Educación
Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Iguala
División de Estudios Profesionales

TRABAJO DE TITULACIÓN INTEGRAL

"TESIS PROFESIONAL"

"RECUPERACIÓN DE PLATA POR MEDIO DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA"

Que para obtener el título de:

INGENIERO INDUSTRIAL

Presenta:

JHON ISAIAS AYALA AVILA

Iguala, Gro., 5 de marzo, 2025

Carretera Nacional Iguala - Taxco Esquina Periférico
Norte, Col. Adolfo López Mateos Infonavit, C.P. 40030
Iguala de la Independencia Gro., Tel. (733) 3321425
Ext. 1140 e-mail: division@iguala.tecnm.mx tecnm.mx |
iguala.tecnm.mx

2025 Año de La Mujer Indígena

ESPACIO 100% LIBRE DE PLÁSTICO DE UN SOLO USO

Año, Nombre	*2025, Jhon Isaías Ayala Ávila*
No. de control	*05670138*
Carrera	*Ingeniería Industrial*
Instituto Tecnológico de Procedencia	*Instituto Tecnológico de Iguala*
e-mail	*isaiasayalax@gmail.com*
Fecha de Autorización de Reproducción	*5 marzo 2025*

Queda Prohibida la reproducción o transmisión total o parcial del texto de la presente obra bajo cualesquiera formas, electrónica o mecánica, incluso fotocopia, el almacenamiento en algún sistema de recuperación de información, o el grabado, sin el consentimiento previo y por escrito del autor y/o editor. Hecho en México.

TRABAJO DE TITULACIÓN INTEGRAL

"OPCIÓN TESIS PROFESIONAL"

"RECUPERACIÓN DE PLATA POR MEDIO DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA".

PRESENTA:

JHON ISAÍAS AYALA ÁVILA
N.C. 05670138
INGENIERÍA INDUSTRIAL

Asesor
M.C. AGUSTIN ACEVEDO FIGUEROA

Iguala, Gro., 5 marzo de 2025

Educación
Secretaría de Educación Pública

TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Iguala
División de Estudios Profesionales

Oficio No. **DEP/CAT/ 177 /2025.**
ASUNTO: Autorización de reproducción electrónica del Trabajo Profesional.

Iguala de la Independencia, Guerrero, 05 / marzo / 2025.

C. JHON ISAIAS AYALA AVILA
PASANTE DE LA CARRERA DE
INGENIERÍA INDUSTRIAL
PRESENTE.

En relación al Manual de Lineamientos Académico-Administrativos del Tecnológico Nacional de México que contempla los planes de estudio para la formación y desarrollo de competencias profesionales, y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su trabajo correspondiente al proyecto de **TITULACIÓN INTEGRAL** mediante ***"TESIS PROFESIONAL"*** denominada: **"RECUPERACIÓN DE PLATA POR MEDIO DE UNA CELDA ELECTROLÍTICA".**

La División de Estudios Profesionales concede autorización para la reproducción electrónica del mismo.

Sin otro particular de momento, quedo de Usted.

A T E N T A M E N T E
Excelencia en Educación Tecnológica
"Tecnología como Sinónimo de Independencia".

EDUCACIÓN | TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE IGUALA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

M.C. FRANCISCO JAVIER RAMÍREZ SANDOVAL
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS PROFESIONALES

c.c.p. Archivo
FJRS/MJHS*

DEDICATORIAS

A Dios, por ser quien me dio la vida y guía mis pasos

A mis padres y hermanos;

Agradecido estaré por siempre.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer principalmente a Dios, por guiar mis pasos y mis decisiones en esta etapa tan importante de mi formación profesional, por fortalecer mi espíritu y mi Fe en este camino donde me esperan grandes retos y también grandes éxitos.

Así, quiero mostrar mi gratitud a todas aquellas personas que estuvieron presentesen en la realización de esta meta, en especial a mis padres, por darme la oportunidad de estudiar y cumplir este sueño que es tan importante para mí, quienes con sus consejos fueron el motor de arranque y mi constante motivación, muchas gracias por su paciencia, comprensión, y por su gran amor.

Manifiesto mis más sinceros agradecimientos a mi asesor de proyecto del Instituto Tecnológico de Iguala, quien con su conocimiento y su guía fue una pieza clave para que pudiera desarrollar una clave de hechos que fueron imprescindibles para cada etapa de desarrollo de este trabajo.

Por último, a mis compañeros, quienes a través de tiempo fuimos fortaleciendo una amistad y creando una familia, muchas gracias por toda su colaboración, por convivir todo este tiempo conmigo, por compartir experiencias, alegrías, frustraciones, llantos, tristezas, peleas, celebraciones y múltiples factores que ayudaron a que hoy seamos como una familia, por aportarme confianza y por crecer juntos en este proyecto, muchas gracias.

Y tambien a mi gran y enorme famila que de manera directa o indirecta, me apoyaror para alcanzar esta meta.

¡Muchas gracias a todos!

RESUMEN

La plata es un metal valioso utilizado, por ejemplo, en la joyería, en la medicina en la electricidad, en la fabricación de espejos y electrónica. Debido a ello se extraen utilizando diversos métodos como son principalmente la flotación y la disolución de valores.

Dada su importancia, en México existen varias plantas de refinación de este metal proveniente de minerales obtenidos en minas del centro y norte del país.

La tecnología actual de recuperación de plata en México en algunas de estas industrias de refinación de metales, considera el uso de celdas constituidas de un ánodo de aleación de plata e impurezas, y un cátodo de acero inoxidable donde se depositan los cristales de plata.

En nuestro caso se preparó una solución de cianuro de socio al 10% y se realizó la lixiviación de mineral con contenido valioso de oro y plata.

Se redujo de tamaño un Kg. de mineral mediante un molino de bolas y se colocó en un recipiente que contenía la solución de cianuro con la finalidad de obtener un lixiviado de valores valiosos de oro y plata.

para que se disolviera el metal valioso se dejó durante tres días y a pH alcalino dentro del electrolito de $NaCn^{-}$, dentro de la celda, la cual tiene una solución de Cianuro de Sodio al 10%, acompañado de impurezas (iones) que, según el valor de su concentración presentan un efecto mayor o menor sobre el consumo de energía total de la celda y sobre el tipo metal depositado.

Por lo anterior en este proyecto de investigación se recuperó electroquímicamente un cristal valioso de plata. Esto mejoró y la productividad de la celda unitaria dentro del proceso electrolítico.

En ese sentido se recuperó un botón de plata usando una celda electrolítica de un lixiviado de cianuro, el cual fue obtenido de un mineral con contenido metálico de plata.

No se realizó análisis vía húmeda para detectar la existencia de oro, así es que se consideró como plata la muestra obtenida, para ello se requiere más tiempo y otro tipo de procedimiento. El objetivo principal era la deposición de metales valiosos usando una celda electrolítica.

Índice pag.

AGRADECIMIENTOS 2
RESUMEN 3
INTRODUCCIÓN 7
ANTECEDENTES 8
CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 12
1.1.- Planteamiento del problema 13
1.1.1.- Preguntas de investigación 13
1.1.2.- Hipótesis 13
1.1.3.- Variables 13
1.2.- Justificación 14
1.3.- Objetivos 14
1.3.1 Objetivo general 14
1.3.2.- Objetivos específicos. 14
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO 16
2.1 Contextualización 17
2.1.1 Métodos tradicionales de obtención y de separación de plata 17
2.2 Nuevos métodos de recuperación de plata 18
2.3 Teoría 21
2.3.1 Mineral de Plata 21
2.4 Propiedades de la plata 22
2.4.1 Propiedades físicas 22
2.4.2 Propiedades químicas 23
2.5 Desarrollo de los procesos 24
2.6 Refinación electrolítica de la plata 25
2.7 Proceso de refinación con ácido nítrico 25
2.8 Celda electrolítica moebius 26
2.9 Antecedentes de los estudios electroquímicos de depósito de plata 28
CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO 30
3.1 Paradigma de investigación 31
3.1.1 Celda para la recuperación de plata 31
3.1.2 Medida de la corriente, voltámetros 31
3.1.3 Rendimiento de la corriente 32
3.1.4 Definición de las variables 33

3.2 Tipo de investigación.....33
3.3 Población, sujetos, muestra y muestreo 33
3.4 Diseño del experimento 36
3.5 Método de muestreo.....36
3.6 Cálculo del tamaño de la muestra.....37
3.7 Instrumentos 37
3.7.1 Diseño.....38
3.7.2 Validación.....38
3.8 Justificación del experimento 38
3.8.1 Procedimiento.....39
3.8.2 Método de análisis de datos 39
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 40
4.1 Análisis de resultados.....41
4.2 Discusión de resultados 42
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 44
5.1 Conclusiones 45
5.2 Recomendaciones. 47
Referencias.....49
Anexos.....51

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Propiedades de la Plata**……..……...** 22
Cuadro 2. Relación entre la concentración del ion con diferente diseño de celda**……..** 30
Cuadro 3. Densidades de corriente equivalentes**……..** 31
Cuadro 4. Diseño del experimento**……..……...** 37

Índice de Figuras

Figura 1. Ánodo y cátodo con arreglo vertical en paralelo dentro de la celda**……..……** 26
Figura 2. Celda electrolítica con electrodos de carbon**……..** 32
Figura 3. cianuro de sodio**……....** 34
Figura 4. Muestra recuperada de celda electrolítica para fundición**……** 34

Figura 5. Muestra recuperada de celda electrolítica..... 35

INTRODUCCIÓN

La plata es un metal valioso utilizado, por ejemplo, en la joyería, en la medicina en la electricidad, en la fabricación de espejos y electrónica. Dada su importancia, en México existen varias plantas de refinación de este metal proveniente de minerales obtenidos en minas del centro y norte del país.

La tecnología actual de recuperación de plata en México en algunas de estas industrias de refinación de metales, considera el uso de celdas constituidas de un ánodo de aleación de plata e impurezas, y un cátodo de acero inoxidable donde se depositan los cristales de plata. El electrolito dentro de la celda contiene una concentración de iones plata entre los valores de 100 a 500 g/L acompañado de impurezas (iones) que, según el valor de su concentración presentan un efecto mayor o menor sobre el consumo de energía total de la celda y sobre el tipo de cristal de plata depositado.

Por lo anterior en este trabajo se propuso recuperar electroquímicamente la plata a partir de soluciones concentradas y encontrara las mejores condiciones de operación con el fin de aumentar la productividad de la celda unitaria dentro del proceso electrolítico. Para ello se realizó un análisis de las principales variables que afectan el crecimiento de los cristales de plata en un proceso de recuperación electrolítico, a partir de una solución de nitrato de plata.

Siendo así se estudió el efecto de la concentración de impurezas en el electrolito sobre el consumo de energía y el efecto de crecimiento de los cristales sobre el electrodo, así como la productividad de la celda.

La investigación se llevó a cabo en el laboratorio de Ingeniería de Métodos en el instituto tecnológico de Iguala de la carrera de Ingeniería Industrial, en el lugar que

ocupan las mesas de concreto del mismo, cerca de la toma corriente. Se llevó a cabo en ese lugar porque se pueden realizar actividades de ese tipo.

ANTECEDENTES

Una de las actividades productivas de mayor relevancia para los países como Perú, Chile, México, Estados Unidos, Canadá, China y Australia es la industria minera. En México se cuenta con minas y plantas metalúrgicas con elevada producción y cuya actividad está centrada principalmente en la explotación de minerales metálicos. Durante la última década los principales metales que mantienen al alza la producción de la industria minero-metalúrgica del país son: la plata, el oro, el zinc, el plomo, los sub productos y los concentrados. Donde la producción de la plata y oro son los principales generadores de ventas en este sector debido a su valor económico

Durante la última década los principales Estados productores del sector de minería en México fueron:
Sonora (23%), Zacatecas (23%), Chihuahua (14%), Coahuila (11%), San Luis Potosí (6%) y Durango (6%). México tiene el segundo lugar como productor de plata en el mundo, el tercero de bismuto, el quinto de plomo, el noveno de oro y el undécimo de cobre.

La Minería en México constituye una de las actividades con mayor tradición en México, practicada desde la época prehispánica, es reconocida en la historia como un factor de avance y desarrollo económico para el país.

En sus inicios la minería tenía mayor auge en estados como Guerrero (Taxco), Oaxaca, Querétaro y Chiapas. Geográficamente, algo más de la mitad de la plata extraída de minas proviene de américa
Son 3 los momentos históricos que tienen relevancia en la historia de la industria minera mexicana: El Porfiriato, en el cual la actividad minera se llevó a su máximo

esplendor, se comenzó a utilizar la energía eléctrica para las labores mineras; la Revolución de 1910, en este periodo decayó la producción minera, sin embargo se

recuperó rápidamente con el tercer momento histórico de la minería mexicana: la Constitución de 1917, donde se establecieron los lineamientos jurídicos para la orientación de la minería en el siglo en cuestión.

En la segunda mitad del siglo XIX hubo un auge en la minería en la zona norte del país debido al descubrimiento de oro californiano. Gracias a la fiebre del oro hubo un florecimiento del comercio local en la zona norte de México e internacional. Esto no solo ayudó al crecimiento de la industria minera, sino también, las rutas comerciales de diferentes productos se reactivaron y provocó intercambios comerciales hacia a diferentes partes del mundo, Europa entre ellos, quienes exportaban oro e importaban diversos productos al país, como materiales para la vestimenta y manufactura de otras industrias.

Durante ese periodo se buscó atraer capital extranjero y de comerciantes de los puertos para rescatar a todos los mineros que ya no contaban con el recurso o herramientas para seguir excavando y explotando sus minas. En la parte de Sonora hubo una delimitación de territorio, debido a la presencia de los apaches, quienes no permitían que se acercaran a sus territorios, permitiendo solo la exploración de dos terceras partes del territorio sonorense. Este auge permitió la acumulación de capitales que beneficiaron a la región norte de México. Sin embargo, el lado negativo surgió al paso de los años, pues surgió la necesidad de una inversión mayor, por ello muchas minas pasaron a manos extranjeras, norteamericanas principalmente, quienes si tenían las condiciones para sacarlas adelante debido a las nuevas ideologías y sistemas que implementaron. Estos hechos provocaron la modernización de la minería en el norte del país, apoyado por reformas a las leyes y nuevas políticas por parte del gobierno de aquella época. También gracias a la inversión en infraestructura que facilitaban el transporte de los productos. Posterior a esta etapa surgió un nuevo periodo durante el gobierno de Porfirio Díaz, donde la minería se vio favorecida por el impulso que dio el presidente a la construcción del ferrocarril en todo el país, permitiendo un flujo de comercio tanto minero como de otros productos a lo largo y ancho de todo el territorio mexicano. Durante esa época

hubo incremento en la población de manera considerable, lo que provocó un crecimiento comercial y económico, por lo que el gobierno estableció un sistema capitalista, lo que ocasionó que los dueños de las minas fueran los grandes empresarios, que mantuvieron y mejoraron tecnológicamente sus minas.

En la actualidad México forma parte de la lista de los países con mayor producción minera en el mundo, durante 1989-1994 la industria minera proporcionó el 1% del empleo nacional y significó aproximadamente el 1.5 del PIB. The Fresnillo Company, Mazapil Cooper Co., Peñoles Mining Co., Pittsburg Mining Co. y Carnegie Mining Co. Así, además de la minería surgieron industrias alternas; la economía se diversificó y el país tomó otro rumbo. Los procesos metalúrgicos se depuraron y lo que importaba era la máxima recuperación del capital y la rapidez con que se trataban los minerales.

En la década de 1960 se decretó la nacionalización de la minería, y se estableció, entre otras cosas, que la administración de las minas debería estar a cargo de profesionistas mexicanos, por lo que se ofreció una nueva perspectiva a los mineros mexicanos. Se nacionalizaron las empresas y hubo una respuesta positiva por parte de los empresarios y profesionistas mexicanos para hacer que esta industria siguiera adelante y se mantuviera firme.

CAPÍTULO I. FUNDAMENTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.- Planteamiento del problema

La industria minera y en especial las pequeñas PyMES, requieren de metodologías que no sean costosas ni contaminantes para la recuperación de contenidos metálicos de minerales y concentrados, los cuales en la actualidad implican muchos costos y son muy contaminantes.

Para desechos basura donde no se involucran procesos de minería que consiste en chips trabajados de limaduras y otras pequeñas piezas de plata; en cualquier caso, la gran mayoría termina reciclándose a través de la fundición y únicamente se tiene una pequeña porción como desperdicio.

La industria del reciclaje de este metal ha existido desde hace décadas, pero las tecnologías disponibles en la actualidad no satisfacen los requerimientos de máxima recuperación de plata.

1.1.1.- Preguntas de investigación

- ¿Se recuperarán metales valiosos mediante el uso de una celda electrolítica?
- ¿Cuál es el beneficio de usar una celda electrolítica en lugar de otros métodos de recuperación de metales valiosos?
- ¿Qué resultados y beneficios se obtienen al utilizar una celda electrolítica para la recuperación de metales valiosos?

1.1.2.- Hipótesis

H_0= Se deposita plata y oro en el electrodo a diferentes intensidades eléctricas.

H_1 = No se deposita plata y oro en el electrodo a diferentes intensidades eléctricas.

1.1.3.- Variables

El presente trabajo es de tipo experimental, por lo que las variables son las siguientes:

Dependientes: gr. De plata/oro
Independientes: (Intensidad de corriente eléctrica), segundos (tiempo).

1.2.- Justificación

Debido a la baja recuperación de los diferentes procesos en la obtención de la plata surge la necesidad de elaborar un método de recuperación de plata de fácil aplicación con un rendimiento confiable una alta recuperación en cantidades pequeñas o grandes y a un bajo coste.

Se elaborará una celda electrolítica para la recuperación de plata con dimensiones apropiadas para un análisis a pequeña escala la cual permita recopilar datos a partir de las cantidades de sedimentación documentando el tamaño y las propiedades de dicha celda, así como sus componentes.

1.3.- Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Recuperar minerales metálicos como plata y oro de minerales con contenido metálico utilizando una celda electrolítica.

1.3.2.- Objetivos específicos.

Construir una celda electroquímica para electrodepositación de plata y oro utilizando electrodos de carbono y una fuente de alimentación de amperaje variable de 3-12 Amperes.
Comprobar la ley de Faraday utilizando una celda electrolítica con electrodos de carbón, para la recuperación de plata y oro
Recuperar plata y oro de minerales con contenido metálico.

Determinar las condiciones ideales-experimentales por medio de una celda electrolítica para el depósito de Ag de una solución de NO_3Ag (nitrato de plata) obtenida a partir de minerales con contenido metálico de Ag, para obtener plata de alta pureza 99.999%. Verificar la obtención de plata en la celda para determinar el porcentaje extraíble.

Determinar la celda electrolítica más acotada para la sedimentación de la plata en un tiempo determinado y así recuperarla a un bajo costo.
Identificar el material (electrodos, carga eléctrica, etc.) más adecuado para realizar el depósito electroquímico de plata de acuerdo con los resultados de disminución de concentración.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Contextualización

2.1.1 Métodos tradicionales de obtención y de separación de plata

Los procesos de separación son esenciales en un gran número de industrias de la transformación, tales como la petrolera, química, petroquímica, papelera, farmacéutica, metalúrgica, minera, etc., lo que representa en muchos casos el quehacer cotidiano de un químico o de un ingeniero químico (Rousseau, 1987). Estos procesos de separación por lo general están destinados a lograr la eliminación de sustancias específicas, a fin de aumentar el valor añadido de las especies de interés, que pueden ser los residuos, los componentes extraídos o ambos (Grandison y Lewis, 1996).

La producción de plata constituye, en sentido estricto, un proceso de separación donde el metal es obtenido a partir de la mena que lo contiene, aislándola de los cloruros o sulfuros que la acompañan.

A lo largo de la historia, los procesos más utilizados para su extracción y separación son la amalgamación, la cianuración y la obtención como subproducto de otros procesos de beneficio de metales.

La amalgamación, fue uno de los primeros métodos para la recuperación de la plata; debido al hecho de que se realizaba en espacios grandes al aire libre, se le denominó beneficio de patio (Ramírez-Ortiz, 2004). Fue ideado por Bartolomé de Medina en 1555 y desarrollado en la Hacienda de Nuestra Señora de La Purísima Concepción, en lo que hoy es el municipio de Pachuca, Hidalgo. En este proceso el mineral se tritura, se agita con cloruro de sodio y agua y, gracias a la acción de minerales de cobre o hierro que actúan como catalizadores, el mercurio logra amalgamar (aliarse) a la plata. Finalmente, la amalgama Ag-Hg (plata-mercurio) se separa y se destila aprovechando la volatilidad del mercurio, después de lo cual la plata queda en forma metálica, libre y con alta pureza.

Aunque este método se empleó durante muchos años, la liberación de mercurio que ataca el sistema nervioso provocó su desuso, y dio lugar a otros procesos como la cianuración.

En la cianuración, el mineral se tritura y se tuesta con cloruro de sodio para obtener cloruro de plata para luego disolver en cianuro sódico formando un complejo de fórmula $NaAg(CN)^2$. Finalmente, el metal se precipita de esta disolución gracias a su interacción con cinc metálico, el cual la reduce hasta plata metálica (Muñoz, 2010).

Cuando en la etapa final del proceso de obtención de algún metal la plata constituye una impureza, ésta puede separarse y tener un valor económico a pesar de que sea un subproducto. Así, si se encuentra mezclada con oro, se separa mediante electrólisis, con un rendimiento del 93-95%; si acompaña al plomo, el metal fundido se mezcla con cinc con quien la plata forma una aleación, para luego separarlos destilando al cinc (Parga y Carrillo, 1996; Fink *et al*., 1984).

2.2 Nuevos métodos de recuperación de plata

La importancia económica de la plata, así como las normas cada vez más estrictas que rigen hoy en día sobre la protección al medio ambiente, se ha visto reflejada en el creciente desarrollo de diversos métodos de recuperación que se han propuesto a nivel laboratorio e industrial para la recuperación de la plata de los residuos generados. Uno de estos procesos de separación emplea los Cartuchos de reemplazo (MCR por sus siglas en inglés), los cuales están constituidos por limadura de hierro metálico o “lana” de acero; así, los residuos líquidos que contienen plata se hacen pasar a través de los cartuchos donde la plata se reduce a su forma metálica y se queda en el cartucho, mientras que el hierro se oxida y pasa a la solución (Eastman Kodak Co., 1996).

La Recuperación electrolítica de la plata es una forma rentable y eficiente para eliminar plata de soluciones ricas en este elemento. En este método se hace

circular una corriente adecuada a través de electrodos sumergidos en la disolución, con lo cual se logra reducir a la plata depositándola en uno de ellos, denominado cátodo. Desafortunadamente este procedimiento no permite recuperar plata de disoluciones en las que su concentración sea menor a los 200 mg/L, y puede en ocasiones generar subproductos nocivos (Bourges *et al.*, 2002; Petrova *et al.*, 2013).

La precipitación química implica la adición de productos químicos como bromuros, tiocianatos y cianuros de hierro para la recuperación de plata de disoluciones (Pfrepper *et al.*, 1989). En los últimos años, la Eastman Kodak Company, ha utilizado la 2, 4, 6-trimercapto-1, 3, 5-triazina sódica (TMT) como nuevo precipitante de plata. Esto tiene algunas ventajas sobre la recuperación electrolítica de plata, como son el hecho de que el método por precipitación química puede utilizar soluciones acuosas con bajas concentraciones de Ag y que, a diferencia de la recuperación electroquímica, es fácil monitorear el progreso del proceso (Eastman Kodak Co., 1996).

La Recuperación electrolítica de la plata es una forma rentable y eficiente para eliminar plata de soluciones ricas en este elemento. En este método se hace circular una corriente adecuada a través de electrodos sumergidos en la disolución, con lo cual se logra reducir a la plata depositándola en uno de ellos, denominado cátodo. Desafortunadamente este procedimiento no permite recuperar plata de disoluciones en las que su concentración sea menor a los 200 mg/L, y puede en ocasiones generar subproductos nocivos (Bourges *et al.*, 2002; Petrova *et al.*, 2013).

La precipitación química implica la adición de productos químicos como bromuros, tiocianatos y cianuros de hierro para la recuperación de plata de disoluciones (Pfrepper *et al.*, 1989). En los últimos años, la Eastman Kodak Company, ha utilizado la 2, 4, 6-trimercapto-1, 3, 5-triazina sódica (TMT) como nuevo precipitante de plata. Esto tiene algunas ventajas sobre la recuperación electrolítica de plata,

como son el hecho de que el método por precipitación química puede utilizar soluciones acuosas con bajas concentraciones de Ag y que, a diferencia de la recuperación electroquímica, es fácil monitorear el progreso del proceso (Eastman Kodak Co., 1996).

A pesar de sus ventajas, estos métodos presentan algunos inconvenientes, como la formación de subproductos nocivos, el que no puedan usarse para todo tipo de desechos de plata o que no permiten la recuperación/eliminación de toda la plata contenida en la disolución. Por ello, se han implementado procesos basados en el intercambio iónico, el cual emplea una resina que intercambia sus iones por la plata contenida en los residuos (Riveros y Cooper, 1987) o la utilización de resinas quelantes (Wang *et al*., 2012), que complejan y extraen a la plata de las disoluciones. Por otro lado, el método de flotación de iones se ha utilizado para recuperar metales como plata, cobre, zinc y cromo de aguas residuales; este método se basa en extraer las especies metálicas iónicas mediante el uso de agentes de superficie activa (surfactantes) y la posterior eliminación de estas especies hidrófobas por burbujas de aire. Con este método se ha logrado recuperar hasta un 90% de estos metales (Polat y Erdogan, 2007).

Actualmente se están desarrollando procesos de biolixiviación para la recuperación de plata de componentes electrónicos; éste es un proceso en el que se emplean microorganismos para disolver los minerales, liberando así al metal que con métodos convencionales sería muy difícil de extraer (Jujun *et al*., 2014). Por otra parte, se ha investigado la recuperación de plata con sales fundidas, el cual es un proceso térmico que tiene la capacidad inherente de destruir completamente los componentes orgánicos de residuos mezclados, desechos peligrosos y electrónicos (Flandinet *et al*., 2012).

En este mismo sentido, la extracción con solventes constituye una opción viable en la separación de muchos metales a partir de sus disoluciones, ya que actúa normalmente como concentradora de iones metálicos y como un filtro químico para

separar los iones de sus impurezas o viceversa. Mediante esta técnica se trata una amplia gama de metales comerciales, tales como cobre, zinc, níquel, cobalto, elementos de tierras raras, uranio, oro y por supuesto plata (Flett, 2005).

No obstante sus grandes cualidades, algunos de estos métodos presentan desventajas, como el requerimiento de una inversión significativa de capital y un control cuidadoso de las condiciones de operación para evitar la creación o el uso de productos indeseados o ambientalmente peligrosos durante el proceso; además, estos métodos de recuperación no siempre disminuyen la concentración de plata a niveles aceptables según las normas existentes (< 5ppm) y son afectados por interferencias de otros elementos presentes en los residuos (Dornelles, 2014; Chen *et al*., 2012).

2.3 Teoría

2.3.1 Mineral de Plata

La plata es un metal nativo y está presente en una gran variedad de minerales. Los minerales de plata más conocidos, aunque no todos explotados de manera industrial, son: Principales minerales de plata.

- -Argentita (Ag^2S)
- -Clorargirita (AgCl)
- -Polibasita $(AgCu)^{16}(SbAs)^2S^{11}$
- -Prousttita (Ag^3 AsS^3)
- -Pirargirita (Ag^3SbS^3)

Por dar un ejemplo en estados unidos el 63% de la plata que se produce es derivada de la explotación de las menas del metal y el 37% restante de otros minerales que llegan a contener el metal

2.4 Propiedades de la plata

2.4.1 Propiedades físicas

La plata es un elemento químico de número atómico 47 situado en el grupo 1b de la tabla periódica de los elementos. Es un metal de transición blanco, brillante, blando, dúctil, maleable y es el mejor conductor metálico del calor y la electricidad. Se encuentra en la naturaleza formando parte de distintos minerales (general mente en forma de sulfuro) o como plata libre. Es muy escasa en la naturaleza, de la que representa una parte en 10 millones de corteza terrestre. La mayor parte de su producción se obtiene como sub producto del tratamiento de las minas de cobre, zinc, plomó, y oro.

Su símbolo es **Ag** y proviene del latín argentum, nombre del metal en esos idiomas (derivados de una raíz indio-europea que significa “brillante”). Su nombre es una evolución de la palabra latina “platus” que significa en un inicio “plano” y posterior mente “lámina metálica”. En castellano existe el término argento de uso exclusivamente literario.

La plata pertenece al grupo de los metales nobles, presenta propiedades intermedias entre el cobre y el oro, cristaliza en estructura cubica centrada en la cara. Debido a su alto grado de simetría, contiene muchos planos de deslizamiento los cuales ayudan a que el material tenga excelentes propiedades mecánicas. La plata es de fácil acuñación, dúctil y altamente maleable, presenta mayor dureza que el oro y un brillo blanco metálico susceptible al pulimento. Su superficie se empaña en presencia del ozono Su maleabilidad y ductilidad solo son superadas por el oro, tal que es posible obtener láminas de .00025 mm de espesor. También se puede fabricar hilo de 180 m de longitud con un solo gramo de este metal. La plata tiene una de las más altas conductividades eléctricas de todos los metales, incluso superior a la del cobre, es el conductor por excelencia. La plata pura también presenta la mayor conductividad térmica, el color más blanco y el mayor índice de reflexión de todos los metales (aunque refleja mal la radiación ultravioleta). Algunas

sales de plata son fotosensibles (se descomponen por acción de la luz) y se han empleado en la fotografía.

Cuadro 1. Propiedades de la plata.

SIMBOLO	DENSIDAD (Kg/m^3)	DUREZA MOHS	RADIO ATÓMICO CALCULADO	PUNTO DE FUSIÓN
Ag	10490	2.5	165 pm	1234.93 K°
CALOR ESPECÍFICO	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	MASA ATÓMICA	ELECTRONEGATIVIDAD
232J/(Kg-k)	429 W/(m-k)	63x10^6m-1Ω-1	107.8386 g/mol	1.93 (Pauling)

2.4.2 Propiedades químicas

La plata fundida absorbe grandes cantidades de oxigeno durante su solidificación. A una temperatura de 1000 °C, 1cm^3 de plata fundida disuelve un máximo de 20cm^3 de oxigeno que corresponde a la composición estequiométrica del compuesto $AgO_{0.01.}$ El hidrogeno es poco soluble en la plata liquida al igual que el nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, mientras que los gases nobles son insolubles en la plata.

Por otra parte, los halógenos reaccionan de forma violenta con la plata fundida, donde el gas cloro que se forma corroe a la plata a temperatura ambiente y forma un oxido estable. Con respecto a la solubilidad de la plata metálica en agua, esta es muy baja, pero es suficiente para mostrar un efecto “bactericida”. Es importante señalar que el medio perfecto para disolver este metal es el ácido nítrico concentrado, aunque también se logra disolver en ácido sulfúrico concentrado y caliente. La rapidez de disolución en ácido sulfúrico diluido es factible siempre y cuando se tenga la presencia de oxigeno e hidrogeno en forma de peróxido. La plata se disuelve en ácidos oxidantes y puede presentar los estados de oxidación +1, +2 y +3, siendo el más común estado de oxidación +1. El óxido y sulfato formado

sobre la plata puede disolverse en ácido nítrico limpiándolo y formando citrato de plata.

2.5 Desarrollo de los procesos

Se ha escrito muy poco acerca de las técnicas que se han sido utilizadas para la extracción de la plata en siglos pasados, pero se tiene evidencia de que la cultura egipcia ha sido la primera en separar la plata del oro partiendo del calentamiento de sus sales. Se dice que las primeras fuentes de plata estuvieron contenidas en minerales de plomo. En la edad media, los depósitos de plata fueron de gran importancia para su explotación en el centro de Europa donde los metales ricos eran fundidos y separados manual mente.

La plata es uno de los metales más conocidos desde la antigüedad, como se menciona el libro del génesis, donde los montones de escoria hallados en Asia menor e islas del mar egeo, indican que la plata comenzó a separarse del plomo al menos cuatro milenios antes de Cristo.

El descubrimiento de un metal raro y poco frecuente, de color blanco y brillante imperecedero e insensible al fuego que otros metales. Tal asombro justifico la atribución al metal singulares propiedades, de las que otros metales carecían, salvo las del oro claro esta; pues ambos no eran sino regalos de la naturaleza, formados por influjo de la Luna y el otro por el Sol.

El mercurio en él, se observaba el aspecto y color de la plata, hasta tal punto que se le dio el nombre de “hydragyrum” (plata liquida) de donde proviene su símbolo (Hg).

Los mineros griegos y romanos supieron como procesar los minerales de plomo con cierto contenido en plata. El plomo era oxidado en un horno de copelación para su total recuperación logrando obtener un grado de pureza entre 65 y 85% y se

podían obtener valores aún mayores a este rango de pureza, pero para lograrlo se necesitaba oxidar fuertemente el material y así se alcanzaba un valor de hasta 99% de pureza.

Cuando la plata era encontrada en depósitos minerales de cobre, se utilizaba un método conocido como proceso de licuefacción. Este método consistía en dos pasos: el primero era fundir la mena con un soplo de aire caliente; y el segundo era la separación de la plata en fase liquida.

2.6 Refinación electrolítica de la plata

La producción de la plata a partir de minerales primarios se lleve a cabo en un sistema de operación que consiste en el reciclado de la plata y de otros materiales preciosos como: el oro, el platino y el cobre. Este proceso consiste en refinar metales que cuentan con una pureza en la plata de 97.5%hasta una pureza de 99.9%. Este incremento de pureza depende de la aplicación que se le requiera dar a la plata. Son diversos los tipos de celdas que se ocupan para la refinación electrolítica de la plata y metales preciosos

2.7 Proceso de refinación con ácido nítrico

En una gran cantidad de celdas es utilizado aun el método de disolución de plata solida con ácido nítrico donde la plata se disuelve de acuerdo con la siguiente reacción:

$$3Ag + 4HNO_3 \text{ ------> } 3AgNO_3 + NO + 2H_2O$$

La disolución de la plata ha incrementado la eficiencia de recuperación de varios metales, entre ellos el oro y el platino, ya que al disolverse el metal se puede separar la solución rica en nitrato de plata con facilidad, permitiendo así el óptimo tratamiento de los metales residuales. Para tal fin, se utilizan aleaciones que

cuentan con una composición del 75% de plata. La manera de recuperar el metal inmerso en la solución es por medio de una cementación o por una precipitación.

2.8 Celda electrolítica moebius

Esta celda fue utilizada en Europa empleando como electrolito nitrato de sodio, nitrato de plata y ácido nítrico. La plata y los metales que acompañan son disueltos por medio de una reacción de oxidación sobre el ánodo. Para lograr tal fin, varios electrodos de Doré de plata llenos de impurezas son sumergidos en la celda controlando el voltaje y la corriente y la corriente aplicada al sistema para lograr solo el depósito de la plata, el cual presenta un crecimiento dendrítico. Debido a este fenómeno, se colocaron pequeñas cuchillas en el sistema que permiten el rastrilleo de los cristales de manera continua, para así evitar que exista un corto circuito en la celda que se genera si los cristales que crecen sobre el cátodo logran chocar con el ánodo.

Si la cantidad de cobre presente en el electrolito se incrementa, debido a la constante disolución del ánodo, se genera una disminución en la pureza de plata depositada. Por lo anterior, la concentración del electrolito debe ser revisada de manera periódica.

En esta celda, el ánodo y el cátodo presentan un arreglo vertical en paralelo dentro de la celda como se muestra en la figura 1. La energía que se consume es de aproximadamente 0.6 Kwh/kg de plata pura producida, y la celda es alimentada constante mente con nitrato de plata para evitar que el electrolito que está siendo beneficiado se agote.

Periódicamente, el proceso se detiene con el fin de separar los cristales depositados sobre la superficie del cátodo, aunque en la actualidad, esta separación se hace manual mente evitando por completo la interrupción dela electrolisis. Los ánodos son retirados de manera continua o interrumpiendo el

proceso. Esta última opción solo se aplica cuando el electrolito contiene altas concentraciones de cobre.

Este tipo de celda es utilizada en el intervalo de concentración de plata de 10-500 g/l, aplicando una densidad de corriente anódica entre 400 – 500 A/cm^^{2}, para un voltaje de 2 a 2.5 V.

Figura 1. Ánodo y cátodo con arreglo vertical en paralelo dentro de la celda



Se recomienda utilizar el proceso de la celda Moebius para la obtención de plata que está contenida en un sustrato en proporción aproximada de un 90% de plata y que esté presente bajo contenido de cobre. Partiendo de este porcentaje de pureza se logra incrementar tal porcentaje hasta 99.5% y en algunos casos hasta un 99.99% lo cual le da a este proceso una gran ventaja y confiabilidad en la refinación de plata.

2.9 Antecedentes de los estudios electroquímicos de depósito de plata

Una breve descripción de algunos estudios referentes al electrodepósito de plata a partir de diferentes soluciones se describe a continuación:

En 1979, S. Nageswar llevo a cabo un estudio a partir de investigaciones realizadas sobre la morfología de la plata electrodepositada en baños de sulfatos, percloratos y nitratos de amonio en un medio de sulfadiazina y sulfadimidina. En este trabajo se encontró que los procesos de nucleación dependen de la concentración de la solución y de la densidad de corriente.

En 1988 G.D. Adzic, D.M Drazic y A.R Despic investigaron el crecimiento granular de la plata electo depositada a partir de una solución de nitrato de plata sobre un sustrato de carbón vítreo, donde se desarrolló una técnica potenciostática de tres pulsos para obtener un pequeño número de núcleos (entre 1 y 10) así como su crecimiento en granos cristalinos y alargados.

En 1996, Sánchez y colaboradores demostraron que la absorción de plata a partir de una solución cianurada se presenta como un proceso cuasi reversible en un electrodo de carbón vítreo a 20°C y que sus parámetros cinéticos son también función de la temperatura intervalo de (10°C - 60°C), en donde la reducción de plata es rápida para altas temperaturas.

En 2002, reyes-cruz y colaboradores efectuaron el estudio de la electrodepositación de plata y oro a partir de soluciones cianuradas en presencia de altas concentraciones de cobre (alrededor de 100 veces mayor que la plata). En este trabajo se trazaron los diagramas de zonas de predominio, tanto para oro y plata como para cobre, encontrando que termodinámicamente es posible hacer un depósito selectivo de plata y oro sin depositar el cobre en un reactor electroquímico a nivel escala piloto.

En el 2005 Palacios Reséndiz estableció una metodología electroquímica sistemática para identificar el intervalo de potencial donde se deposita la plata proveniente de soluciones de tiosulfatos sobre materiales de diferente naturaleza utilizados como electrodos.

De la revisión bibliográfica realizada se puede observar que hay pocos trabajos reportados que aborden el estudio electroquímico de la recuperación de la plata a partir de soluciones de nitratos por lo que es necesario trabajar en este campo para tener nuevas y mejores tecnologías que aborden esta problemática.

CAPÍTULO III. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Paradigma de investigación

3.1.1 Celda para la recuperación de plata

La ingeniería electroquímica o ciencia y tecnología de los procesos electroquímicos surge como una rama de la ingeniería química a principios de los años sesenta y desde entonces constituye una disciplina plenamente establecida.

El uso de una celda electrolítica para la recuperación de metales puede competir con los métodos tradicionales solo si este puede ofrecer una alta eficiencia y un bajo costo en el proceso esto de penderá principalmente del diseño de la celda

Aquí se muestra una estimación de la máxima recuperación de un ion metálico según el tipo de electrodo utilizado en dichas celdas.
Aquí se muestra una estimación de la máxima recuperación de un ion metálico según el tipo de electrodo utilizado en dichas celdas.

Cuadro 2. Relación entre la concentración del ion con diferente diseño de celda.

Diseño de celda	Recuperación del metal (ppm)
Con electrodo plano	10^5-10^2
Con cilindro rotatorio	10^4-10^1
Con electrodos tridimensionales	10^3-10^1

3.1.2 Medida de la corriente, voltámetros

La determinación del rendimiento de corriente implica el conocimiento del peso o volumen del producto obtenido como resultado de la electrolisis, y de la cantidad de electricidad empleada. La intensidad de la corriente puede medirse a intervalos frecuentes con un amperímetro, y el valor medio de las lecturas multiplicado por el tiempo, dará el número de ampere-hora consumidos.
En los trabajos de laboratorio encuentra aplicación el voltímetro. Se parte ello de la ley de Faraday, disponiéndose todos los detalles a fin de obtener en el instrumento

un rendimiento del 100%. La cantidad de producto separado en el electrodo se pesa o mide, directa o indirectamente; y dividiéndola por el equivalente electroquímico puede obtenerse la cantidad de electricidad circulada, en coulomb. Para obtener un resultado satisfactorio, es necesario que no haya reacciones secundarias ni influencias perturbadoras en el sistema (Mantell C.L., 1963, p. 52).

3.1.3 Rendimiento de la corriente

Aunque la mínima cantidad de electricidad que se requiere para la producción de un equivalente – gramo de una sustancia son 96500 coulomb, o 26,8 ampere-hora, en la práctica resulta necesaria una cantidad mayor. El hecho de que la cantidad real exceda a la teórica, no obedece a un fallo de las leyes de Faraday, sino a otras causas. Puede haber en cada electrodo, sin que se caiga en cuenta de ello, separación de más de una sustancia.

Los productos de la electrolisis pueden sufrir pérdidas mecánicas; asimismo pueden ocurrir reacciones secundarias en los electrodos. Además, puede haber fugas de corriente, cortocircuitos y pérdidas en forma de calor. La razón de la cantidad teórica a la práctica que se requiere, se llama rendimiento de la corriente. De un modo análogo, la cantidad efectiva de un producto separado por una cantidad determinada de corriente, dividida por la cantidad teórica, da asimismo el rendimiento de la corriente. En la práctica industrial, los rendimientos pueden variar desde cantidades tan bajas como el 25 % o 30% en la descomposición de algunas sales fundidas.

La intensidad de corriente por unidad de superficie es la densidad de corriente que suele darse en ampere por decímetro cuadrado (Mantell C.L., 1963, p. 51).
En la siguiente tabla se dan algunas equivalencias.

Cuadro 3. Densidades de corriente equivalentes.

A/dm^2	**A/pie^2**	**A/pulg^2**	**A/cm^2**
1	1	0,0645	0,00108
0,108	144	0,007	0,155

15,5	929	1	1
100		6,45	

3.1.4 Definición de las variables

Dependiendo de la intensidad de corriente es la cantidad en gramos de electrodepositación de plata y oro que se logra depositar en el electrodo de carbono, cumpliéndose la ley de Faraday.

Dependiente: Gramos obtenidos de plata y oro.
Independiente: Cantidad descarga eléctrica suministrada medida en Amperes.

3.2 Tipo de investigación

Es una investigación de tipo experimental con diseño estadístico y pruebas de hipótesis. El experimento se diseñó en base a la descripción siguiente:

3.3 Población, sujetos, muestra y muestreo

- El depósito se llevó a cabo sobre un cátodo de grafito. El ánodo utilizado fue de grafito
- La micro celda, electroquímica estática (sin flujo) de 6500ml de volumen (ver Figura 2)
- Nitrato de plata cristales 80 gr.
- Agua 5800 ml
- Multímetro
- Regulador de corriente eléctrica AC-DC salidas 12v 14v 16v 18v 19v 1.3 A MAX~4.5 A MAX 20v 24v 5 A MA

Figura 2. Celda electrolítica con electrodos de carbón.



Con base en lo anterior se procedió de la siguiente manera. Se tomó una muestra de mineral con contenido de plata y oro y se procedió a reducir de tamaño utilizando el molino de bolas.

Se disolvió el contenido valioso usando cianuro de sodio (ver figura 3) y se dejó en reposo durante 3 días vigilando el que el pH se mantuviera en 12. Posteriormente se decantó el lixiviado y este se pasó a la celda electrolítica para realizar las pruebas de deposición. Se proporcionaron diferentes voltajes con un tiempo de 5 minutos en promedio variando los voltajes y manteniendo constante el tiempo para obtener la cantidad electrodepositada de plata y oro de acuerdo con el voltaje suministrado, posteriormente se procedió a fundir la muestra colectada por el cátodo en un crisol de barro (ver figura 4) utilizando fundentes comerciales como son carbonato de sodio, bórax y un poco de atincar. Para ello se construyó un horno de tabique y se utilizó un soplete de cuello largo con gas butano.

Al final se obtuvo un botón de plata pura el cual se lamino con martillo y se pesó en una balanza analítica (ver figura 5).

Figura 3 cianuro de sodio

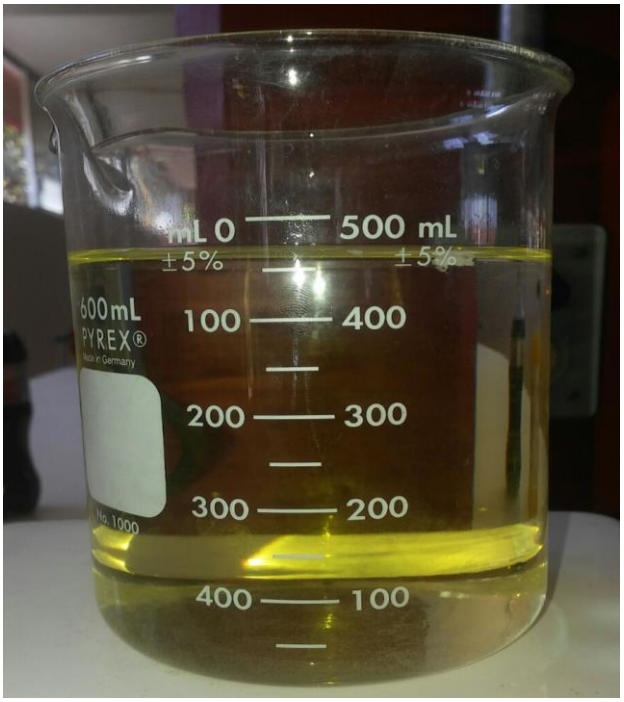


Figura 4. Muestra recuperada de celda electrolítica para fundición.



Figura 5. Muestra recuperada de celda electrolítica.



3.4 Diseño del experimento

Se decide probar si se recupera plata y oro de un mineral que contiene dichos metales para ello se debe pulverizar y luego disolver en una solución de cianuro de sodio.

Este es un experimento con un solo factor (gramos de plata y oro electrodepositados) y a= 1 nivel (1 hora o tiempo diferente de electrodepositación).

3.5 Método de muestreo

La toma de la muestra se realizó tomando el electrodo en el que se depositó la plata y el oro, y se retiró con espátula, después se colocó la muestra en un crisol de barro, posteriormente en la celda electrolítica se le retiro usando un sifón el cianuro de

sodio contenido y se tomó la plata y el oro que se calló del electrodo y que quedo en el piso de la celda y está también se colocó en el crisol de barro.

3.6 Cálculo del tamaño de la muestra

La muestra que se utilizó para llevar a cabo la prueba es de un kg de mineral el cual se redujo de tamaño para poder someterlo al procedimiento antes descrito.

3.7 Instrumentos

- Celda electroquímica de metal recubierto con fibra de vidrio.
- Cátodo de grafito.
- Ánodo de grafito
- La microcelda electroquímica estática (sin flujo) de 6500ml de volumen (ver Figura 2)
- Nitrato de plata cristales 80 gr.
- Agua 5800 ml
- Multímetro
- Regulador de corriente eléctrica AC-DC salidas 12v 14v 16v 18v 19v
- 1.3 A MAX~4.5 A MAX 20v 24v 5 A MA
- Muestra de mineral con contenido de oro y plata.
- Molino de bolas
- Cianuro de sodio
- Vaso de precipitado
- Papel indicador de PH
- Carbonato de sodio
- Bórax
- Crisol de barro
- Altincar
- Balanza Analítica
- Horno de tabique cocido

- Mufla eléctrica
- Copelas de cemento y hueso
- Martillo
- Balanza analítica

3.7.1 Diseño

Se decide probar si se recupera plata y oro de un mineral que contiene dichos metales para ello se debe pulverizar y luego disolver en una solución de cianuro de sodio.

Este es un experimento con un solo factor (gramos de plata y oro electrodepositados) y a= 1 nivel (1 hora o tiempo diferente de electrodepositación).

Cuadro 4. Diseño del experimento.

Horas de electrodepositación	**Gramos electrodepositados**	**Porcentaje acumulado**
1 hr.	X_1	X_1
2 hr.	X_2	$X_1 + X_2$
3 hr.	X3	$X_1 + X_2 + X_3$

3.7.2 Validación

3.8 Justificación del experimento

La secuencia que se llevara a cabo es que solamente se incrementa en una hora el tiempo de electrodepositación hasta tres horas, manteniendo el amperaje constante. Con esto se pretende solamente observar la cantidad en gramos de plata y oro depositados, y si se depositan de acuerdo a la ley de Faraday. Por tal motivo no es necesario realizarlo a más niveles.

De 80 gramos de cianuro de plata, Se recuperaron 5.786 gr. De plata con un voltaje de 12.5 volts y 1.02 amperios.

La cantidad electrodepositada se obtuvo en tres horas con un amperaje constante de 3. Pudiéramos decir que la recuperación o electrodepositación de la plata y el oro se logra a través del tiempo y una descarga baja y continúa de carga eléctrica alimentada a la celda electrolítica.

3.8.1 Procedimiento

La toma de la muestra se realizó tomando el electrodo en el que se depositó la plata y el oro, y se retiró con espátula, después se colocó la muestra en un crisol de barro, posteriormente en la celda electrolítica se le retiro usando un sifón el cianuro de sodio contenido y se tomó la plata y el oro que se calló del electrodo y que quedo en el piso de la celda y está también se colocó en el crisol de barro.

3.8.2 Método de análisis de datos

Los datos se analizaron mediante gráficos en Excel y se colocaron las variables dependiente e independiente, se observó y se realizó una conclusión respecto a la información presentada.

La toma de la muestra se realizó tomando el electrodo en el que se depositó la plata y el oro, y se retiró con espátula, después se colocó la muestra en un crisol de barro, posteriormente en la celda electrolítica se le retiro usando un sifón el cianuro de sodio contenido y se tomó la plata y el oro que se calló del electrodo y que quedo en el piso de la celda y está también se colocó en el crisol de barro.

La muestra que se utilizó para llevar a cabo la prueba es de un kg de mineral el cual se redujo de tamaño para poder someterlo al procedimiento antes descrito.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

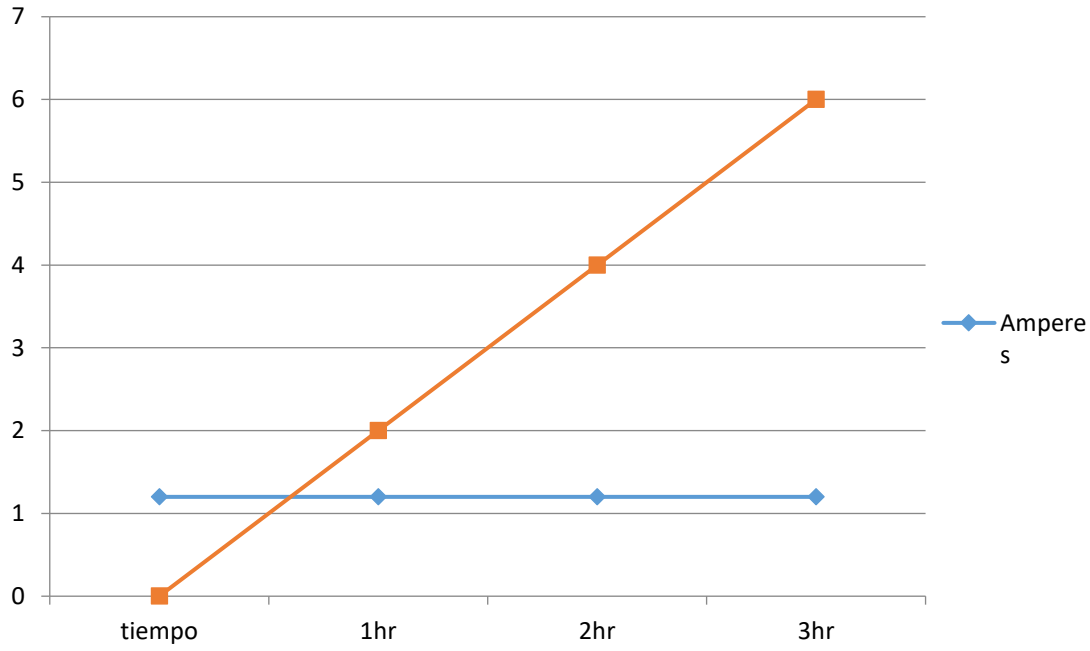
4.1 Análisis de resultados

Para realizar el análisis de los resultados se consideró lo que se obtuvo después del tratamiento electrolítico en la celda electrolítica.
Se debe recordar que la celda, se construyó de lámina galvanizada y se recubrió con fibra de vidrio, se utilizaron electrodos de carbono y se pesó la muestra a tratar, la cual fue de 80 gramos de cianuro de plata, de esta muestra se recuperaron 5.786 gr. De plata con un voltaje de 12.5 volts y 1.02 amperios. Se realizó un tratamiento de electrodeposición que tuvo una duración de 3 horas.

Durante la prueba el tiempo de tratamiento aumento. La corriente eléctrica fue constante. Y de lo que se trataba era de comprobar si había deposición de metales valiosos en el electrodo, lo cual se demostró.

La cantidad electrodepositada se obtuvo en tres horas con un amperaje constante de 3amperes. Pudiéramos decir que la recuperación o electrodepositación de la plata y el oro se logra a través del tiempo y una descarga baja y continúa de carga eléctrica alimentada a la celda electrolítica.

Gráfico 1. Amperaje y gramos con respecto al tiempo.



4.2 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en la recuperación de minerales con contenido metálico valioso se utilizan diversas técnicas mediante una celda electrolítica logran una recuperación alta de metales depositados en el ánodo.

Sin embargo, representa un riesgo como todas las demás técnicas utilizadas, así como inseguridad, recuperación muy buena pero asociada a mayores cantidades de minerales en su procesamiento lo que implica mayor riesgo y sobre todo tiempo y recursos para obtener los metales valiosos y sacar algún provecho de los mismos, Se requieren cubrir los riesgos provocados con los desechos de lixiviados, se deben tratar o enviar a un manejo adecuado a través de una empresa que los maneje, transporte y deposite de manera adecuada.

Sin embargo, este proporciona una serie de ventajas en la recuperación de los mismos. Se obtiene plata y oro de alta pureza y de gran valor comercial.

El método para la recuperación de metales valiosos, es rápido y sencillo, no requiere mucho esfuerzo y genera alta pureza en la recuperación de los mismos, es poco el tiempo invertido en la recuperar los metales y depositarlos, no es tan costoso obtener de los lixiviados de oro y plata los metales valiosos usando este método de que mejora la recuperación de los mismos.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En la recuperación de minerales con contenido metálico valioso se utilizan diversas técnicas y procedimientos para lograr una recuperación alta.

Sin embargo, todas representan riesgos, inseguridad, baja recuperación y sobre todo tiempo y recursos para obtener los metales valiosos y sacar algún provecho de los mismos.

En ese sentido el método utilizado para la recuperación de plata y oro a partir de la disolución de los valores y usando una celda electrolítica, ha reducido muchos de los procesos que se llevaban a cabo al utilizar un proceso de flotación de minerales y este ha proporcionado una serie de ventajas en la recuperación de los mismos.

Aunque en el proceso de flotación se obtienen elementos metálicos valiosos, estos se encuentran más sucios que en la recuperación electrolítica y por eso es necesario someterlos a otro proceso de refinación lo cual no se lleva a cabo en el proceso electrolítico.

El uso de procesos electroquímicos permite obtener metales de gran pureza y de una forma mucho más ecológica que con los tratamientos convencionales.

Es una tecnología respetuosa con el medioambiente ya que evita la emisión de gases, sulfuros y partículas metálicas.

Este tratamiento electroquímico soluciona de modo eficiente uno de los problemas en la recuperación de metales valiosos.

Es una tecnología segura, efectiva y de bajo coste.

Sin embargo, sus limitantes son que, a mayor escala en el tratamiento de lixiviados de oro y plata, es mayor la problemática para su manejo, debido a que los tamaños de los instrumentos utilizados vuelven difíciles su manipulación, es decir el transporte y manejo de los mismos requiriendo equipos de manejo de materiales más grandes y complejos en el tratamiento electrolítico. Los electrodos son más grandes, la cantidad de electricidad utilizada es mucho mayor y la celda electrolítica es de gran dimensión.

Por eso mismo, es más difícil el tratamiento cuando se manejan más kilos de mineral a tratar para obtener lixiviados de cianuro o ácido nítrico ya que se requieren equipos de manejo de materiales de gran volumen.

Solo como información adicional:

La **electrodeposición** tiene múltiples aplicaciones en la industria, gracias a su capacidad para mejorar las propiedades de las superficies metálicas.

1. **Automoción**: En la industria automotriz, la electrodeposición se usa para proteger componentes contra la corrosión y mejorar su apariencia.
2. **Electrónica**: La aplicación de capas finas de metales como el oro y el níquel en los circuitos impresos y conectores eléctricos ayuda a mejorar la conductividad.
3. **Joyería**: La galvanoplastia permite añadir recubrimientos de metales preciosos sobre piezas, creando joyería más asequible sin sacrificar el aspecto.
4. **Decoración y arquitectura**: La electrodeposición de metales como el cromo ofrece acabados brillantes y resistentes en elementos decorativos y de construcción.

Y ahora su uso se expande a la recuperación de metales valiosos de minerales con contenido de oro y plata.

5.2 Recomendaciones.

Se recomienda utilizar el proceso electrolítico para la recuperación de metales usando una celda electrolítica con electrodos de carbono ya que se obtiene plata y oro de alta pureza y de gran valor comercial. El procedimiento es rápido y preciso sin muchos riesgos. Se recomienda solamente que el lugar sea bien ventilado, debido a los humos que se producen en la reacción electroquímica y al momento de realizar la fundición del metal obtenido. No es recomendable usarlo con minerales cutas leyes sean altas, debidos a que pueden estos minerales fundirse de manera directa y obtener la plata y el oro de manera más rápida, económica y directa.

Quisiera aclarar que el presente trabajo se realizó con un equipo diseñado y construido en el instituto tecnológico con esfuerzos propios, que los materiales y equipos necesarios se adquirieron exprofeso para ello y que no se apoyó en ningún sentido para la puesta en marcha del proyecto.

Existen situaciones que requieren mejorarse y equipos necesarios que deben adquirirse para continuar con el estudio experimental de la electrodeposición de metales valiosos de plata y oro, para mejorar la técnica, reducir los tiempos, los costos y mejorar el procedimiento de electrodeposición.

Una alternativa de recuperación de oro y plata a partir de soluciones ricas, llamadas lixiviados, es el procedimiento electrolítico empleando la celda sugerida en el trabajo realizado. El presente trabajo ha sido aplicado en forma directa a una solución proveniente del proceso de lixiviación en presencia de cianuro de sodio. La composición química de la solución sometida a electrolisis directa en Celda no se conoce debido a que no se realizó ningún análisis de tipo espectrográfico para conocer la concentración de mg Au/l; de mg Ag/l; de Fe/l y quizás otros metales que existan en el lixiviado.

Sin embargo, mediante el experimento realizado, las deposiciones logradas por este procedimiento son del 98% y 99% para el oro y plata respectivamente, lo cual es bueno ya que se encuentra libre de metales contaminantes. Se recomienda realizarlo para conocer el contenido inicial del lixiviado, así como el final para comparar el porcentaje de recuperación.

Referencias

1 C.L., Mantell (1963). Ingenieria Electro-quimica. Recuperado de: http://qmcuagrm.blogspot.mx/2012/05/ingenieria-electroquimica-c-l-mantell.html

2 Rousseau R. W. (1987) *Handbook of Separation Process Technology*. John Wiley & Sons, p. ix.

3 Grandison A. S., Lewis M. J. (1996) *Separation processes in the food and biotechnology industries: principles and applications*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England, p. 5.

4 Ramírez, O.J. (2004). El beneficio de los minerales de plata por amalgamación. Agosto 18, 2014, Universidad Autónoma de Zacatecas [En línea].

5 Parga, J.R., Carrillo F.R. (1996) Avances en los métodos de recuperación de oro y plata de minerales refractarios. *Revista de Metalurgia*, 32(4), 254-261.

6 Fink, G. D., Beaty, W. H., Carroll, M. J. (1984) *Manual práctico de electricidad para ingenieros*. Reverte, pp. 23-26.

7 Eastman Kodak Company (1996) Recovering Silver from Photographic Processing Solutions. Agosto 16, 2014, de KODAK Publications, U.S.A. [En línea]. http://www.kodak.com/ek/uploadedFiles/J215ENG.pdf.

8 Bourges, J., Broudic J. C., Dauby J., Leboucher I., Leclerc O., Baticle, P. (2002) U.S. patent 6428679. Assignors to Commisariat de l´Énergie Atomique, Paris, and Compagnie Générale des Matériels Nucleaires, Valizy-Villacoublary.

9 Petrova T. M., Tzaneva B., Fachikov L., Hristov J. (2013) Silver recovery from spent photographic solutions by a magnetically assisted particle bed. *Chemical Engineering and Processing*, 71, 83-96.

10 Pfrepper G., Pfrepper R., Knothe M. (1989) Recovery of palladium and silver from process solutions by precipitation with thiocyanates and iron cyanides. *Hydrometallurgy*, 21 (3), 293-304.

11 Riveros P. A., Cooper W. C. (1987) *Proceedings of Metallurgical Society of Canadian Institute of Mining and Metallurgy*, pp. 379–393.

12 Wang S., Li H., Chen X., Yang M., Qi Y., J. (2012) Selective adsorption of silver ions from aqueous solution using polystyrene-supported trimercaptotriazine resin. *Journal of Environmental Sciences*, 24 (12), 2166–2172.

13 Polat, H., Erdogan, D. (2007) Heavy metal removal from wastewaters by ion flotation. *Journal of Hazardous Materials*, 148, 267-273.

14 Article title: México, el principal productor de plata a nivel mundial
Website title: Poblanerías en línea
URL: http://www.poblanerias.com/2015/05/mexico-el-principal-productor-de-plata.

Anexos

Lugar donde se desarrolló el proyecto: Laboratorio de Ingeniería de Métodos de la carrera de Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de Iguala el cual se encuentra ubicado en:

- Carretera Nacional Iguala - Taxco, Perif. Nte. Esquina, Adolfo López Mateos, Iguala de la Independencia, Gro.
- *Gráfico 2. Amperaje y gramos con respecto al tiempo. En Pag. 41.*