

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA QUIMICA**



**“RECUPERACION DE ORO POR RESINA DE INTERCAMBIO IONICO DE
SO-LUCIONES CIANURADAS”**

TESIS

**PRESENTADO POR:
Bach. LUIS PINEDA QUISPE**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO QUÍMICO

PUNO-PERU

2015

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA


“RECUPERACIÓN DE ORO POR RESINA DE INTERCAMBIO
IÓNICO DE SOLUCIONES CIANURADAS”

PRESENTADO PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
QUÍMICO.


TESIS PRESENTADO POR:


LUIS PINEDA QUISPE

APROBADO POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE : 
M. Sc. Gregorio Palomino Cuela

PRIMER MIEMBRO : 
M. Sc. Roger Huanqui Pérez

SEGUNDO MIEMBRO : 
M. Sc. Moisés Pérez Capa

DIRECTOR DE TESIS : 
M. Sc. German Quille Calizaya

PUNO – PERÚ

2015

LINEA: Ingeniería de procesos

TEMA: Recuperación de metales a partir de soluciones

Dedicatoria

A Dios Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor.

Mis Padres Marcelina y Benedicto (QEPD), por darme la vida, quererme mucho, creer en mí y porque siempre me apoyaste. Mamá gracias por darme una carrera para mi futuro, todo esto te lo debo a ti.

Mi hermano(a)s, por estar conmigo y apoyarme siempre, los quiero mucho.

Todos mis amigos y a todos aquellos familiares por compartir los buenos y malos momentos.

Mis maestros Por su gran apoyo y motivación para la culminación de nuestros estudios profesionales y para la elaboración de esta tesis, por apoyarnos en su momento.

PRESENTACIÓN

SEÑOR DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO - PUNO.

SEÑOR COORDINADOR DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA.

En cumplimiento con las disposiciones legales vigentes en el Estatuto de la Universidad Nacional del Altiplano y el Reglamento de la Facultad de Ingeniería Química, presento a vuestra consideración, el trabajo de tesis de investigación intitulado: **“RECUPERACIÓN DE ORO POR RESINA DE INTERCAMBIO IÓNICO DE SOLUCIONES CIANURADAS.”** con la finalidad de optar el Título Profesional de Ingeniero Químico y contribuir a la solución del problema de recuperación del oro.

En el presente trabajo se estudió la recuperación de oro a partir de soluciones cianuradas por resinas de intercambio iónico.

En tal sentido quiero expresar mi reconocimiento y agradecimiento a todos los docentes de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Altiplano por las enseñanzas brindadas para la realización de este trabajo de investigación.

Luis Pineda Quispe

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas e instituciones que, en la forma de orientación, ayuda y estímulo fueron fundamentales para la realización de este trabajo.

Especialmente a:

Mis padres, por el apoyo incondicional, la cual me ha permitido lograr mis objetivos tan anhelados. A mis hermanos por comprenderme y apoyarme en los momentos más difíciles.

A la empresa minera MACDESA por haberme apoyado y capacitado en procesos metalúrgicos de tratamiento de minerales auríferos.

A la Universidad Nacional del Altiplano y Facultad de Ingeniería Química por la formación profesional brindada.

ÍNDICE GENERAL

Pág.

RESÚMEN
INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES, OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

1.1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.2.	ANTECEDENTES.....	15
1.3.	OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	17
1.3.1.	OBJETIVO GENERAL.....	17
1.3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1.4.	JUSTIFICACIÓN.....	18

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO, MARCO CONCEPTUAL E HIPÓTESIS

2.1.	EL PROCESO DE CIANURACIÓN.....	19
2.1.1.	REACCIONES DE DISOLUCIÓN DE ORO EN SOLUCIONES DILUIDAS DE CIANURO.....	19
2.2.	RESINAS Y TIPOS DE RESINAS.....	25
2.3.	PRINCIPIOS GENERALES DEL INTERCAMBIO IÓNICO CON RESINAS SÓLIDAS.....	28
2.4.	CINÉTICA DE LA REACCIÓN DE INTERCAMBIO IÓNICO.....	31
2.5.	EQUILIBRIO Y SELECTIVIDAD EN ETAPA DE CARGA DE LA RESINA.....	31
2.6.	PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE INTERCAMBIADORES IÓNICOS.....	35
2.7.	GRADO DE HINCHAMIENTO DE LA RESINA.....	36
2.8.	RECUPERACIÓN DE ORO DESDE SOLUCIONES CIANURADAS POR INTERCAMBIO IÓNICO.....	38
2.8.1.	RE-EXTRACCIÓN (DESORCIÓN).....	42
2.8.2.	REGENERACIÓN.....	43
2.9.	EXTRACCIÓN DE ORO POR AMINAS.....	43
2.10.	ISOTERMAS DE ADSORCIÓN.....	48
2.10.1.	ISOTERMA DE LANGMUIR.....	49
2.10.2.	ISOTERMA DE FREUNDLICH.....	37

2.11.	CINÉTICA DE ADSORCIÓN.....	50
2.12.	FACTORES QUE AFECTAN LA ADSORCIÓN.....	52
2.13.	MARCO CONCEPTUAL.....	53
2.14.	HIPÓTESIS.....	54
2.14.1.	HIPÓTESIS GENERAL.....	54
2.14.2.	HIPÓTESIS ESPECÍFICA.....	54

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.	EQUIPOS, MATERIALES Y REACTIVOS.....	55
3.1.1.	EQUIPOS Y MATERIALES.....	55
3.1.2.	REACTIVOS E INSUMOS.....	56
3.2.	MOTODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	56
3.2.1.	DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DE ANÁLISIS DE ORO POR FUSIÓN.....	56
3.2.2.	DETERMINACIÓN DE LEY DE ORO EN MINERALES.....	61
3.2.3.	DETERMINACIÓN DE ORO EN SOLUCIONES DE CIANURO (ALTA LEY EN ORO).....	64
3.2.4.	DETERMINACIÓN DE ORO EN SOLUCIONES DE CIANURO (BAJA LEY EN ORO).....	65
3.2.5.	DETERMINACIÓN DE CIANURO LIBRE EN SOLUCIONES LIXIVIADAS.....	67
3.3.	PROCESO DE ADSORCIÓN DE ORO.....	67
3.3.1.	HUMECTACIÓN E HINCHAMIENTO DE LA RESINA IRA 400.....	68
3.3.2.	ACTIVACIÓN DE LA RESINA.....	68
3.3.3.	ACONDICIONAMIENTO DE LA SOLUCIÓN CIANURADA.....	68
3.3.4.	FIJACIÓN O ADSORCIÓN DE ORO EN LA RESINA IRA 400.....	69
3.4.	DISEÑO EXPERIMENTAL Y FACTORES SELECCIONADOS.....	69

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	PRUEBAS EXPERIMENTALES DE ADSORCIÓN DE ORO POR RESINAS IRA 400.....	72
4.2.	TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DEL DISEÑO FACTORIAL.....	78
4.3.	ANÁLISIS DE VARIANZA.....	79
4.4.	DIAGRAMA DE PARETO.....	67



4.5.	ESTIMACIÓN DE EFECTOS Y MODELO MATEMÁTICO.....	69
4.6.	OPTIMIZACIÓN DE RESPUESTA.....	70
4.7.	SUPERFICIE DE RESPUESTA.....	82
4.8.	COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS EN LA ADSORCIÓN DE ORO.....	83

CONCLUSIONES**RECOMENDACIONES****BIBLIOGRAFÍA****ANEXOS**

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1: Coeficientes de selectividad relativa.....	34
Tabla 2.2: Comparación de ventajas y desventajas en proceso de elución.....	39
Tabla 2.3: Basicidad de alquilaminas en agua a 25°C.....	44
Tabla 2.4: Extracción de oro de solución aurocianuro por una amina cuaternaria, aliquat 336 0,05 (R4N) ₂ SO ₄ en xileno.....	45
Tabla 2.5: Efecto de la concentración de extractante Adogen 238, en la extracción de oro de solución aurocianuro.....	46
Tabla 2.6: Efecto de la fuerza iónica en la extracción de oro en solución aurocianuro por aminas 0,05M en xileno.....	46
Tabla 2.7: Efecto de la concentración inicial de oro en la extracción de oro de soluciones aurocianuro por Adogen 238, 0,05 M xileno.....	47
Tabla 3.1: Preparación de geoquímico para análisis de minerales.....	58
Tabla 3.2: Niveles máximos y mínimos.....	70
Tabla 3.3: Matriz de diseño factorial.....	71
Tabla 4.1: Resultados de porcentaje de adsorción de oro.....	72
Tabla 4.2: Resultados de adsorción de oro según diseño experimental.....	76
Tabla 4.3: Matriz de diseño factorial.....	77
Tabla 4.4: Análisis de varianza para % de adsorción de oro.....	78
Tabla 4.5: Efectos estimados para % adsorción de oro.....	80
Tabla 4.6: Coeficiente de regresión para adsorción de oro.....	81
Tabla 4.7: Optimización de adsorción de oro.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1: Modelo electroquímico para la cianuración del oro.....	21
Figura 2.2: Esquema de la reacción de intercambio iónico.....	28
Figura 2.3: Esquema del proceso de difusión en el intercambio iónico.....	29
Figura 2.4: Modelo de la esponja para representar un intercambiador iónico, a la izquierda se tiene el caso de un intercambiador catiónico y, a la derecha, el de uno aniónico.....	30
Figura 2.5: Efecto del pH en la extracción de oro de solución aurocianuro por aminas primaria, secundaria y terciaria.....	44
Figura 2.6: Isoterma de Langmuir.....	49
Figura 2.7: Isoterma de Freundlich.....	50
Figura 3.1. Diagrama de flujo para la determinación de Au y Ag en minerales.....	60
Figura 4.1: Porcentaje de adsorción de oro en función de tiempo.....	73
Figura 4.2: Diagrama de balance de oro en adsorción.....	74
Figura 4.3: Diagrama de Pareto estandarizado.....	67
Figura 4.4: Efectos principales en la adsorción de oro.....	68
Figura 4.5: Superficie de respuesta estimada.....	71
Figura 4.6: Contornos de superficie estimada para adsorción de oro.....	72

RESÚMEN

El proceso metalúrgico del oro de la Empresa MACDESA consiste en operaciones de chancado y molienda, lixiviación por agitación, adsorción en carbón activado y desorción. La ley del mineral se determinó mediante análisis químico cuyo valor en promedio es 7,5 g Au/TM de mineral, el mismo que fue analizado por el método de fusión. La recuperación del oro en el proceso de cianuración por agitación alcanzó 93% de extracción.

El estudio del proceso de intercambio iónico consistió en el tratamiento de soluciones lixiviadas de oro, mediante la utilización de una resina sólida IRA 400, que al estar contacto con las soluciones cianuradas atrapan los complejos del aurocianuro, de donde se obtuvo resina cargada de oro.

El proceso se llevó a cabo en un sistema de resina en pulpa con agitación. Las condiciones de operación que presentaron mejores resultados de adsorción de oro fueron: pH 10,5; concentración de la solución cianurada 7 mgAu/L y porcentaje de cianuro en la solución 0,1%. De acuerdo al diseño experimental se han ejecutado 8 pruebas de adsorción más 3 réplicas en el centro. La recuperación del metal precioso mediante resinas de intercambio iónico fue de 97% de extracción. Durante el proceso de adsorción se controló el consumo de cianuro para mantener la fuerza de cianuro, así como el pH de la solución. Las pruebas de cuantificación de oro en soluciones cianuradas fueron determinadas por el método de fusión, los mismos que fueron realizados en el laboratorio de la Empresa Minera MACDESA-Arequipa Perú. Los materiales experimentales utilizados en la adsorción de oro fueron: 1 g de resina IRA 400, un agitador magnético y vasos precipitados de 400 mL. De acuerdo a los resultados obtenidos se considera que existen ventajas que favorecen el uso de resinas sintéticas, debido a su rápida velocidad de extracción de oro desde soluciones cianuradas y altas recuperaciones de oro en comparación con el uso de carbón activado y mejoras en el proceso.

Palabras claves: Oro, adsorción, resina, intercambio iónico, solución cianurada.

INTRODUCCIÓN

La planta de tratamiento de Minera Aurífera MACDESA, se encuentra localizada en el departamento de Arequipa provincia de Caravelí y distrito de Chala. Las principales operaciones metalúrgicas que se realizan en la empresa Minera MACDESA consisten en operaciones de chancado y molienda, cianuración, carbón activado y desorción. El mineral tratado tiene alta ley en oro. En el proceso de cianuración en tanques de agitación, la recuperación de oro alcanza entre 90 y 93%.

La mayoría de las plantas minero metalúrgicas utilizan el proceso de carbón activado y desorción en las operaciones de concentración y purificación de oro, pero su principal desventaja es que se trabajan en el proceso de desorción a altas temperaturas y recuperaciones de oro relativamente bajo.

El proceso de intercambio iónico en el tratamiento de soluciones de lixiviación para extraer de ellas uno o más compuestos, mediante la utilización de resinas sólidas, altamente reticuladas y con iones intercambiables. Estas resinas en general están compuestas en granos, que tienen una gran área específica, debido al reticulado, y que al ponerse en contacto con una solución rica de solución aurocianurada atrapa el oro químicamente desprendiéndose al ión intercambiable. Con esto se obtiene la resina cargada con el metal oro. Luego para la desorción se usa otra solución eluyente, generalmente se utiliza la mezcla de acetona y ácido clorhídrico, con el fin de descargar el metal oro atrapado y finalmente se regenera la resina.

El presente trabajo de investigación intitulado “**RECUPERACIÓN DE ORO POR RESINA DE INTERCAMBIO IONICO DE SOLUCIONES CIANURADAS.**” se realizó con el objetivo de innovar y reemplazar la tecnología de carbón activado por resinas de intercambio iónico en la recuperación oro a partir de soluciones aurocianuradas. El proceso consiste en adsorber el oro mediante resina IRA 400 a partir de soluciones cianuradas en medio alcalino, esta técnica aún no se aplica en el tratamiento de minerales auríferos. Los ensayos de adsorción fueron realizados a escala laboratorio, utilizando una resina aniónica de amina cuaternaria. Las variables a determinar son las siguientes: pH, concentración de oro en lixiviados, porcentaje de cianuro en solución acuosa, y tiempo de adsorción, así como dilución más adecuada de la pulpa que serán aplicados a escala de planta piloto.



Las pruebas de adsorción por resinas de intercambio iónico se realizaron en el laboratorio de la empresa MACDESA-Arequipa. Así, mismo los análisis químicos de oro por el método de fusión también fueron ejecutados en el laboratorio químico de la Empresa MACDESA Arequipa. Los materiales experimentales utilizados fueron: Horno de fundición, estufa eléctrica, plancha de calentamiento, crisoles y copelas, reactivos fundentes (Flux), balanza digital, resina IRA 400, solución cianurada de oro, agitador magnético, vasos precipitados y reactivo de ácido nítrico para separación de plata del botón de oro. De acuerdo al diseño experimental se realizaron 11 pruebas experimentales con 3 réplicas en el centro.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, ANTECEDENTES, OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Puno es considerada como una de las regiones más ricas en minerales de oro, la extracción se realiza con soluciones de cianuro de sodio, el posterior proceso de recuperación es a través de carbón activado. La tecnología de resinas de intercambio iónico para la recuperación de oro desde soluciones cianuradas presenta ventajas respecto al uso de carbón activado, debido a su mayor capacidad de carga, su selectividad al preferir el Au, adsorbiendo en menor proporción a la plata y el cobre.

Desde el punto de vista operacional resultan también muy favorable ya que las resinas requieren menor temperatura de descarga en comparación con el carbón activado y no requiere reactivación térmica, sólo se necesita de un lavado con una solución eluyente para regenerar a las resinas. La recuperación del oro desde soluciones cianuradas, utilizando resinas de intercambio iónico, es un proceso de concentración de oro a ser aplicada en el futuro y como una posible reducción de costos de operación y mejoras en el proceso de recuperación de oro.

El proceso de intercambio iónico consiste en el tratamiento de soluciones cianuradas, para extraer de ellas unas o más compuestos, mediante la utilización de resinas sólidas, altamente reticuladas y con iones intercambiales. Estas resinas en general, están compuestas de granos, que tienen una gran área específica, debido al reticulado y que al ponerse en contacto con una solución rica de lixiviación, atrapan químicamente uno o más iones metálicos desprendiéndose al ion intercambiable, con esto se obtiene la resina cargada con el metal. Luego se usa un eluyente adecuado para descargar el metal adsorbido y se regeneran las capacidades extractivas de la resina. Existen varios tipos de resinas comerciales para recuperación de oro y plata de soluciones de cianuro, tiouria y tiosulfato.

Para el proceso de recuperación de oro a partir de soluciones cianuradas se propone utilizar la resina de intercambio iónico amberlita IRA 400.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA GENERAL

¿Adsorberá la resina amberlita IRA 400 los complejos de oro a partir de soluciones cianuradas alcalinas?

FORMULACIÓN DE PROBLEMAS ESPECÍFICOS

¿Cuál será el pH óptimo en la adsorción del oro con resina amberlita IRA 400?

¿Cuál será la concentración de oro adecuada en la adsorción con resina amberlita IRA 400?

¿Cuál será la concentración de cianuro adecuada en la adsorción de oro con resina amberlita IRA 400?

1.2. ANTECEDENTES

La era de las resinas sintéticas como intercambiadores iónicos se inició en 1935 por trabajos de Adams (1935). Luego hacia 1940 en Estados Unidos se patentó una serie de resinas denominadas Amberlitas. El grupo picrilamina (2, 4, 8 trinitrofenil) fue usado para obtener especificidad por potasio, mientras que la incorporación del ligando mercapto produce resina de alta selectividad por los metales que forman mercaptano.

Hale (1956), desarrolló una resina con un grupo aminodiacetato, el cual tenía alta afinidad por un gran número de iones de metales de transición. Las resinas quelantes que contienen amino -N- acetato han sido extensamente estudiadas, entre ellas la IDA es el ligando más popular, que ha sido comparada con la resina que contiene ácido fosfórico en la separación de Nd (III) de La (III) usando ácido nítrico como eluyente.

Las resinas con ligando macro cíclicos son aquellos que contienen por lo menos tres átomos donadores formando un anillo cuyo tamaño mínimo es 9 átomos y son coronados, se caracteriza por tener un hueco capaz de hospedar cationes metálicos. Oikawa(1988) ha preparado la resina aminocarboxilato en base al quitosano por la reacción de quitosano y EDTA anhidro.

Oikawa (1988), sintetizaron una resina con cadena quelante que contiene dos grupos IDA sobre el anillo 5-triazina. Dentro del poliestireno (Resina DIEN) ha sido introducido la cadena dietilenotriamina a través del nitrógeno secundario. La carboximetilación de la resina DIEN permitió el derivado del amino -N-acetato (resina CMA).

Gomes et al (2001), en su trabajo de investigación, recuperación de oro de soluciones de cianuro, utilizó la resina Purolite A-100 de intercambio aniónico de base débil. Esta resina es estable hasta 60°C y después de la regeneración conserva sus propiedades físicas. La resina Purolite A-100 aniónico mostró alta capacidad para el oro (500 mg Au/g de resina

seca), cuya capacidad de adsorción fue determinado mediante isotermas de Freundlich. Finalmente, un adsorbente de lecho fijo se satura con solución de cianuro de oro y se regenera con una solución de hidróxido de potasio.

Rabiul et al (2013), la recuperación de oro fue investigado por un nuevo tipo de adsorbente mesoporoso, que es rápida y selectiva para el Au(III). El adsorbente se preparó mediante la inmovilización de metoxicarbonil- benciliden-hidrazinilo-benzoico (MBHB) sobre sílice mesoporoso altamente ordenado. El adsorbente aumenta la formación de color por la formación de complejos estables Au(III)-MBHB. La capacidad máxima de adsorción del adsorbente fue tan alta como 177,94 mgAu/g adsorbente mesoporoso. La selectividad del adsorbente posee excelentes propiedades de iones Au(III) a partir de sistemas acuosos multi-iónicos.

Silva et al (2003), los trabajos realizados a escala laboratorio para la regeneración de cianuro de las soluciones alcalinas cianocomplejos de oro, cobre y hierro, utilizando una opción innovadora del proceso AVR asociado a las resinas de intercambio iónico poliméricos Imac HP555 (Rom & Haas- EEUU) y amberlita IRA-420 (Rom & Haas Brasil) en las columnas. La resina Imac HP555 ha adsorbido 64,5% de CN de la solución alcalina que contiene cianocomplejos de metal. Mientras tanto, en la etapa de elución con H₂SO₄ y tiouria alcanzaron 31,2% CN, el 86,2% de Au, 86,4% de Cu y 41,5% de Fe. La resina IRA-400 ha adsorbido 53,4% de CN en las mismas condiciones experimentales adoptadas por la resina Imac HP555. La resina amberlita IRA-400 eluyó 48% de CN, 96,8% de Au, 9,1% de Cu y 76% de Fe.

Yong y Choong (2014), utilizó la resina Dowex XLT 21K, que es una resina básica fuerte para adsorber selectivamente complejos de cianuro de oro. La existencia de complejo oro-cianuro en la superficie de la resina Dowex se demostró por análisis de SEM y EDX. El valor máximo de la eficiencia de eliminación de oro-cianuro es de 93% de 10g/L de concentración de resina de adsorción a pH alcalino. La capacidad de adsorción de la resina Dowex XLT 21K fue de 32 mgAu/g de masa seca. Además, la mayoría de los procesos de adsorción para complejo de oro-cianuro se terminó en 1 h. Se concluyó que la resina Dowex XLT 21K tiene una excelente selectividad para el complejo de oro-cianuro, se puede aplicar al sistema de recuperación de complejos de oro-cianuro a nivel industrial.

Chaparro et al (2012), estudió la adsorción de oro a partir del complejo oro tiosulfato, evaluando la eficiencia de la resina utilizada para el intercambio aniónica AuRIX[®]100 en medio amonio-tiosulfato. Se variaron los parámetros cinéticos que intervienen en la reacción, como son: $[Au]_i$, temperatura, velocidad de agitación, $[NH_4OH]$, $[(NH_4)_2S_2O_3]$ y pH. El seguimiento de la reacción para evaluar el contenido de oro a un tiempo t se determinó por absorción atómica. El estudio se llevó a cabo en un reactor batch y una columna de intercambio iónico. Las condiciones de operación que presentaron mejores resultados de extracción de oro en pruebas por lote, fueron: $pH=10.5$, velocidad de agitación=500 rpm, $[Au]_i=1$ mg/l, $[(NH_4)_2S_2O_3]=0.04$ M, $[AuRIX^{\circledR}100]=5$ gramos y temperatura= $25^{\circ}C$. Los resultados obtenidos, indican que al aumentar la concentración de tiosulfato favorece la extracción en un 99% durante 3 horas, siendo afectado notablemente por la presencia de amonio. Las condiciones que presentaron mejores resultados durante las pruebas realizadas en la columna fueron: temperatura $25^{\circ}C$, 89-276 BVH durante 25 horas y $pH=10.5$.

1.3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la recuperación del oro mediante el uso de la resina intercambio ionico amberlita IRA 400 a partir de soluciones cianuradas alcalinas.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la cianuración de mineral de oro para obtener solución acuosa complejo aniónico de aurocianuro.
- Determinar el pH óptimo del proceso de adsorción de oro mediante resina IRA 400
- Determinar la concentración adecuada de oro en el proceso de adsorción por resinas de intercambio iónico.
- Cuantificar la concentración de cianuro en el proceso de adsorción de oro con resina.

1.4. JUSTIFICACIÓN

La minería peruana ha experimentado importantes avances en el desarrollo de nuevos procesos en el tratamiento de minerales auríferos, tanto en la etapa de lixiviación como en la recuperación de oro. Se viene estudiando la posibilidad de reemplazar la técnica de carbón activado por resinas de intercambio iónico.

Actualmente las técnicas más utilizadas a nivel mundial para la recuperación de oro en soluciones de cianuración, son la cementación con zinc o la adsorción en carbón activado. También cabe señalar, los procesos de resinas de intercambio iónico y la extracción por solvente, los cuales se encuentran en su etapa de estudio y desarrollo para la recuperación de oro en soluciones de cianuración.

En la técnica convencional de recuperación de oro a partir de soluciones cianuradas es utilizada comúnmente el carbón activado, esta técnica implica complejidad y alto costo de operación debido que en la etapa de desorción se realiza a temperaturas elevadas.

El uso de carbón activado en la recuperación de oro a partir de soluciones de cianuro está bien establecido. Sin embargo, las resinas de intercambio iónico presentan una serie de ventajas sobre carbón activado como la carga superior, la regeneración de iones cianuro para reciclar al circuito de lixiviación y la eliminación periódica de reactivación de alta temperatura lo que implicaba alto costo de operación. Estas ventajas han motivado una mayor investigación sobre las resinas de débil- base, base fuerte, quelantes y resinas adsorbentes para la recuperación de oro y plata. Otra de las ventajas que ofrece la resina es la alta recuperación de oro.

El uso de la resina IRA 400 en la recuperación de oro se realizará a temperaturas ambientales y en menor tiempo posible. Los resultados de la investigación será un aporte en el tratamiento de minerales auríferos en la Región de Puno.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO, MARCO CONCEPTUAL E HIPÓTESIS

2.1. EL PROCESO DE CIANURACIÓN

La cianuración es el método más importante que se ha desarrollado para la extracción del oro de sus minerales y se usa a escala comercial en todo el mundo. La química del proceso de cianuración se basa en el hecho, de que bajo condiciones oxidantes, el oro y la plata puede disolverse y acomplejarse en soluciones de cianuro alcalinos.

El oro contenido en el licor resultante de la lixiviación, puede recuperarse mediante cualquiera de los siguientes procesos: precipitación con polvo de zinc o adsorción con carbón activado.

El oro no se oxida a temperatura ordinaria, no es soluble en ácidos: clorhídrico, nítrico y sulfúrico. Se disuelve en agua regia, la que puede ser dificultada por la presencia de la plata mediante la formación de cloruro de plata que cubre la superficie del metal.

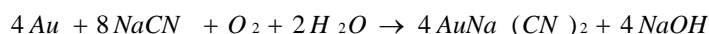
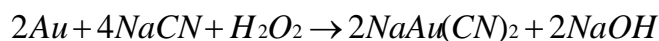
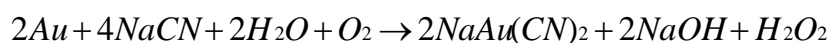
El oro también se disuelve en soluciones que contengan bromo o cloro, pero con mayor lentitud, siendo la reacción acelerada por el incremento de la temperatura. El yodo al estado nascente disuelve al oro.

La base del proceso de cianuración, es que soluciones débiles o diluidas de cianuro de sodio o potasio, tienen una acción disolvente preferencial sobre partículas de oro metálico (igualmente sobre la plata), con respecto a otros metales que se encuentran habitualmente en los minerales de oro.

El cianuro es el término descriptivo general aplicado usualmente al cianuro de sodio (NaCN). Debiendo mencionarse que el ion cianuro (CN^-) es en realidad el que tiene la acción o fuerza disolvente y la base alcalina del sodio, potasio o calcio, simplemente da la estabilidad química al compuesto. (Tecsop, 2010).

2.1.1. REACCIONES DE DISOLUCIÓN DE ORO EN SOLUCIONES DILUIDAS DE CIANURO

Sancho y Verdeja (1998), indican que las reacciones de mayor significación en el proceso de cianuración son las que a continuación se presentan:

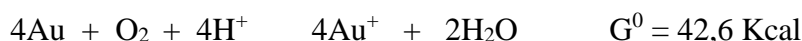
a. Ecuación de Elsner**b. Ecuación sugerida por Janin****c. Ecuación de Bodlaender**

La ecuación global vendría a ser la misma que la ecuación de Elsner.

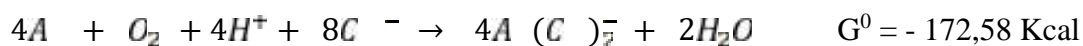
Respecto a estas ecuaciones cabe hacer un comentario, en razón de que el constituyente de mayor importancia es el oxígeno (excepto el de Janin, por lo que pierde credibilidad). Las reacciones propuestas por Bodlaender resaltan cuán importante es la presencia de oxígeno, la cual en una cantidad limitada, forma el peróxido necesario por la disolución del oro y en exceso, propicia la oxidación del ion cianuro a ion cianato.

Mecanismo de la lixiviación con cianuro de sodio

Haug D.H.H. et al (1986), indica que la lixiviación de oro con cianuro de sodio es bien conocido y termodinámicamente probado que el oxígeno no oxida al oro en un ambiente normal.



En la presencia de iones cianuro, el oro es fácilmente soluble. Existe formación de un complejo de cianuro de oro estable.



La disolución de oro en soluciones de cianuro es electroquímica por naturaleza. El oro es disuelto en sitios anódicos mientras que el oxígeno es reducido en sitios catódicos. El ánodo y el cátodo forman un par de corrosión en el cual existe transferencia de electrones de los sitios anódicos a los sitios catódicos a través del oro sólido.

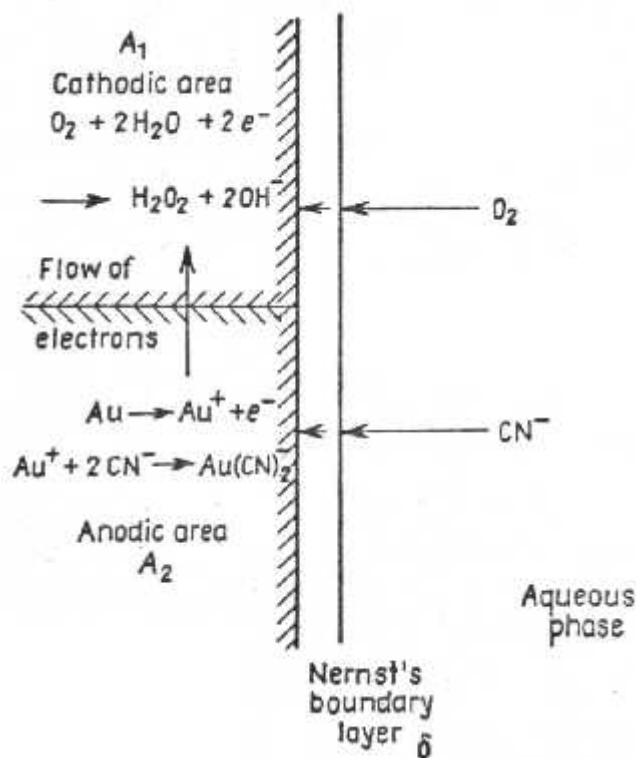
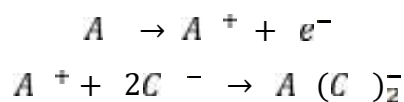


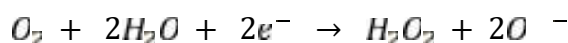
Figura 2.1: Modelo electroquímico para la cianuración del oro

Las reacciones anódicas y catódicas son:

Reacción anódica



Reacción catódica



Astucuri (1984), ha mostrado que la cinética de cianuración del oro y plata es controlada por difusión. Para altas concentraciones de oxígeno, la velocidad de reacción depende de la difusión de iones cianuro a través de la capa de película del líquido, y para concentraciones de cianuro altas, la velocidad es controlada por la difusión del oxígeno a través de la capa de película.

Para el desarrollo de esta ecuación se parte de la aplicación de la ley de Fick para la difusión del oxígeno y el cianuro hacia la superficie del oro - interface - bajo condiciones de estado estacionario.

$$\frac{d(O_2)}{d} = \frac{D_{O_2}}{\delta} A_1 \{ [O_2] - [O_2]_i \}$$

$$\frac{d(CN^-)}{d} = \frac{D_{CN^-}}{\delta} A_2 \{ [CN^-] - [CN^-]_i \}$$

Donde:

D_{O_2} y D_{CN^-} - son los coeficientes de difusión del O_2 y CN^- , respectivamente y i es la interfase es decir indica las concentraciones en la interfase.

$\frac{d(O_2)}{d}$ y $\frac{d(CN^-)}{d}$ son las velocidades de difusión de O_2 disuelto y CN^- , respectivamente.

$[O_2]$ y $[O_2]_i$ son las concentraciones de O_2 disuelto en el seno de la solución, y la interfase de reacción, respectivamente en moles/litro

$[CN^-]$ y $[CN^-]_i$ son las concentraciones del ión CN^- en el seno de la solución y la interfase de reacción, respectivamente en moles /litro

A_1 y A_2 son las áreas superficiales en las cuales ocurren las reacciones catódicas y anódicas, respectivamente es el espesor de la capa limite, en cm.

Para el caso de control difusional (en que la difusión es el mecanismo limitante o el paso más lento), es posible asumir que las reacciones químicas en la superficie del oro son muy rápidas comparadas con las velocidades de las cuales los iones oxígeno y cianuro difunden a través de la capa limite. De esta forma, las concentraciones de la interfase del sólido pueden ser consideradas como cero.

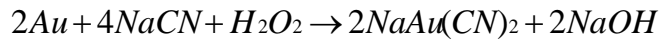
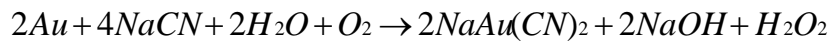
$$[O_2]_i = 0 \quad [CN^-]_i = 0$$

Por lo tanto, tenemos:

$$\frac{d(O_2)}{d} = \frac{D_{O_2}}{\delta} A_1 [O_2]$$

$$\frac{d(CN^-)}{d} = \frac{D_{CN^-}}{\delta} A_2 [CN^-]$$

En 1966, Habashi citado por Astucuri, mostró la evidencia cinética del proceso de disolución, que es de naturaleza electroquímica, siendo la reacción total la siguiente:



Inspeccionando las reacciones catódicas y anódicas y la consecuente reacción global, se puede ver que se requieren 4 moles del ión cianuro y un mol de oxígeno para disolver para disolver 2 moles de oro. Entonces la velocidad de disolución del oro estará dada por:

$$v = \frac{d}{dt} \quad \dot{n} = 2 \frac{d(O_2)}{dt} = 2 \frac{D_{O_2}}{\delta} A_1 [O_2]$$

$$v = \frac{d}{dt} \quad \dot{n} = \frac{1}{2} \frac{d(C^-)}{dt} = \frac{1}{2} \frac{D_{C^-}}{\delta} A_2 [C^-]$$

Además, en condiciones de estado estacionario la velocidad de la reacción catódica debe ser igual a la velocidad de la reacción anódica, por lo tanto:

$$2 \frac{D_{O_2}}{\delta} A_1 [O_2] = \frac{1}{2} \frac{D_{C^-}}{\delta} A_2 [C^-]$$

Si consideramos que el área de interface total relevante para la disolución de oro, es $A=A_1+A_2$. Reemplazando en la expresión de la velocidad de disolución, finalmente resulta:

$$v = \frac{d}{dt} \quad \dot{n} = \frac{2AD_{O_2}D_{C^-}[O_2][C^-]}{\delta\{D_{C^-}[C^-] + 4D_{O_2}[O_2]\}}$$

Esta es la ecuación cinética general de la cianuración y la que hay que saber interpretar.

Cuando la concentración de cianuro es muy baja, en la ecuación general el primer término del denominador puede ser desechado, por lo tanto la ecuación de disolución se simplifica:

$$v = \frac{d}{dt} \quad \dot{n} = \frac{1}{2} \frac{AD_{C^-}}{\delta} [C^-]$$

$$v = \frac{d}{dt} \quad \text{ó} \quad n = k_1 [C^-]$$

Esta última relación nos indica que a bajas concentraciones de cianuro, la velocidad de disolución depende solo de la concentración de cianuro, lo cual es apoyado por datos experimentales.

Por otro lado; si la concentración de cianuro es alta, el término de la derecha del denominador de la ecuación general se elimina quedando por lo tanto:

$$v = \frac{d}{dt} \quad \text{ó} \quad n = 2 \frac{A D_{O_2}}{\delta} [O_2]$$

$$v = \frac{d}{dt} \quad \text{ó} \quad n = k_2 [O_2]$$

De acuerdo a esto a altas concentraciones de cianuro la velocidad depende de la concentración de oxígeno, el cual también coincide con la experiencia.

También se puede deducir para que ocurra una máxima velocidad de disolución se tiene que cumplir que:

$$\frac{1}{2} \frac{A D_C}{\delta} [C^-] = 2 \frac{A D_{O_2}}{\delta} [O_2]$$

$$D_C [C^-] = 4 D_{O_2} [O_2]$$

Entonces, la velocidad limite máxima para la disolución del oro ocurre cuando:

$$\frac{[C^-]}{[O_2]} = 4 \frac{D_{O_2}}{D_C}$$

Ahora bien, se ha determinado que la difusión de la molécula de cianuro hacia la interface es más dificultosa, primero, ya que al tener carga negativa tiende a asociarse en su movimiento con los protones presentes y, segundo, por ser de un tamaño, mayor que la del oxígeno. Entonces, no es extraño descubrir que la molécula de oxígeno, al ser un gas disuelto, presente una movilidad mayor, cerca de 1,5 veces más rápida que la del cianuro. Por lo tanto, al medir experimentalmente los coeficientes de difusión respectivos, para 25°C, se tiene aproximadamente los siguientes valores:

$$D_{O_2} = 2,76 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$D_C = 1,83 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

Es decir, se mantiene la relación $\frac{[C^-]}{[O_2]} = 1,5$. Reemplazando estos valores resulta que: Astururi (1984), la mayor velocidad para la disolución del oro ocurre cuando se cumple que las concentraciones del cianuro y del oxígeno disuelto se encuentran en una razón molar de aproximadamente seis.

$$\frac{[C^-]}{[O_2]} = 6$$

Por otra parte, a temperatura ambiente y presión atmosférica, en un litro de agua hay unos 8,2 mg de O_2 disuelto en el agua. Esto corresponde a unos $0,27 \cdot 10^{-3}$ moles/litro de concentración de O_2 de acuerdo a esto la velocidad máxima de disolución del oro, con O_2 del aire a 1atm ($P_{O_2}=0,21$ atm), estará dada por una concentración de KCN de 0,079g/L o de $1,62 \cdot 10^{-3}$ moles/litro (0,01%), aproximadamente, que es justamente lo que se observa en la práctica.

2.2.RESINAS Y TIPOS DE RESINAS

Las resinas tienen forma de pequeñas esferitas o granos, están compuestas por moléculas polimerizadas a la que se ha agregado grupos complejantes o grupos iónicos.

Kichener (1957), resina es un polímero sintético en el cual los grupos de hidrocarburos forman una red de tres dimensiones que contienen ligandos. Los grupos funcionales de las resinas en general, están unidos a esqueletos llamados también matrices que son polímeros que están formados por polímeros estirenos y divinilbenceno (DVB) asociados por copolimerización y entrecruzamiento entre ellos.

Matriz Polimérica Inorgánica

La matriz inorgánica de sílica es la generalmente usada. Esta resina tiene fuerza mecánica, estabilidad térmica hacia ácidos y bases fuertes, sin embargo tiene las siguientes desventajas.

- a) imposibilidad de tener un alto grado de funcionalización, por lo tanto una baja capacidad de captación de metales.
- b) El intercambio iónico es lento.

Matriz Polimérica Orgánica

Matriz Polimérica Natural: Es la celulosa, también son usadas la quitina (N-acetil-D-glucosamina) y su derivado el quitosano, kunin (1970), la quitina es uno de los polisacáridos más abundante en la naturaleza, que se encuentra presente en el exoesqueleto de los artrópodos. Los artrópodos, el grupo más grande del reino animal comprenden varias clases: insectos, arácnidos y crustáceos. La quitina también puede ser encontrada con una similar composición en la membrana celular de los anélidos, hongos y animales. Por ejemplo los caparazones de la langosta y cangrejo contienen entre 20 – 25 % de quitina y cerca de 75 – 80 % de carbonato de calcio minerales y proteínas. La estructura de la quitina es similar a la de la celulosa, las cadenas que forma la quitina son generalmente lineales y adquieren conformaciones ordenadas en las que los grupos acetoamida forman enlaces de hidrogeno intra e intermolecular bastante fuertes con los grupos hidroxilos, dando como resultado un material altamente insoluble. Sin embargo la quitina es soluble en general con alguna degradación en ácidos minerales concentrados. El quitosano es un derivado de la quitina, es un copo limero obtenido de la desacetilación parcial de la quitina, cuyas unidades repetitivas son la acetilglucosamina (203 g/mol) y la glucosalina (161 g/mol).

Matriz Polimérica Sintética: Es la más utilizada y pueden ser de condensación o de adición (polimerización).

Polímeros por Condensación: Estos isómeros son de alto peso molecular y alto grado de entrecruzamiento, son formados por la reacción de pequeños monómeros polifuncionales por eliminación de pequeñas moléculas como alcohol, agua o amoníaco, formándose nuevos enlaces C-C, C-N, C-O. Un ejemplo es la condensación de fenol y formaldehído.

Estos polímeros pueden romperse fácilmente por lo que tienen poca estabilidad mecánica y química.

Polímeros de Adición o Polimerización: Son formados por la polimerización de radicales libres de compuestos olefínicos y diolefínicos. Los más utilizados son los polímeros formados por la condensación del estireno y el divinilbenceno.



La incorporación del grupo formador de complejos (ligandos) se puede realizar por tres métodos.

- a. Polimerización directa y copolimerización de monómeros conteniendo el ligando deseado.
- b. Modificación química del polímero preformado.
- c. Incorporación de ligandos iónicos a resinas de intercambio iónico.

Propiedades de las Resinas

Las resinas de poliestireno selectivas y de intercambio iónico poseen las siguientes propiedades generales:

- Elevada estabilidad a elevadas temperaturas de la solución.
- Gran estabilidad frente a los reactivos químicos y solventes, sin embargo oxidantes fuertes (por ejemplo HNO_3 , KMnO_4) pueden causar alguna destrucción.
- El grado de entrecruzamiento puede ser controlado por la proporción de divinilbenceno empleando en la preparación

Resinas sintéticas de policondensación

Adams (1935), realizaron la síntesis de macromoléculas dotadas de propiedades de cambio condensando polifenoles y formol. Los fenoplatos obtenidos tienen una débil capacidad de cambio iónico debido a los OH fenólicos libres. Diversas modificaciones llevan a otras resinas ácidas y a las resinas básicas.

Resinas Catiónicas

El grupo funcional de las resinas fuertemente ácidas es generalmente SO_3H^- . Se parte entonces de un fenol sulfonado, pero al estar así bloqueada una de las tres posiciones activas, la policondensación no puede dar nada más que productos lineales que no son demasiado insolubles.

La resistencia térmica de estas resinas son débiles, pues el SO_3H^- del núcleo se hidroliza a partir de los 40°C se logró mejorar hasta una resistencia de 80°C .

Las resinas de función ácida débil ($-\text{COOH}$) conservan los grupos $-\text{OH}$ fenólicos. Sus inconvenientes, falta de estabilidad y débil capacidad, las hacen desaparecer poco a poco del mercado, en tanto que hace algunos años todos los fabricantes las producían.

2.3. PRINCIPIOS GENERALES DEL INTERCAMBIO IÓNICO CON RESINAS SÓLIDAS

Reacción de intercambio iónico

Los intercambiadores iónicos son matrices sólidas que contienen sitios activos (también llamados grupos ionogénicos) con carga electrostática, positiva o negativa, neutralizada por un ion de carga opuesta (contra ion). En estos sitios activos tiene lugar la reacción de intercambio iónico. Esta reacción se puede ilustrar con la siguiente ecuación tomando como ejemplo el intercambio entre el ion sodio, Na^+ , que se encuentra en los sitios activos de la matriz R, y el ion calcio, Ca^{2+} , presente en la disolución que contacta dicha matriz, ver figura 2.2 (Ortega, 2009).

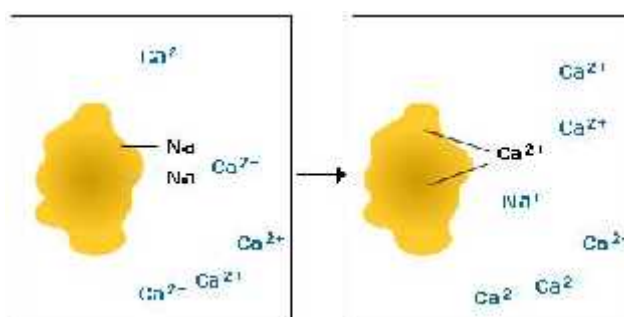
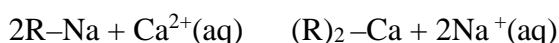


Figura 2.2: Esquema de la reacción de intercambio iónico

A medida que la disolución pasa a través de la resina, los iones presentes en dicha disolución desplazan a los que estaban originariamente en los sitios activos. La eficiencia de este proceso depende de factores como la afinidad de la resina por un ion en particular, el pH de la disolución si el grupo activo tiene carácter ácido y básico, la concentración de iones o la temperatura.

Es obvio que para que tenga lugar el intercambio iónico, los iones deben moverse de la disolución a la resina y viceversa. Este movimiento se conoce como proceso de difusión. La difusión de un ion está en función de su dimensión, carga electrostática, la temperatura y también está influenciada por la estructura y tamaño de poro de la matriz. El proceso de difusión tiene lugar entre zonas de distinta concentración de iones, de más concentrado a menos, hasta que tengan la misma concentración ver figura 2.3 (Ortega, 2009).

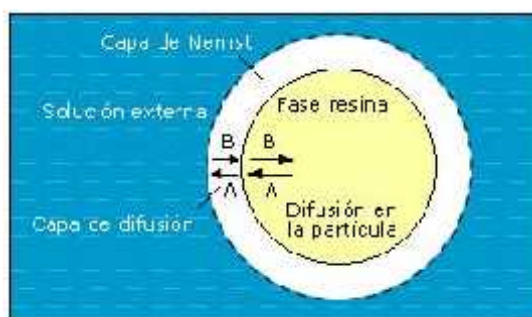


Figura 2.3: Esquema del proceso de difusión en el intercambio iónico

Las resinas de intercambio iónico están constituidas por granos de material sólido macromolecular, de carácter polar e insoluble, con un reticulado muy fuerte que presentan una gran superficie interna y tienen aniones o cationes móviles. En esencia, el intercambio iónico es un fenómeno de interfase que comprende un contacto iónico, el desplazamiento y finalmente el desprendimiento y alejamiento del ión móvil. Si el ión móvil es de carga positiva, entonces se tienen resinas catiónicas y si es negativo entonces serán resinas aniónicas. Una sustancia que actúa como intercambiador iónico está compuesta de una estructura matriz, que es portadora de cargas eléctricas positivas o negativas. Esto es compensado por iones de signo contrario, denominados contra-iones. Los contra-iones son libres de moverse dentro de la estructura y pueden ser reemplazados por otros iones del mismo signo, mientras que los iones fijos a la estructura por esencia no son móviles. Los iones del mismo signo que los de la matriz se llaman co-iones.

Cuando la matriz es portadora de iones fijos cargados positivamente, se dice que el intercambiador es aniónico, dado que puede cambiar aniones con los contra-iones. En forma similar, un intercambiador catiónico es capaz de intercambiar cationes con sus contra-iones. Las reacciones de intercambio aniónico se pueden representar así (Domic, 2001)

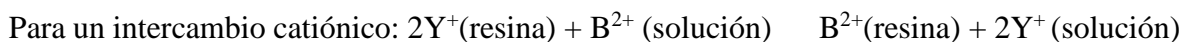


O bien simplemente: X^- (resina) + A^- (solución) \rightleftharpoons A^- (resina) + X^- (solución)



O bien simplemente: Y^+ (resina) + B^+ (solución) \rightleftharpoons B^+ (resina) + Y^+ (solución)

Si los iones intercambiados son de valencias diferentes, entonces se preservan los balances de cargas y de masa. Por ejemplo, si A^{2-} es intercambiado por X^- y B^{2+} por Y^+ , entonces las ecuaciones anteriores pueden ser representadas así:



Los electrolitos disueltos pueden llegar a removerse completamente desde la solución acuosa, por la vía de intercambiar sus cationes por protones. H^+ , y todos los aniones por hidroxilos, OH^- . Esto se puede lograr en un mismo reactor provisto de dos etapas: una parte con resina catiónica y la otra con resina aniónica. También puede ser logrado mediante un solo reactor que contenga una íntima mezcla de partículas de resina catiónica y de resina aniónica.

En general, si se tiene una resina R. con un grupo funcional reactivo uniforme de iones A^+ , entonces su forma de sal es RA . En este caso, si la solución contiene otro catión B^+ entonces se podrá establecer un equilibrio del tipo (Domic, 2001).

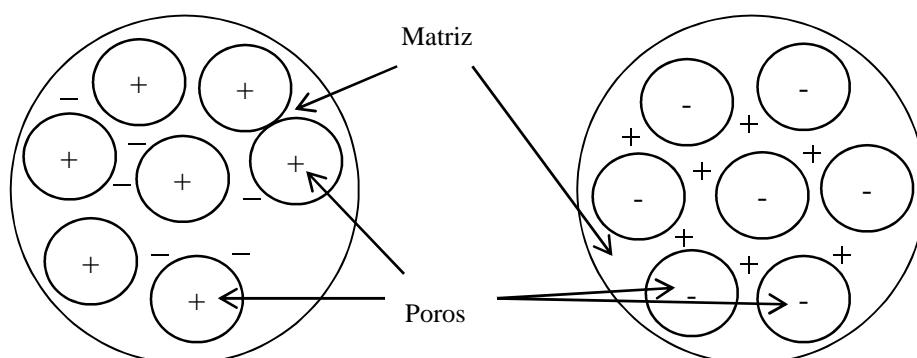
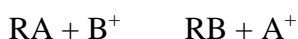


Figura 2.4: Modelo de la esponja para representar un intercambiador iónico, a la izquierda se tiene el caso de un intercambiador catiónico y, a la derecha, el de uno aniónico.

2.4. CINÉTICA DE LA REACCIÓN DE INTERCAMBIO IÓNICO

Las reacciones de intercambio iónico son heterogéneas y comprenden cinco etapas en serie; la más lenta aún determina la velocidad total de la reacción. Considere la siguiente reacción de intercambio iónico.



Las cinco etapas son (Haung, 1986):

1. Difusión de película del ion compuesto B^+ a través de una película estancada a la superficie de la partícula de la resina.
2. Difusión de la partícula del ion compuesto B^+ en la partícula de la resina.
3. Reacción de intercambio entre iones opuestos A^+ y B^+ en el grupo iónico fijo.
4. Difusión de partícula del ion opuesto intercambiado A^+ del interior a la superficie de la partícula.
5. Difusión de película del ion opuesto A^+ a través de la capa estancada a la fase de solución bulk.

La reacción química (etapa 3) misma controla la velocidad. Así las velocidades son normalmente dependientes de los fenómenos de difusión

En la mayoría de los casos de resinas de intercambio iónico modernas, la reacción de intercambio es reversible, la posición de equilibrio es reproducible y se aplica la ley de acción de masas. Así, para soluciones diluidas será posible definir una constante de equilibrio, basada en concentraciones en vez de actividades:

$$K = \frac{[R^-][A^+]}{[R^-][B^+]}$$

Ahora bien, se ha encontrado experimentalmente que la magnitud de la constante de equilibrio, K , depende fuertemente de la naturaleza química de los iones A^+ y B^+ . Así como de sus respectivas concentraciones. Así, la resina muestra una preferencia por algunos tipos de iones sobre otros, lo cual da origen al fenómeno de selectividad en la etapa de carga del proceso de intercambio iónico. La constante de equilibrio, K , relaciona las concentraciones de los iones en la resina y en la solución acuosa. Sin embargo, es muy difícil establecer las actividades de los respectivos iones en la resina.

2.5. EQUILIBRIO Y SELECTIVIDAD EN ETAPA DE CARGA DE LA RESINA

Una resina puede, en general, visualizarse como un reticulado tridimensional de cadenas poliméricas enlazadas entre sí, a ciertos intervalos mediante moléculas entrecruzadas. Los

grupos funcionales adheridos se ionizan para liberar cationes (o aniones en el caso de una resina aniónica), los que pueden intercambiarse con otros iones presentes en la solución en la cual la resina está inmersa.

La resina así actúa como si fuera un electrolito del cual sólo los cationes (o los aniones) están disponibles para la reacción química.

En el caso de las resinas convencionales, constituidas en su estructura por un copolímero gelatinoso y elástico, la casi totalidad de las reacciones de intercambio ocurren hacia el interior de la resina y, por lo tanto, hacen uso de las propiedades de hinchamiento de ésta.

En general, un intercambiador iónico cambia sus contra-iones de preferencia frente a otros iones presentes en la solución debido a alguna razón química y física. Para resinas catiónicas, en presencia de soluciones diluidas, la preferencia se basa en lo siguiente:

- La resina preferirá un contra-ion de carga mayor ya que un ion más cargado será más fuertemente atraído por los iones fijos. Así, el torio, Th^{4+} , reemplazará al lantano, La^{3+} , éste reemplazará al calcio, Ca^{2+} , y el calcio reemplazará al sodio, Na^+ .
- Para iones con igual carga, la resina manifestará preferencias por el que presente un volumen más pequeño una vez solvatado, ya que así se disminuye el grado de hinchamiento con lo que la matriz elástica se relaja, es decir, se contrae. Por ejemplo, para los iones alcalinos, la selectividad se da así: $\text{Li}^+ < \text{Na}^+ < \text{K}^+ < \text{Rb}^+ < \text{Cs}^+$, es decir, el cesio será preferido por la resina en vez del litio. De igual modo, la selectividad varía de acuerdo a la secuencia: $\text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Sr}^{2+} < \text{Ba}^{2+}$, y, a su vez, $\text{F}^- < \text{Cl}^- < \text{Br}^- < \text{I}^-$.

Esta secuencia es igual que la de los radios decrecientes de los iones hidratados, la resina preferirá al contra-ion que interacciona más fuertemente con la matriz, sea por formación de enlaces o por atracción electrostática. Así, la resina con anión carboxilo, COOH^- , prefiere los protones, H^+ , como contra-iones, mientras la resina con anión picrilamina preferirá los iones de potasio K^+ .

Se promueve la selectividad cuando disminuye la concentración de la solución externa, dado que en soluciones diluidas el hinchamiento es máximo y la resina tiene una mayor tendencia a relajarse, por ejemplo, la selectividad causada por una mayor valencia se ve aumentada con una solución más diluida.

Aumentando el entrecruzamiento de la resina, aumentará también la selectividad. Así los contra-iones más grandes serán más fácilmente rechazados de los poros más estrechos de la resina.

Si cierta cantidad de una resina catiónica fuertemente ácida, en su forma protonizada, R-H, es sumergida en una cantidad limitada de una solución diluida que contiene cationes B⁺, entonces sucede un intercambio de cationes B⁺ por protones H⁺ y, eventualmente, se alcanzó un equilibrio de acuerdo a la reacción:



Cuya constante de equilibrio termodinámico es:

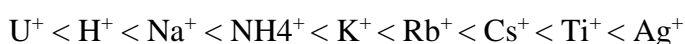
$$K = \frac{(a_R \quad a_{H^+})}{(a_{B^+} \quad a_R)}$$

Donde a_{H^+} y a_{B^+} representan las actividades de los iones en la fase acuosa y a_R y a_{RB} , representan las respectivas actividades en la fase resina. Sin embargo, las actividades iónicas en la fase resina no son susceptibles de determinación experimental, por lo que se prefiere expresar esta ecuación en una forma más práctica, la que puede ser en términos de concentraciones:

$$K_H^B = \frac{[R] [H^+]}{[R] [B^+]}$$

Donde los corchetes representan concentraciones molares y las concentraciones en la fase resina, a su vez K_H^B es la constante de equilibrio o el coeficiente de selectividad relativa, cuyo valor expresa la habilidad de la resina para capturar los iones B⁺ de preferencia frente a los protones, H⁺, en una solución que contenga concentraciones iguales de iones B⁺ y H⁺. En la tabla 2.1 se presentan valores de coeficientes de selectividad relativa, en la que se puede ver que los valores mayores se asocian a la resina que presenta mayor grado de entrecruzamiento. Debe tenerse presente que los coeficientes de selectividad relativa, K_H^B no constituyen necesariamente una constante, dado que no están basados propiamente en las actividades, o en los coeficientes de actividad, sino sólo en una aproximación de éstas, como son las concentraciones. Asimismo estudios iniciales del proceso de intercambio iónico permitieron determinar las selectividades relativas para iones metálicos, en bajas concentraciones, cuya secuencia, por ejemplo, para los cationes se da de esta manera (Domic, 2001).

Valencia 1:



Valencia 2:



Valencia 3:

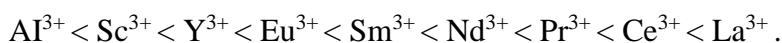


Tabla 2.1: Coeficientes de selectividad relativa

Coeficientes de selectividad relativa , K_H^B para iones univalentes y para resinas de poliestireno entrecruzado, fuertemente ácidas con grupos sulfónicos.		
Cationes	, K_H^B : 4 % de entrecruzamiento de la resina	, K_H^B : 10 % de entrecruzamiento de la resina
Li ⁺	0,8	0,7
H ⁺	1,0	1,0
Na ⁺	1,2	1,5
NH ₄ ⁺	1,4	2,1
K ⁺	1,6	2,9
Rb ⁺	1,7	2,9
Cs ⁺	1,8	2,9
Ag ⁺	3,1	13,5

Fuente: Domic, Esteban (2001) “Hidrometalurgia.

En términos generales, para soluciones de bajas concentraciones, el valor de los coeficientes de selectividad relativa K_H^B , aumenta al aumentar el número atómico y con la mayor valencia del respectivo ion.

Por otro lado, la afinidad de los iones metálicos por una resina de intercambio iónico puede expresarse en forma alternativa, recurriendo a la situación de equilibrio que cada ion alcanza con dicha resina. En efecto, cuando la fase acuosa que contiene el ion metálico que se desea remover es puesta en contacto, por un tiempo suficientemente prolongado como para alcanzar el equilibrio, y las dos fases son analizadas, la razón entre las concentraciones en las dos fases se denomina “razón o coeficiente de distribución”, D , y corresponde a :

$$D = \frac{C_{\text{ion}}^{\text{d m e f i n}}}{C_{\text{ion}}^{\text{d m e f i a}}}$$

Cuanto mayor sea el valor de D , más eficiente es la transferencia. La representación gráfica de las concentraciones de equilibrio, a temperatura constante, del ion en la resina sólida extractante, versus la del mismo ion en la fase acuosa, constituye la isoterma de distribución.

2.6. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE INTERCAMBIADORES IÓNICOS

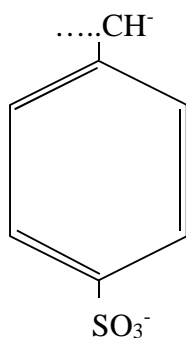
Capacidad de intercambio: Se define como la cantidad de iones que una resina puede intercambiar en determinadas condiciones experimentales. Depende del tipo de grupo activo y del grado de entrecruzamiento de la matriz y se expresa en equivalentes por litro de resina, o por gramo. (Un equivalente es el peso molecular en gramos del compuesto dividido por su carga eléctrica).

Capacidad específica teórica: Se denomina así al número máximo de sitios activos del intercambiador por gramo. Este valor suele ser mayor que la capacidad de intercambio, ya que no todos los sitios activos son accesibles a los iones en disolución.

Selectividad: Propiedad de los intercambiadores iónicos por la que un intercambiador muestra mayor afinidad por un ion que por otro. La selectividad de una resina por un ion determinado se mide con el coeficiente de selectividad. La selectividad depende de las interacciones electrostáticas que se establezcan entre el ion y el intercambiador y de la formación de enlaces con el grupo ionogénico. La regla principal es que un intercambiador preferirá aquellos iones con los que forme los enlaces más fuertes.

La estructura de poro y la elasticidad del intercambiador también influyen en su selectividad, como ocurre con las zeolitas. Su estructura de poro rígida les permite actuar como tamices moleculares, impidiendo la entrada de ciertos iones sencillamente por su tamaño.

a) La "capacidad máxima" de una resina: se trata de la cantidad de grupos ionogénicos por gramo de resina y libres de solutos y solventes adsorbidos. El peso de una resina es función de su forma iónica. Para un intercambiador aniónico se usa la forma cloruro, Cl^- , y no la forma hidroxilo, OH^- , dado que es más difícil determinar el peso seco de este último. El secado de una resina se lleva a cabo a 50°C , bajo condiciones de vacío y durante toda una noche. Por ejemplo, cuando un copolímero estireno/di-vinil-benceno está enteramente monosulfonado y en la forma de protón, H^+ , consiste principalmente de las unidades:



Cada unidad, $\text{C}_8\text{H}_8\text{O}_3\text{S}$, tiene un peso molecular, de acuerdo a su fórmula, de 184,2 g/mol y es portador de un grupo iónico fijo. En consecuencia, la capacidad máxima de esa resina es

de aproximadamente $1000 / 184,2 = 5,43$ miliequivalentes / gramo. En todo caso, es bueno saber que los valores normales de capacidad para una resina catiónica típica varían en el orden de entre 2 y 5 miliequivalentes/gramo (Domic, 2001).

b) La "capacidad efectiva" de una resina: este es el número de contra-iones intercambiables por una unidad específica de resina. Este valor coincide con la capacidad máxima en los casos de las resinas fuertemente ácidas y fuertemente básicas, ya que la resina se ioniza completamente, luego el número de grupos intercambiables se iguala con el número de grupos ionogénicos. En cambio en las resinas débilmente ácidas y de las débilmente básicas, este número es menor, dado que la resina no se ioniza completamente. Para determinar la capacidad efectiva de las resinas, experimentalmente se titula la resina con un ácido o un álcali, según corresponda. La capacidad efectiva de las resinas no-ionizada dependerá de: El pH de la solución externa, considerando que los grupos ácidos débiles no se ionizan a bajos pH. De esta forma, una resina acida débil absorberá menos iones sodio Na^+ , desde soluciones ácidas que desde soluciones alcalinas.

Las concentraciones de la solución externa. Para una resina no ionizada en la forma de protones, H^+ , el intercambio con iones sodio, Na^+ , es promovido si se aumenta la concentración de iones Na^+ .



Por consiguiente, la gran afinidad que esta resina tiene por los protones, H^+ , sólo puede ser contrarrestada mediante un incremento de la concentración del contra ion en la solución externa (Domic, 2001).

2.7. GRADO DE HINCHAMIENTO DE LA RESINA

La resina es un copolímero de aspecto y textura algo gelatinosa, es decir su cuerpo es plástico y por lo tanto, hasta cierto punto elástico. Cuando una resina seca es sumergida en agua, una gran cantidad de agua es incorporada a la resina, y como resultado, la resina se hincha, es decir se estira tridimensionalmente. De esta forma debe tenerse cuidado al determinar las propiedades que dependen del volumen de la resina como la densidad. Esta propiedad de hinchamiento o hidratación o elasticidad en presencia de los líquidos, también se conoce en las gomas naturales (agar - gel coloidal) y en una gran variedad de plásticos sintéticos.

a) Características del hinchamiento en una resina: El grado de hinchamiento o hidratación, que alcanza una resina es limitado, ya que se alcanza un equilibrio con las fuerzas

elásticas de la estructura del polímero matriz. En cambio, las zeolitas, sean naturales o sintéticas, no sufren ningún hinchamiento, ya que su estructura no es elástica. El hinchamiento se produce por varias razones:

- En un medio líquido el ion fijo y el contra-ion tienden a solvatarse.
- La solución iónica, altamente concentrada, del interior de la resina tiende a diluirse al ponerse en contacto con el agua, a causa de osmosis simple.
- Los grupos iónicos fijos vecinos se repelen uno al otro por fuerzas electrostáticas, lo que hace estirarse a la estructura de la matriz. Esta repulsión es función de la constante dieléctrica del medio en que se sumerge la resina (Domic, 2001).

b) Factores que favorecen el hinchamiento, o hidratación: Los factores que favorecen este hinchamiento son:

- Bajo grado de entrecruzamiento del reticulado en la matriz del polímero.
- Alta capacidad de intercambio, ya que es un indicador de que hay más grupos iónicos activos en el intercambio de la resina.
- Tamaño grande de los contra-iones y fuertemente solvatados.
- Ionización completa en el interior de la resina. Las resinas con grupos ácidos débiles se hinchan menos en la forma de protones H^+ que en la forma de un ion alcalino; de igual forma una resina débilmente básica, se hincha menos en una solución hidroxilo OH^- que en la forma de cloruro Cl^- . Lo inverso ocurre para las resinas fuertemente acidas y fuertemente básicas.
- Las bajas concentraciones en el electrolito de la solución externa favorecen un aumento del hinchamiento, dado que una disminución en su concentración aumenta las diferencias de presión que promueven la osmosis entre el interior de la resina y la fase acuosa externa (Domic, 2001).

c) Importancia del hinchamiento de una resina: Esta característica del grado de hinchamiento o hidratación, para una resina determinada, tiene una gran importancia práctica, especialmente en la operación de columnas de intercambio iónico. Se pueden producir fuertes presiones en el interior del lecho y la columna puede colapsar o bien pueden ocurrir movimientos de la resina que provoquen canalizaciones indeseadas. Una resina en estado hinchado está sometida a tensión y puede compararse a un resorte estirado. Por lo tanto, cualquier factor que alivie esa tensión será favorecido por la resina. Por otra parte las resinas en su estado de hinchamiento presentan las mejores características para ser selectivas ya que su

tendencia será relajarse, y esto será favorable para el proceso de intercambio de sus contra-iones ya que este cambio le causa una relajación (Domic, 2001).

2.8. RECUPERACIÓN DE ORO DESDE SOLUCIONES CIANURADAS POR INTERCAMBIO IÓNICO

Este caso de aplicación corresponde a una alternativa paralela a la recuperación del aurocianuro por adsorción con carbón activado. Esta alternativa tecnológica se ha desarrollado y aplicado con profusión, particularmente en Sudáfrica y en Uzbekistán, en la ex Unión Soviética (planta Muruntau). La característica más sobresaliente se refiere a la aplicación del proceso directamente sobre las pulpas de lixiviación por agitación, proceso que se conoce como de "resina-en-pulpa", abreviado como RIP (del inglés: "rasin-in-pulp") en analogía al proceso CIP, de carbón-en-pulpa.

La operación de IX con resinas tiene grandes dificultades para competir frente al proceso de CA, ya que se enfrenta al problema con una menor selectividad, con una mayor fragilidad de los granos de resina en condiciones de cierta atrición y con la necesidad de procesos complejos para la elución y regeneración de la resina. Sin embargo, las resinas también tienen algunas ventajas desde el punto de vista químico.

Para la adsorción de oro y plata desde soluciones de cianuro, se pueden usar resinas tanto fuertemente alcalinas como débilmente alcalinas. Las fuertemente alcalinas presentan grandes capacidades y rápida cinética, pero no son muy selectivas frente a otros metales y son difíciles de eluir. Las resinas débilmente alcalinas son más selectivas y más fáciles de eluir, aunque presentan menores capacidades de carga, típicamente de un 25 a 50% menos respecto de la carga que alcanzan las resinas fuertemente alcalinas. Las débilmente alcalinas, además, por su propia naturaleza débil, captan sólo en un rango estrecho de pH: 6 a 8, por encima de pH 8 se reducen en forma pronunciada sus capacidades y cinética de adsorción. Se ha logrado producir resinas débilmente alcalinas, con un pequeño porcentaje (10 a 15%) de grupos funcionales de aminas cuaternarias, las que les proporcionan algunas características de las resinas fuertemente alcalinas, siendo esta combinación la preferida para obtener mejores resultados en la recuperación del oro.

En cualquier caso, en el proceso de IX, la resina capta el oro en la forma del complejo aniónico de aurocianuro, $\text{Au}(\text{CN})_2^-$, liberándose el respectivo contra-ion, aniónico, de la resina. Para la elución de las resinas existen cuatro diferentes procedimientos, tres de los cuales se pueden aplicar a las resinas fuertemente alcalinas (F/A) y uno a las débilmente alcalinas (D/A). Sin embargo, debe recordarse que las resinas débilmente alcalinas presentan sólo un

rango de pH en el cual captan complejos aniónicos de oro eficientemente, entonces basta con un cambio de pH para lograr la elución de todos los aniones captados. En todo caso, una buena elución debiera dejar un contenido residual no superior a unos 25-50 gramos de oro por tonelada de resina. Los procedimientos de elución propuestos, con sus propias ventajas y complicaciones, se aprecian en la Tabla 2.2 y se describen a continuación.

Tabla 2.2: Comparación de ventajas y desventajas en proceso de elución

Comparación de ventajas y desventajas de los diversos procedimientos propuestos para la elución del oro desde resinas fuertemente (F/A) y débilmente alcalinas (D/A).			
Reactivo	Case	Ventajas	Desventajas
$Zn(CN)_4^{2-}$	F/A	<ul style="list-style-type: none"> • Todos los complejos aniónicos cianurados se eluyen con facilidad. • La resina puede regenerarse completamente en cada ciclo con un eficiente reciclaje de reactivos • No hay problemas con los materiales constructivos, ni en la elución ni en el EW 	<ul style="list-style-type: none"> • La resina tiene que regenerarse químicamente después de la elución • La cinética de elución es lenta • Existe una alta toxicidad en el gas de HCN (ácido cianhídrico) producido en la regeneración
$CS(NH_2)_2$	F/A	<ul style="list-style-type: none"> • No se tiene que regenerar la resina después de la elución • No se usan sustancias tóxicas en la elución 	<ul style="list-style-type: none"> • La cinética de elución es lenta • Hay corrosión en los electrodos del EW al circular el eluido • Hay envenenamiento de la resina con el cobaltocianuro • Hay descomposición de la tiourea en soluciones ácidas
NH_4SCN	F/A	<ul style="list-style-type: none"> • Todos los complejos aniónicos cianurados se eluyen en la elución-regeneración • La resina puede regenerarse a su capacidad completa en cada ciclo con buen uso de los reactivos • No se usan sustancias tóxicas ni en la elución ni la regeneración • Elución con rápida cinética 	<ul style="list-style-type: none"> • La resina tiene que regenerarse químicamente después de la elución • Existe una leve corrosión de los electrodos al paso del eluido por la celda de EW
NaOH	D/A	<ul style="list-style-type: none"> • Todos los complejos aniónicos cianurados se eluyen en la elución-regeneración • La resina puede regenerarse a su capacidad completa en cada ciclo con reactivos baratos • No se usan sustancias tóxicas ni en la elución ni la regeneración • Elución y EW con rápida cinética • No hay problemas con los materiales constructivos, ni en la elución ni en el EW 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ La resina debe tratarse con ácidos después de la elución para regenerarla.

Fuente: Domic, Esteban, (2001) Hidrometalúrgia.

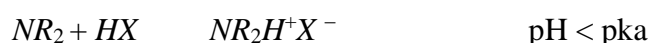
Resinas aniónicas de base fuerte

Las resinas aniónicas de base fuerte contienen grupos funcionales aniónicos cuaternarios que son sitios activos con cargas positivas fijas (protonadas) y que al contacto con la solución de lixiviación, se extrae el $Au(CN)_2^-$ por intercambio con el contra-ion (X^-) y la formación de

un par iónico. Esta reacción en general no depende del pH y es por eso que en nuestro caso particular esto no revierte un mayor problema al usarse un pH elevado.



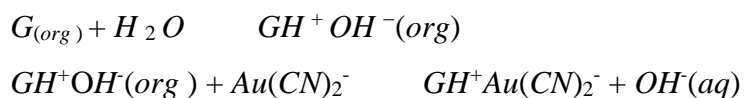
Los aniones que comúnmente se encuentran en la solución de cianuración, aparte del $Au(CN)_2^-$, se encuentran los complejos $Ni(CN)_4^{2-}$, $Co(CN)_6^{3-}$, $Zn(CN)_4^{2-}$, $Cu(CN)_4^{3-}$, $Fe(CN)_6^{4-}$ y $Fe(CN)_6^{3-}$ de manera que también serán extraídos por la resina de base fuerte. Algunos aniones ejercen un efecto competitivo con respecto al complejo aurocianuro y por lo tanto desplazan a este de su lugar en la resina de manera que afectan la capacidad de carga. Esta propiedad es usada como medio para la descarga de la resina tal como se verá posteriormente. Los aniones que ocasionan este efecto competitivo son complejos de $Cu(CN)_4^{3-}$, $Fe(CN)_6^{3-}$ y complejos de $Zn(CN)_4^{2-}$. La composición de la solución también afecta la carga de la resina. De esta forma algunos cationes como el Zn^{2+} , Ni^{2+} , Co^{3+} y aniones como CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} se cargan en la resina, compitiendo con el complejo aurocianuro. Los grupos funcionales en las resinas básicas son neutros y deben ser protonados antes de poder interactuar con los aniones aurocianuro ya que se suministran en forma de base débil. Las propiedades de intercambio iónico de estas resinas están gobernadas por el pH de la solución en contacto con la resina. La activación de la resina de base débil se produce a un pH menor que el pKa del grupo funcional de amina terciaria, por ello, antes de que se use la resina, es necesario que el valor del pH de la pulpa sea reducido bajo el pKa de la resina, para alcanzar la máxima extracción.



El pKa es el pH al cual el 50 % de los grupos funcionales de la resina están protonados y este valor para las resinas básicas débiles varía entre 10 y 11, esto no tiene ningún problema ya que las soluciones de cianuración están en el mismo rango, pero hace unos años, el pKa para resinas débiles variaba entre 6 a 8 de manera que había una reversión en el equilibrio de la reacción de activación, quedando la resina en forma de “base libre”. Esto último fue uno de los mayores problemas en la aplicación de resinas básicas débiles, ya que requería que el pH de la solución cianurada en contacto con la resina estuviera en un rango en donde la reacción de activación se orientara hacia la derecha. En una solución ácida, el equilibrio va hacia la derecha y la resina se comporta como una resina básica fuerte durante la extracción del aurocianuro.

Por otro lado, las guanidinas son bases orgánicas muy fuertes que poseen una basicidad intermedia entre las que proporcionan las aminas simples y las aminas cuaternarias, con un pKa entre 12 y 13,5. Debido a la basicidad intermedia entre las que proporcionan las aminas

simples y las aminas cuaternarias, con un pka entre 12 y 13,5. Debido a la basicidad del grupo guanidina, este es capaz de extraer un protón del agua para formar un catión guanidina y un anión hidroxilo a pH entre 10 y 11,5 como se muestra a continuación (Ortega, 2009).



La resina de intercambio iónico también adsorbe el cianuro libre de la solución según:



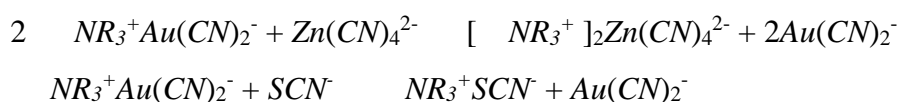
Selectividad de la Resina

Se entiende por selectividad a la preferencia que tiene la resina por un determinado ión. La selectividad depende de varios factores, encontrándose que con la temperatura varía levemente mientras que la variable presión aún no ha sido investigada ya que la tecnología no lo ha requerido.

La resina de base fuerte tiene mayor afinidad por aniones pequeños y de forma lineal; en esto también influye la estructura de las resinas, de manera que la separación de las cargas en la estructura determinará la preferencia de la resina por un anión monovalente sobre otro multivalente aun cuando estos sean altamente polarizables. Así un anión bivalente requerirá dos grupos cargados positivamente juntos y a medida que la separación entre estos grupos aumenta, la afinidad por este anión disminuirá mientras que la afinidad por el anión monovalente no será afectada ya que solo se necesita un grupo para adsorberlo. Adicionalmente, para las resinas de base fuerte, la capacidad de polarización de los aniones está relacionada con su tamaño por lo tanto para dos aniones con igual carga y forma, el más grande será más polarizable y al tener mayor polarización se enlazará con mayor fuerza formando un par iónico. Las aminas simples no son buenas extractantes de oro ya que no son lo suficientemente básicas para ser protonadas, es decir, tener sitios activos con cargas positivas fijas al pH de la solución proveniente de la cianuración, mientras que las aminas cuaternarias, por su parte, son bases extremadamente fuertes ya que poseen una carga positiva permanente, esto permite que estas resinas adsorban fuertemente al complejo aurocianuro. La carga catiónica en la guanidina protonada (catión guanidina) es más larga y sus cargas positivas son más difusas en comparación con el punto de carga asociado con el grupo funcional amino cuaternario. Mientras que la protonación para estas últimas ocurre en solo uno de los tres nitrógenos, en el grupo funcional de guanidina, la carga positiva es distribuida sobre todos los nitrógenos y el átomo de carbón central; lo que le da una gran selectividad para el aurocianuro en comparación con las resinas básicas fuertes (Ortega, 2009).

2.8.1. RE-EXTRACCIÓN (DESORCIÓN)

La re-extracción en los sistemas de resinas básicas fuerte es difícil y requieren que el $Au(CN)_2^-$ extraído, sea descargado revirtiendo el equilibrio alcanzado durante la extracción o por la conversión de los iones metálicos en complejos no aniónicos. En el primer caso se trata de un intercambio iónico o desplazamiento con un anión como cloruro, bisulfato, nitrato, tiocianato o cianuro. Debido a que el complejo aurocianuro se carga fuertemente sobre la resina, para poder revertir el equilibrio, la actividad del anión sustituto, debe de incrementarse adicionando un solvente polar orgánico como acetona o acetonitrilo, pero si se usa un anión que compita con el aurocianuro y que se adsorba más fuertemente que este último, la reacción no necesitará de ninguna adición revirtiéndose de forma natural. Usualmente el desplazamiento competitivo es hecho con tiocianato o con un complejo cianuro de Zn, el cual tiene mayor capacidad de reacción con las resinas básicas fuerte.



La reacción con el cianuro de Zn es reversible lo que hace preferible su uso en este tipo de resinas. La ventaja de las resinas básicas débiles es que pueden ser descargadas mediante una simple hidrólisis ácido base, esto quiere decir que a alto pH, el equilibrio alcanzado durante la activación es revertido y los grupos funcionales de la resina, en la forma de base libre; no podrán sostener aniones.



Las resinas básicas débiles pueden descargarse por un intercambio iónico similar al de las resinas básicas fuertes pero en la práctica no es tan eficiente, simple ni económico como el método anterior por lo tanto no es aplicable.

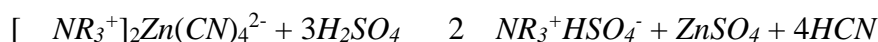
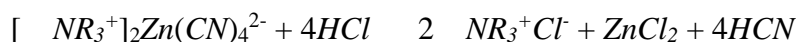
Este tipo de resinas básicas débiles, al sufrir una reticulación suplementaria puede tener grupos funcionales de base fuerte y los complejos aurocianuro que se carguen en estos grupos no podrán ser eluidos con NaOH y podrían provocar pérdidas de valores en la solución barren cuando la resina es recirculada al circuito de adsorción. Con el uso de guanidina, el ion hidroxilo es intercambiado por el aurocianuro para extraer el oro. Desde que estas son reacciones de equilibrio, la extracción del oro puede ser revertida poniendo en contacto el extractante cargado con una solución fuertemente cáustica a pH 13-14 (Ortega, 2009).



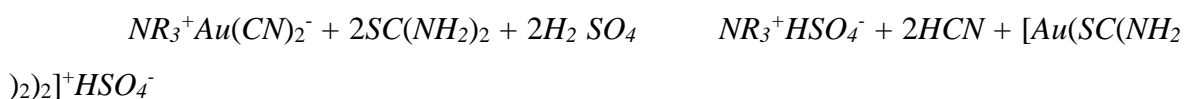
Para volver a utilizar la resina deberá volver a activarse.

2.8.2. REGENERACIÓN

La resina debe volver a convertirse a su forma Cl^- , SO_4^{2-} antes de volver a la adsorción. Esto se realiza comúnmente con ácido clorhídrico o ácido sulfúrico lo que implica la destrucción del cianuro de Zinc y con lo que se logra una alta eficiencia. Cuando se utiliza el tiocianato, la resina se regenera con sulfato férrico y el tiocianato se recupera mediante precipitación de fierro con hidróxido férrico.



El otro método usado implica una reacción química con tiourea o tiosulfato en donde el complejo aurocianuro se convierte en una tiourea catiónica o complejo tiosulfato el cual ya no estará asociado a la funcionabilidad de la amina cuaternaria catiónica.



Ambos tratamientos necesitan condiciones ácidas lo que trae problemas con el manejo del HCN y cambios de pH que incrementan la degradación de la resina básica fuerte debido al shock osmótico. El gas HCN es colectado y puesto en contacto con NaCN para regenerar NaCN. La tiourea no extrae metales básicos entre los que se puede mencionar el fierro y el cobalto y por lo tanto la resina puede ir perdiendo su capacidad. En soluciones ácidas, el cobalto cargado sobre la resina puede formar $[\text{Co}(\text{CN})_5\text{H}_2\text{O}]^{2-}$, el cual se polimeriza dentro de la resina envenenándola (ortega, 2009).

2.9. EXTRACCIÓN DE ORO POR AMINAS

Considerando que el mecanismo de reacción de las guanidinas es similar al de las aminas, para comparación se analizó el comportamiento de aminas utilizadas e investigadas anteriormente, Miller y Mooiman (1985), (Primene JMT, Adogen 283 y Alamine 336) aminas primarias, secundarias y terciarias respectivamente.

La Figura 2.5 muestra las gráficas de porcentaje de extracción vs pH; las curvas en forma sigmoidea son representativas de la extracción de aniones por aminas. Estas gráficas también son similares a las que se obtienen en la extracción de aniones por resinas base débil.

Respecto a la extracción de $\text{Au}(\text{CN})_2^-$, el orden de basicidad de las aminas terciaria < primaria < secundaria como se indica por la posición de las curvas de extracción en orden que coincide con el aumento de la basicidad de alquilaminas en agua (Miller y Mooiman 1985).

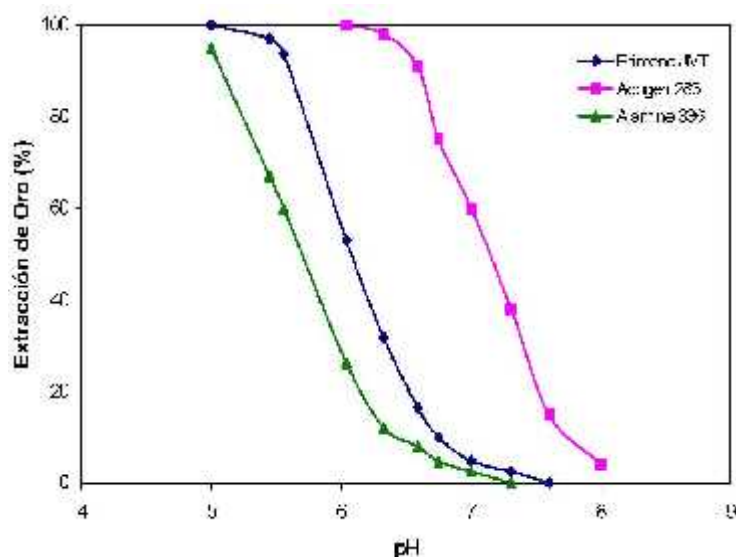


Figura 2.5: Efecto del pH en la extracción de oro de solución aurocianuro por aminas primaria, secundaria y terciaria.

Las constantes dependerán obviamente de la naturaleza del anión. A diferentes aniones, distintos requerimientos, dependiendo de su ambiente químico, consideraciones de tamaño, carga, cantidad de solvatación, etc. y la posición de equilibrio de la reacción dependerá de estas consideraciones.

Tabla 2.3: Basicidad de alquilaminas en agua a 25°C

Tipo de Amina	pKa
Primaria RNH_2	10,4 – 10,7
Secundaria: R_2NH	10,9 – 11,2
Terciaria: R_3N	9,9 – 1,6

Fuente: Riveros, (1990).

En el caso de aminas cuaternarias, el oro se extrae en el rango completo de pH, tales compuestos amonio cuaternarios, no pueden despojarse con soda cáustica y en consecuencia, los requerimientos de despojamiento con frecuencia complican la estrategia del proceso y tienen que realizarse por una de las siguientes formas:

Tabla 2.4: Extracción de oro de solución aurocianuro por una amina cuaternaria, Aliquat 336 0,05 M $(R_4N)_2SO_4$ en Xileno

pH	% Extraccion
10,20	100
4,95	100
3,02	100
1,00	100

Fuente: Riveros, (1990).

a) Intercambio aniónico por ejemplo, muy altas concentraciones de otro anión (Cl^-), deberá necesitarse para desplazar el $Au(CN)_2^-$.

b) Destrucción del complejo extraído.

Ambas técnicas son imprácticas y causarían problemas de implementarse en una planta de recuperación de oro Las aminas base débil son más fáciles de despojar (invirtiendo la reacción de extracción).

Efecto de la longitud y tipo de la cadena alquil

En la mayoría de las investigaciones se ha encontrado que el pH50 en las curvas de extracción, no depende de la longitud o tipo de la cadena alquil pero sí del tipo de amina. Para una concentración específica del extractante, pH50 corresponde al pH donde ocurre una extracción del 50% del metal. Los valores se indican a continuación (Riveros y Miller, 1990).

Primaria pH50 = 6,05 - 6,55

Secundaria pH50 = 7,06 – 7,15

Terciaria pH50 = 5,35 – 5,66

Es evidente la manera en que los pH50 se agrupan para cada tipo de amina. En este sistema hay un pequeño efecto de la longitud de la cadena alquil o ramificación en la extracción de oro. De acuerdo a los valores de pH50, se muestra como las aminas secundarias extraen oro a valores de pH mayores que las aminas terciarias, demostrando así mayor basicidad con respecto a $Au(CN)_2^-$. Aún así una, efectiva extracción de oro por estas aminas está limitada a valores de pH < 7. (Riveros y Miller, 1990).

Efecto de la concentración de amina.

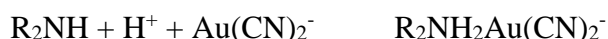
El efecto de la concentración de amina sobre la capacidad de extracción para una amina secundaria se muestra en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5: Efecto de la concentración de extractante Adogen 283, en la extracción de oro de solución aurocianuro

Concentración de Amina, (M)	pH50 en Xileno	pH50 en Chevron IX
0,025	7,15	6,15
0,05	7,15	6,50
0,20	7,75	7,75
0,50	8,30	7,90

Fuente: Miller y Mooiman, (1985).

El pH50 es el valor de pH donde se extrae el 50% del metal. En ambos diluyentes, el pH50 se incrementa al aumentar la concentración de amina. Por ejemplo, la capacidad de carga a valores de pH mayores, se incrementa conforme la concentración del extractante sea mayor. Un incremento de diez veces la concentración de amina, aumenta el pH50 en 1,15 unidades. El aumento se debe al efecto de acción de masas que desliza el equilibrio de extracción hacia la derecha (reacción):



En este caso el incremento en el pH50, no es visto como incremento en la basicidad de la amina como tal, es simplemente una aplicación del principio de Le Chatelier.

Efecto de la fuerza iónica.

En algunas investigaciones la fuerza iónica de la fase acuosa, se mantiene con un electrolito de 0,5 M Na₂SO₄ y/o NaCl. Los experimentos de extracción en función del pH se reportan con y sin electrolito para los tres tipos de aminas. Es aparente que cualquier efecto por la adición de electrolitos es pequeño y se puede concluir que la fuerza iónica no es significativa en la determinación del porcentaje de extracción de Au(CN)₂⁻ por alquilaminas.

Tabla 2.6: Efecto de la fuerza iónica en la extracción de oro en solución aurocianuro por aminas 0,05 M en Xileno

Extractante	pH50 (0,5 M Na ₂ SO ₄)	pH50
Primene JMT	6,05	6,15
Adogen 283	7,15	7,15
Alamine 336	5,66	5,65

Fuente: Miller y Mooiman, (1985).

Efecto de la concentración inicial de oro. Es una variable particularmente importante, por las bajas concentraciones de oro en casi todos los licores de cianuración (1-10 mg/L). Los valores de pH50 para diferentes concentraciones de oro se presentan en la Tabla 2.6.

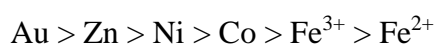
Tabla 2.7: Efecto de la concentración inicial de oro en la extracción de oro de soluciones aurocianuro por Adogen 283; 0,05 M en xileno

[Au] mg/L	pH50
1000	7,15
100	6,55
10	6,50

Fuente: Miller y Mooiman, (1985).

Al disminuir la concentración inicial de oro (1000 a 100 a 10 mg/L), las curvas de porcentaje de extracción se mueven hacia la región ácida y resultan más bajos valores de pH50. La posición de las curvas de extracción vs. pH debe ser independiente de la concentración de oro, ya que el porcentaje de extracción se normaliza respecto a la concentración de oro. Por tanto, la disminución en pH50 con una disminución en la concentración de oro, no puede atribuirse solamente al efecto de acción de masas. El posible efecto puede deberse al balance de las actividades de la amina, sal amina, y anión aurocianuro.

La extracción de cianoaniones fue inversamente proporcional al pH, basándose en los valores de pH50, obteniéndose la siguiente selectividad:



En otros estudios para extracción de oro y plata en soluciones de cianuro y utilizando aminas cuaternarias, se reportan buenos resultados para una amina del tipo R_4N^+ donde



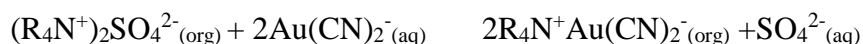
En 1974, Jerma et al, (1999) reportó el despojamiento de oro de aminas cuaternarias utilizando soluciones de tiourea. En este procedimiento, la tiourea desplaza los ligandos de cianuro y convierte el complejo de oro aniónico a uno catiónico, como en la reacción:



Donde TU: tiourea

Debido a su punto de carga positiva, el despojamiento de las aminas base fuerte requiere que el anión aurocianuro cargado sea despojado por intercambio de un ión competitivo con otro anión, típicamente el tetracianuro de zinc, como se muestra en las reacciones.

Química de la extracción de oro utilizando amina cuaternaria.



Dónde: (R_4N^+) = Amina cuaternaria; R = Grupo alquil (Ortega, 2009).

2.10. ISOTERMAS DE ADSORCIÓN

2.10.1. ISOTERMA DE LANGMUIR.

En 1918, Langmuir desarrolló un modelo simple para tratar de predecir el grado de adsorción de un soluto sobre una superficie como función de la concentración del fluido. En este modelo se supone que (Daniels, 1984):

- i) El adsorbato forma una capa monomolecular sobre la superficie;
- ii) Todos los sitios de la superficie son equivalentes;
- iii) No hay interacción entre las partículas adsorbidas y
- iv) Las moléculas adsorbidas no tienen movimiento sobre la superficie.

Para el ajuste de datos experimentales la ecuación Langmuir puede estar descrita por la forma:

$$q_e = \frac{bQ_m C_e}{1 + bC_e} \quad (1)$$

Donde:

q_e : Cantidad adsorbida en el equilibrio (mg/g),

C_e : Concentración de equilibrio del adsorbato (mg/L),

Cantidad adsorbida de la cobertura completa de una monocapa (mg/g),

b : Constante de Langmuir relacionada con la energía de adsorción (L/mg).

La isoterma de Langmuir tiene la siguiente forma gráfica (figura 2.6).

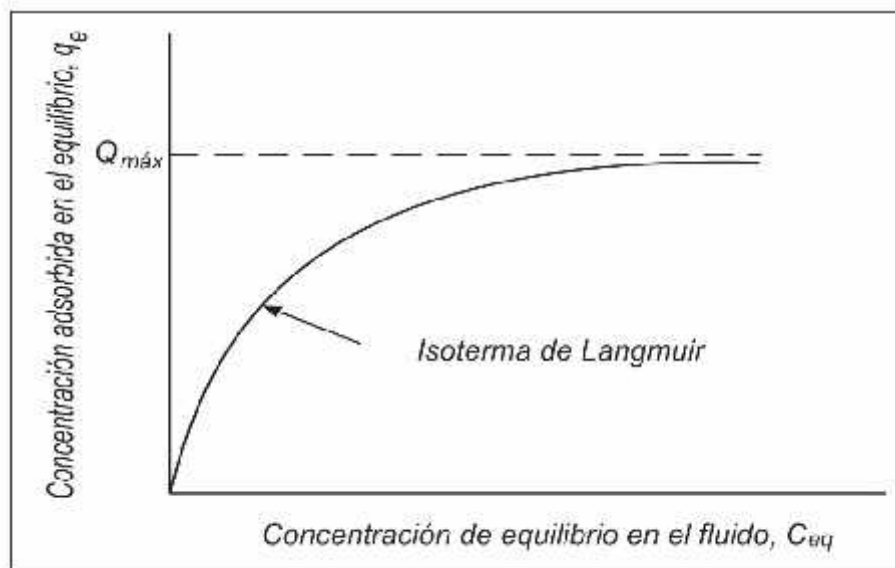


Figura 2.6: Isoterma de Langmuir.

2.10.2. ISOTERMA DE FREUNDLICH.

La expresión de la isoterma de Freundlich (1926) es una ecuación empírica basada en sorción en una superficie heterogénea sugiriendo que los sitios obligatorios no son equivalentes y/o independientes. La ecuación empírica de Freundlich, conduce generalmente a un mejor ajuste, especialmente para la adsorción a partir de líquidos. La isoterma de Freundlich viene expresada por la ecuación (Weber, 1979):

$$q_e = K_f C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

Donde:

q_e : Cantidad adsorbida en el equilibrio (mg/g),

C_e : Concentración de equilibrio del adsorbato (mg/L),

K_f : Constante de Freundlich se relaciona con la capacidad de adsorción y

n : Intensidad de adsorción.

La isoterma de Freundlich tiene la siguiente forma gráfica.

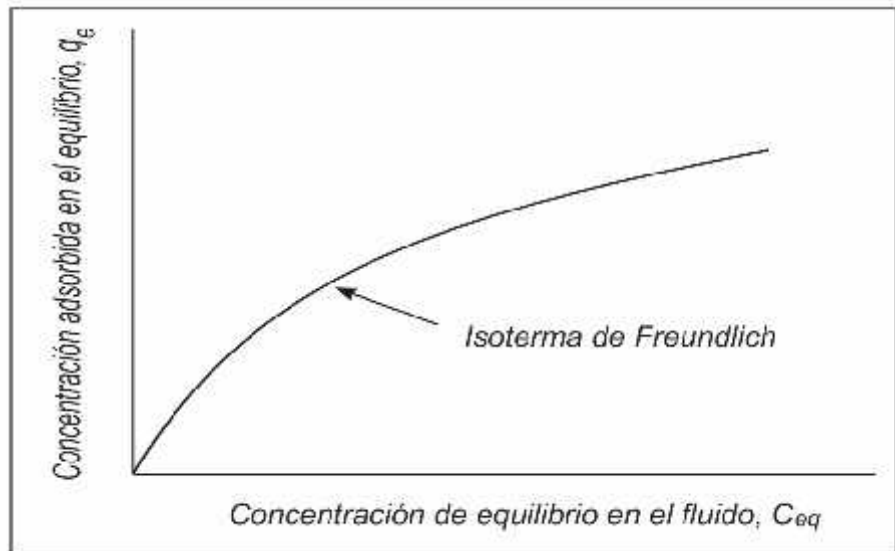


Figura 2.7: Isoterma de Freundlich.

2.11. CINÉTICA DE ADSORCIÓN

En el proceso de adsorción, los parámetros cinéticos son útiles para predecir el grado de adsorción y proporciona importante información para el diseño y modelamiento del proceso. La velocidad de adsorción depende de dos factores: la velocidad con que el soluto es transferida desde el líquido al sólido de acuerdo a los mecanismos de transferencia de masa y la velocidad de la verdadera adsorción o proceso de acoplamiento. Existen cinco etapas significativas de resistencia para que se realice la adsorción estas son (Doran, 1995):

- Transferencia desde el seno del líquido, hasta la capa límite del líquido que rodea a la partícula.
- Difusión a través de la capa límite del líquido, que rodea a la partícula.
- Transferencia a través del líquido existente en los poros de la partícula hacia las superficies internas.
- El proceso de adsorción en sí mismo.
- La difusión superficial a lo largo de las superficies de los poros internos; es decir la migración de las moléculas de adsorbato dentro de la superficie de adsorción antes de la desorción.

El fenómeno de la adsorción con resina, es una transferencia de una fase líquida que contiene el adsorbato, hacia una fase sólida, el adsorbente, que es la resina, con retención de moléculas de los contaminantes del agua residual en la superficie de la resina es un proceso de varias etapas.

El proceso es así:

- *Etapa 1:* Transferencia muy rápida de la partícula de la capa externa de hidratación hacia la interna.
- *Etapa 2:* Desplazamiento rápido del agua ligada hasta contactar con la resina.
- *Etapa 3:* Difusión lenta dentro de la resina bajo la influencia del gradiente de concentración.
- *Etapa 4:* Adsorción muy rápida en los microporos.

Los modelos cinéticos más usados para identificar el mecanismo de adsorción en los procesos de adsorción son: la ecuación de pseudo primer orden, pseudo segundo orden, Elovich, difusión intrapartícula y modelo reversible de primer orden.

a) La ecuación de pseudo primer orden.

La ecuación de pseudo primer orden generalmente está expresado como:

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad (3)$$

Donde:

q_e y q_t : Capacidad de adsorción en equilibrio y en el tiempo t , respectivamente (mg/g),

k_1 : Constante de velocidad de adsorción de pseudo primer orden (L/min).

Después de la integración y aplicando las condiciones de contorno: $t = 0$ a $q_t = 0$ y $t = t$ a $q_t = q_t$, la forma integrada de la ecuación 5.3 se convierte:

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}) \quad (4)$$

b) La ecuación de pseudo segundo orden.

La ecuación de pseudo segundo orden es expresada como (Ho *et al.*, 2000):

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad (5)$$

Donde:

q_e y q_t : Capacidad de adsorción en equilibrio en el tiempo t , respectivamente (mg/g),

k_2 : Constante de velocidad de adsorción de pseudo segundo orden (g/mg.min).

Para las condiciones de contorno: $t = 0$ a $q_t = 0$ y $t = t$ a $q_t = q_t$, la forma integrada de la ecuación se convierte:

$$q_t = \frac{t}{\frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e}} \quad (6)$$

La ecuación 2-9 puede rearseglarse a:

$$q_t = \frac{t}{\frac{1}{h} + \frac{1}{q_e}} \quad (7)$$

h : Velocidad inicial de adsorción (mg/g.min)

Modelo reversible de primer orden.

El modelo reversible de primer orden es expresado como (Vinod y Anirudhan, 2001):

$$L (1 - \theta) = -K_e t \quad (8)$$

Donde:

θ : Fracción de la capacidad de adsorción ($Y/Y_{m\acute{a}x}$) en un tiempo t ,

K_e : Constante cinética global de equilibrio (min^{-1}) y

t : Tiempo de contacto (min).

2.12. FACTORES QUE AFECTAN LA ADSORCIÓN

Área superficial

La adsorción es un fenómeno superficial, como tal, el grado de adsorción es proporcional al área superficial específica. El área superficial específica puede definirse como la porción del área total que está disponible para la adsorción. Por tanto, la cantidad adsorbida por peso unitario de adsorbente sólido es tanto mayor cuanto más finamente dividido y poroso este el sólido (Weber, 1979).

Naturaleza del adsorbato

En la adsorción de una solución debemos tener en cuenta el hecho de que la solubilidad del soluto influye en gran parte en el control del equilibrio de adsorción (Weber, 1979).

pH

El pH de la disolución en que tiene lugar la adsorción influye en el grado de adsorción por una o más razones. Debido a que los iones hidronio e hidroxilo se adsorben bastante fuertemente, la adsorción de otros iones viene influenciado por el pH de la solución. Además, el pH influye en la adsorción ya que gobierna el grado de ionización de los compuestos ácidos o básicos, el cual es factor determinante para la adsorción (Weber, 1979).

Temperatura

Las reacciones de adsorción son normalmente exotérmicas; por tanto el grado de adsorción suele aumentar al disminuir la temperatura. Las variaciones de entalpía en la adsorción suelen ser del orden de las correspondientes a reacciones de condensación o cristalización. Así pequeñas variaciones de temperatura no alteran grandemente el proceso de adsorción. La variación en el contenido calorífico del sistema en que ocurre la adsorción, la cantidad total de calor desarrollado en la adsorción de una cantidad definida de soluto sobre un adsorbente, se llama calor de adsorción, UH (Weber, 1979).

Naturaleza del adsorbente.

La naturaleza fisicoquímica del adsorbente puede tener efectos profundos sobre la velocidad y capacidad de adsorción respectivamente. Cada sólido es un adsorbente potencial, pero la consideración del carácter superficial de cada tipo de sólido material es distinta (Weber, 1979).

Adsorción de solutos mixtos.

La mayoría de las aguas residuales contienen compuestos que pueden realzar, interferir mutuamente o actuar independientemente en el proceso de adsorción. Los factores que afectan la adsorción total de múltiples adsorbatos incluyen el tamaño y la configuración molecular relativa, las afinidades adsorptivas relativas y la concentración relativa de los solutos (Lawrence *et al.*, 2006).

2.13. MARCO CONCEPTUAL

CIANURACIÓN

Disolución del oro de un mineral, por acción de una disolución alcalina de NaCN.

CONCENTRADO DE ORO

Es el producto obtenido por enriquecimiento de la mena, sin alterar la naturaleza de la misma.

LIXIVIACIÓN POR AGITACIÓN

Es la disolución de mineral molido en un tanque de agitación mecánica o neumática mediante un disolvente.

PULPA

Suspensión de partículas del mineral en agua que se encuentra generalmente en constante agitación.

RESINA

Es un polímero orgánico sintético que contiene sitios intercambiables de cationes o aniones de igual signo.

INTERCAMBIO IONICO

El intercambio iónico es una reacción química reversible, que tiene lugar cuando un ion de una disolución se intercambia por otro ion de igual signo que se encuentra unido a una partícula sólida inmóvil.

AMBERLITA IRA 400

Es un polímero orgánico de intercambio aniónico de características básicas, utilizada para adsorción de metales.

ADSORCIÓN

Es la transferencia de soluto del líquido sobre la superficie del adsorbente.

2.14. HIPÓTESIS**2.14.1. HIPÓTESIS GENERAL**

La resina amberlita IRA 400 tiene la propiedad de adsorber iones de oro a partir de soluciones cianuradas en medio alcalino.

2.14.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICA

- En la lixiviación por agitación el cianuro de sodio disuelve el mineral de oro.
- A pH alcalino la resina IRA 400 muestra comportamiento fisicoquímico de intercambiar iones aniónicos.
- A concentraciones diluidas de iones oro es adecuada el intercambio aniónico complejo de cianuro de oro y resina IRA 400.
- A mayores concentraciones de cianuro es adecuada el intercambio aniónico complejo de cianuro de oro y resina IRA 400.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. EQUIPOS, MATERIALES Y REACTIVOS

3.1.1. Equipos y Materiales

- Horno de fusión eléctrico.
- Sistema de extracción de gases.
- Crisoles de arcilla de 40 y 50 g.
- Fundente pre-mezclado.
- Bolsas plásticas.
- Pinza porta crisol.
- Lingotera
- Horno de Copelación
- Sistema de extracción de gases.
- Copelas de magnesita N^a 8.
- Pinza porta copela.
- Plancha de calentamiento
- Equipo Extractor de Gases.
- Crisoles de Porcelana.
- Lingotera
- Horno de Copelación
- Tubos de ensayo
- Embudo.
- Porta embudo.
- Pizetas.
- Fiolas con tapa
- Balanza analítica
- Agitador magnético
- pH-metro
- Estufa
- Baño María
- Bureta digital

- Termómetro
- Matraz erlenmeyer
- Frascos de vidrio de 50 mL
- Vasos de precipitados
- Probeta

3.1.2. Reactivos e Insumos

- Resina IRA 400
- Cianuro de sodio
- Ácido clorhídrico
- Yoduro de potasio
- Nitrato de plata
- Ácido Nítrico
- Hidróxido de sodio
- Ácido sulfúrico
- Ácido nítrico
- Agua destilada

3.2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.2.1. DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DE ANÁLISIS DE ORO POR FUSIÓN

Fundición

Mezclado y preparado la muestra con los reactivos se homogeniza, luego es colocado al interior de los crisoles debidamente codificados y se cubre con una capa de bórax aproximadamente con 1 cm de espesor. Inmediatamente ingresa al horno de fundición por espacio de 70 minutos a una temperatura de 1050°C.

Incuartación

Cuando el contenido de plata en la muestra, es similar o menor que el oro, el ácido nítrico no disuelve la plata y en ese caso es necesario adicionar o incuartar más plata hasta tener unas 8 veces más plata que oro, lo que se hace adicionando plata en la fundición o en la copelación.

Copelación

Tiene por objeto separar el oro y la plata de plomo que le colectó en la fusión o escoriación y consiste de una reacción oxidante en una copela, transformando el plomo metálico a óxido,

que en su mayor parte (98,5% de PbO) es absorbido por la misma copela y una menor cantidad se volatiliza, quedando un botón brillante de oro y plata (oro en bullón) cuando la oxidación ha terminado.

Para copelar se introducen las copelas a la mufla y se cierra la puerta hasta que estén bien caliente. Se abre la puerta y con tenazas se colocan sobre ellas los cubos de plomo y se cierra nuevamente la puerta los botones de plomo se funden y cubren con una espuma oscura que desaparece en unos dos minutos si las copelas están bien calientes y el plomo se hace brillante, lo que indica que se han cubierto las copelas o que el plomo empieza a oxidarse.

Se vuelve a abrir la puerta para dar entrada al aire, la superficie del plomo se hace convexa y pasan de abajo pajitas de litargirio que indican que el botón se está moviendo, llamándose así por la apariencia que dan las pajitas de litargirio.

La temperatura de copelación es fundamental, pues si es alta se debe volatilizar la plata y si es baja no se volatiliza todo el plomo y una pequeña parte de él queda con el botón de oro y plata. Los humos de plomo oxidado dan buena indicación de la temperatura de copelación, pues si ascienden rápidamente la temperatura es elevada y si por el contrario descienden, la temperatura es baja. La temperatura adecuada (aproximadamente 850°C) hace que los humos se desprendan lentamente y cristalicen en los bordes de la copela, dando un anillo de plumillas de litargirio alrededor del botón de oro y plata que quede al final de la copelación. Hacia el final de proceso se cierra la puerta de la mufla para elevar la temperatura a unos 900°C, y expulsar los últimos restos de plomo, se vuelve abrir la mufla para que el enfriamiento sea lento y al solidificarse el botón de oro y plata se produce el relámpago. Después de esto se sacan las copelas y se dejan enfriar con la precaución, cuando los botones son grandes de sacarlas muy lentamente o tapar las copelas con otras más calientes para evitar el galleo o chisporroteo, que trae, fuertes pérdidas.

Los botones se despegan de las copelas con pinzas para botones y se limpian con un cepillo de cerda dura antes de pesarlos.

Lingoteado

Al concluir el proceso de fusión se retira los crisoles, para ser vaciado en lingoteras (cada lingotera contiene 6 divisiones de 50 ml cada una), para el enfriado correspondiente de las muestras.

Obtención de régulos y copelado

Una vez enfriado las lingoteras procedemos a separar el régulo de la escoria utilizando un martillo, chancamos el regulo hasta obtener la forma de un cubo y procedemos a depositarlas

en copelas previamente calentadas dentro del horno de copelación. El regulo es copelado a una temperatura de de 950 °C por un espacio de 30 minutos.

Obtención del Doré

Terminado la copelación pasamos a retirar las copelas, luego extraemos el dore (oro y plata) para chancarlas, posteriormente se coloca en crisolitos de porcelana para pasar al primer ataque químico.

Primer Ataque Químico

El Doré es atacado con solución de ácido nítrico diluido al 15% durante 15 minutos a una temperatura de 100°C.

El ataque finaliza una vez que el doré deja de burbujear, luego se cambia el ácido por el 1:1 y pasamos al segundo ataque químico.

Segundo Ataque Químico

Se aplica ácido nítrico concentrado durante 20 minutos a 200°C, el ataque termina cuando el botón muestra un color amarillento, pasamos a extraer el líquido de los crisoles quedando únicamente el botón, el botón y el crisol son lavados 3 veces con agua destilada, luego son secados. El botón pasa al enfriado para su respectivo pesado.

Pesado

Finalizado el 2° ataque químico, la esponja de oro (botón) pesa en mg en una balanza analítica para determinar su ley en g/TM seca para el reporte.

PREPARACION DE GEOQUIMICO PARA ANALISIS DE MINERALES

Tabla 3.1: Preparación de geoquímico para análisis de minerales

TIPO DE MUESTRA	MINERA- LES	FAJAS	CARBO- NES	PLATA
Reactivo	Composi- ción	Composi- ción	Composi- ción	Composi- ción
Litargirio	51%	55%	58%	53%
Bicarbonato de sodio	28%	25%	22%	25%
Bórax	13%	15%	17%	16%
Sílice	8%	5%	3%	6%
Total mezcla	100%	100%	100%	100%

Fuente: Laboratorio Químico – MACDESA.

Preparación de los diferentes tipos de geoquímicos según Tabla 3.1.

Primeramente desglosar las bolsas en cantidad necesaria, abrirlas, colocarlas sobre la balanza y tarar. Dosificar los reactivos según tipo de muestra indicados a continuación:

- Para mineral oxidado: Pesar harina 2,3 g y 150 g de geoquímico para mineral, solución de nitrato de plata al 8% y 12 g de bórax.
- Para mineral sulfurado: Pesar 30 g de muestra por duplicado, 160 g de geoquímico para mineral, solución de nitrato de plata al 8%, nitrato de potasio según tipo de mineral sulfurado y 12 g de bórax.
- Para análisis de fajas: Pesar harina 2,7g y 165 g de geoquímico para fajas, solución de nitrato de plata al 8% y 12 g de bórax.
- Para análisis de carbones: Pesar harina 2 g y 100 g de geoquímico para carbones, plata metálica y 12 g de bórax.
- Para análisis de plata: Pesar harina 2,3 g y 150g de geoquímico para plata y 12 g de bórax.

Una vez terminado de pesar los reactivos dosificados en las bolsas, disponerlos en sus cajas respectivas de acuerdo al tipo de muestra a analizar.

Nota: Al pesar la composición de cualquier geoquímico homogenizar los reactivos.

DIAGRAMA DE FLUJO DE ENSAYO AL FUEGO

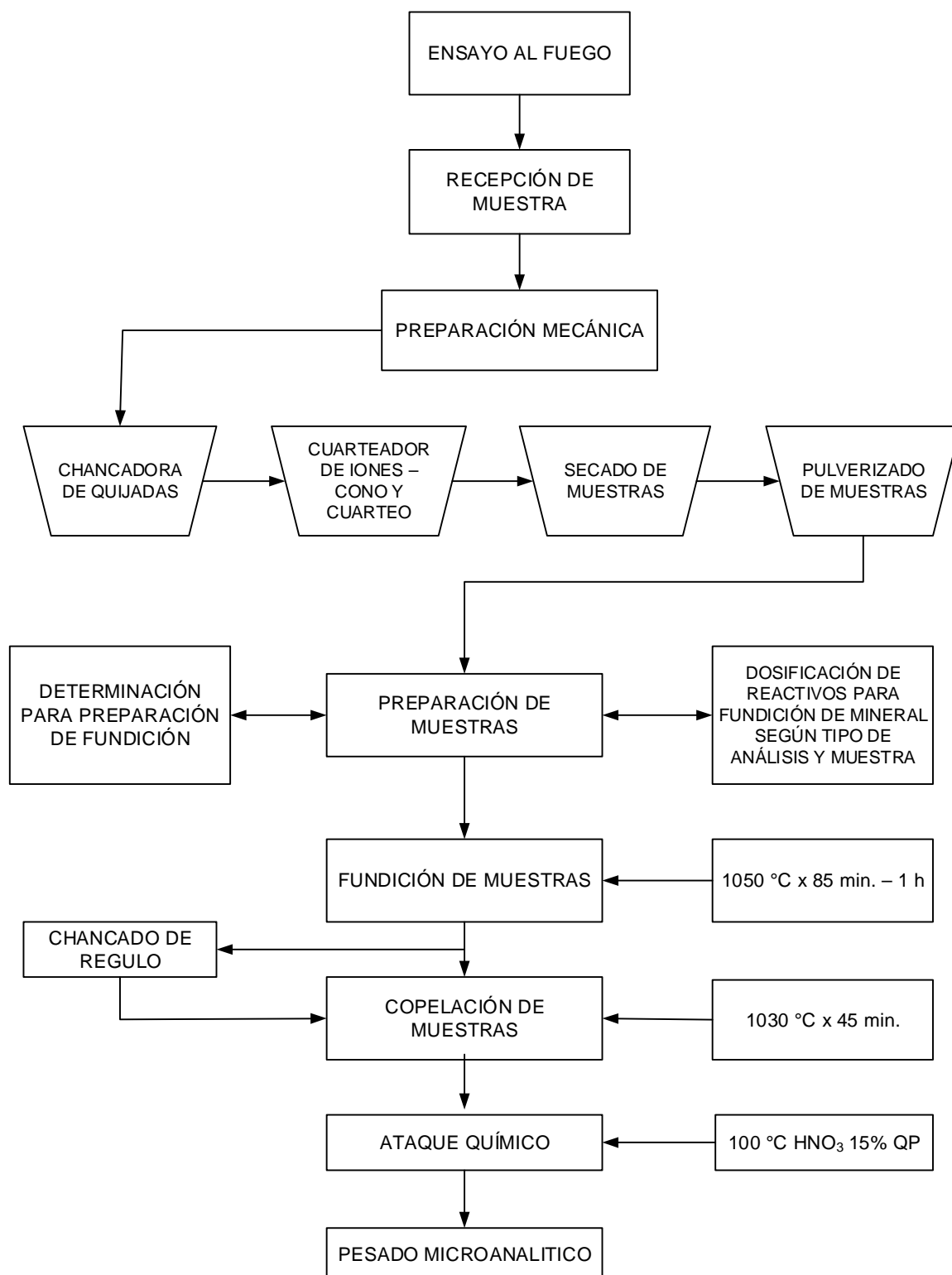


Figura 3.1: Diagrama de flujo para la determinación de Au y Ag en minerales

3.2.2. DETERMINACIÓN DE LEY DE ORO EN MINERALES

a) RECEPCIÓN DE MUESTRAS

Procedimiento

- El Departamento de Geología dejará las muestras de mina en el área de Laboratorio Químico; estas tendrán un peso aproximado de 5 kg y deberán estar dentro de una bolsa plástica debidamente codificadas y selladas.
- El preparador de muestras recepcionará dichas muestras y verificará que estas estén selladas y codificadas, a la vez verificará que los códigos (etiquetas) correspondan a los escritos en la hoja de ingreso de muestras entregadas por geología.
- En las hojas de ingreso de muestras (original y copia) se especificará el tipo de ensaye, código del lote fecha de muestreo, códigos de muestras, total de muestras y deberán estar firmadas por el Ing. de geología y escritas con letra legible.
- Una vez constatado lo anterior, el preparador de muestras firmará la hoja de entrega de muestras poniendo la fecha y hora de recepción, quedándose con el original y la copia será devuelta a geología.

b) PREPARACION DE MUESTRAS

Procedimiento

- Prender el extractor de polvos.
- Vaciar lentamente la muestra procedente del chancado secundario (malla -10) sobre la tolva del cuarteador de rifles.
- Guardar una de las partes obtenidas y con la otra parte proceder a cuarteos sucesivos hasta obtener una cantidad representativa en bandejas conteniendo el código de muestras.
- Limpiar el cuarteador de rifles con aire comprimido.
- Continuar de igual manera las demás muestras.
- Limpiar con el aire comprimido el cuarteador así como sus bandejas, la mesa de trabajo y toda el área de cuarteo.

c) SECADO

Procedimiento

- Eliminar en su totalidad el agua contenida en la muestra, empleando un horno de secado a 180 °C por 30 min.

- Colocar las bandejas conteniendo las muestras debidamente codificadas y ordenadas dentro del horno de secado.
- Retirar las muestras cuando estén totalmente secas.
- Dejar enfriar las muestras.

d) PULVERIZADO

Procedimiento

- Verificar que las cajas de pulverizado se encuentren completamente limpias.
- Prender el extractor de polvos.
- Vaciar la muestra dentro de la olla de anillos y ponerlo en el pulverizador.
- Programar el tiempo de pulverizado, dependiendo de la cantidad y dureza de la muestra. Aproximadamente 2 min.
- Apagado el pulverizador, retirar la olla conteniendo la muestra pulverizada.
- Vaciar la muestra pulverizada sobre un manta, homogenizarla y luego colocarla en un sobre con su código correspondiente.
- Limpiar la olla con aire comprimido y con material estéril.
- Continuar de igual manera las demás muestras.
- Apagar el pulverizador y proceder a su limpieza interna y externa.

e) FUNDICION DE MUESTRAS

Procedimiento

- La balanza analítica debe ser calibrada con las pesas patrón.
- Colocar el crisol debidamente numerado conteniendo el fundente 150 g aprox. sobre la balanza.
- Destarar el crisol con el fundente.
- Pesar 30 g de muestra de mineral, cuyo peso y código serán anotados en un registro o cuaderno por fecha y orden de fundición.
- Mezclar con la ayuda de las bolsas cada muestra y el fundente contenidos en el crisol.
- Prender el extractor de gases.
- Colocar los crisoles conteniendo las muestras en forma ordenada dentro del horno de fundición a una temperatura inicial de 950 °C, alcanzado luego los 1050 °C, mantener por un tiempo de 10-20 minutos.
- Sacar los crisoles del horno y vaciar sobre lingoteras manteniendo un mismo orden.
- Dejar enfriar.

- Separar la escoria del regulo (botón de plomo + oro + plata).
- Encuadrar dichos régulos para eliminar trazas de escorias.

f) COPELACION

Procedimiento

- Poner a precalentar las copelas (10-20 minutos entre 900 °C y 980 °C) previamente numeradas con la ayuda de la pinza manteniendo el mismo orden de fundición.
- Con la ayuda de una pinza colocar los régulos en las copelas precalentadas en forma ordenada, mantener la temperatura a 980 °C.
- Prender el equipo de extracción de gases.
- Terminada la copelación dejar enfriar aprox. 5 minutos abriendo la puerta y proceder a retirar las copelas conteniendo las muestras en forma ordenada
- Dejar enfriar las muestras para continuar con el análisis respectivo.

g) ATAQUE QUIMICO

Disolver la plata para la liberación del oro.

Procedimiento

- Prender extractor de gases.
- Colocar cada Dore (limpio y laminado) en su respectivo crisol de porcelana previamente numerado y ordenado.
- Colocar los crisoles de porcelana conteniendo la muestra en la plancha de calentamiento (entre 100°C a 105°C), adicionar aproximadamente 3mL de solución de Ácido Nítrico al 15% y luego 4 a 5 mL de ácido nítrico concentrado.
- Una vez terminada la reacción (disolución de la plata), eliminar la solución de Nitrato de Plata.
- Lavar la muestra de oro con agua destilada por dos veces, evitando pérdidas de dicha muestra y luego pasa a secado.
- Pesar el botón oro puro en balanza analítica.
- Calcular la ley de oro

$$L \text{ d o } \left(\frac{g}{t}\right) = \frac{m \text{ A}}{a \text{ m}} \quad F$$

$$F = \frac{m}{g} = \frac{1g}{1 \text{ m}} \cdot \frac{1 \text{ g}}{1K} * \frac{1 \text{ K}}{1T} = 1000 \frac{g}{T}$$

Estas leyes indican los gramos de oro existentes en la solución que forma la pulpa con 1 TM de sólidos a una determinada densidad.

Cálculo de oro en onza/ton corta

$$\text{Ley} = \text{mg Oro} \times 1,16679 = \frac{\text{onz troy}}{\text{ton corta}}$$

Donde el valor 1,16679 es el factor de conversión.

Ejemplo: de 25 g de muestra se ha obtenido 0,456 mg de oro puro, su ley será.

$$\text{Ley} = 0,456 \times 1,16679 = 0,532 \frac{\text{onz troy}}{\text{ton corta}}$$

3.2.3. DETERMINACIÓN DE ORO EN SOLUCIONES DE CIANURO (ALTA LEY EN ORO)

- Tomar muestra de lixiviado de oro (pulpa) aproximadamente 100 mL de los tanques de cianuración por agitación.
- Agregar cal sobre la pulpa lixiviada para la separación sólido-líquido por sedimentación
- La solución decantada de la pulpa, es filtrada en papel filtro lento para obtener una solución limpia de aproximadamente 60 mL.
- Paralelamente preparar un crisol conteniendo 150 g de flux (Bicarbonato de sodio, óxido de silicio, bórax y litargirio) y 2,3 g de harina para formar régulo (se debe mezclar flux y harina).
- Tomar con pipeta 20 mL de solución filtrada y colocar en el crisol que contiene flux. Posteriormente agregar 5-6 gotas de nitrato de plata y cubrir con un poco de bórax.
- Colocar los crisoles conteniendo las muestras en forma ordenada dentro del horno de fundición a una temperatura inicial de 950 °C, alcanzado luego los 1050 °C, mantener por un tiempo de 30- 40 minutos.
- Sacar los crisoles del horno y vaciar sobre lingoteras manteniendo un mismo orden.
- Dejar enfriar.

- Separar la escoria del regulo (botón de plomo + oro + plata).
- Encuadrar dichos régulos para eliminar trazas de escorias.
- Poner a precalentar las copelas (10-20 minutos entre 900 °C y 980 °C) previamente numeradas con la ayuda de la pinza manteniendo el mismo orden de fundición.
- Con la ayuda de una pinza colocar los régulos en las copelas precalentadas en forma ordenada, mantener la temperatura a 980 °C.
- Prender el equipo de extracción de gases.
- Terminada la copelación dejar enfriar aprox. 5 minutos abriendo la puerta y proceder a retirar las copelas conteniendo las muestras en forma ordenada
- Dejar enfriar las muestras para continuar con el análisis respectivo.
- Separar la plata de oro con solución de ácido nítrico al 15%, calentando a 100°C. Después agregar 4-5 mL de ácido nítrico concentrado.
- Lavar la muestra de oro con agua destilada varias veces, secar, pesar, calcular y reportar.

CÁLCULOS

$$L \text{ de } O \left(\frac{m}{L} \right) = \frac{m \text{ A}}{m} \cdot F$$

$$F = 1000$$

El factor 1000 es la unidad de conversión de mL a L. Ejemplo de 20 mL de muestra de solución cianurada se ha obtenido 0,14 mg de oro. La ley de oro en mg/L será:

$$\frac{m}{L} \text{ A} = \frac{0,14 \text{ m}}{20 \text{ m}} \times 1000 = 7 \frac{m}{L} \text{ d } O$$

3.2.4. DETERMINACIÓN DE ORO EN SOLUCIONES DE CIANURO (BAJA LEY EN ORO)

- La solución decantada de la pulpa, anterior ensayo, es filtrada en papel filtro lento para obtener una solución limpia.
- Tomar 100 mL de solución filtrada en un vaso de precipitados de 250 mL y agregar 10 mL de solución de cianuro.
- Llevar el vaso sobre estufa caliente, agregar 20 mL de solución de acetato de plomo al 15% y adicionar 5 g de polvo de zinc, agitar con una baqueta para formar una esponja y calentar hasta ebullición.

- Preparar un crisol conteniendo 150 g de flux (Bicarbonato de sodio, óxido de silicio, bórax y litargirio) y 2,3 g de harina para formar régulo (se debe mezclar flux y harina).
- Colocar la esponja de oro y el precipitado en el crisol que contiene flux. Posteriormente agregar 5-6 gotas de nitrato de plata y cubrir con un poco de bórax.
- Colocar los crisoles conteniendo las muestras en forma ordenada dentro del horno de fundición a una temperatura inicial de 950 °C, alcanzado luego los 1050 °C, mantener por un tiempo de 30- 40 minutos.
- Sacar los crisoles del horno y vaciar sobre lingoteras manteniendo un mismo orden.
- Dejar enfriar.
- Separar la escoria del regulo (botón de plomo + oro + plata).
- Encuadrar dichos régulos para eliminar trazas de escorias.
- Poner a precalentar las copelas (10-20 minutos entre 900 °C y 980 °C) previamente numeradas con la ayuda de la pinza manteniendo el mismo orden de fundición.
- Con la ayuda de una pinza colocar los régulos en las copelas precalentadas en forma ordenada, mantener la temperatura a 980 °C.
- Prender el equipo de extracción de gases.
- Terminada la copelación dejar enfriar aprox. 5 minutos abriendo la puerta y proceder a retirar las copelas conteniendo las muestras en forma ordenada
- Dejar enfriar las muestras para continuar con el análisis respectivo.
- Separar la plata de oro con solución de ácido nítrico al 15%, calentando a 100°C. Después agregar 4-5 mL de ácido nítrico concentrado.
- Lavar la muestra de oro con agua destilada varias veces, secar, pesar, calcular y reportar.

CÁLCULOS

$$L \quad d \quad \bar{\sigma} \quad \left(\frac{m}{L}\right) = \frac{m \quad A}{m} \quad F$$

$$F = 1000$$

3.2.5. DETERMINACIÓN DE CIANURO LIBRE EN SOLUCIONES LIXIVIADAS

Procedimiento experimental

- Utilizando probeta de 25 mL tomar 5 mL de solución cianurada.
- Añadir gotas de solución de yoduro de potasio al 10%.
- Cargar la bureta con solución de nitrato de plata 0,01 M
- Titular con solución de nitrato de plata hasta cambio de viraje amarillo opalescente.
- Anotar el volumen de gasto de nitrato de plata y calcular el porcentaje de cianuro libre.

CÁLCULOS

$$\%N = \frac{V \ N \ m}{V_t \ d \ N} \cdot 100$$

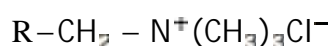
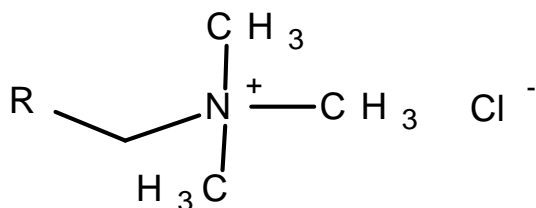
3.3. PROCESO DE ADSORCIÓN DE ORO

El método experimental desarrollado para el presente estudio, consiste en la adsorción de oro mediante el uso de la resina IRA 400, la misma que se utilizó como componente activo resina intercambio aniónico de base fuerte, previamente la resina se humecta con agua destilada para su hinchamiento y se activa a pH alcalino.

Características de la resina amberlita IRA 400

Tipo de resina	: Intercambiador aniónico de base fuerte
Matriz grupo activo	: Grupo funcional amonio $R-CH_2 - N^+(CH_3)_3 Cl^-$
Matriz	: Estireno/divinilbenceno/gel
Límite	: Temperatura máxima 60°C
Tamaño de partícula	: Mallas 20-50
Humedad	: 40-47%
Densidad aparente	: 0,65 g/L
Volumen Void	: 40-45%
Grado de generación	: 98% (mínimo)
Capacidad de volumen	: 1,2 meq/mL (mínimo)
Capacidad de peso	: 3,3 meq/g (mínimo)

Estructura de la resina amberlita IRA 400



Donde:

R = Matriz estireno/divinilbenceno

Grupo de amonio cuaternario = $-\text{CH}_2 - \text{N}^+(\text{CH}_3)_3\text{Cl}^-$

El grupo de amonio cuaternario unidos a copolímero de estireno y divinilbenceno.

3.3.1. HUMECTACIÓN E HINCHAMIENTO DE LA RESINA IRA 400

- Pesar 1 g de resina IRA 400
- Transferir en vaso precipitado de 100 mL
- Agregar 20 mL de agua destilada
- Dejar en reposo durante 24 horas
- Separar la resina humectada por filtración, utilizando papel filtro y embudo

3.3.2. ACTIVACIÓN DE LA RESINA

- Una vez humectada la resina se activa con solución de NaOH
- Se prepara solución de NaOH al 10%
- Se hace lavado con solución de NaOH hasta pH alcalino 10,5
- Finalmente se lava con agua destilada
- Se separa la resina por filtración y queda listo para ensayo de adsorción.

3.3.3. ACONDICIONAMIENTO DE LA SOLUCIÓN CIANURADA

- En un vaso precipitado de 250 mL se coloca 200 mL de solución cianurada
- Se prepara solución de NaOH 1M
- Se ajusta la solución cianurada a pH 10,5 y 11,5 agregando solución de NaOH 1M

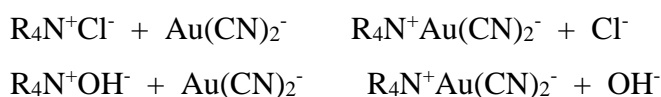
- Paralelamente se ajusta el contenido de porcentaje de cianuro en la solución cianurada agregando NaCN.

3.3.4. FIJACIÓN O ADSORCIÓN DE ORO EN LA RESINA IRA 400

Una vez acondicionada tanto la resina IRA 400 y la solución cianurada se procede a fijar el complejo aurocianuro en la resina, haciendo contacto la resina con solución cianurada.

En un vaso precipitado de capacidad 400 mL, se agrega 200 mL de solución cianurada de oro, y luego se ajusta el pH a 10,5 y 11,5 con solución de hidróxido de sodio de acuerdo al diseño experimental propuesto. Sobre el vaso precipitado que contiene la disolución acuosa de aurocianuro se agrega 1 g de la resina IRA 400 y luego se pone en agitación constante. Las condiciones experimentales consideradas son: Tiempo de adsorción 24 h, temperatura ambiental 18°C, concentración de oro en solución cianurada 4 y 7 mg/L y velocidad de agitación 250 rpm. Se tomaron alícuotas de las muestras para medir el pH. Después de 24 h se detiene la agitación, se separa la resina de la disolución acuosa por filtración para su análisis respectivo. Los análisis de oro en soluciones sobrenadantes se realizan por el método de fusión y oro fijado en la resina se determina por balance metalúrgico de oro. Con los resultados de análisis químico se ha calculado el porcentaje de oro adsorbido en la resina en los 11 ensayos correspondientes.

Las reacciones de intercambio iónico son:



Desorción de oro

La operación de desorción se realiza utilizando una mezcla de acetona y ácido clorhídrico al 5%. En su reemplazo puede ser utilizada solución de tiouria.

3.4. DISEÑO EXPERIMENTAL Y FACTORES SELECCIONADOS

Los experimentos realizados, ya sea en laboratorio y/o nivel industrial, están orientados a determinar la influencia de uno o más factores sobre el rendimiento, recuperación, calidad, eficiencia, del proceso en estudio.

Uno de los métodos que cumplen con esta función son los diseños experimentales, que permiten obtener la máxima información con el mínimo número de experiencias.

Estos diseños estudian los efectos que producen las combinaciones de “n” variables sobre las respuestas, cada una a dos niveles y cuyos resultados sirven para estimar estadísticamente una ecuación multivariable que describa el proceso nos lleve a optimizarlo.

Según el estudio que se realizó, se aplicó el diseño experimental para tres variables, (2^3), con réplicas en el punto central del diseño. Ya que el diseño nos permite conocer su comportamiento e identificar la influencia de las variables.

El diseño factorial 2^3 , considera tres factores cada uno de ellos a dos niveles, contiene ocho combinaciones de niveles de factores, tres efectos principales (X_1 , X_2 y X_3), tres interacciones de dos factores (X_1X_2 , X_1X_3 y X_2X_3) y además con tres réplicas en el punto central.

Elaborar una ecuación estadística – matemática que permita controlar la adsorción de oro en función de las variables más importantes. En el presente estudio se elabora un Diseño Factorial 2^n donde “n” es igual a 3 variables independientes y “2” significa 2 niveles mínimo y máximo. En el proceso de adsorción de oro en la resina se ha considerado los variables independientes siguientes:

1. pH
2. Concentración de oro
3. Concentración de cianuro

Tabla 3.2: Niveles máximos y mínimos

Código	Factor	Unidad	Mínimo	Máximo
A	pH	Escala	10,5	11,5
B	Concentración de oro	mg/L	4	7
C	Concentración de cianuro	%	0,1	0,2

Fuente: Elaboración propia en base a niveles máximos y mínimos.

Tabla 3.3: Matriz de diseño factorial**Fuente:** Elaboración propia en base a diseño factorial 2^3 .

N°	A	B	C	X1	X2	X3	X1X2	X1X3	X2X3	Recuperación
1	10,5	4	0,1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	Y1
2	11,5	4	0,1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	Y2
3	10,5	7	0,1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	Y3
4	11,5	7	0,1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	Y4
5	10,5	4	0,2	-1	-1	+1	+1	-1	-1	Y5
6	11,5	4	0,2	+1	-1	+1	-1	-1	-1	Y6
7	10,5	7	0,2	-1	+1	+1	-1	-1	+1	Y7
8	11,5	7	0,2	+1	+1	+1	+1	+1	+1	Y8
9	11	5,5	0,15	0	0	0	0	0	0	Y9
10	11	5,5	0,15	0	0	0	0	0	0	Y10
11	11	5,5	0,15	0	0	0	0	0	0	Y11

Ecuación de regresión

El modelo de la ecuación es:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_1X_2 + b_5X_1X_3 + b_6X_2X_3$$

Donde:

Y = Variable respuesta

X₁ = pHX₂ = Concentración de oroX₃ = Concentración de cianurob₀, b₁, b₂, b₃, b₄, b₅, b₆ y b₇ coeficientes de correlación lineal

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. PRUEBAS EXPERIMENTALES DE ADSORCIÓN DE ORO POR RESINAS IRA 400

Condiciones de Operación

Cantidad de resina utilizada	: 1 g
Volumen de solución cianurada (tanque cianuración K1)	: 200 mL
Ley de oro en solución cianurada	: 5,35 mg/L
pH	: 11,5
Velocidad de agitación	: 250 rpm

Tabla N° 4.1: Resultados de porcentaje de adsorción de oro

Tiempo (h)	Concentración inicial de oro (mg/L)	Concentración final de oro (mg/L)	% de adsorción
0	5,35	0	0
2	5,35	1,20	77,57
4	5,35	0,95	82,24
6	5,35	0,80	85,05
12	5,35	0,51	90,56
24	5,35	0,41	92,31
48	5,35	0,33	93,84

Fuente: Elaboración propia en base a resultados de adsorción de oro

En la tabla 4.1 se presenta los resultados de porcentaje de adsorción de oro a diferentes tiempos utilizando resina IRA 400. La concentración inicial de oro fue de 5,35 mg/L. Los porcentajes de adsorción de oro alcanzaron a 92,31% y 93,84% en 24 horas y 48 horas respectivamente.

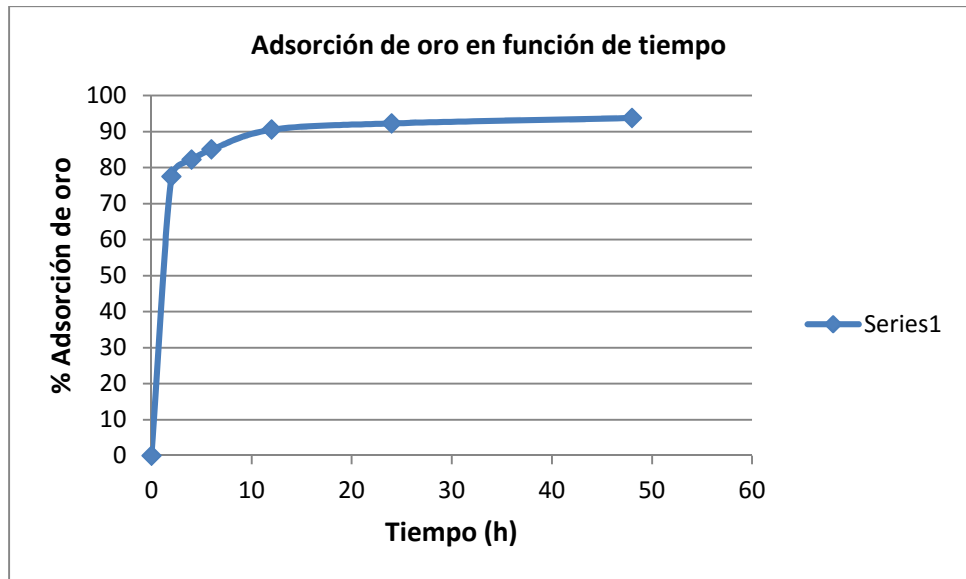


Figura 4.1: Porcentaje de adsorción de oro en función de tiempo

En la figura 4.1 corresponde a la prueba de adsorción de oro con resina IRA 400, podemos observar que inicialmente la cinética de adsorción es rápido, en 2 horas ha llegado adsorber al 77,57% de oro, por lo que su pendiente es una recta, a partir de ese punto disminuye la cinética de adsorción y la adsorción es lenta a partir de 12 horas tal como podemos apreciar en el gráfico.

BALANCE METALÚRGICO DE ORO EN LA ADSORCIÓN CON RESINA

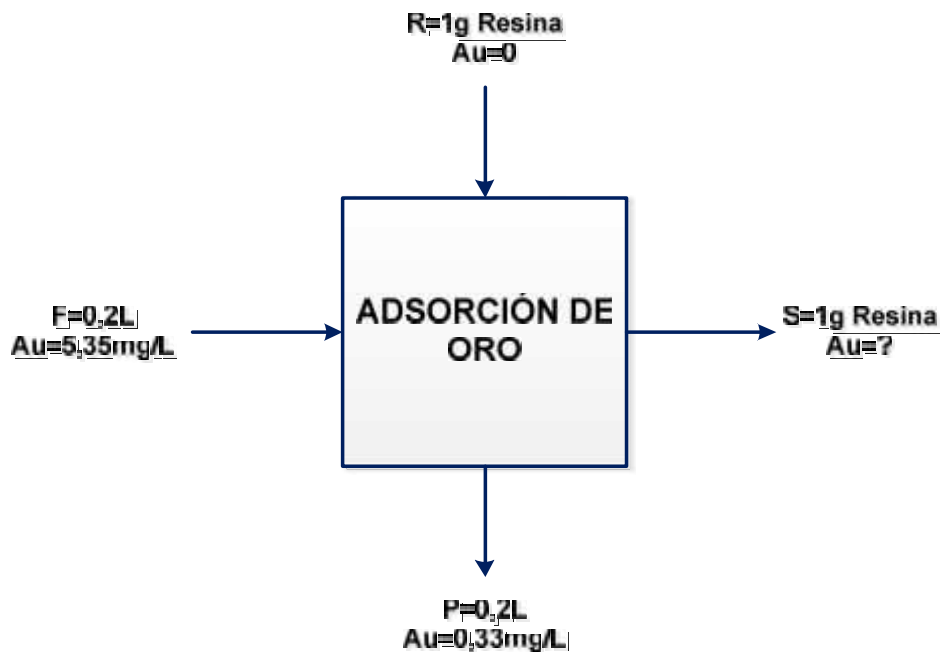


Figura 4.2: Diagrama de balance de oro en adsorción

Balance general

$$F + R = S + P$$

Balance de oro

$$\begin{aligned}
 F \ A + R \ A &= S \ A + P \ A \\
 0,2L \ 5,35 \frac{m}{L} + R \ (0) &= 1g \ A + 0,2L \ 0,33 \frac{m}{L} \\
 1,4m &= A + 0,066m \\
 A &= 1,334m
 \end{aligned}$$

La resina está cargado con 1,334 mg de oro

Cálculo de porcentaje de adsorción de oro

Concentración inicial de oro : 5,35 mg/L

Concentración final de oro : 0,33 mg/L

$$\% \text{ad óno} = \left(1 - \frac{C}{C} \frac{\text{ón f}}{\text{ón i}}\right) \times 100$$

$$\% \text{a óno} = \left(1 - \frac{0,33}{5,35}\right) \times 100$$

$$\% \text{a óno} = 93,84\%$$

DETERMINACIÓN DE CIANURO LIBRE EN LIXIVIADOS

Volumen de muestra	: 5 mL (solución cianurada)
Solución de AgNO ₃	: 0,01 N
Peso molecular de NaCN	: 49 g/mol
Meq de NaCN	: 0,049 g/meq
Volumen de gasto AgNO ₃	: 6,1 mL

$$\%N = \frac{V \ N \ m}{V_i \ d \ N} \cdot 100$$

$$\%N = \frac{6,1m \ \frac{0,0 \ m}{m} \ 2 \ 0,049 \ g/m}{5 \ m \ d \ N} \cdot 100$$

$$\%N = 0,1\%$$

CORRECCIÓN DE PORCENTAJE DE NaCN EN SOLUCIÓN CIANURADA

Volumen de solución cianurada	: 200 mL
Porcentaje de NaCN	: 0,1%
Cantidad de NaCN	: 0,2 g

La fuerza de la solución cianurada de 200 mL se mantendrá constante con 0,2% de NaCN,

La cantidad de NaCN (200*0,2)/100	: 0,4 g
Teniendo cantidad de NaCN	: 0,2 g
Luego falta agregar NaCN	: 0,2 g
Para que tenga 0,2% de NaCN	: 0,4 g

Tabla 4.2: Resultados de adsorción de oro según Diseño Experimental

N° de pruebas	pH	Concentración de oro	Porcentaje de NaCN	% Adsorción de oro
1	10,5	4	0,1	91,5
2	11,5	4	0,1	94,1
3	10,5	7	0,1	94,7
4	11,5	7	0,1	96,9
5	10,5	4	0,2	92,9
6	11,5	4	0,2	93,4
7	10,5	7	0,2	89,5
8	11,5	7	0,2	92,4
9	11	5,5	0,15	93,7
10	11	5,5	0,15	93,8
11	11	5,5	0,15	93,6

Fuente: Elaboración propia de acuerdo a resultados obtenidos

En la tabla 4.2 nos muestra los resultados de porcentaje de adsorción de oro obtenidos del proceso de intercambio iónico con resina IRA 400. El control de cianuro se realizó por titulación con nitrato de plata, durante el proceso de adsorción se mantuvo la fuerza de cianuro al 0,1%; 0,20%; y 0,15%. Los pH considerados en la adsorción fueron 10,5 y 11,5. El tiempo de adsorción en los 11 ensayos fue realizado durante 24 horas.

Cálculo de porcentaje de adsorción de oro de la prueba N° 1

Concentración inicial de oro : 4 mg/L

Concentración final de oro : 0,34 mg/L

$$\% \text{ a } \text{ ó n } \sigma = \left(1 - \frac{C}{C} \frac{\text{ón f}}{\text{ón in}} \right) \times 100$$

$$\% \text{ a } \text{ ó n } \sigma = \left(1 - \frac{0,34}{4} \right) \times 100$$

$$\% \text{ a } \text{ ó n } \sigma = 91,5\%$$

4.2. TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DEL DISEÑO FACTORIAL

Tabla 4.3: Matriz de diseño factorial

N°	A	B	C	X1	X2	X3	X1X 2	X1X3	X2X 3	% Adsorción oro
1	10,5	4	0,1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	91,5
2	11,5	4	0,1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	94,1
3	10,5	7	0,1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	94,7
4	11,5	7	0,1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	96,9
5	10,5	4	0,2	-1	-1	+1	+1	-1	-1	92,9
6	11,5	4	0,2	+1	-1	+1	-1	-1	-1	93,4
7	10,5	7	0,2	-1	+1	+1	-1	-1	+1	89,5
8	11,5	7	0,2	+1	+1	+1	+1	+1	+1	92,4
9	11	5,5	0,15	0	0	0	0	0	0	93,7
10	11	5,5	0,15	0	0	0	0	0	0	93,8
11	11	5,5	0,15	0	0	0	0	0	0	93,6

Fuente: Elaboración propia en base a resultados del matriz de diseño factorial

DISEÑO FACTORIAL 2^3

Diseño Base

Número de factores experimentales	: 3
Número de bloques	: 1
Número de respuestas	: 1
Número de corridas	: 11 incluyendo 3 puntos centrales por bloque
Grados de libertad para el error	: 4

Se ha creado un diseño Factorial el cual estudia los efectos de 3 factores en 11 corridas. El diseño se ejecutó en un solo bloque. El orden de los experimentos ha sido completamente aleatorizado.

4.3. ANÁLISIS DE VARIANZA

Tabla 4.4: Análisis de varianza para % de adsorción de oro

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:pH	8,405	1	8,405	20,99	0,0102
B:concentración de oro	0,32	1	0,32	0,80	0,4218
C:Porcentaje de cianuro	10,125	1	10,125	25,29	0,0073
AB	0,5	1	0,5	1,25	0,3263
AC	0,245	1	0,245	0,61	0,4778
BC	13,52	1	13,52	33,77	0,0044
Error total	1,60136	4	0,400341		
Total (corr.)	34,7164	10			

Fuente: Análisis de varianza calculada por programa STATGRAPHICS Centurion XVI.I

R-cuadrada : 95,3873 por ciento
 R-cuadrada (ajustada por g.l.) : 88,4682 por ciento
 Error estándar del est. : 0,632725
 Error absoluto medio : 0,358678
 Estadístico Durbin-Watson : 1,84335 (P=0,5298)
 Autocorrelación residual de Lag 1 : -0,0431386

La tabla 4.4 ANOVA nos muestra la variabilidad de % adsorción oro en partes separadas para cada uno de los efectos. Además muestra la prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 3 efectos tienen un valor-P menor que 0,05; indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo, así ajustado, explica 95,3873% de la variabilidad en % Adsorción oro. El estadístico R-cuadrada ajustada, que es más adecuado para

comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 88,4682%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,632725. El error medio absoluto (MAE) de 0,358678 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si haya alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor que 5,0%, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0%.

De acuerdo a la tabla de análisis de varianza los factores significativos son pH y porcentaje de cianuro con un nivel de significancia de 98,98% y 99,27% respectivamente.

4.4. DIAGRAMA DE PARETO

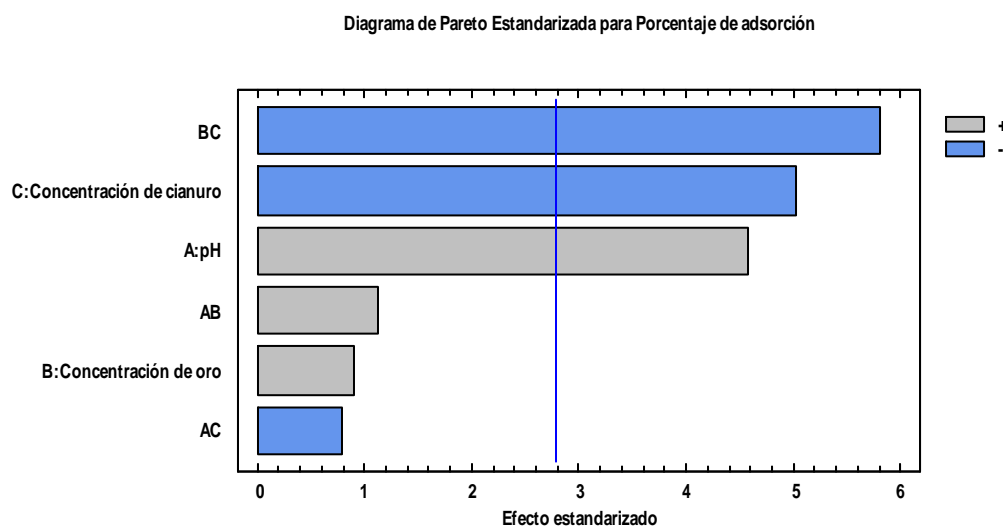


Figura 4.3: Diagrama de Pareto estandarizado

El diagrama de Pareto de la figura 4.3 nos muestra los efectos de los factores en la adsorción de oro por resinas de intercambio iónico. El factor puro C (concentración de cianuro) tiene mayor efecto en la recuperación de oro. Seguido del factor puro A (pH), y el de menor efecto el factor puro B (concentración de oro). La interacción BC muestra mayor efecto significativo seguido de la interacción AB y la interacción AC tiene efecto insignificante en la adsorción de oro.

Gráfica de Efectos Principales para Porcentaje de adsorción

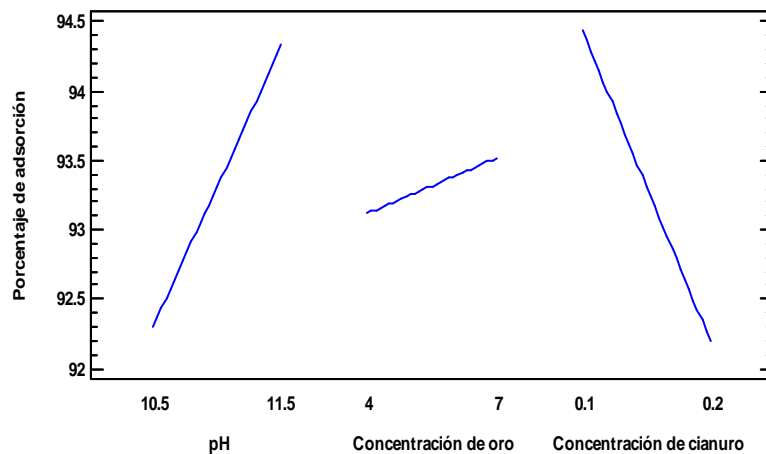


Figura 4.4: Efectos principales en la adsorción de oro

La figura 4.4 nos indica los efectos principales de pH, concentración de oro y concentración de cianuro para la adsorción de oro. El efecto pH se incrementa rápidamente en la adsorción de oro en el rango de 92,03 a 94,03%. El efecto concentración de oro se incrementa lentamente en la adsorción de oro en el rango de 93,01 a 93,5% y el efecto de concentración de cianuro disminuye en la adsorción de oro en el rango de 92,02% a 94,04% aproximadamente.

4.5. ESTIMACIÓN DE EFECTOS Y MODELO MATEMÁTICO

Tabla 4.5: Efectos estimados para % adsorción de oro

<i>Efecto</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>V.I.F.</i>
promedio	93,3182	0,190774	
A:pH	2,05	0,447404	1,0
B:concentración de oro	0,4	0,447404	1,0
C:Porcentaje de cianuro	-2,25	0,447404	1,0
AB	0,5	0,447404	1,0
AC	-0,35	0,447404	1,0
BC	-2,6	0,447404	1,0

Fuente: Efectos estimados por programa STATGRAPHICS Centurion XVI.I

La tabla 4.5 muestra las estimaciones para cada uno de los efectos estimados y las interacciones. También muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Note también que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande, es igual a 1,0. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1. Factores de 10 o más normalmente se interpretan como indicativos de confusión seria entre los efectos.

Tabla 4.6: Coeficiente de regresión para adsorción de oro

<i>Coeficiente</i>	<i>Estimado</i>
constante	67,7265
A:pH	1,26667
B:concentración de oro	-0,933333
C:Porcentaje de cianuro	149,833
AB	0,333333
AC	-7,0
BC	-17,3333

Fuente: Coeficientes estimados por programa STATGRAPHICS Centurión

La ecuación del modelo ajustado es:

$$\% \text{ Adsorción oro} = 67,7265 + 1,26667 * \text{pH} - 0,933333 * \text{concentración de oro} + 149,833 * \text{Porcentaje de cianuro} + 0,333333 * \text{pH} * \text{concentración de oro} - 7,0 * \text{pH} * \text{Porcentaje de cianuro} - 17,3333 * \text{concentración de oro} * \text{Porcentaje de cianuro}$$

4.6. OPTIMIZACIÓN DE RESPUESTA

Optimizar Respuesta

Meta: maximizar % Adsorción oro

Valor óptimo = 97,3932

Tabla 4.7: Optimización de adsorción de oro

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
pH	10,5	11,5	11,5
concentración de oro (mg/l)	4,0	7,0	7,0
Porcentaje de cianuro (%)	0,1	0,2	0,1

Fuente: Optimización de respuesta por programa STATGRAPHICS Centurión XVI.I

La tabla 4.7 muestra la combinación de los niveles de los factores, la cual maximiza el % de adsorción de oro sobre la resina IRA 400. También muestra la combinación de factores a la cual se alcanza el óptimo. La máxima optimización alcanzada en la adsorción de oro es 97,3932 %. Así mismo muestra las variables óptimas de pH 11,5; concentración de oro 7 mg/L y porcentaje de cianuro 0,1%.

4.7. SUPERFICIE DE RESPUESTA

Superficie de respuesta estimada

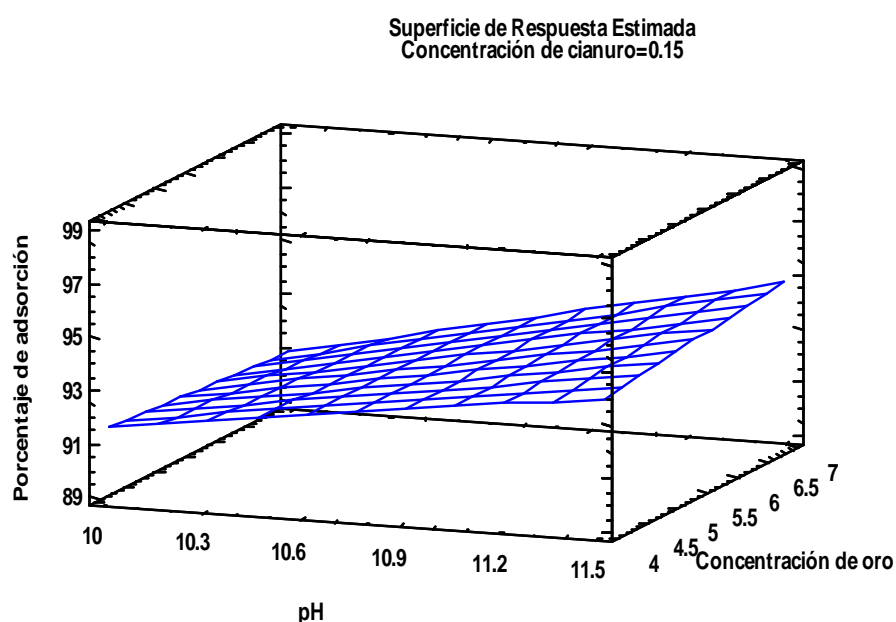


Figura 4.5: Superficie de respuesta estimada

La figura 4.5 nos muestra contornos de superficie de respuesta para adsorción de oro. La recuperación de oro es aproximadamente el 97% en función de pH y concentración de oro. El tiempo de adsorción considerada es de 24 horas.

Contornos de la Superficie de Respuesta Estimada
Concentración de cianuro=0.15

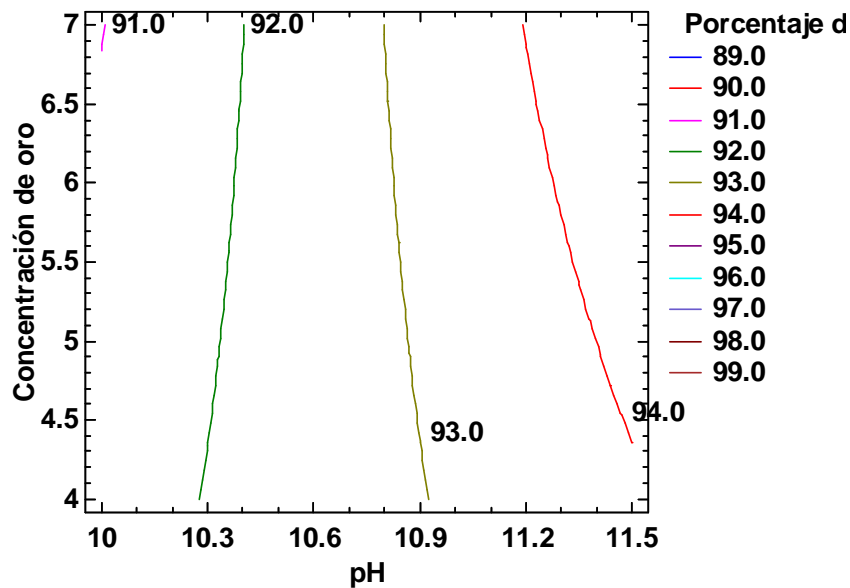


Figura 4.6: Contornos de superficie estimada para adsorción de oro

La figura 4.6 nos muestra contornos de la superficie de respuesta estimada para adsorción de oro. Las recuperaciones de oro mostrado en los contornos de la superficie de respuesta son de 91%, 92%, 93% y 94% en función de pH, concentración de oro y concentración de cianuro. El tiempo de adsorción determinada fue de 24 horas.

4.8.COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS EN LA ADSORCIÓN DE ORO

- El uso de la resina Aurix 100 para la recuperación del complejo oro tiosulfato de soluciones acuosas fue de 99%, a pH 10,5 (Chaparro et al, 2012).
- La recuperación de oro con resina IR-4B de base débil alcanzó 95% de adsorción de oro y 79% de plata (Hussey, 1964).
- La recuperación de oro con carbón activado fabricado de cáscara de coco tanto en los circuitos de carbón en pulpa (CIP) y carbón en columna (CIL) es de 95% (Dayton, 1984).

- Generalmente la recuperación de oro mediante carbón activado a partir de soluciones cianuradas alcanzan entre 93 a 95%.
- La recuperación de oro mediante resina IRA 400 a partir de soluciones cianuradas fue de 97%.
- Los resultados nos indican que la recuperación de oro mediante el uso de la resina IRA 400, es comparable con resultados de otras resinas sintéticas utilizadas para la recuperación de oro.
- Según los resultados de la recuperación de oro con carbón activado es relativamente menor comparada con la recuperación de oro con resinas de intercambio iónico.
- La adsorción de oro en carbón activado es lento (48 a 72 horas).
- La adsorción de oro con resina IRA 400 fue de 24 horas.
- El proceso de resinas usa menos energía que el de carbón activado y la cinética de adsorción de oro es más rápida.

CONCLUSIONES

- Mediante análisis químico se ha determinado la ley de oro en mineral cuyo valor es 7,5 gAu/TM, esto nos indica que el mineral tiene una alta ley, el mismo que es recuperado por el método de cianuración por agitación. En el proceso de cianuración en tanques con agitación mecánica la recuperación de oro fue de 93%.
- La resina IRA 400 adsorbe oro a partir de soluciones aurocianuros a temperatura ambiente. La recuperación de oro mediante resinas de intercambio iónico fue de 97%.
- Las condiciones óptimas del proceso de adsorción de oro mediante resina IRA 400 es :

pH	: 11,5
Concentración de oro	: 7 mg/l
Concentración de cianuro	: 0,1 %
- El tiempo de adsorción de oro en la resina IRA 400 fue de 24 horas.
- La resina IRA 400 tiene la ventaja de trabajar a rangos de pH alcalino. La presencia de otros iones metálicos en soluciones cianuradas como hierro, cobre, plata y zinc, interfiere en la adsorción de oro.
- La técnica de análisis químico de oro por el método de fusión es adecuado para soluciones lixiviadas de alta concentración en oro.
- El diseño experimental factorial 2ⁿ ha permitido optimizar las variables del proceso y la máxima adsorción del oro.
- El modelo matemático que permite optimizar el proceso de adsorción de oro en resinas de intercambio iónico IRA 400 es:

$$\begin{aligned} \% \text{ Adsorción oro} = & 67,7265 + 1,26667 * \text{pH} - 0,933333 * \text{concentración de oro} \\ & + 149,833 * \text{Porcentaje de cianuro} + 0,333333 * \text{pH} * \text{concentración de oro} - \\ & 7,0 * \text{pH} * \text{Porcentaje de cianuro} - 17,3333 * \text{concentración de oro} * \text{Porcentaje de} \\ & \text{cianuro.} \end{aligned}$$

RECOMENDACIONES

- Estudiar la cinética del proceso de intercambio iónico.
- Estudiar la influencia de factores, como la temperatura, impurezas en el proceso de intercambio iónico de resinas.
- Utilizar otras resinas de intercambio iónico en la concentración y purificación de oro
- Estudiar la capacidad de desorción de oro a distintas concentraciones.
- Realizar ensayos de desorción con otros agentes tales como tiocianato, urea.
- Caracterizar los lixiviados de oro mediante técnicas de espectroscopía de emisión atómica, a fin de conocer la concentración de impurezas.
- Realizar procesos de concentración y purificación de oro por intercambio iónico en columnas.
- Realizar investigaciones en la concentración y purificación de oro por resinas de intercambio iónico a escala de planta piloto.

BIBLIOGRAFÍA

1. Adams, B. A. (1935). E. L. Adsorptive of synthetic resins, J, Soc. Chem. Ind, 54 1 (T).
2. Astucuri Ticono, Venancio, (1984). Principios de Hidrometalúrgia y Algunas Aplicaciones Fundamentales. Editorial Gol S.R. Ltda-Perú.
3. Ballester-Verdeja-Sancho (2000). Metalurgia extractiva, fundamentos. Editorial Síntesis. Madrid. España.
4. Bedoya C, Erasmo, (1997). Efecto del Oxígeno en la Lixiviación de Sulfuros Auríferos de Inti Raymi S.A. Oruro-Bolivia.
5. Chaparro, M., E., Valenzuela, J., L., Munive, G., T., Parga, J., R. (2012). Uso de resina de Intercambio Aniónico para la Recuperación del Complejo Oro Tiosulfato desde Soluciones Acuosas. Información Tecnológica, 23, 53-60.
6. Caravaca, C., Alguacil, F.J. y Sastre, A., (1996). The Use of Primary Amines in Gold(I) from Cyanide Solutions”, Hydrometallurgy 40, pp. 263-275.
7. Cárdenas R., A, (1993). Metalurgia Extractiva del Oro, Ed. Imral Ltda., Oruro-Bolivia.
8. Cochran, W.G.; Cox, G. M., (1997). Diseños Experimentales, Trillas, 2da edición, México.
9. Dayton, S. H. (1984). Golden Sunlight sheds warming rays on placer US. Eng. Min. J., May, 34.
10. Doran, P. M. (1995). Bioprocess Engineering Principles. Academic Press Inc: Great Britain.
11. Domic M, Esteban, (2001). Hidrometalurgia, Fundamentos, Procesos y Aplicaciones. Primera Edición, Andros Impresores Ltda. Santa Elena 1955, Santiago-Chile.
12. Daniels, F. (1984). Fisicoquímica. Versión SI, CECSA: México.
13. Glandt, Eduardo D., (2001). Optimization of Chemical Processes, Segunda Edición, Me Graw-Hill Higher Education, University of Pennsylvania.
14. Gonzales, Jorge y Mora, Hermes,F. (2006). Tostación, Empleando Microondas, en Menas Refractarias Auríferas y su Efecto en la Extracción del Oro. Universidad Nacional de Colombia – Medellín.
15. Hussey, S. J., (1964). Application of Ion Exchange resins in the cyanidation of gold and silver ores. Rep. Invest 4374, U. S. bureau of mines. Arlington. VA.
16. Haung, D.H.H.; Twidwel, D.L.G. y Miller, D.J.D. (1986). Hidrometalurgia, Tomo II Editorial San Marcos, Lima.

17. Jerma Kowicz-Bartkowiak, D., Apostoluk, W., Trochimezuk, A.W. y Kolarz, B.N. (1999). Selectivity of Resins with Guanidyl Groups Towards Dicyanoaurate Anions”, Solvent Extraction and Ion Exchange, 17(3), pp. 613-634.
18. kopacz, Stanislaw; Mikulski, Teofil, (1990). The Rare Elements, Occurrence and Technology, Oxford-New Cork-Tokio.
19. Kunin, R. Gustalson (1970), R.L., Isacoff, E.G. & Filling, H.F.(1969). Ion Exchange resins for uranium hydrometallurgy, Erg. Min. J, 170 (7), 73.
20. Kichener, J.A. (1957). Ion Exchange Resin, Methuen & Co. Ltd, 81.
21. Lawrence, K. W., Yung-Tse, H., & Nazih, K. S. (2006). Advance Physicochemical Treatment Processes. Humana Press Inc. Totowa, New Jersey, United States of America.
22. Miller, J.D. y Mooiman, M.B. (1985). “A Review of New Developments in Amine Solvent Extraction Systems for Hydrometallurgy”. Separation Science and Technology, 19 (11,12), pp 895 – 909.
23. Misari, Ch., Fidel Sergio, (1993). Metalurgia del Oro, Volumen I y II, Primera Edición, editorial Litoral, Lima-Perú.
24. McCabe, L. W., Smit, J. C., Harriott, P. (1998). Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. Editorial McGraw-Hill, Inc., España.
25. Marín Escalona, Luis. (2007). Aglomerado y Curado en el Proceso de Lixiviación de Minerales.
26. Navarro D., Villarroel P., Alguacil P., (2001). Lixiviación de Oro con Tiosulfato de Amonio Catalizada con ión Cúprico desde un Concentrado Polimetálico, Sam-Conamet-AAS, Santiago de Chile.
27. Ortega, A., K. (2009). Recuperación de oro desde soluciones cianuradas por intercambio iónico en la Compañía Minera Aurífera Santa Rosa S.A. Tesis para obtener título de Ingeniero Metalurgista, Universidad Nacional de Ingeniería- Lima.
28. Riveros, P.A. (1990). “Studies on The Solvent Extraction of Gold from Cyanide Media”. Hydrometallurgy, 25, pp. 135-156.
29. Ramidez Monreal, Ricardo, (1970). Oro, Plata y Cobre, Editorial Zig-Zag, Santiago-Chile.
30. Smith, Adrián; Mudder Ferry, (1992). The Chemistry and Treatment of Cyanidation Waste, Edición Mining, England.
31. Sancho, José; Verdeja, Luís Felipe, (1998). Metalurgia Extractiva, Volumen I y II

Editorial Síntesis, México.

32. Salinas, E., Rivera I., Carrilo F. R., Patiño F., Hernández J., (2004). Mejora del Proceso de Cianuración de Oro y Plata, Mediante la Preoxidación de Minerales Sulfurosos con Ozono. *Rev. Soc. Quim. México.* 48, 315-320.
33. Terkel, Rosenquist, (1987). *Fundamentos de Metalurgia Extractiva*, Ed. Limusa, México.
34. Treybal, R. E. (1980). *Operaciones de Transferencia de Masa*. Editorial McGraw-Hill. México.
35. Torre, Chauvin, Ernesto; Guevara Caiquetan, Alicia (2005). *Recuperación de Oro a Partir de Minerales Refractarios Polisulfurados*.
36. Tecsup (2010). *Metalurgia Extractiva del Oro*. Convenio de Cooperación Técnica.
37. Vargas Gallardo, Juan, (1995). *Metalurgia del Oro y la Plata*, Editorial San Marcos, Lima-Perú.
38. V. N. John; E. M., Dorr, (1996). *Cianuración y Concentración del Minerales de Oro y Plata*, 3ra, Ed. Me Graw-Hill, New York y London.
39. Weber, W. J. (1979). *Control de la Calidad del agua Procesos Físicoquímicos*. Editorial Reverté S. A. Barcelona, España.
40. Yáñez Traslaviña, J.J., García Páez, I.H., Pedraza Rosas J.E., Laverde Cataño, D. (2005). *Caracterización de los Minerales Auríferos de la zona Minera de San Pedro Frio (Bolívar-Colombia)*. Universidad Nacional de Colombia Medellín Colombia.
41. Yoplac Castramonte, Edwilde. (2009). *Docente UNI, curso en hidrometalurgia y beneficio de minerales*. Lima-Perú.
42. Yong Sohn, Hong; Wadsworth, Milton E. (1986). *Cinética de los Procesos de la metalurgia Extractiva*, Editorial Trillas S. A., Primera Edición.
43. XieFeng, Dreysinger David, Lu Jianming, (2007). *La Aplicación Novedosa de Ferri-cianuro como Oxidante en la cianuración de oro y plata*, ScienceDirect Ingeniería de Minerales, Canadá

ANEXOS

Control de operación durante la prueba metalúrgica de cianuración de oro

N° Control	Tiempo (h)	Au (g/TM)	Recuperación (%)
1	0	7,500	0,00
2	6	1,031	65,60
3	12	0,585	80,50
4	24	0,359	88,00
5	36	0,238	92,00
6	48	0,240	93,00

Fuente: Resultado de prueba metalúrgica de cianuración de oro por agitación mecánica

Gráfico de extracción de oro en tanque agitado

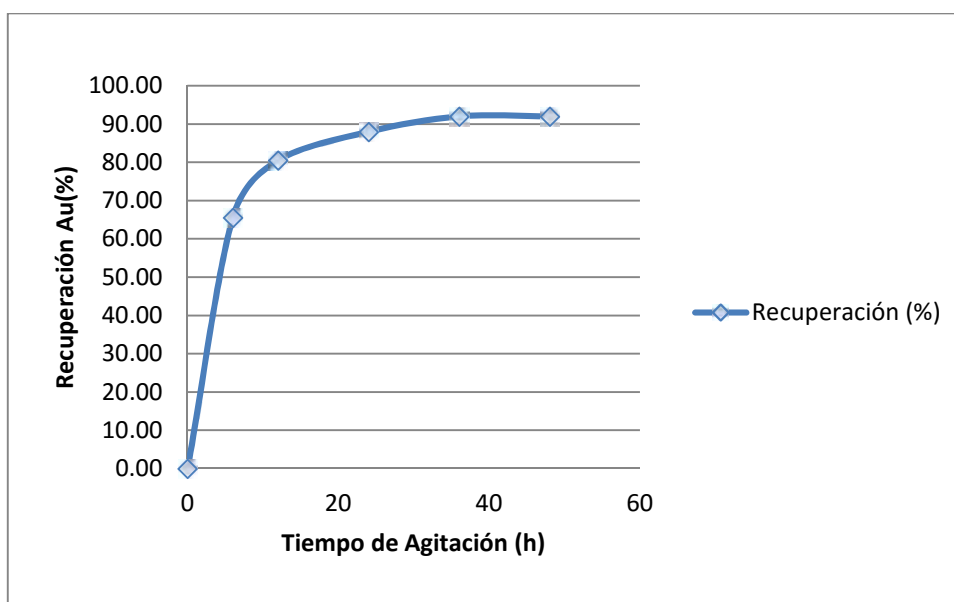




Foto 01: Filtración de pulpa del tanque de lixiviación



Foto 02: Separación de la resina del agua durante dos días.



Foto 03: Son tres muestras con la solución cianurada y la resina IRA 400



Foto 04: Filtración de la solución y la resina que estaba durante 24 horas.



Foto 05: La resina se está mezclando con 200 mL de la solución cianurada



Foto 06: Filtrado de la solución que estaba durante las seis horas.



Foto 07: Esta listo los crisoles para la fundición de la solución



Foto 08: Titulación con AgNO_3 para la determinación de porcentaje de cianuro



Foto 09: Pesando el botón de oro en balanza digital



Foto 10: Es el oro