra PM1: Procesadores plásticos molidos

Ensayo No: 2

Objetivo: Cianurar procesadores plásticos para la recuperación de oro, plata y cobre.

Condiciones de Cianuración:

- Peso de la muestra: 50 g
- Volumen de solución: 1 L
- pH inicial: 10,5
- pH trabajo: 11,0
- Tiempo de lixiviación: 24 h
- Concentración de cianuro: 4 g/L
- Tipo de cianuración: Agitada
- Pretratamiento: Reducción de tamaño

En la Figura AIV.2 y Tablas AIV.5, AIV.6, AIV.7 y AIV.8 se presentan los resultados de la cianuración de la muestra PM1 con las condiciones antes mencionadas.

Tabla AIV.5 Control de cianuración PM1

Tiempo (d)	AgNO3 consumido (mL)	[CN –] libre (g)	[CN –] añadido (g)	pH
1	3,0	2,5	1,5	11,1
2	2,6	2,7	1,3	10,9
4	3,4	2,3	1,7	11,0
24	2,6	2,7	1,3	10,8
Total de NaCN añadido (g): 9,8				
Consumo de NaCN (kg/t): 196				

Tabla AIV.6 Resultados de cianuración (análisis de oro) PM1

Fracción	Peso (g)	Volumen (L)	Contenido de Au		Peso de Au (mg)	Repartición (%)
			(mg/g)	(mg/L)		
Relave	48,53	-	0,92	-	44,65	38,81
Solución Fuerte	-	0,96	-	72,85	69,94	60,79
Solución Lavado	-	0,30	-	1,53	0,46	0,40
Totales	-	-	-	-	115,04	100,00

Tabla AIV.7 Resultados de cianuración (análisis de plata) PM1

Fracción	Peso (g)	Volumen (L)	Contenido de Ag		Peso de Ag (mg)	Repartición (%)
			(mg/g)	(mg/L)		
Relave	48,53	-	3,24	-	157,24	50,97
Solución Fuerte	-	0,96	-	156,45	150,19	48,68
Solución Lavado	-	0,30	-	3,60	1,08	0,35
Totales	-	-	-	-	308,51	100,00

Recuperación de oro en solución (Sol. Fuerte + Sol. Lavado) = 21,46 %

Recuperación de plata en solución (Sol. Fuerte + Sol. Lavado) = 1,82 %

Alimentación recalculada de oro: 118,46 g/t

Alimentación recalculada de plata: 319,96 g/t

Tabla AIV.8 Cinética de cianuración PM1

Tiempo (h)	Recuperación Au (%)	Recuperación Ag (%)	Recuperación Cu (%)
1	48,74	41,34	63,82
2	52,76	44,51	67,12
4	57,33	46,21	69,57
24	63,35	51,21	80,27

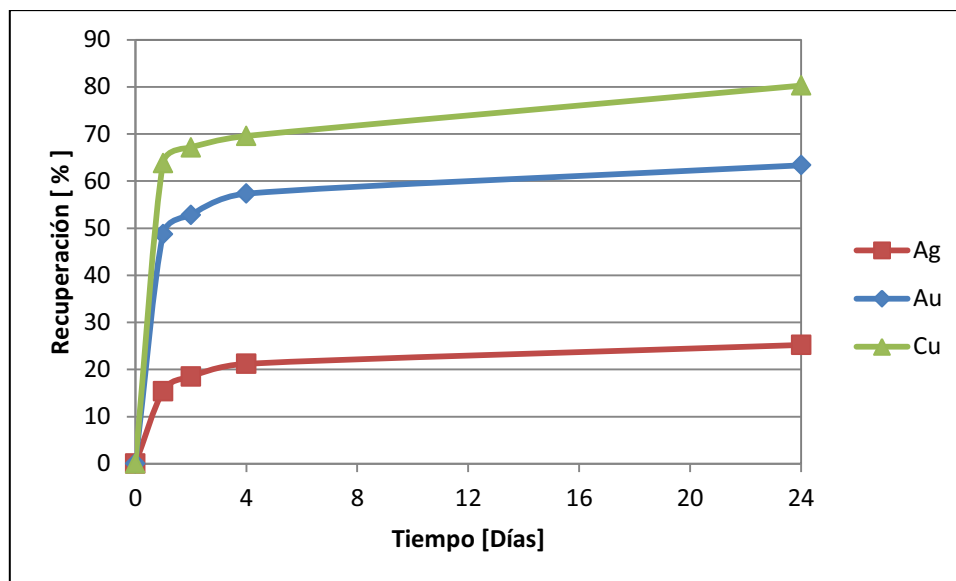


Figura AIV.2 Cinética de cianuración PM1

Ficha Técnica N° 3

Muestra PM2: Procesadores plásticos molidos

Ensayo No: 3

Objetivo: Cianurar procesadores plásticos para la recuperación de oro, plata y cobre.

Condiciones de Cianuración:

- Peso de la muestra: 50 g
- Flujo de solución: 3 L/d
- pH inicial: 10,5
- pH trabajo: 11,0
- Tiempo de lixiviación: 5 d
- Concentración de cianuro: 4 g/L
- Tipo de cianuración: En columna (circuito abierto)
- Pretratamiento: Reducción de tamaño

En la Figura AIV.3 y Tablas AIV.9, AIV.10, AIV.11 y AIV.12 se presentan los resultados de la cianuración de la muestra PM2 con las condiciones antes mencionadas.

Tabla AIV.9 Control de cianuración PM2

Tiempo (d)	AgNO3 consumido (mL)	[CN –] libre (g)	[CN –] añadido (g)	pH
1	4,2	1,9	2,1	11,1
2	4,0	2,0	2,0	10,9
3	3,8	2,1	1,9	11,0
4	4,0	2,0	2,0	10,8
5	3,6	2,2	1,8	11,1
Total de NaCN añadido (g): 13,8				
Consumo de NaCN (kg/t): 276				

Tabla AIV.10 Resultados de cianuración (análisis de oro) PM2

Fracción	Peso (g)	Volumen (L)	Contenido de Au		Peso de Au (mg)	Repartición (%)
			(mg/g)	(mg/L)		
Relave	47,23	-	1,97	-	93,04	78,54
Solución Fuerte	-	0,96	-	26,16	25,11	21,20
Solución Lavado	-	0,30	-	1,02	0,31	0,26
Totales	-	-	-	-	118,46	100,00

Tabla AIV.11 Resultados de cianuración (análisis de plata) PM2

Fracción	Peso (g)	Volumen (L)	Contenido de Ag		Peso de Ag (mg)	Repartición (%)
			(mg/g)	(mg/L)		
Relave	47,23	-	6,65	-	314,13	98,18
Solución Fuerte	-	0,96	-	6,00	5,76	1,80
Solución Lavado	-	0,30	-	0,23	0,07	0,02
Totales	-	-	-	-	319,96	100,00

Recuperación de oro en solución (Sol. Fuerte + Sol. Lavado) = 21,46 %

Recuperación de plata en solución (Sol. Fuerte + Sol. Lavado) = 1,82 %

Alimentación recalculada de oro: 118,46 g/t

Alimentación recalculada de plata: 319,96 g/t

Tabla AIV.12 Cinética de cianuración PM2

Tiempo (d)	Recuperación Au (%)	Recuperación Ag (%)	Recuperación Cu (%)
1	6,76	0,38	7,36
2	11,45	0,82	14,51
3	16,10	1,16	21,34
4	18,08	1,30	27,80
5	22,75	1,96	32,06

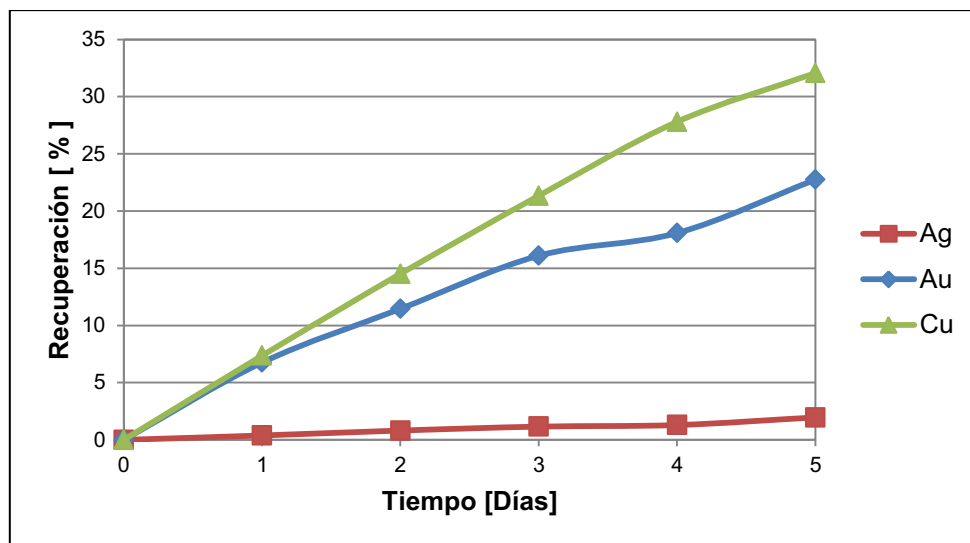


Figura AIV.3 Cinética de cianuración PM2

Ficha Técnica N° 4

Muestra PM3: Procesadores plásticos molidos

Ensayo No: 4

Objetivo: Cianurar procesadores plásticos para la recuperación de oro, plata y cobre.

Condiciones de Cianuración:

- Peso de la muestra: 50 g
- Flujo de solución: 1 L/d
- pH inicial: 10,5
- pH trabajo: 11,0
- Tiempo de lixiviación: 15 d
- Concentración de cianuro: 4 g/L
- Tipo de cianuración: En columna (circuito abierto)
- Pretratamiento: Reducción de tamaño

En la Figura AIV.4 y Tablas AIV.13, AIV.14, AIV.15 y AIV.16 se presentan los resultados de la cianuración de la muestra PM3 con las condiciones antes mencionadas.

Tabla AIV.13 Control de cianuración PM3

Tiempo (d)	AgNO3 consumido (mL)	[CN ⁻] libre (g)	[CN ⁻] añadido (g)	pH
1	4,6	1,7	2,3	11
2	4,4	1,8	2,2	11,1
3	4,8	1,6	2,4	10,86
4	4,2	1,9	2,1	11,15
5	4	2	2	11,06
6	3,8	2,1	1,9	10,75
7	4,4	1,8	2,2	10,98
8	4,2	1,9	2,1	11,05
9	3,4	2,3	1,7	10,68
10	4	2	2	11,11
11	3,8	2,1	1,9	11,05
12	3	2,5	1,5	11,16
13	3,2	2,4	1,6	11,07
14	2,4	2,8	1,2	10,88
15	1,4	3,3	0,7	10,97
Total de NaCN añadido (g): 31,8				
Consumo de NaCN (kg/t): 636				

Tabla AIV.14 Resultados de cianuración (análisis de oro) PM3

Fracción	Peso (g)	Volumen (L)	Contenido de Au		Peso de Au (mg)	Repartición (%)
			(mg/g)	(mg/L)		
Relave	41,57	-	1,53	-	63,60	51,41
Solución Fuerte	-	0,96	-	61,71	59,24	47,89
Solución Lavado	-	0,30	-	2,90	0,87	0,70
Totales	-	-	-	-	123,71	100,00

Tabla AIV.15 Resultados de cianuración (análisis de plata) PM3

Fracción	Peso (g)	Volumen (L)	Contenido de Ag		Peso de Ag (mg)	Repartición (%)
			(mg/g)	(mg/L)		
Relave	41,57	-	6,93	-	288,08	92,46
Solución Fuerte	-	0,96	-	24,14	23,17	7,44
Solución Lavado	-	0,30	-	1,11	0,33	0,11
Totales	-	-	-	-	311,59	100,00

Recuperación de oro en solución (Sol. Fuerte + Sol. Lavado) = 48,59 %

Recuperación de plata en solución (Sol. Fuerte + Sol. Lavado) = 7,55 %

Alimentación recalculada de oro: 123,71g/t

Alimentación recalculada de plata: 311,59 g/t

Tabla AIV.16 Cinética de cianuración PM3

Tiempo (d)	Recuperación Au (%)	Recuperación Ag (%)	Recuperación Cu (%)
1	9,68	0,18	7,95
2	17,82	0,30	15,76
3	26,91	0,33	24,05
4	32,37	0,52	32,19
5	36,05	0,77	40,00
6	42,97	0,90	43,04
7	45,76	1,41	52,34
8	48,04	3,22	57,15
9	49,70	4,80	61,39
10	50,79	5,62	65,19
11	51,95	7,00	69,35
12	52,41	7,32	71,63
13	52,73	7,47	72,37
14	53,23	7,73	73,63
15	53,66	7,90	74,14

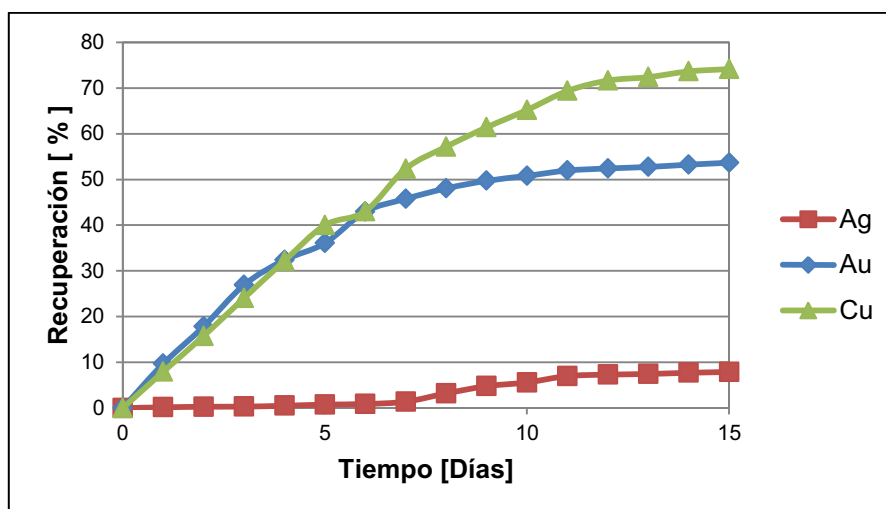


Figura AIV.4 Cinética de cianuración PM3

Ficha Técnica N° 5

Muestra PM4: Procesadores plásticos molidos pretratados con NaOH

Ensayo No: 5

Objetivo: Cianurar procesadores plásticos para la recuperación de oro, plata y cobre.

Condiciones de Cianuración:

- Peso de la muestra: 50 g
- Flujo de solución: 1 L/d
- pH inicial: 10,5
- pH trabajo: 11,0
- Tiempo de lixiviación: 15 d
- Concentración de cianuro: 4 g/L
- Tipo de cianuración: En columna (circuito abierto)
- Pretratamiento: Reducción de tamaño y lixiviación con NaOH

En la Figura AIV.5 y Tablas AIV.17, AIV.18, AIV.19 y AIV.20 se presentan los resultados de la cianuración de la muestra PM4 con las condiciones antes mencionadas.

Tabla AIV.17 Control de cianuración PM4

Tiempo (d)	AgNO3 consumido (mL)	[CN ⁻] libre (g)	[CN ⁻] añadido (g)	pH
1	2,4	2,8	1,2	10,9
2	3	2,5	1,5	11,1
3	2,4	2,8	1,2	11,07
4	3,2	2,4	1,6	11,12
5	3,8	2,1	1,9	11,3
6	4	2	2	11
7	4	2	2	11,1
8	4,4	1,8	2,2	10,87
9	3,6	2,2	1,8	11,05
10	3,2	2,4	1,6	11
11	2,6	2,7	1,3	11,1
12	2,4	2,8	1,2	10,95
13	2,8	2,6	1,4	10,86
14	2,4	2,8	1,2	11,15
15	1,8	3,1	0,9	11,06
Total de NaCN añadido (g): 27				
Consumo de NaCN (kg/t): 540				

Tabla AIV.18 Resultados de cianuración (análisis de oro) PM4

Fracción	Peso (g)	Volumen (L)	Contenido de Au		Peso de Au (mg)	Repartición (%)
			(mg/g)	(mg/L)		
Relave	44,47	-	1,72	-	76,49	72,92
Solución Fuerte	-	0,98	-	28,62	28,05	26,74
Solución Lavado	-	0,30	-	1,17	0,35	0,34
Totales	-	-	-	-	104,89	100

Tabla AIV.19 Resultados de cianuración (análisis de plata) PM4

Fracción	Peso (g)	Volumen (L)	Contenido de Ag		Peso de Ag (mg)	Repartición (%)
			(mg/g)	(mg/L)		
Relave	44,47	-	6,85	-	304,62	96,78
Solución Fuerte	-	0,98	-	10,16	9,96	3,16
Solución Lavado	-	0,30	-	0,62	0,19	0,06
Totales	-	-	-	-	314,77	100

Recuperación de oro en solución (Sol. Fuerte + Sol. Lavado) = 30,08 %

Recuperación de plata en solución (Sol. Fuerte + Sol. Lavado) = 3,22 %

Alimentación recalculada de oro: 104,89 g/t

Alimentación recalculada de plata: 314,77 g/t

Tabla AIV.20 Cinética de cianuración PM4

Tiempo (d)	Recuperación Au (%)	Recuperación Ag (%)	Recuperación Cu (%)
1	2,02	0,16	3,75
2	3,94	0,24	7,80
3	9,41	0,43	12,08
4	12,48	0,61	17,27
5	14,29	0,73	20,32
6	15,45	0,87	25,12
7	18,87	1,89	27,53
8	19,89	1,98	29,68
9	20,99	2,11	33,10
10	22,00	2,17	33,67
11	21,91	2,28	34,62
12	23,34	2,42	35,27
13	24,27	2,90	39,61
14	24,75	3,09	40,43
15	24,89	3,33	42,22

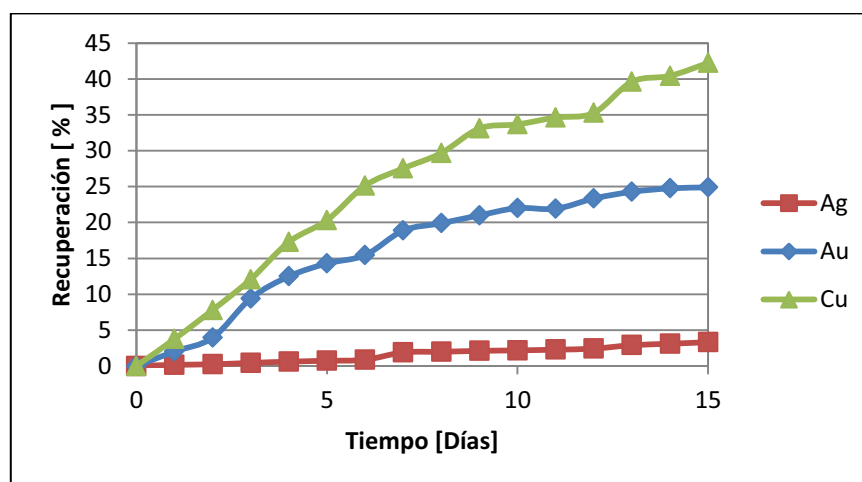


Figura AIV.5 Cinética de cianuración PM4

Ficha Técnica N° 6

Muestra PM5: Procesadores plásticos molidos

Ensayo No: 6

Objetivo: Cianurar procesadores plásticos para la recuperación de oro, plata y cobre.

Condiciones de Cianuración:

- Peso de la muestra: 50 g
- Flujo de solución: 1 L/d
- pH inicial: 10,5
- pH trabajo: 11,0
- Tiempo de lixiviación: 15 d
- Concentración de cianuro: 4 g/L
- Tipo de cianuración: En columna (circuito abierto)
- Pretratamiento: Reducción de tamaño y lixiviación con H_2SO_4

En la Figura AIV.6 y Tablas AIV.21, AIV.22, AIV.23 y AIV.24 se presentan los resultados de la cianuración de la muestra PM5 con las condiciones antes mencionadas.

Tabla AIV.21 Control de cianuración PM5

Tiempo (d)	AgNO3 consumido (mL)	[CN ⁻] libre (g)	[CN ⁻] añadido (g)	pH
1	3,2	2,4	1,6	10,6
2	3,4	2,3	1,7	10,7
3	3,8	2,1	1,9	10,55
4	4	2	2	10,8
5	3,6	2,2	1,8	11
6	4	2	2	10,9
7	4,2	1,9	2,1	10,9
8	3,4	2,3	1,7	11,05
9	4	2	2	10,85
10	3,8	2,1	1,9	11
11	3,4	2,3	1,7	11,05
12	3,2	2,4	1,6	10,95
13	2,6	2,7	1,3	11,1
14	3,4	2,3	1,7	11
15	2,4	2,8	1,2	11,05
Total de NaCN añadido (g): 30,2				
Consumo de NaCN (kg/t): 604				

Tabla AIV.22 Resultados de cianuración (análisis de oro) PM5

Fracción	Peso (g)	Volumen (L)	Contenido de Au		Peso de Au (mg)	Repartición (%)
			(mg/g)	(mg/L)		
Relave	44,13	-	1,86	-	82,08	72,41
Solución Fuerte	-	0,96	-	32,01	30,73	27,11
Solución Lavado	-	0,30	-	1,82	0,55	0,48
Totales	-	-	-	-	113,36	100,00

Tabla AIV.23 Resultados de cianuración (análisis de plata) PM5

Fracción	Peso (g)	Volumen (L)	Contenido de Ag		Peso de Ag (mg)	Repartición (%)
			(mg/g)	(mg/L)		
Relave	44,13	-	6,52	-	287,73	96,42
Solución Fuerte	-	0,96	-	10,93	10,49	3,52
Solución Lavado	-	0,30	-	0,62	0,19	0,06
Totales	-	-	-	-	298,41	100,00

Recuperación de oro en solución (Sol. Fuerte + Sol. Lavado) = 27,69 %

Recuperación de plata en solución (Sol. Fuerte + Sol. Lavado) = 3,58 %

Alimentación recalculada de oro: 113,36g/t

Alimentación recalculada de plata: 298,41 g/t

Tabla AIV.24 Cinética de cianuración PM5

Tiempo (d)	Recuperación Au (%)	Recuperación Ag (%)	Recuperación Cu (%)
1	2,17	0,18	4,19
2	4,23	0,26	8,39
3	10,11	0,47	13,49
4	13,95	0,68	19,30
5	15,37	0,80	22,70
6	16,89	0,95	27,46
7	20,29	2,07	30,76
8	21,39	2,17	33,16
9	22,57	2,27	35,59
10	23,66	2,38	37,62
11	24,48	2,55	38,69
12	25,10	2,64	39,40
13	26,10	3,12	42,59
14	27,05	3,38	44,19
15	27,83	3,58	45,40

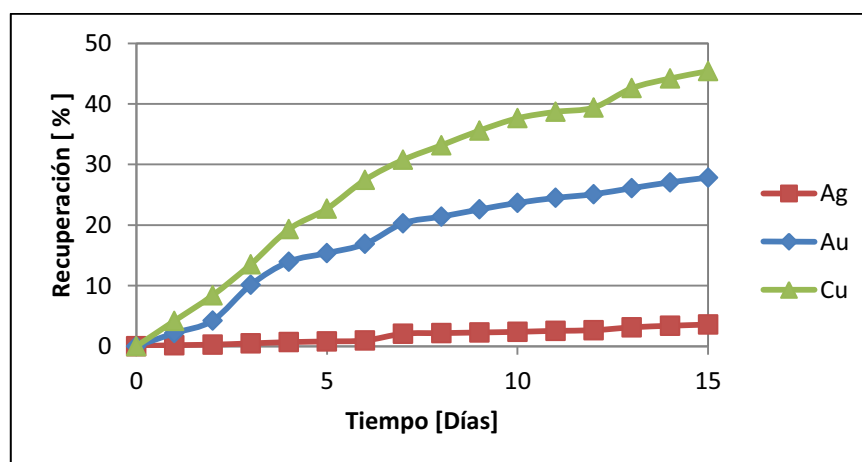


Figura AIV.6 Cinética de cianuración PM5

Ficha Técnica N° 7

Muestra PM6: Procesadores plásticos molidos

Ensayo No: 7

Objetivo: Cianurar procesadores plásticos para la recuperación de oro, plata y cobre.

Condiciones de Cianuración:

- Peso de la muestra: 50 g
- Flujo de solución: 1 L/d
- pH inicial: 10,5
- pH trabajo: 11,0
- Tiempo de lixiviación: 15 d
- Concentración de cianuro: 4 g/L
- Tipo de cianuración: En columna (circuito abierto)
- Pretratamiento: Reducción de tamaño y lixiviación con NH_3

En la Figura AIV.7 y Tablas AIV.25, AIV.26, AIV.27 y AIV.28 se presentan los resultados de la cianuración de la muestra PM6 con las condiciones antes mencionadas.

Tabla AIV.25 Control de cianuración PM6

Tiempo (d)	AgNO3 consumido (mL)	[CN ⁻] libre (g)	[CN ⁻] añadido (g)	pH
1	3,6	2,2	1,8	10,88
2	3,4	2,3	1,7	11,04
3	3	2,5	1,5	10,85
4	4,4	1,8	2,2	10,60
5	4,7	1,65	2,35	10,55
6	4,2	1,9	2,1	11,12
7	4,5	1,75	2,25	10,65
8	4	2	2	10,70
9	3,4	2,3	1,7	11,10
10	3,2	2,4	1,6	10,87
11	3,6	2,2	1,8	11,05
12	3	2,5	1,5	11,00
13	2,6	2,7	1,3	11,10
14	1,8	3,1	0,9	10,95
15	2,2	2,9	1,1	10,86
Total de NaCN añadido (g): 29,8				
Consumo de NaCN (kg/t): 596				

Tabla AIV.26 Resultados de cianuración (análisis de oro) PM6

Fracción	Peso (g)	Volumen (L)	Contenido de Au		Peso de Au (mg)	Repartición (%)
			(mg/g)	(mg/L)		
Relave	43,87	-	1,76	-	77,21	73,89
Solución Fuerte	-	0,98	-	27,50	26,95	25,79
Solución Lavado	-	0,30	-	1,13	0,34	0,32
Totales	-	-	-	-	104,50	100,00

Tabla AIV.27 Resultados de cianuración (análisis de plata) PM6

Fracción	Peso (g)	Volumen (L)	Contenido de Ag		Peso de Ag (mg)	Repartición (%)
			(mg/g)	(mg/L)		
Relave	43,87	-	6,43	-	282,08	93,14
Solución Fuerte	-	0,98	-	20,93	20,51	6,77
Solución Lavado	-	0,30	-	0,86	0,26	0,09
Totales	-	-	-	-	302,85	100,00

Recuperación de oro en solución (Sol. Fuerte + Sol. Lavado) = 26,11 %

Recuperación de plata en solución (Sol. Fuerte + Sol. Lavado) = 6,86 %

Alimentación recalculada de oro: 104,50 g/t

Alimentación recalculada de plata: 302,85 g/t

Tabla AIV.28 Cinética de cianuración PM6

Tiempo (d)	Recuperación Au (%)	Recuperación Ag (%)	Recuperación Cu (%)
1	4,65	0,30	5,28
2	9,30	0,54	8,21
3	13,61	1,15	11,11
4	16,13	1,62	17,79
5	17,37	1,69	26,94
6	18,40	2,16	30,87
7	20,62	3,50	36,37
8	21,27	3,82	38,68
9	21,94	4,12	40,97
10	22,45	4,30	42,68
11	22,84	4,52	44,10
12	23,03	4,59	44,69
13	23,36	5,84	46,28
14	23,71	6,42	47,28
15	23,91	6,85	48,16

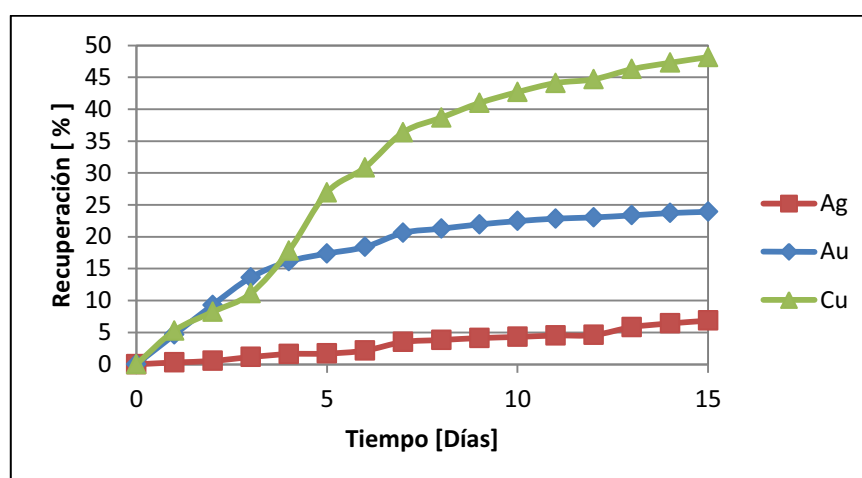


Figura AIV.7 Cinética de cianuración PM6

Ficha Técnica N° 8

Muestra PM7: Procesadores plásticos molidos

Ensayo No: 8

Objetivo: Cianurar procesadores plásticos para la recuperación de oro, plata y cobre.

Condiciones de Cianuración:

- Peso de la muestra: 50 g
- Flujo de solución: 1 L/d
- pH inicial: 10,5
- pH trabajo: 11,0
- Tiempo de lixiviación: 15 d
- Concentración de cianuro: 4 g/L
- Tipo de cianuración: En columna (circuito abierto)
- Pretratamiento: Reducción de tamaño y lixiviación con NH_3
+ $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

En la Figura AIV.8 y Tablas AIV.29, AIV.30, AIV.31 y AIV.32 se presentan los resultados de la cianuración de la muestra PM7 con las condiciones antes mencionadas.

Tabla AIV.29 Control de cianuración PM7

Tiempo (d)	AgNO3 consumido (mL)	[CN ⁻] libre (g)	[CN ⁻] añadido (g)	pH
1	3	2,5	1,5	11
2	2,8	2,6	1,4	11,05
3	3,6	2,2	1,8	10,95
4	4	2	2	10,86
5	4	2	2	11,15
6	4,2	1,9	2,1	11,06
7	4,4	1,8	2,2	10,75
8	3,2	2,4	1,6	10,98
9	3,6	2,2	1,8	11,05
10	4	2	2	10,68
11	3	2,5	1,5	11,11
12	2,6	2,7	1,3	11,05
13	3,2	2,4	1,6	11,16
14	1,6	3,2	0,8	11,07
15	1	3,5	0,5	11
Total de NaCN añadido (g): 28,1				
Consumo de NaCN (kg/t): 562				

Tabla AIV.30 Resultados de cianuración (análisis de oro) PM7

Fracción	Peso (g)	Volumen (L)	Contenido de Au		Peso de Au (mg)	Repartición (%)
			(mg/g)	(mg/L)		
Relave	44,13	-	1,86	-	82,08	72,41
Solución Fuerte	-	0,96	-	32,01	30,73	27,11
Solución Lavado	-	0,30	-	1,82	0,55	0,48
Totales	-	-	-	-	113,36	100,00

Tabla AIV.31 Resultados de cianuración (análisis de plata) PM7

Fracción	Peso (g)	Volumen (L)	Contenido de Ag		Peso de Ag (mg)	Repartición (%)
			(mg/g)	(mg/L)		
Relave	44,13	-	6,52	-	287,73	96,42
Solución Fuerte	-	0,96	-	10,93	10,49	3,52
Solución Lavado	-	0,30	-	0,62	0,19	0,06
Totales	-	-	-	-	298,41	100,00

Recuperación de oro en solución (Sol. Fuerte + Sol. Lavado) = 27,59 %

Recuperación de plata en solución (Sol. Fuerte + Sol. Lavado) = 3,58 %

Alimentación recalculada de oro: 113,36 g/t

Alimentación recalculada de plata: 298,41g/t

Tabla AIV.32 Cinética de cianuración PM7

Tiempo (d)	Recuperación Au (%)	Recuperación Ag (%)	Recuperación Cu (%)
1	2,17	0,18	4,19
2	4,23	0,26	8,39
3	10,11	0,47	13,49
4	13,95	0,68	19,30
5	15,37	0,80	22,70
6	16,89	0,95	27,46
7	20,29	2,07	30,76
8	21,39	2,17	33,16
9	22,57	2,27	35,59
10	23,66	2,38	37,62
11	24,48	2,55	38,69
12	25,10	2,64	39,40
13	26,10	3,12	42,59
14	27,05	3,38	44,19
15	27,83	3,58	45,40

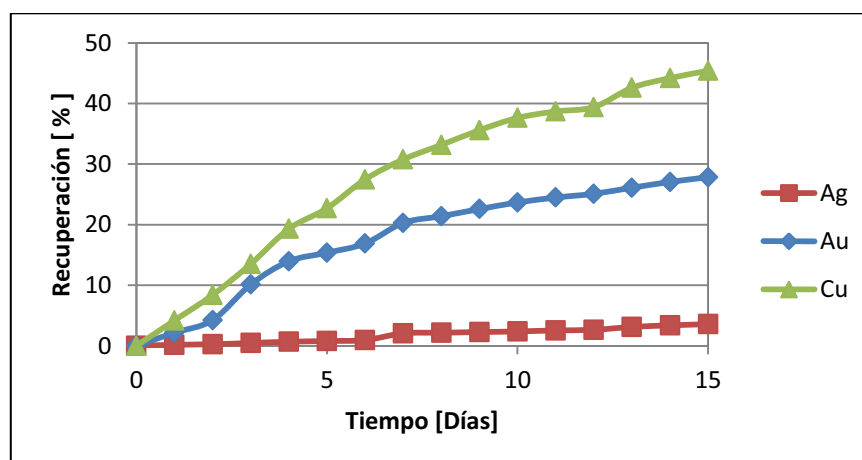


Figura AIV.8 Cinética de cianuración PM7

Ficha Técnica N° 9

Muestra TM1: Tarjetas de circuitos impresos molidas

Ensayo No: 9

Objetivo: Cianurar tarjetas de circuitos impresos para la recuperación de oro, plata y cobre.

Condiciones de Cianuración:

- Peso de la muestra: 500 g
- Flujo de solución: 10 L/d
- pH inicial: 10,5
- pH trabajo: 11,0
- Tiempo de lixiviación: 15 d
- Concentración de cianuro: 4 g/L
- Tipo de cianuración: En columna (circuito cerrado con adsorción)
- Pretratamiento: Reducción de tamaño

En la Figura AIV.9 y Tablas AIV.33, AIV.34, AIV.35 y AIV.36 se presentan los resultados de la cianuración de la muestra TM1 con las condiciones antes mencionadas.

Tabla AIV.33 Control de cianuración TM1

Tiempo (d)	AgNO3 consumido (mL)	[CN ⁻] libre (g)	[CN ⁻] añadido (g)	pH
1	2,6	13	27	10,83
2	3,4	17	23	10,95
3	3,8	19	21	11,09
4	4,2	21	19	11,10
5	4,0	20	20	10,90
6	4,0	20	20	11,07
7	4,2	21	19	11,12
8	4,0	20	20	11,30
9	4,4	22	18	11,00
10	4,2	21	19	11,10
11	4,8	24	16	10,87
12	5,4	27	13	11,05
13	6,0	30	10	11,00
14	6,6	33	7	11,10
15	7,0	35	5	10,95
Total de NaCN añadido (g): 297				
Consumo de NaCN (kg/t): 594				

Tabla AIV.34 Resultados de cianuración (análisis de oro) TM1

Fracción	Peso (g)	Volumen (L)	Contenido de Au		Peso de Au (mg)	Repartición (%)
			(mg/g)	(mg/L)		
Relave	399,70	-	0,40	-	161,59	52,22
Solución Fuerte	-	9,90	-	14,68	145,36	46,98
Solución Lavado	-	3,00	-	0,82	2,47	0,80
Totales	-	-	-	-	309,41	100

Tabla AIV.35 Resultados de cianuración (análisis de plata) TM1

Fracción	Peso (g)	Volumen (L)	Contenido de Ag		Peso de Ag (mg)	Repartición (%)
			(mg/g)	(mg/L)		
Relave	399,70	-	0,92	-	368,4	48,24
Solución Fuerte	-	9,90	-	39,13	387,34	50,72
Solución Lavado	-	3,00	-	2,66	7,98	1,05
Totales	-	-	-	-	763,72	100

Recuperación de oro en solución (Sol. Fuerte + Sol. Lavado) = 47,78 %

Recuperación de plata en solución (Sol. Fuerte + Sol. Lavado) = 51,77 %

Alimentación recalculada de oro: 309,41 g/t

Alimentación recalculada de plata: 763,72 g/t

Tabla AIV.36 Cinética de cianuración TM1

Tiempo (d)	Recuperación Au (%)	Recuperación Ag (%)	Recuperación Cu (%)
1	8,41	2,01	2,31
2	12,40	4,07	2,57
3	19,60	6,10	3,23
4	24,13	8,42	4,98
5	27,81	10,48	11,86
6	35,47	21,06	14,96
7	38,61	27,03	15,74
8	40,76	32,28	17,92
9	42,06	35,32	29,06
10	43,13	40,26	35,29
11	44,44	43,71	43,89
12	45,74	46,99	49,24
13	46,97	50,39	59,92
14	47,50	50,63	67,73
15	47,89	51,64	77,15

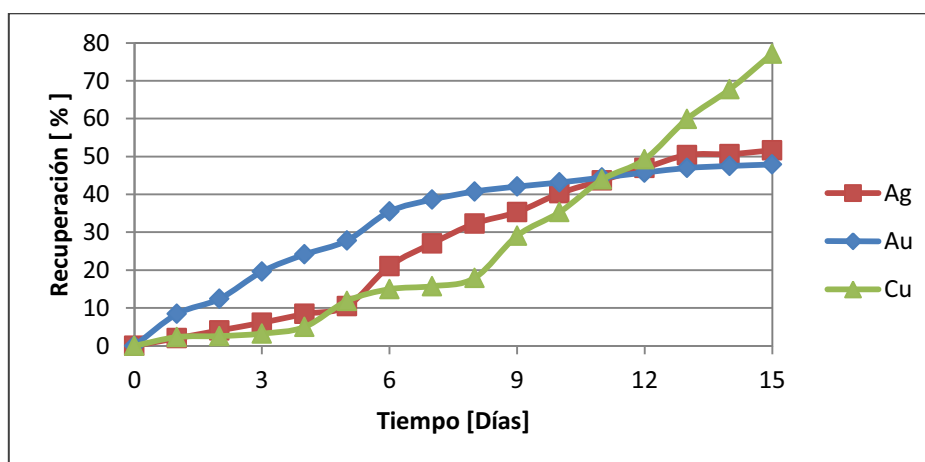


Figura AIV.9 Cinética de cianuración TM1

ANEXO V

FICHAS TÉCNICAS DE LIXIVIACIÓN

Ficha Técnica N° 1

Muestra PM4: Procesadores plásticos molidos

Ensayo No: 1

Objetivo: Lixiviación procesadores plásticos para la recuperación de hierro, cobre y níquel.

Condiciones de Lixiviación:

- Peso de la muestra: 50 g
- Flujo de solución: 1 L/d
- Tiempo de lixiviación: 8 d
- Agente lixivante: NaOH
- Concentración: 1M
- Tipo de lixiviación: En columna (circuito cerrado)

Datos de Lixiviación

Volumen de solución fuerte = 0,95 L

Volumen de solución de lavado = 0,3 L

En la Figura AV.1 y Tablas AV.1, AV.2 y AV.3 se presentan los resultados de la lixiviación de la muestra PM4 con las condiciones antes mencionadas.

Tabla AV.1 Control de lixiviación PM4

Tiempo (d)	Concentración Cu (mg/L)	Concentración Fe (mg/L)	Concentración Ni (mg/L)
1	4,55	0,00	0,00
2	11,78	0,00	0,00
3	16,35	0,00	0,00
4	23,73	0,00	0,00
5	23,76	0,00	0,00
6	31,55	0,00	0,00
7	80,81	0,00	0,00
8	97,11	0,00	0,00

Tabla AV.2 Cinética de lixiviación PM4

Tiempo (d)	Recuperación Cu (%)	Recuperación Fe (%)	Recuperación Ni (%)
1	0,02	0,00	0,00
2	0,06	0,00	0,00
3	0,08	0,00	0,00
4	0,12	0,00	0,00
5	0,12	0,00	0,00
6	0,16	0,00	0,00
7	0,40	0,00	0,00
8	0,48	0,00	0,00

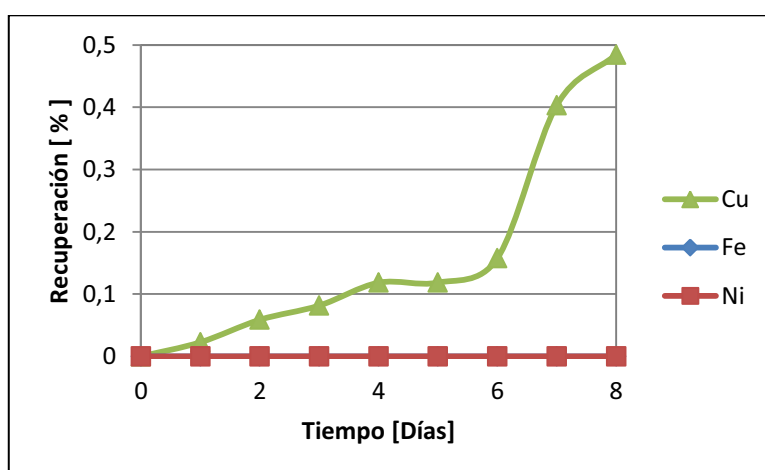


Figura AV.1 Cinética de lixiviación PM4

Ficha Técnica N° 2

Muestra PM5: Procesadores plásticos molidos

Ensayo No: 2

Objetivo: Lixiviación procesadores plásticos para la recuperación de hierro, cobre y níquel.

Condiciones de Lixiviación:

- Peso de la muestra: 50 g
- Flujo de solución: 1 L/d
- Tiempo de lixiviación: 8 d
- Agente lixivante: H_2SO_4
- Concentración: 1M
- Tipo de lixiviación: En columna (circuito cerrado)

Datos de Lixiviación:

Volumen de solución fuerte = 0,96 L

Volumen de solución de lavado = 0,3 L

En la Figura AV.2 y Tablas AV.4, AV.5 y AV.6 se presentan los resultados de la lixiviación de la muestra PM5 con las condiciones antes mencionadas.

Tabla AV.3 Control de lixiviación PM5

Tiempo (d)	Concentración Cu (mg/L)	Concentración Fe (mg/L)	Concentración Ni (mg/L)
1	11,11	26,24	20,20
2	14,31	61,70	68,80
3	29,23	298,50	428,00
4	16,14	307,40	420,00
5	18,33	367,00	524,00
6	14,75	466,00	679,00
7	13,27	471,00	683,00
8	8,13	695,00	874,00

Tabla AV.4 Cinética de lixiviación PM5

Tiempo (d)	Recuperación Cu (%)	Recuperación Fe (%)	Recuperación Ni (%)
1	0,06	1,43	1,74
2	0,07	3,35	5,93
3	0,15	16,21	36,86
4	0,08	16,70	36,18
5	0,09	19,93	45,13
6	0,07	25,31	58,48
7	0,07	25,58	58,83
8	0,04	37,75	75,28

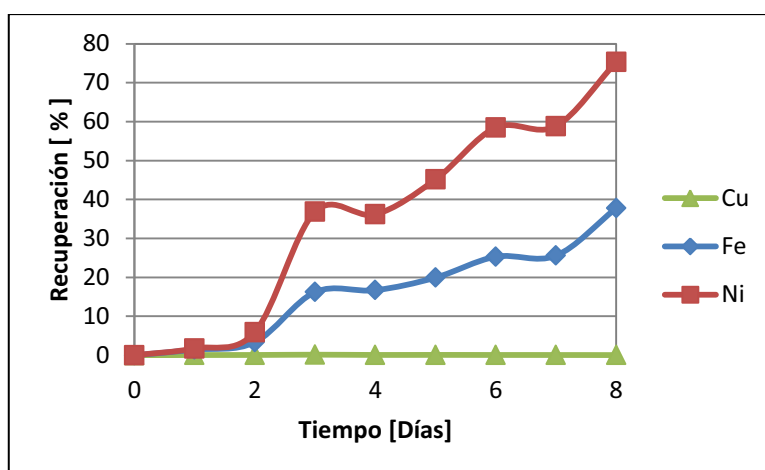


Figura AV.2 Cinética de lixiviación PM5

Ficha Técnica N° 3

Muestra PM6: Procesadores plásticos molidos

Ensayo No: 3

Objetivo: Lixiviación procesadores plásticos para la recuperación de hierro, cobre y níquel.

Condiciones de Lixiviación:

- Peso de la muestra: 50 g
- Flujo de solución: 1 L/d
- Tiempo de lixiviación: 8 d
- Agente lixivante: NH_3
- Concentración: 1M
- Tipo de lixiviación: En columna (circuito cerrado)

Datos de Lixiviación

Volumen de solución fuerte = 0,95 L

Volumen de solución de lavado = 0,3 L

En la Figura AV.3 y Tablas AV.7, AV.8 y AV.9 se presentan los resultados de la lixiviación de la muestra PM6 con las condiciones antes mencionadas.

Tabla AV.5 Control de lixiviación PM6

Tiempo (d)	Concentración Cu (mg/L)	Concentración Fe (mg/L)	Concentración Ni (mg/L)
1	1,24	0,00	0,00
2	1,43	0,00	0,00
3	1,03	0,00	0,00
4	0,84	0,00	0,00
5	0,46	0,00	0,00
6	0,45	0,00	0,00
7	0,53	0,00	0,00
8	0,14	0,00	0,00

Tabla AV.6 Cinética de lixiviación PM6

Tiempo (d)	Recuperación Cu (%)	Recuperación Fe (%)	Recuperación Ni (%)
1	1,24	0,00	0,00
2	2,66	0,00	0,00
3	3,70	0,00	0,00
4	4,54	0,00	0,00
5	5,00	0,00	0,00
6	5,45	0,00	0,00
7	5,99	0,00	0,00
8	6,12	0,00	0,00

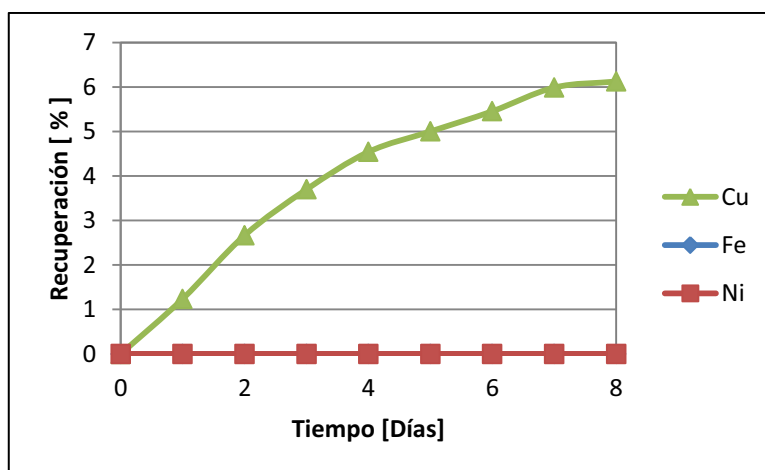


Figura AV.3 Cinética de lixiviación PM6

Ficha Técnica N° 4

Muestra PM7: Procesadores plásticos molidos

Ensayo No: 4

Objetivo: Lixiviación procesadores plásticos para la recuperación de hierro, cobre y níquel.

Condiciones de Lixiviación:

- Peso de la muestra: 50 g
- Flujo de solución: 1 L/d
- Tiempo de lixiviación: 8 d
- Agente lixivante: $\text{NH}_3 + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
- Concentración: 1M
- Tipo de lixiviación: En columna (circuito cerrado)

Datos de Lixiviación

Volumen de solución fuerte = 0,95 L

Volumen de solución de lavado = 0,3 L

En la Figura AV.4 y Tablas AV.10, AV.11y AV.12 se presentan los resultados de la lixiviación de la muestra PM7 con las condiciones antes mencionadas.

Tabla AV.7 Control de lixiviación PM7

Tiempo (d)	Concentración Cu (mg/L)	Concentración Fe (mg/L)	Concentración Ni (mg/L)
1	1337,00	0,55	1,44
2	2413,00	0,56	4,22
3	2825,00	0,59	8,18
4	3158,00	0,59	11,77
5	2931,00	0,59	17,42
6	3351,00	0,59	25,10
7	3194,00	0,59	27,00
8	3405,00	0,59	31,00

Tabla AV.8 Cinética de lixiviación PM7

Tiempo (d)	Recuperación Cu (%)	Recuperación Fe (%)	Recuperación Ni (%)
1	6,67	0,25	0,00
2	12,03	0,03	0,12
3	14,09	0,03	0,36
4	15,75	0,03	0,70
5	14,62	0,03	1,01
6	16,71	0,03	1,50
7	15,93	0,03	2,16
8	16,98	0,03	2,33

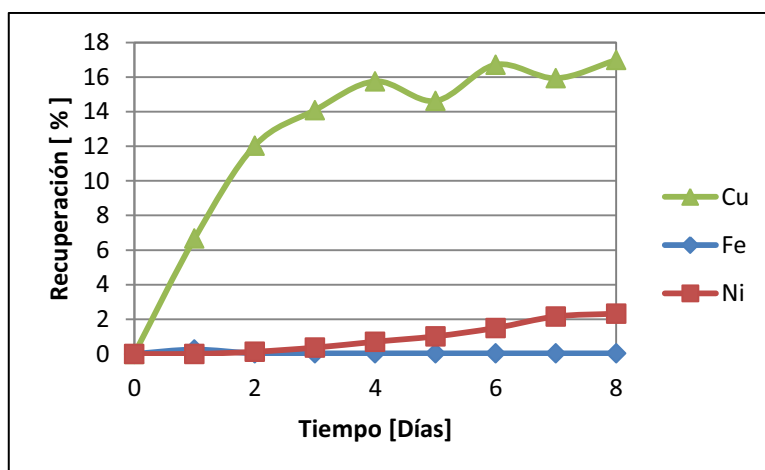


Figura AV.4 Cinética de lixiviación PM7

ANEXO VI FICHA TÉCNICA DE ADSORCIÓN

Ficha Técnica N 1

Muestra TM1: Procesadores plásticos molidos

Ensayo No: 1

Objetivo: Adsorber oro, plata y cobre de la solución carga proveniente de la cianuración de tarjetas de circuitos impresos.

Condiciones de Adsorción:

- Volumen de solución: 10 L
- Flujo de solución: 10 L/d (20L/d*kg_{C.A.})
- Tiempo de lixiviación: 15 d
- Relación CA/Sol: 150 g/L
- pH de trabajo: 11,0
- Tipo de adsorción: En columna

Tabla AVI.1 Datos de Adsorción TM1

Tiempo (d)	Adsorción Au	Adsorción Ag	Adsorción Cu
1	98,85	96,20	60,63
2	96,30	96,30	3,65
3	94,95	89,53	6,81
4	86,76	93,62	10,16
5	87,27	87,00	25,97
6	85,74	95,93	13,29
7	83,67	97,84	3,07
8	77,78	98,03	9,42
9	65,38	95,04	38,57
10	56,67	92,12	30,10
11	48,57	91,61	34,35
12	50,00	91,85	26,10
13	47,06	92,14	41,54
14	29,17	83,10	33,32
15	18,52	85,86	36,79

En las Tablas AVI.1 y AVI.2 se presentan los resultados de la adsorción en carbón activado de la solución cianurada de la muestra TM1 con las condiciones antes mencionadas.

Tabla AVI.2 Resultados de Adsorción TM1

Adsorción global Au	Adsorción global Ag	Adsorción global Cu
97,32	99,34	80,72

