

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CENTRO DEL PERÚ



FACULTAD DE INGENIERÍA METALÚRGICA
Y DE MATERIALES

RECUPERACIÓN DEL ORO A PARTIR DE CARBÓN
ACTIVADO CARGADO EMPLEANDO SOLUCIONES HIDRO
ALCOHÓLICAS EN LA PLANTA DE CIANURACIÓN DE
LAYTARUMA

TESIS

PRESENTADO POR LOS BACHILLERES

Bach. ALIAGA MUNIVE, Henry Ysaac

Bach. PALOMINO VELARDE, Dolly

PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO METALURGISTA Y DE MATERIALES

HUANCAYO – PERÚ
2009

ASESOR

Ing. JUAN GUERRA MUÑOZ

DEDICATORIA

A mi madre por incentivarme a seguir esforzándome en la vida ya que me permitirá seguir obteniendo logros profesionales, permitiéndome destacar en mi nación.

Dolly Palomino Velarde

DEDICATORIA

A mi madre y a mi familia por su apoyo incondicional que gracias a ello me permiten dar este paso tan importante en mi vida profesional.

Henry Ysaac Aliaga Munive

ÍNDICE

Dedicatoria	Pág.	
Resumen		
Introducción		
CAPITULO I		
ASPECTOS GENERALES		
1.1	Objetivos	09
1.2	Justificación	10
1.3	Aspectos Preliminares	11
1.3.1	Economía Nacional y Mundial del Oro	11
1.3.2	Propiedades y Usos del Oro	15
1.3.3	Zona de Estudio y Localización de la Planta de Cianuración	18
1.3.4	La Minería Aurífera en el Perú	19
1.3.5	Implicancias Ambientales de la Metalurgia del Oro	26
CAPITULO II		
ESTUDIO TEÓRICO		
2.1	Procesos Actuales	30
2.1.1	Flotación de Minerales de Oro	33
2.1.2	Hidrometalurgia de los Minerales de Oro	38
2.2.	Análisis Teórico del Proceso Propuesto	63
2.2.1	Conceptos Básicos del Fenómeno de la Adsorción	63
2.2.2	Adsorción por Carbón Activado	70
2.2.3	Consideraciones Teóricas del Proceso Propuesto	73
2.3	Planteamiento Teórico de la Investigación	74
2.3.1	Planteamiento del Problema	74
2.3.2	Hipótesis	75
CAPITULO III		
ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN		
3.1	Características de la Planta	77
3.2	Parte Experimental	81
3.2.1	Análisis de los Datos del Proceso de Desorción	82
3.2.2	Regeneración del Carbón	84
3.2.3	Presentación de Resultados	84
	Conclusiones	93
	Recomendaciones	95
	Referencias Bibliográficas	96

TESIS

“RECUPERACIÓN DEL ORO A PARTIR DE CARBON ACTIVADO CARGADO EMPLEANDO SOLUCIONES HIDRO ALCOHOLICAS EN LA PLANTA DE CIANURACION DE LAYTARUMA”

RESUMEN

El atractivo económico actual para la explotación de yacimientos de oro ha desarrollado un creciente interés en implementar nuevos proyectos lo que hace indispensable el desarrollo de nuevos conocimientos acerca de los procesos conocidos como es el caso del proceso de recuperación del oro a partir de soluciones provenientes del proceso de cianuración.

Los procesos de recuperación de metales como el oro en solución a partir de soluciones de lixiviación se realizan fundamentalmente aplicando los criterios de cementación o precipitación por desplazamiento de iones más electroactivos o aprovechando la naturaleza y propiedades de la adsorción de las especies metálicas disueltas en resinas o carbón activado. Posteriormente a los procesos de recuperación se necesita seguir con el tratamiento que permita obtener al metal en forma de una solución adecuada para el proceso subsiguiente (generalmente de carácter electroquímico), en el cual se obtiene al metal con la pureza adecuada.

Se ha considerado a este trabajo como una investigación aplicada, es decir se tratará de brindar información de parámetros que podrían ser aplicados a los procesos de cianuración del oro metálico.

El objetivo de este trabajo fue estudiar la recuperación del oro a partir del carbón activado usando un rango de alcoholes diferentes (isopropanol, etanol y etileno glicol). El trabajo experimental fue llevado a cabo a escala de laboratorio, usando carbón activado de cáscara de coco, a temperaturas de 40 a 80°C y a tiempos de extracción de 8 horas. El isopropanol fue el eluyente más rápido con >98% de Au eluido después de 1 h a 80°C, el etileno glicol tuvo una extracción similar después de 2 h, el etanol fue el menos efectivo con 5 h requeridas para >95% de extracción. Interesantemente, 77% de extracción de Au fue obtenido a 40°C usando etileno glicol.

Un modelo semi empírico de segundo orden fue usado para describir exitosamente el descargado. La energía de activación > 57 kJ/mol, indicando que la desorción fue el determinante de la cinética. El siguiente orden de las constantes cinéticas estimadas ha sido observado en cualquier temperatura investigada: $K_{\text{isopropanol}} > K_{\text{etileno glicol}} > K_{\text{etanol}}$ indicando que el isopropanol fue el mejor compuesto orgánico para el proceso de descargado del oro entre las especies seleccionadas investigadas en este trabajo. [] e un punto de vista práctico, la no inflamabilidad del etileno glicol lo hace el más atractivo.

INTRODUCCIÓN

El creciente interés en la mejora de los estándares de vida del país no solamente debe de ser de interés de los conductores de los destinos del mismo, sino también debe de involucrar los esfuerzos de sus cuadros técnicos, como en este caso de los egresados de la universidades, como consecuencia de ello hemos considerado en realizar un estudio de investigación en el área que nos compete, específicamente en uno de nuestros principales productos metálicos de exportación como es el caso del oro.

Se sabe que el oro es uno de los metales más nobles que existen en condiciones normales en la corteza terrestre, cuya naturaleza y propiedades han hecho que sea valioso y repercute su explotación minera – metalúrgica en las economías nacionales, por esta razón hemos creído que es importante analizar y profundizar los conocimientos acerca de los mecanismos hidrometalúrgicos, especialmente el estudiar las alternativas de recuperación a partir de las soluciones lixiviadas obtenidas en el proceso de cianuración que en la actualidad es el principal método de beneficio de las menas de oro. Para el efecto hemos considerado como

objetivo de este trabajo el de estudiar la recuperación del oro a partir del carbón activado usando un rango de alcoholes diferentes (isopropanol, etanol y etileno glicol).

El desarrollo del trabajo de tesis comprende de los siguientes aspectos, en primer lugar realizamos una presentación de las generalidades, luego el análisis teórico del estudio planteado, más adelante se presenta el problema y planteamos la hipótesis respectiva, luego de esquematizar, se realizan las pruebas experimentales, de cuyos resultados haremos la discusión final y determinar nuestras conclusiones y recomendaciones.

En tal sentido esperamos cumplir con las expectativas técnicas y ponemos a disposición de nuestros jurados el presente estudio que nos permitirá obtener el título de ingenieros metalurgistas y de materiales.

LOS AUTORES

CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES

Este primer capítulo considera importante el analizar los aspectos generales de la tesis, como el de objetivizar y justificar este trabajo, además de otros aspectos de interés general.

1.1 OBJETIVOS

La tesis tiene dentro de sus objetivos los siguientes aspectos:

a) Objetivo General

Determinar el efecto del uso de soluciones hidro alcohólicas en la recuperación del oro adsorbido en el carbón activado cargado en la Planta de Cianuración de Laytaruma.

b) Objetivos Específicos

b.1) Estudiar los efectos del tiempo de reacción y de la temperatura en el proceso de recuperación del oro adsorbido en el carbón activado cargado.

- b.2) Determinar los efectos cinéticos con la finalidad de establecer un modelo cinético que caracterice los procesos de reextracción del oro.
- b.3) Analizar las características operativas de los procesos de recuperación del oro, en los procesos de cianuración de minerales auríferos.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Nuestro trabajo se justifica de acuerdo a los siguientes criterios:

- a) La búsqueda de tecnologías limpias en los procesos metalúrgicos, es decir buscar mejores características ambientales, hace necesario plantear la búsqueda de nuevos reactivos para aplicar en los diferentes procesos como es el caso de la recuperación del oro a partir del carbón activado cargado proveniente del proceso de lixiviación.
- b) En los últimos tiempos se han realizado nuevos descubrimientos de yacimientos de oro y se ha demostrado un gran potencial productivo de este metal en nuestro país, esto hace que sea necesario optimizar las tecnologías en lo referente a su metalurgia extractiva y específicamente en el aspecto hidrometalúrgico.
- c) La tendencia y preocupación actual de las instituciones científicas y tecnológicas es la búsqueda de soluciones coherentes desde el punto de vista técnico y económico, es decir que las propuestas deben de estar al alcance y posibilidad de las empresas mineras que se dedican a esta industria.

1.3 ASPECTOS PRELIMINARES

Para un mejor entendimiento de nuestro estudio es importante informarnos de algunos aspectos que hemos considerado son de suma importancia dentro del manejo de tecnologías de la cianuración del oro.

1.3.1 Economía Nacional y Mundial del Oro

La implicancia de los aspectos económicos relacionados al bien a producir o mejorar sus aspectos operacionales, como en este caso es el oro, nos ayuda a percibir la importancia del desarrollo de tecnologías como es el caso de nuestro trabajo de investigación.

Las exportaciones fueron US\$ 2 107 millones. Respecto a mayo del 2009 se registró una reducción nominal de 1,6 por ciento. El volumen embarcado fue menor en 5,5 por ciento debido al menor embarque de productos tradicionales (8,2 por ciento), principalmente cobre, oro, petróleo crudo y derivados. Sin embargo, se observó mayores embarques de productos no tradicionales (3,6 por ciento), particularmente de los sectores agropecuario, pesquero y textil. El precio promedio aumentó 4,2 por ciento, por los mayores precios del cobre, oro y petróleo así como de los productos agropecuarios y siderometalúrgicos, principalmente.

Balanza Comercial Junio 2009

(Valores FOB en millones de US\$)

	2009						Jun./May.		I SEMESTRE			
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Flujo	Var. %	2008	2009	Flujo	Var. %
1. EXPORTACIONES	1 628	1 813	1 940	1 806	2 141	2 107	- 35	- 1,6	16 241	11 436	- 4 805	- 29,6
Productos tradicionales	1 147	1 357	1 412	1 364	1 665	1 607	- 57	- 3,4	12 513	8 552	- 3 961	- 31,7
<i>Del cual:</i>												
Harina de pescado	92	117	142	56	139	208	70	50,1	749	754	5	0,7
Café	27	14	9	9	25	45	21	84,0	129	128	- 1	- 0,8
Cobre	248	317	383	350	483	444	- 39	- 8,1	4 171	2 225	- 1 946	- 46,7
Oro	464	516	493	516	554	486	- 68	- 12,3	2 812	3 029	217	7,7
Zinc	39	48	75	79	89	95	6	6,3	842	425	- 416	- 49,5
Petróleo y derivados	74	108	128	129	123	108	- 15	- 12,5	1 525	669	- 856	- 56,1
Productos no tradicionales	471	446	520	429	462	489	27	5,8	3 654	2 818	- 836	- 22,9
Agropecuarios	155	121	135	120	121	139	18	14,6	866	791	- 75	- 8,7
Pesqueros	40	51	50	39	41	51	11	25,9	326	273	- 53	- 16,2
Textiles	104	113	136	101	123	134	11	9,3	988	710	- 278	- 28,2
Maderas y papeles, y sus manuf.	25	23	25	22	27	24	- 4	- 13,3	201	147	- 54	- 26,9
Químicos	67	64	77	69	59	58	- 1	- 2,1	484	394	- 90	- 18,6
Minerales no metálicos	12	9	11	11	10	11	1	11,9	83	65	- 18	- 21,7
Sidero-metalúrgicos y joyería	33	35	35	40	40	42	2	4,8	510	226	- 284	- 55,8
Metal-mecánicos	27	21	42	21	34	24	- 11	- 30,9	139	169	30	21,2
Otros	8	7	8	7	7	7	- 0	- 6,7	57	44	- 13	- 23,5
Otros	10	10	8	13	14	10	- 4	- 30,7	74	66	- 8	- 10,9

La producción de oro tuvo una disminución, habiendo llegado a 14,111,198 Grs. Finos, lo que representa una disminución de – 11.74 por ciento respecto del mismo mes del año anterior, siendo explicado principalmente por la menor producción de Minera Barrick Misquichilca (-26.66 por ciento, por menores leyes en Alto Chicama) y Minera Yanacocha (-12.46 por ciento), compensado parcialmente con el incremento en la producción de Cía. de Minas Buenaventura (44.89 por ciento).

Específicamente para el oro se sumó US\$ 486 millones en junio, cifra menor en 12,3 por ciento a mayo 2009, por el menor volumen exportado (14,3 por ciento), atenuado por el mayor precio (2,3 por

ciento). Se realizaron menores despachos este mes por parte de Yanacocha, Buenaventura y las comercializadoras Universal Metal Trading y Procesadora Sudamericana, principalmente, compensado en parte por mayores despachos de Barrick y Minera Santa Rosa. No obstante, en el primer semestre los embarques de oro aumentaron 7,4 por ciento. Los principales mercados de destino del oro son Suiza, Canadá y Estados Unidos que en conjunto representan el 96,9 por ciento de las exportaciones.

**Principales Empresas Exportadoras
de Oro 1/**
(miles de oz troy)

	2009						Jun 09 / May 09		I Semestre			
	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Flujo	Var. %	2008	2009	Flujo	Var. %
Total	540	548	532	579	597	512	-85,2	-14,3	3 081	3 308	226	7,4
Yanacocha	144	169	201	185	179	161	-18,3	-10,2	962	1 039	76	7,9
Barrick	117	103	95	112	112	115	3,1	2,7	734	654	-79	-10,8
Procesadora Sudamericana	44	57	54	66	62	36	-26,4	-42,3	276	319	43	15,6
Universal Metal Trading	55	36	26	26	47	31	-15,8	-33,7	91	222	131	--
Buenaventura	24	26	27	41	38	25	-12,9	-34,0	160	182	22	13,8
Minerales del Sur	16	20	10	14	14	13	-1,2	-8,5	88	87	-1	-1,2
Minera Aurífera Santa Rosa	13	13	11	11	13	14	0,8	5,8	87	75	-12	-14,2
Resto	125	124	108	124	132	117	-14,4	-10,9	683	730	47	6,8

1/ Estimado

A nivel mundial, El precio de oro al contado ha tocado el miércoles, 14-10-2009, máximos históricos a 1.071,00 dólares (intradía), y al cierre de la jornada del mercado del martes, 13-10-2009, llegó a los 1.064,20 dólares la onza, debido a la debilidad del dólar estadounidense y siendo impulsado por su carácter de inversión refugio en época de crisis y caídas bursátiles, superando así el

récord de oro de los días anteriores y de los 1.033,80 dólares registrados en el día del 17 de marzo del 2008..



Esta cotización récord del oro se debe entender como consecuencia de la incertidumbre de los mercados por la recesión económica y el temor a un acusado repunte inflacionista en el medio plazo por los efectos secundarios de los planes de estímulo económico y las inyecciones de liquidez.

La tenencia de oro es considerada como una de las pocas formas de conservar la riqueza y al propio patrimonio durante la peor crisis financiera desde la Gran Depresión. En concreto, la onza de oro, tradicionalmente considerado como un valor refugio ante la inflación, ha alcanzado su récord máximo a 1.071,00 dólares, porque los inversores temen que los enormes paquetes de estímulo económico y rescate bancario de Estados Unidos eventualmente

debiliten al dólar y causen inflación. Eso hace que las personas busquen refugios seguros, lo que se refleja en la entrada en oro. Se espera que los precios del oro toquen el año 2009 nuevos máximos. El consenso es que en el largo plazo todos los rescates que estamos viendo, sea en la industria automotriz, la industria bancaria u otras generarán inflación y eso sería positivo para el oro. El precio del oro récord (en términos reales) sólo ha llegado a la mitad de su anterior máximo, después del rally vivido en los últimos 8 años. Si se lo ajusta por la inflación, el anterior máximo histórico de 1980 de 850 dólares equivaldría a 1.844 dólares actuales. El precio verdadero del oro sería en unos 7.267 dólares la onza.

1.3.2 Propiedades y Usos del Oro

Oro Aurum, que en latín quiere decir aurora resplandeciente. Se forma en filones hidrotermales, normalmente relacionados con cuarzo y sulfuros, diseminados en rocas. Filones de cuarzo y depósitos de aluvión aurífero y pepitas.

Dureza: 2.5 a 3, muy dúctil

Textura: Textura maciza y constituye pequeños individuos de forma irregular

Densidad: 19,3 g/cm³

Color: Amarillo dorado

Brillo: Metálico, es un metal muy brillante.

Es el más maleable y dúctil de todos los metales. El oro es muy inactivo. No le afecta el aire, el calor, la humedad ni la mayoría de los disolventes. Sólo es soluble en agua de cloro, agua regia o una mezcla de agua y cianuro de potasio. Punto de fundición: 1063°C
Punto de ebullición: 2700°C . Peso específico: 19.3 Peso Atómico: 19.72 No. A: 79

El Oro tiene grandes propiedades de resistencia a la corrosión, maleabilidad, ductilidad y reflectibilidad. Antiguamente sólo se conocían seis metales: el hierro, el cobre, el estaño, el plomo, el oro y la plata, los cuales siguen siendo los más conocidos y los más aplicados. En general este metal es sólido, no deja pasar la luz, es muy buen conductor de la electricidad y el calor, se puede transformar en hilos, barras y chapas y su brillo es metálico.

USOS Y CONSUMO

El oro puro es demasiado blando para ser usado normalmente y se endurece aleándolo con plata o cobre, con lo cual el oro podrá tener distintos tonos de color o matices. El oro y sus muchas aleaciones se emplean bastante en joyería, fabricación de monedas y como patrón monetario en muchos países. Debido a su buena conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión, así como una buena combinación de propiedades químicas y físicas, se comenzó a emplear a finales del siglo XX como metal en la industria.

Otras aplicaciones:

El oro ejerce funciones críticas en ordenadores, comunicaciones, naves espaciales, motores de aviones a reacción, y otros muchos productos.

Su alta conductividad eléctrica y resistencia a la oxidación ha permitido un amplio uso como capas delgadas electrodepositadas sobre la superficie de conexiones eléctricas para asegurar una conexión buena, de baja resistencia. Como la plata, el oro puede formar fuertes amalgamas con el mercurio que a veces se emplea en empastes dentales. El oro coloidal (nanopartículas de oro) es una solución intensamente coloreada que se está estudiando en muchos laboratorios con fines médicos y biológicos. También es la forma empleada como pintura dorada en cerámicas. El ácido cloroáurico se emplea en fotografía. El isótopo de oro ^{198}Au , con un periodo de semidesintegración de 2,7 días, se emplea en algunos tratamientos de cáncer y otras enfermedades. Se emplea como recubrimiento de materiales biológicos permitiendo ser visto a través del microscopio electrónico de barrido (SEM). Se emplea como recubrimiento protector en muchos satélites debido a que es un buen reflector de la luz infrarroja.

1.3.3 Zona de Estudio y Localización de la Planta de Cianuración

La Planta de Lixiviación de Laytaruma está ubicada en la Quebrada de Acaville, Distrito de Jaqui, Provincia de Caravelí, Departamento de Arequipa, a una altitud de 1100 msnm. Tiene como coordenadas geográficas: 74°10' Longitud Oeste y 15°25' Latitud Sur.

El acceso a la Planta normalmente se hace por vía terrestre desde Lima. De Lima al Valle de Yauca existen 565 km (vía asfaltada), de Yauca a Jaqui existen 23 km y de Jaqui a Laytaruma son 21 km de recorrido (vía afirmada).

GEOLOGIA DE LA ZONA

Paisaje fisiográfico, terrazas del tipo fluvial especialmente en el sector del valle Yauca y en base a relieves semiaccidentados en el área de la quebrada de Acaville, propio de los primeros contrafuertes de la Cordillera Occidental, es decir formaciones líticas, asociados mayormente a suelos tipo litosoles, de origen ígneo.

GEORMOFOLOGIA-ESTATIGRAFIA

Relieve topográfico plano a ligeramente ondulado, variando a abruptos en los cerros aislados o en la cordillera antigua de la costa; la zona presenta valle en forma de V, laderas de mucha pendiente, generalmente poco estables, en las zonas cercanas al

cauce de la quebrada presenta terrazas planas o ligeramente inclinadas tipo fluvial.

El perfil estatigráfico de los suelos está formado por un estrato de arcilla limosa de 1,2 a 1,6 m de espesor, sobrecayendo a un profundo estrato de grava pobremente graduada (fluvio aluvial).

El escenario edáfico está representado por suelos de textura variable entre ligeros a finos con cementaciones salinas cálcicas o gypsicos, fluviosales en las zonas irrigadas, los litosoles y las formaciones líticas se presentan en áreas empinadas donde aparece el material rocoso, completan el cuadro edáfico suelos de naturaleza volcánica o andosoles.

La geología consiste principalmente de rocas de origen volcánico y sedimentario intrusionado por el Batolito de la Costa, al cual están ligados varios yacimientos explotados en la zona.

1.3.4 La Minería Aurífera en el Perú

Los Andes Peruanos comprenden un conjunto de cordilleras paralelas emplazadas entre la costa marítima y el llano amazónico. Su estratigrafía, estructuras, magmatismo, mineralización y sismicidad son producto de varios ciclos orogénicos superpuestos y de la "Subducción Andina", que tiene lugar a partir del Jurásico y

que da lugar a la colisión de la Placa Tectónica Sudamericana con la Placa Tectónica Oceánica.

La Cordillera de los Andes tiene como basamento rocas metamórficas del Proterozoico, sobre las que se acumularon secuencias sedimentarias que fueron deformadas por la Tectónica Hercínica Paleozoica, a la cual estuvieron asociadas intrusiones plutónicas y volcanismo durante el Paleozoico Superior. El ciclo andino se inicia en el Mesozoico; definiendo sus estructuras y alcanzando su máximo desarrollo en el Terciario y continuando su actividad hasta el presente. En la evolución de los Andes se han sucedido procesos de sedimentación marina y continental y fases de deformación acompañados de actividad magmática intrusiva y volcánica. Se evidencian pliegues, fallas y algunas deformaciones en rocas cuaternarias, así como superficies de erosión levantadas, vulcanismo y levantamiento en forma de terrazas marinas recientes. Es notoria la actividad sísmica y volcánica en los Andes Peruanos como parte del cinturón sísmico activo.

Acorde con el contexto geológico, el Perú es un país de abundantes recursos minerales. A lo largo y ancho de su territorio se encuentran gran variedad de depósitos metalíferos de diversa naturaleza, originados principalmente por efecto del magmatismo intrusivo subvolcánico y extrusivo, encontrándose yacimientos filoneanos metasomáticos y disseminados formados por procesos

hidrotermales metasomáticos y volcanogénicos, cuyos tipos de menas y volúmenes dependen de las rocas y de la naturaleza de las soluciones mineralizantes que les dieron origen. En los últimos años la exploración ha estado orientada a la búsqueda de yacimientos epitermales de oro y plata de alta y baja sulfidización, como Yanacocha y Pierina en volcánicos terciarios, así como pórfidos de cobre con oro disseminado, existiendo aún grandes áreas por investigar. Este aspecto podrá a partir de hoy ser efectuado con mayor alcance, al haber sido concluida la preparación y publicación de todos los mapas de la Carta Geológica Nacional, así como la ayuda de las imágenes satelitales cuyo análisis y procesamiento se realiza en el INGEMMET y se complementa con la magnífica información geológica y de recursos minerales de su base de datos.

La explotación de los yacimientos minerales peruanos, en el caso de los depósitos de oro, plata y cobre, datan de la época preincaica. Durante la época colonial alcanzó gran desarrollo, la explotación de oro, plata, mercurio y, en menor escala, plomo, por su contenido argentífero. En la actualidad el Perú ocupa el primer lugar en la producción de oro en América Latina, con más de 132 toneladas por año, y se proyecta alcanzar records históricos jamás alcanzados en la historia nacional. Se produce más de 40 sustancias entre metálicas y no-metálicas. De las primeras mencionaremos: antimonio, bismuto, cadmio, cobre, estaño, hierro,

indio, manganeso, mercurio, molibdeno, oro, plata, plomo, selenio, talio, telurio, tungsteno, zinc; otros minerales de cromo, cobalto, níquel, platino, titanio, uranio y tierras raras, se han reconocido en diversas localidades del país, pero es necesario mayor exploración para definir y cuantificar sus posibilidades. Entre los minerales no metálicos, se produce baritina, caliza, yeso, caolín, arcillas refractarias, talco y rocas ornamentales, orientadas mayormente al mercado interno.

Una exploración sistemática del país, basada en las nuevas informaciones geológicas del territorio, los conocimientos de la metalogénesis andina y las nuevas tecnologías de exploración disponibles, harán posible evidenciar y cuantificar nuevos y mayores recursos minerales y energéticos a lo largo y ancho de todo el territorio nacional.

YACIMIENTOS AURIFEROS :

Los yacimientos de oro se pueden clasificar en :

1. Segregaciones magmáticas:

Formadas por la consolidación de magmas fundidos. Estos depósitos se conocen también con el nombre de “ortomagmáticos”.

2. Pegmatitas:

Formadas por soluciones igneo-acuosas resultantes de la diferenciación magmática.

3. Depósitos pirometasomáticos:

Formados a temperaturas y presiones altas en las rocas invadidas, cerca de los contactos de intrusivos ígneos, por fluidos térmicos que emanan de las rocas invasoras.

4. Depósitos hipotermiales:

Son filones y depósitos formados por fluidos térmicos a grandes profundidades a temperaturas y presiones altas.

5. Depósitos mesotermiales:

La mineralización se presenta como vetas, stockwork y diseminado, con pirita-arsenopirita-calcopirita, localmente con estibnita

6. Depósitos epitermales:

Filones y depósitos formados por fluidos térmicos a poca profundidad, a temperaturas y presiones relativamente bajas.

7. Depósitos originados por las soluciones frías:

Formadas por aguas de origen atmosférico que corren por el suelo y disuelven a su paso los metales de las rocas para su precipitación ulterior.

8. Depósitos sedimentarios:

Formados por procesos de degradación. Estos se refieren a los placeres de oro.

Las aguas termales contienen mayor cantidad de oro que otras aguas.

El oro como resultado de su característica siderofila se concentra en fluidos residuales y subsiguientes fases metálicas o sulfuros mas bien que en cristales de silicato de magmas de enfriamiento. En los depósitos hidrotermales, el oro esta asociado con mercurio, bismuto, antimonio, arsénico, selenio, telurio y talio, así como también con plata y cobre. En los depósitos magnaticos, el oro esta asociado con los metales del grupo del platino.

El oro a menudo substituye a otros elementos químicamente similares o forma pequeñísimas inclusiones en los minerales más comunes, tales como pirita, arsenopirita, calcopitita, antimonita, oropimente y rejalgar.

A pesar de que se han empleado varias técnicas nuevas para la exploración del oro, la cacerola (pan) sigue siendo la más simple, eficiente y de bajo costo para determinar la cantidad de oro visible y rastrear su origen. Los análisis por activación del neutrón y el espectrofotómetro de absorción atómica permiten el análisis relativamente rápido y confiable del oro y ha contribuido a los geólogos de campo en la realización de estudios geoquímicos en

las áreas que anteriormente eran de poco interés debido a los elevados costos de muestreo y la falta de afloramientos.

MINERALOGIA DE LAS MENAS AURIFERAS:

Desde el punto de vista de la cianuración las menas de oro generalmente se clasifican en los siguientes grupos:

- a. Menas de Óxidos simples que contienen partículas finas de oro nativo, ya sea en cuarzo o ganga o piedra caliza.
- b. Menas de Sulfuros simples en las que el oro esta asociado con pequeñas cantidades de pirita y arsenopirita.
- c. Material aluvial o placer.
- d. Menas complejas de metales comunes en las que los metales preciosos con constituyentes importantes desde el punto de vista económico.
- e. Menas complejas refractarias en las que las especies minerales que contienen oro no son prontamente solubles en cianuro.
- f. Menas de metales comunes donde los metales preciosos son de menor valor y son subproductos resultantes del procesamiento metalúrgico.

Los primeros 3 grupos se prestan para la cianuración en pilas, consiguientemente estas menas deben poseer las características siguientes:

1. Los valores de oro y plata son recuperables por cianuración.
2. La mena es relativamente libre de cianicidas o sustancias que destruyen el cianuro o interfieren con la reacción básica de la cianuración del oro, tales como los sulfuros parcialmente oxidados de antimonio, zinc, hierro, cobre, arsénico.
3. El tamaño de las partículas de oro es fino y la roca encajonada es porosa para la cianuración y permanece permeable durante todo el tiempo que dura la lixiviación.
4. La mena es libre de materia carbonacea, la cual tiene la propiedad de absorber el cianuro de Oro y causar una precipitación prematura del oro.
5. Las partículas de oro presentes en las menas de baja porosidad, son fácilmente liberadas por trituración.
6. La mena no contiene excesiva cantidad de constituyentes arcillosos o finos que podrían impedir la percolación de la solución.
7. La mena es libre de constituyentes que forman ácido que causa un alto consumo de cal.

1.3.5 Implicancias Ambientales de la Metalurgia del Oro

La importancia al manejo ambiental en los procesos extractivos minero metalúrgicos tienen su punto de partida en la actual Constitución Política del Perú de 1993, en el que se indica dentro de algunos aspectos que es obligación del gobierno proteger el

ambiente promoviendo el uso sostenible de los recursos naturales. En tal sentido el gobierno a normado a través del Ministerio de Energía y Minas, y a dictado una serie de dispositivos para regular, corregir, mitigar y prevenir la contaminación del medio ambiente que es ocasionado por el sector minero.

Para las operaciones que ya venían operando antes de implementar estas medidas legales tenían que desarrollar un Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) que dentro de sus dispositivos contenían las acciones e inversiones necesarias para incorporar a las operaciones minero-metalúrgicas, los adelantos tecnológicos y las medidas alternativas que tengan como propósito reducir o eliminar las emisiones o vertimientos, para poder cumplir con los niveles máximos permisibles de contaminación que ha sido establecida por la autoridad competente.

Los principales residuos generados por esta actividad están constituidos por: Residuos Sólidos (Roca procesada); Residuos Líquidos (Mercurio, Cianuro, Cal, Sales de Metales Pesados y Reactivos); Emisiones Gaseosas (Amalgamación, Cianuración, Gases Nitrosos, Polvo, Gases de Combustión).

Las medidas ambientales tienen la finalidad de minimizar y controlar los impactos ambientales, que básicamente consisten en

el análisis e implementación de técnicas en los diferentes procesos que generen dichos residuos y emisiones gaseosas.

Los impactos positivos conllevan beneficios a los seres humanos, por ejemplo, el empleo, mejor educación, las mejoras socioeconómicas, etc. Los impactos negativos perjudican la calidad de vida, con la contaminación de la atmósfera, del agua, del entorno social, etc., debido a derrames de petróleo, relaves mineros (residuos de los procesos metalúrgicos), fugas, emisiones gaseosas, ruidos, olores fuertes, etc.

A nivel mundial se está tomando conciencia, tal es así que se han conformado instituciones específicas con la finalidad de afrontar esta problemática. En Estados Unidos de Norteamérica el Mineral Policy Center, indica en artículo aparecido de Internet, acerca de los impactos ambientales, que la minería causa serios problemas ambientales para las comunidades locales a través de los Estados Unidos y a través de todo el mundo. Desde la polución perpetua de agua causado por el drenaje ácido de mina a derrames de cianuro y contaminación con metales pesados; desde la destrucción del hábitat de la vida salvaje y matanza de peces a la creación de desechos de roca minada tóxicos perpetuos con devastadoras consecuencias ambientales. El Mineral Policy Center estima que existen más de 557,000 lugares de minas abandonadas de roca dura. Estas minas abandonadas pueden poseer serias amenazas

ambientales para la salud y seguridad públicas. Por ejemplo, los efluentes de las minas han pululado más de 12 000 millas de los ríos y torrentes americanos y 180 000 acres de nuestros lagos y reservorios. Tal contaminación presenta una creciente amenaza para los acuíferos subterráneos.

CAPITULO II

ESTUDIO TEÓRICO

Para efectos de la realización de este trabajo de investigación, es importante hacer un previo un análisis teórico acerca del problema en estudio, en tal sentido revisaremos algunos aspectos relacionados al tema en discusión, tales como la tecnología actual, fundamentos teóricos, en función a la problemática planteada.

2.1 PROCESOS ACTUALES

A continuación presentamos un análisis preliminar acerca de los procesos y métodos de beneficio aplicados para los minerales de oro. Desde el punto de vista de concepción tecnológica, los métodos de procesamiento y beneficio de los minerales de oro, se basan en las propiedades de estos dentro de las menas que los contienen. Las principales propiedades son las siguientes:

Densidad: La densidad del oro y de los minerales portadores, es en general muy elevada. Esta alcanza por ejemplo, 13 a 19 gr/cm³ en el oro natural, según la proporción en plata. Como consecuencia, se han desarrollado técnicas de concentración gravimétrica, que se han venido usando desde la antigüedad hasta ahora. En la siguiente tabla mostramos las densidades de los principales minerales portadores de oro:

TABLA N°1 PROPIEDADES DE LOS MINERALES DE ORO

MINERAL	COMPOSICION	CONTENIDO EN ORO %	DENSIDAD
Oro Natural	Au	>75	16-19
Electrum	(Au, Ag)	45-75	13-16
Calaverita	AuTe ₂	40	9,2
Krenerita	Au ₄ AgTe ₁₀	31-44	8,6
Silvanita	AuAgTe ₄	24-30	8,2
Petzita	Ag ₃ AuTe ₂	19-25	9,1
Hesita	Ag ₂ Te	<5	8,4

Mojabilidad: El carácter hidrofóbico de la superficie del oro natural, le confiere una excelente flotabilidad, dependiendo del tamaño de grano. La flotación es un método de tratamiento muy utilizado para minerales sulfurados que contienen oro.

Solubilidad: El oro y algunos de sus minerales portadores son solubles en las soluciones diluídas y alcalinizadas de cianuro. Esta propiedad ha permitido a que la lixiviación mediante la cianuración sea la técnica más corriente de procesamiento para la recuperación del oro a partir de sus minerales.

El oro es también soluble en otros solventes, por ejemplo la Thiourea y los Tiosulfatos en medio ácido. En todos los casos se puede notar que ante la presencia de un solvente es necesario que la solución de ataque tenga un potencial de óxido-reducción, lo suficientemente elevado para poner el oro en solución. La presencia de un agente oxidante es pues indispensable. Es el oxígeno del aire el que juega este rol en el caso de la cianuración.

Amalgamación: es un proceso de formación de una mezcla o aleación entre el oro y el mercurio, esto debido a que el oro es fácilmente "humedecido" por el mercurio, debido a que la tensión superficial entre ambos metales es débil.

La amalgamación es una técnica que pierde progresivamente terreno, pues por una parte no permite recuperar todo el oro libre y por otra parte exige un control muy estricto para la preservación del medio ambiente.

2.1.1 Flotación de Minerales de Oro.

En muchas menas auríferas solamente una parte de este metal se encuentra en forma libre y finamente subdividida, ya que el resto está disuelto en los sulfuros de los metales base o forman parte de éstos. Con frecuencia, la pirita, la arsenopirita y los sulfuros de cobre son auríferos, y se encuentran con sustancias cianurables del tipo de los compuestos de antimonio o con productos de oxidación.

La flotación se usa como un complemento de la lixiviación. De este modo un concentrado de poco volumen y elevado valor puede recuperarse y tratarse como producto separado, bajo distintas condiciones de disolución, y facilitar una recuperación total mucho mayor a un costo algo más bajo. Frecuentemente el oro no puede recuperarse de los materiales sulfurados hasta que haya alcanzado un estado mucho más fino de subdivisión que la mayor parte de la mena, en cuyo caso esta molienda más fina resulta más barata por ser mucho menor la cantidad tratada. La flotación puede constituir también un proceso muy atrayente para la separación de minerales del tipo estibina, de los sulfuros y telururos de cobre y de otros compuestos que deben someterse a una tostación antes de cianurarse, así como también para reducir la cantidad de mineral que pasa por los hornos. Aún cuando la recuperación del oro y la plata por flotación, de estas menas es baja, puede seguir siendo ventajosa para separar aquellos

compuestos que estorban el proceso de cianuración, para cianurar la parte principal de la mena y, a continuación, recuperar los metales preciosos mediante la cianuración del concentrado.

La Cyanamid, indica que los métodos para el tratamiento de la recuperación de oro a partir de los minerales asociados con oro, depende del tipo de mineralización. La mayoría de los minerales de oro están comprendidos en tres clases principales:

- 1) Los minerales de oro en los cuales la oxidación de los sulfuros es esencialmente completa. Generalmente el oro está presente en forma libre y el resto del oro ocurre tanto en la matriz porosa de los productos de oxidación de los sulfuros y entrampado con la ganga. Esta clase de mineral generalmente es bajo en contenido de sulfuros. Para la recuperación del oro libre y el oro que ocurre en la matriz del óxido se usa el proceso de cianuración. La concentración gravimétrica puede ser usada para ayudar a la recuperación de partículas gruesas de oro. En el caso de una oxidación parcial, donde está presente una mayor cantidad de sulfuros se recomienda una combinación de procesos de flotación y cianuración para la recuperación de oro entrampado en los sulfuros, y en casos particulares, una concentración gravimétrica incluida en el circuito de molienda para la recuperación del oro grueso en partículas.

- 2) Los minerales de oro en los cuales parte del oro está libre, ya sean en su forma metálica o como una telurita y el resto asociado con sulfuros tales como la pirita y la arsenopirita y generalmente con ganga no sulfurosa. La mayoría de la producción mundial de oro proviene de este tipo de minerales, los cuales son frecuentemente tratados con alguna combinación de los métodos de concentración tales como gravimetría, flotación y cianuración.

- 3) Los minerales que contienen su mayor valor como minerales de metales base, como el cobre, plomo y zinc. Estos minerales son generalmente considerados como minerales de metales base, pero pueden tener suficiente cantidad de oro de tal manera que influye en la selección de los reactivos de flotación.

En la flotación de los minerales de oro de las clases 1 y 2, una combinación de colectores de los promotores Aerofloat 208 ó Aero 3477 y xantato es ampliamente usada. Un espumante tipo alcohol, polipropileno glicol o ácido cresílico pueden preferirse cuando están presentes partículas de oro libre gruesas. Los promotores Aerofloat 25 ó 31 pueden usarse también por su habilidad de colectar al oro debido a las propiedades de espumación que poseen. El requerimiento total de colector

usualmente está en el orden de 25 a 75 g/t. Cuando se requieren colectores más poderosos, particularmente para la flotación de la pirita, arsenopirita y pirrotita, se recomienda una combinación de promotores Aero 404, 407 ó 412 como el colector principal y un xantato como colector secundario. Si se requiere, el uso de 50 a 100 g/t de sulfato de cobre activará a los sulfuros. Cuando una gran cantidad de arsenopirita está presente y se desea recuperarla, puede entonces requerirse, tanto como 500 g/t de sulfato de cobre para su activación.

Mientras que la flotación de los minerales de las clases 1 y 2 se lleva usualmente a cabo en pH natural, se recomienda investigarse el efecto de los ajustes de pH con ácido o Na_2CO_3 entre los pH de 4 a 9 cuando están los sulfuros mezclados con contenido de oro. Debe evitarse el uso de la cal, puesto que tiene una fuerte tendencia a deprimir las partículas de oro libre. El uso de uno de los promotores de la serie 400 acuosa de los promotores Aero es muy favorable cuando la flotación se lleva a cabo a pH menor de 7.

En general, las partículas de oro metálico limpias más finas de 200 micras flotan rápidamente con los reactivos previamente mencionados. El oro metálico más grueso de 200 micras es más difícil de flotar y debe de considerarse ya sea la amalgamación o la concentración gravimétrica. Las densidades de pulpa de 35%

de sólidos o más ayudarán a la recuperación de las partículas de oro libre más gruesas.

Cuando los minerales se ubican entre la clase 1 y la clase 2 son sulfuros parcialmente oxidados asociados al oro, se debe considerar el uso de adiciones cuidadosamente controladas de sulfuro de sodio o hidrosulfuro, para sulfurizar los minerales parcialmente oxidados. Debido a que el sulfuro de sodio (hidrosulfuro) puede deprimir el oro libre, puede desearse flotar primero el oro libre y los minerales sulfurados limpios seguido por una sulfurización y una flotación con uno de los promotores Aero de la serie acuosa 400. La adición de sulfato de cobre puede mejorar la recuperación de los minerales sulfurados.

En el caso de los minerales de la clase 3, la flotación es específica para cada caso dependiendo del tipo de mineral de cobre, plomo o zinc. En general, el uso de uno de los ditiofosfatos beneficiará la recuperación de la mineralización secundaria de oro.

En el África del Sur y muchos otros países en el mundo, la cianuración del mineral de oro es seguida por una flotación de los residuos de la cianuración para la recuperación del oro y pirita aurífera. Los residuos reaprovechables y corrientes se tratan de esta manera; y muchos relaves antiguos han sido vueltos a tratar

en años recientes. Estos residuos son acondicionados con ácido sulfúrico a un pH de 3,8 a 4,5 por 1 a 15 horas (dependiendo si la agitación es mecánica o por aire). El sulfato de cobre (20-100 g/t), los promotores Aero 404, 407 ó 412 (20-50 g/t) y un espumante se agregan a la cabeza de los "roughers". Para una recuperación más alta de oro se requieren tiempos de flotación muy largos, tanto como 30 minutos en la práctica de planta. Los concentrados "rougher" se limpian como se requiera para producir una alimentación adecuada para los tostadores. El material calcinado es luego cianurado para recuperar el oro. Los promotores Aero 404, 407 ó 412 son los colectores a escoger debido a su estabilidad (en circuitos ácidos), comparada con xantatos.

2.1.2 Hidrometalurgia de los Minerales de Oro

Aparte del proceso de cianuración, que es el método hidrometalúrgico más extendido para la extracción del oro a partir de sus minerales, el cual vamos a discutirlo con mayor detalle en la siguiente sección, indicaremos algunos procesos hidrometalúrgicos para extraer a este precioso metal:

Proceso de Clorinación

El cloro en presencia de agua ataca al oro fino accesible en forma rápida como sigue:



El oro soluble, después de la separación de sólidos, es generalmente precipitado con sulfato ferroso o dióxido de azufre. Si el mineral contiene apreciable cantidad de plata se lixivia con tiosulfato (hiposulfito) para disolver el cloruro de plata. Este método se sugiere como alternativa para el tratamiento de lodos del proceso Merrill (precipitación con polvo de zinc) y para concentrados gravimétricos.

Un método basado en la clorinación es el Proceso DUVAL, específicamente para minerales conteniendo metales base (principalmente de cobre); comprende de un ataque con cloruro férrico de la chalcopirita para formar cloruro cúprico, la reducción del cloruro cúprico a cloruro cuproso, recuperación del cobre metálico y la regeneración del cloruro férrico por oxidación.

El oro y la plata en el proceso DUVAL probablemente se disuelve en diferentes grados y los valores preciosos solubles son recuperados junto con el cobre por electrólisis. El oro y plata remanentes en los residuos de lixiviación son procesados por cianuración u otros métodos conocidos.

Otros procesos hidrometalúrgicos también han sido operados para el tratamiento de concentrados de metales base, principalmente cobre. El proceso Arbiter Anaconda emplea un

paso de lixiviación sulfato amoniacal seguido por una extracción por solventes y electrodeposición. Los valores de metales preciosos permanecen en los residuos para posteriores tratamientos.

Otros halógenos como el bromo y el yodo se han estudiado y probado recientemente. El yodo es muy efectivo y su complejo es más estable que el de bromo, el que a su vez es más estable que el de cloro. Para la recuperación del oro y del yodo se ha propuesto una celda electrolítica especial.

El Método del Tiosulfato

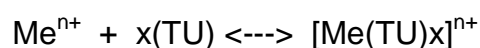
El uso del tiosulfato fue el método preferido antes que apareciera la cianuración, hace cien años y habiéndolo desplazado totalmente. Recientemente se han realizado mejoras del proceso y se ha utilizado en lixiviación de oro y plata desde residuos de lixiviación a presión. También se ha estudiado su uso en la lixiviación de concentrados sulfurados complejos, usando soluciones amoniacales de tiosulfato.

Proceso de Thioureación

La thiourea es un acomplejante para el oro y la plata. Se producen complejos catiónicos, en lugar de complejos aniónicos (metal - cianuro). Las velocidades de lixiviación son más rápidas con las soluciones ácidas de thiourea y más aún cuando se adiciona el

ión férrico como oxidante. Es una opción no tóxica frente a otros sistemas.

La thiourea (H_2NCSNH_2) es un compuesto orgánico, los cristales se disuelven en agua para producir una forma acuosa estable en soluciones ácidas. El único aspecto de la thiourea es que reacciona en soluciones acuosas con ciertos iones metálicos de transición para formar compuestos catiónicos estables. El rol acomplejante de la thiourea se muestra:



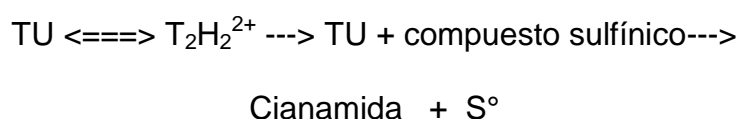
donde Me es el metal; n, valencia; TU, representa la thiourea; x el número de coordinación o estequiometría.

Según R.G. Schulze es necesario tener en cuenta tres puntos para la lixiviación con thiourea:

1. La thiourea usa fases oxidantes condensadas, por ejemplo, compuestos de ión férrico o peróxido de hidrogeno, mientras que el cianuro toma oxígeno del aire.
2. La carga del complejo thiourea es catiónica, mientras que el cianuro produce aniones complejos cargados negativamente.

3. Cinéticamente, la velocidad de lixiviación de la thiourea debe ser una función de la concentración de la thiourea y del oxidante, el cual aquí es representado por el hierro trivalente.

La dependencia de la velocidad de disolución de metales preciosos sobre la concentración de iones férricos es determinada por el hecho que la thiourea por si misma es fácilmente oxidada. De acuerdo a la reacción:



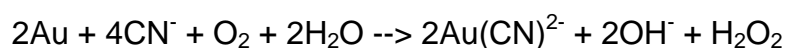
el primer producto de oxidación de la thiourea es el disulfuro de formamidina, T_2 , ó $\text{T}_2\text{H}_2^{2+}$ en soluciones ácidas, como un resultado de una reacción reversible. En un segundo paso irreversible, el $\text{T}_2\text{H}_2^{2+}$ experimenta desproporción para producir thiourea y un compuesto sulfínico no identificado, el cual en un tercer, y también irreversible paso, finalmente se descompone a cianamida y azufre elemental. El azufre elemental generado tiene una forma adhesiva fina que cubre toda la superficie, resultando la pasivación del material alimentado.

El Método CIP (Carbón en Pulpa)

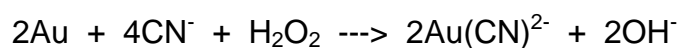
La lixiviación de minerales de oro empleando el cianuro (de sodio o de potasio) es uno de los métodos más utilizados a partir de comienzos de este siglo, reemplazando a los métodos de clorinación y lixiviación con tiosulfato de sodio; debido a que la cianuración es generalmente más barata, más efectiva y más selectiva. El proceso de cianuración consiste de una lixiviación por percolación de mineral triturado o la agitación de una pulpa del mineral molido con una solución de cianuro diluida, generalmente menos que el 0,3% de cianuro de sodio (NaCN) de fuerza. La solución es alcalina para prevenir la hidrólisis del cianuro y la pérdida de este reactivo debido a los acompañantes en el mineral. La cal (CaO) es comúnmente empleada para mantener los valores de pH entre 10 y 10,5, con este fin también pueden emplearse el hidróxido de sodio (NaOH) o el carbonato de sodio (Na_2CO_3). Muchas sales de cianuro alcalino pueden ser usadas efectivamente y algunos nitrilos orgánicos también. Sin embargo el cianuro de sodio o algunas veces el cianuro de calcio es preferentemente usado. El oxígeno disuelto es un ingrediente fundamental en la etapa de lixiviación. El oro y la plata disueltas pueden ser precipitados de las soluciones clarificadas por desplazamiento metálico, usualmente con polvo de zinc. Alternativamente, las soluciones no clarificadas pueden ser tratadas con carbón activado granular o resinas para absorber los valores metálicos preciosos.

El oro en la forma de partículas metálicas finas y limpias es fácilmente disuelto por cianuración. El oro que ocurre como seleniuros o telururos debe de ser tostado o procesado químicamente para hacer que el oro sea satisfactoriamente lixiviable con cianuro diluido. De acuerdo a Barsky, el oro puro es soluble en la proporción de cerca de tres miligramos por centímetro cuadrado por hora con una adecuada aereación y agitación.

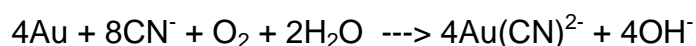
G.M. Potter y R.B. Bhappu describen la química de la recuperación del oro a partir de sus fuentes naturales. La reacción principal de disolución del oro está indicada por:



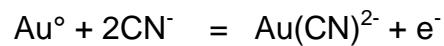
Algo del peróxido de hidrógeno así formado puede ser usado en la reacción:



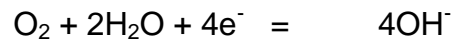
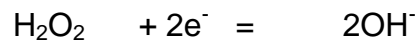
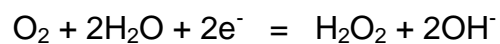
Una parte pequeña del oro puede ser disuelta de acuerdo a la ecuación clásica de Elsner:



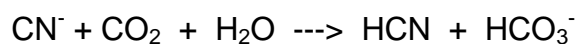
Kudryk y Kellog, establecen que la disolución del oro en medio cianurado tiene carácter electroquímico, indicando que la reacción anódica es:



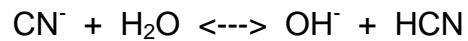
y que la reducción catódica procede a través de una serie de reacciones incluyendo al H_2O_2 , de modo que en soluciones básicas, se pueden representar por:



Parte del cianuro alcalino usado en soluciones de lixiviación es perdido por entrapamiento en los residuos, parte por acción de los cianicidas (cianuro consumido por las impurezas), algo como gas de cianuro de hidrógeno (HCN) y parte como amoníaco (NH_3) y compuestos de nitrógeno (N). El cianuro puede reaccionar con dióxido de carbono (CO_2) como sigue:



También el cianuro puede hidrolizarse de acuerdo a:



Las pérdidas por CO_2 y por reacciones de hidrólisis son reducidas manteniendo la protección alcalina, usualmente a través del uso de cal (CaO) en pH 10,0 a 10,5

Aspectos Tecnológicos de la Cianuración

Para que el oro se disuelva completamente en soluciones alcalinas de cianuro se deben de satisfacer ciertos requerimientos, tales como:

- a) El oro debe de estar como partículas discretas y limpias.
- b) Deben de estar ausentes las impurezas que puedan inhibir la reacción.
- c) Se debe disponer de un adecuado suministro de oxígeno.

En el caso de las impurezas podemos referirnos a los principales constituyentes de una mena conteniendo oro:

- La pirita se puede descomponer en las soluciones cianuradas, interfiriendo en el sentido de que existe consumo del oxígeno,

formación de cianatos y cianicidas que retardan la cianuración del oro.

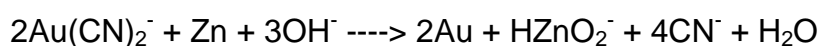
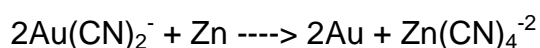
- La pirrotita, es más reactiva que la pirita, es un cianicida más que el anterior mineral, también consume oxígeno.
- Minerales Arsenicales, en las menas de oro ocurren fundamentalmente en tres formas: Arsenopirita (FeAsS ó $\text{FeS}_2 \cdot \text{FeAs}_2$), Rejalgar (As_2S_2) y Oropimente. Estos minerales interfieren en la disolución del oro debido a la formación de compuestos como: Arsenitos alcalinos (CaHAsO_3), consiguientemente hay pérdida de oxígeno, formación de tioarsenitos, formación de una película arsenical del oro (escodorita).
- Minerales Antimoniales, particularmente es referido a la estibina, que es parcialmente soluble en cianuro, forma tioantimonitos los que se combinan con el oxígeno de la solución, disminuyendo la disolución del oro, también puede formarse partículas coloidales de estibina, que obstruyen la disolución del oro.
- Minerales de plomo, dentro de este grupo se consideran a la galena (PbS) y la anglesita (PbSO_4). Dependiendo del pH se pueden formar plumbitos alcalinos, que a su vez pueden

formar complejos cianurados insolubles y estos a su vez forman HCN.

- Minerales de cobre, casi todos los minerales de cobre exhiben algún grado de solubilidad en soluciones de cianuro, en diferentes grados (desde 5 a 95% de disolución del cobre), incrementándose con la temperatura. Normalmente se forman cianatos y tiocianatos. La presencia del cobre hace que la disolución del oro disminuya.
- Minerales de Telurio, se indica que este tipo de minerales hace que la disolución de oro sea difícil, cuando el oro está contenido en este tipo de minerales.
- Materiales carbonaceos, por ejemplo el grafito puede actuar como agente precipitante del oro, por efecto de la readsorción.
- Hierro, este metal disperso formado por el desgaste de las bolas y forros de los molinos, puede ocasionar pérdidas considerables de oro por la precipitación de este sobre la superficie del hierro.

Recuperación del Oro a partir de sus Soluciones

El oro es comúnmente recuperado a partir de sus soluciones clarificadas por precipitación con polvo de zinc. La efectividad del zinc es mejorada por la desaereación de la solución previo a la adición de zinc tal como se practica en el sistema de Merrill Crowe empleando el vacío. Las principales reacciones para el oro probablemente son las siguientes:

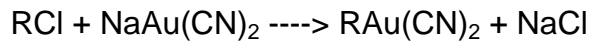


La precipitación del oro por el zinc es un proceso de cementación, realizado por una reacción ánodo-cátodo que también resulta en una disolución del zinc. Al adicionar sales de plomo soluble, en algunos casos mejora la reacción y favorece las condiciones electroquímicas de la reacción. La remoción de oxígeno bajo condiciones de vacío disminuye la tendencia del oro a redisolverse en cianuro y corta la disolución oxidante del zinc en el cianuro.

El aluminio también es un precipitante efectivo para el oro a partir de soluciones desaereadas de cianuro.

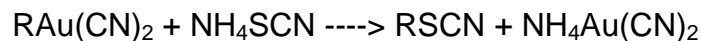
Como una alternativa a la separación sólido-líquido y a la precipitación con polvo de zinc del oro a partir de soluciones

cianuradas, la aplicación de resinas de intercambio iónico o carbón activado, ya sea para soluciones claras o pulpas deben ser consideradas. El uso de resinas puede ser explicado mediante la siguiente reacción:



donde R es un anión intercambiador.

La reacción de reextracción con la resina Amberlite IRA-400, es como sigue:



El oro reextraído en solución entonces es electrodepositado como sigue:



Adsorción y Readsorción en Carbón Activado

El oro y la plata en soluciones cianuradas son exitosamente recuperadas comercialmente por adsorción en carbón activado granular. Los iones calcio presentes en las soluciones cianuradas, favorecen la adsorción del complejo aurocianuro, mientras que los iones sodio inhiben la adsorción, particularmente sobre pH 10.

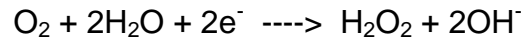
Una operación típica de desorción a partir del carbón activado se realiza en una solución conteniendo 1% de NaOH, 0,1% de NaCN a temperaturas cercanas a la de ebullición (80°C), para carbones típicamente cargados con 200 a 600 onzas de oro y plata combinados por tonelada corta de carbón. La desorción toma de 40 a 60 horas. Las soluciones cargadas son electrolizadas para recuperar el oro y la plata en cátodos de acero. El carbón generalmente es reusado, después de reactivaciones periódicas por tratamiento térmico a 600°C. Una temperatura elevada de 160°C, disminuye el tiempo de desorción de 4 a 6 horas, también una mezcla acuosa de cianuro-soda cáustica-etanol o metanol a 60 a 80°C.

Se indican tres teorías para explicar el mecanismo de la adsorción. Es probable que los tres mecanismos operen al mismo tiempo pero en diferentes grados:

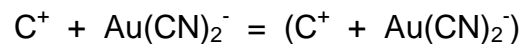
- a) Teoría de adsorción física.- que considera que la adsorción es resultado de las fuerzas de Van der Waals.

- b) Teoría química compleja.- que indica que la adsorción es el resultado de la neutralización de los grupos ácidos en la superficie del carbón.

c) Mecanismo electroquímico.- cuando el oxígeno está en contacto con una suspensión acuosa de carbón, es reducida a grupos hidrófilos y se libera H₂O₂.



Puesto que los electrones son abastecidos por el carbón, éste adquirirá una carga positiva. Para mantener la neutralidad eléctrica en la superficie del carbón, los aniones son atraídos por el carbón resultando adsorbidos. Esto puede explicarse mediante:



explicándose él por qué, el oro adsorbido por el carbón desde la solución nunca es oro metálico.

Factores que Influyen en la Precipitación del Oro en Carbón Activado

Se pueden resumir en los siguientes aspectos:

- 1) El mecanismo de precipitación involucra una adsorción acompañada de un cambio químico.

- 2) El oro precipita a una velocidad mayor que la de la plata y el carbón tiene mayor capacidad de adsorción para el oro que para la plata.
- 3) La capacidad del carbón parece alcanzar hasta 2000 onzas de oro por tonelada de carbón.
- 4) Existe poca diferencia entre carbones preparados a partir de diferentes maderas.
- 5) El punto más importante en la fabricación del carbón es el tratamiento térmico ya sea durante la fabricación o subsiguientemente.
- 6) El enfriamiento violento del carbón no mejora sus propiedades.
- 7) La pulverización a tamaños finos menores que 200 mallas, no incrementa apreciablemente la eficiencia del carbón.
- 8) El cianuro de oro adsorbido no es soluble en agua hirviendo y es especialmente soluble en cianuro caliente. El carbón empleado de este modo puede ser usado nuevamente para una precipitación posterior.

- 9) Pocas son las sustancias en solución que afectan apreciablemente la eficiencia de precipitación.
- 10) El oro que precipita, desde las soluciones de una cianuración, sobre carbón no es de naturaleza metálica y por lo tanto no tiene las propiedades químicas de un metal. Aún observando bajo el microscopio no se puede ver nada de oro como metal.
- 11) El sulfuro de sodio y el cianuro libre en solución disminuyen la velocidad de precipitación del oro sobre el carbón.
- 12) En la precipitación con carbón existe una pérdida de cianuro debido a la adsorción, aunque es posible recuperar algo de esta pérdida.
- 13) La precipitación de oro es efectiva desde soluciones de bajo grado.
- 14) El carbón puede reemplazar al zinc cuando las soluciones contaminadas causan problemas en la cementación.

Aspectos Tecnológicos del Proceso Carbón en Pulpa (CIP)

Este sistema de recuperación de oro consiste en la aplicación directa del carbón activado en la solución rica sin previa

clarificación (en forma de pulpa), tiene la ventaja sobre los sistemas convencionales el tratamiento de minerales con difíciles características de decantación y filtración, tal como es requerido en el sistema CCD (Counter current decantation). Esto se complementa, que algunos minerales tienen altos contenidos de cianidas, que hacen impracticable cualquier método de cianuración. Con el uso del carbón activado, debido a su gran selectividad por el oro, se pueden tratar por el sistema CIP sin mayores problemas. Como beneficio adicional en el uso del CIP no es necesario mantener cianuro libre en las etapas finales de adsorción del oro soluble, como lo es para el sistema de precipitación con zinc. Es importante recalcar, que el carbón activado recupera la mayor parte del oro soluble más no así el oro insoluble.

Un circuito clásico del proceso CIP puede consistir de 4 ó más tanques con agitación puestos a trabajar en serie en donde la pulpa es alimentada, luego de ser lixiviada. En los tanques de CIP donde se alimenta la solución cianurada conteniendo valores de oro en solución es también alimentado el carbón activado, donde entra en contacto con la solución mediante la agitación mecánica que tiene cada tanque, produciéndose el proceso de adsorción de oro, la pulpa pasará al segundo tanque y así sucesivamente hasta el último tanque obteniéndose cada vez valores más pobres de oro en la solución. Mientras que el carbón va en la dirección

opuesta al flujo de pulpa cargándose cada vez más de mayores valores de oro. La remoción del carbón cargado se realiza, cuando haya alcanzado sus valores máximos. Este carbón pasa al circuito de desorción, donde es descargado el oro, luego se reactiva el carbón y se le añade al último tanque CIP. Sucesivamente se realiza la operación cuando en cada tanque se haya alcanzado los valores máximos de adsorción.

Factores que Influyen en el Proceso CIP

Los factores importantes que influyen en el circuito CIP son:

- a) Contenido de oro en la solución alimentada.
- b) Contenido de oro en las colas (Barren solution).
- c) Densidad de la pulpa.
- d) Efectos del pH.
- e) Presencia de otros iones (sales solubles).
- f) Presencia de arcillas.
- g) Consumo del carbón - Desgaste por abrasión.
- h) Efectos de otros reactivos en la recuperación.
- i) Concentración del carbón en la pulpa g/l.
- j) Tiempo de retención en la pulpa.

Algunos Aspectos de la Electrodeposición de Oro

La recuperación de los metales preciosos de la solución rica es efectuada por electrodeposición. En esta etapa se remueven los

metales preciosos de la solución por el paso de la corriente a través de una celda electrolítica compuesta por los cátodos, ánodos y el electrolito.

El suministro de corriente directa es conectado al ánodo y al cátodo, haciendo que el metal sea depositado sobre el cátodo, aplicando un voltaje aproximado de 2,5 V.

El cátodo es de acero inoxidable y está envuelto en lana de acero para crear mayor área superficial de contacto.

El electrolito proveniente del reactor es enfriado por agua en un intercambiador de calor hasta alcanzar una temperatura de 35°C, e ingresa a la celda de electrodeposición con una alta concentración de metales preciosos, depositándose también el Cu, junto con la Ag y el Au sobre el cátodo.

La solución barren o pobre que deja la celda se recicla al circuito por un sistema de bombeo.

De otro lado, una vez que el carbón es desorbido a un nivel de oro residual de aproximadamente 2-5 oz/TC, el carbón es considerado agotado.

Parámetros de Operación:

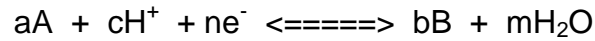
pH de la solución	:	12,0
Temperatura	:	75°C
Flujo de la solución	:	22,0 l/min
Tiempo desorción-electrodeposición	:	36 h
Voltaje de la celda	:	3,5 V.
N° de cátodos	:	6
Peso de lana de acero	:	2 kg
Capacidad de tratamiento	:	200 kg

Termodinámica de la Cianuración.

La termodinámica de los sistemas acuosos es interpretada a partir de los Diagramas de Pourbaix o Eh-pH. Los diagramas Eh-pH (Potencial de electrodo vs pH) desarrollados para describir los equilibrios en un sistema de corrosión metálico, también son apropiados para describir la termodinámica de los sistemas hidrometalúrgicos. Pourbaix (1950), fue el primero que usó y explicó este tipo de diagramas.

Los diagramas Eh-pH, representan los equilibrios heterogéneos, considerando que el sistema en estudio está en condiciones de estabilidad. Estos diagramas describen teóricamente las reacciones de hidrólisis, oxidación y reducción que ocurren en las soluciones acuosas.

La ecuación general que describe un proceso hidrometalúrgico puede ser escrita en forma de reducción:



El cual es igualado a un electrodo de referencia, como el electrodo estándar de hidrógeno (SHE) y partiendo del criterio de potencial de equilibrio para celdas electroquímicas, se determina a partir de la condición del equilibrio termodinámico:

$$\Delta G + nF(\mu - \mu_{ref}) = 0$$

donde n es el número de equivalentes químicos, F es el número de Faraday (23 060 calorías/voltio), $(\mu - \mu_{ref})$ es el potencial de circuito abierto de los terminales, cuando el sistema total está en equilibrio.

Obteniéndose finalmente la ecuación, que relaciona el Eh y el pH :

$$Eh = -\frac{\Delta G}{nF} - \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_B}{a_A} - 2,303 \frac{RT}{nF} C \cdot pH - \frac{RT}{nF} m \ln a_{H_2O} \quad (1)$$

donde $Eh = \mu - \mu_{ref}$, y

$$\Delta G^\circ = -a\mu^\circ_A - (c-n)\mu^\circ_{H^+} - n/2 \mu^\circ_{H_2} + b\mu^\circ_B + \mu^\circ_{H_2O}$$

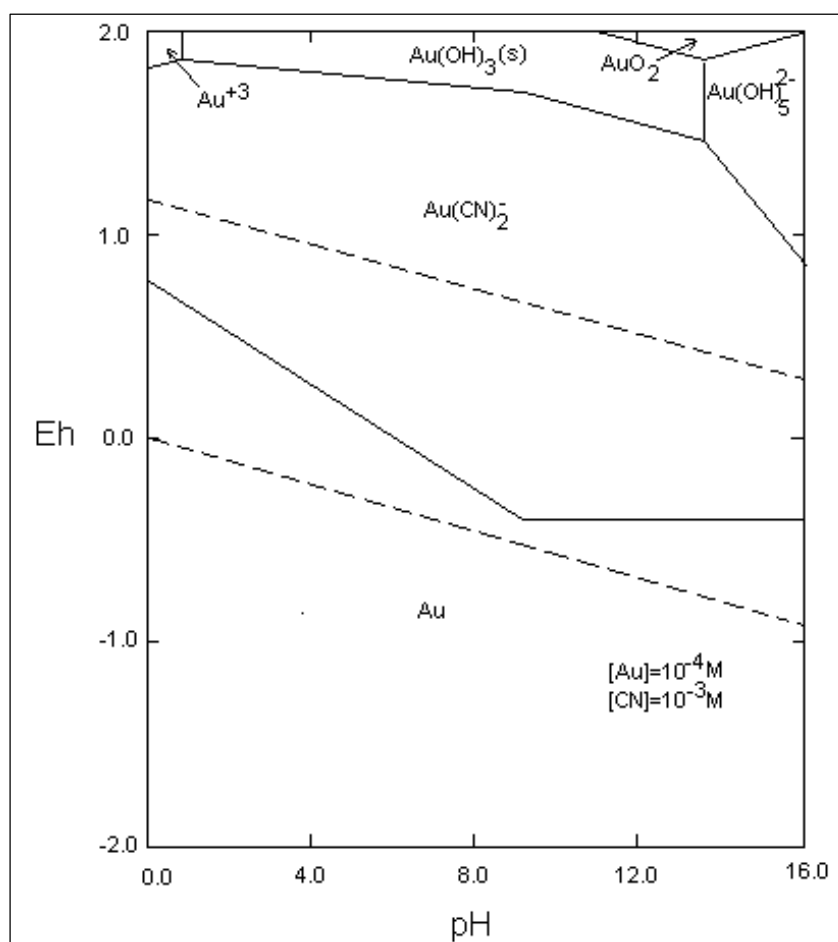
Con la ecuación (I) se pueden graficar las líneas generadas para cada reacción, en un diagrama cuyas coordenadas son el potencial de electrodo (Eh) y el pH (ambas consideradas como variables dependientes). Estas líneas a su vez generarán áreas de dominio de cada especie.

En la figura N° 1 se muestra el diagrama Eh-pH, para el sistema Au-CN-H₂O a 25°C, para condiciones prácticas de operación, [Au]=10⁻⁴M y [CN]=10⁻³M; en el cual se puede observar las áreas de predominancia de los principales compuestos en un sistema de lixiviación de oro en un medio cianurado. En la parte inferior se tiene el dominio de Au metálico, en zonas de potenciales reductores en medio ácido, el área va disminuyendo hasta hacerse constante en la zona de potenciales reductores en medio alcalino, el punto de intersección se da en el pH = 9,21, ocasionado por el límite de la reacción:

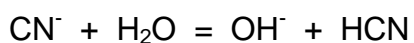


$$\log K = 9.21 \text{ a } 25^\circ\text{C}$$

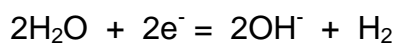
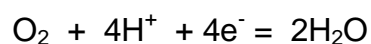
FIGURA N°1 – DIAGRAMA Eh-pH SISTEMA Au-CN-H₂O



Dentro del diagrama podemos observar el área del complejo $\text{Au}(\text{CN})_2^-$, que es la principal especie disuelta del oro en este medio, que en su zona de potencial ligeramente más oxidante en medio alcalino es la zona más conveniente de trabajo para la lixiviación del oro, la operación a pH's menores a 9,21 ocasiona la pérdida de cianuro por hidrólisis de la reacción:

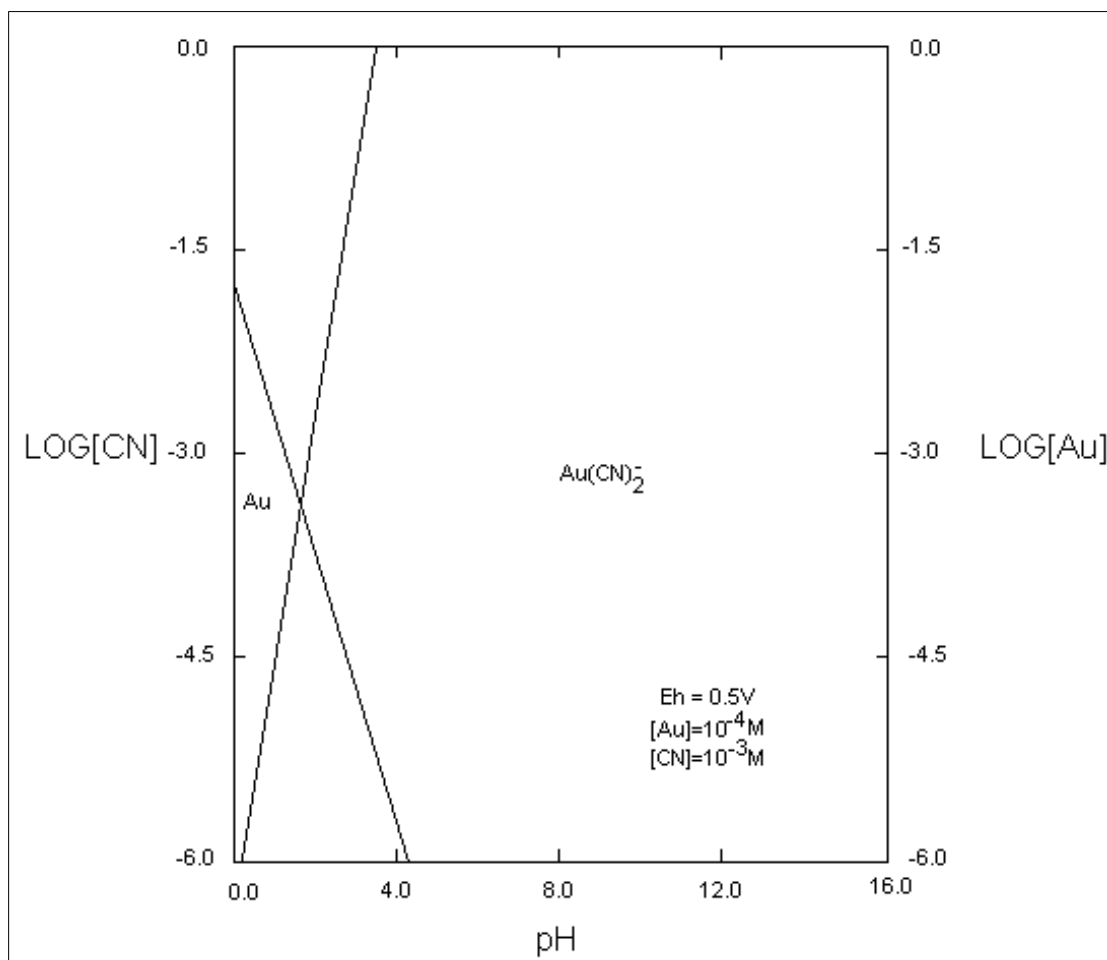


por lo tanto se trata de mantener la protección alcalina usando cal (CaO) en rangos de pH entre 10 y 10,5; sobre este valor la velocidad de disolución decae posiblemente debido a la formación de una capa pasiva de $\text{Au}(\text{OH})_3(\text{s})$, sobre la superficie que se está lixiviando. En zonas de potencial oxidante en extremos de acidez se observa la presencia de la especie iónica Au^{3+} , desde este límite se observa la existencia del $\text{Au}(\text{OH})_3(\text{s})$ hasta pH's bastante alcalinos, en extremos alcalinos se observa la presencia del ión $\text{Au}(\text{OH})_5^{2-}$, y finalmente en potenciales más oxidantes se tiene al AuO_2 . Las líneas punteadas describen el campo de estabilidad del agua de acuerdo a:



En la Fig.Nº2 se presenta un diagrama combinado $\log[\text{Me}]\text{-pH}$ y $\log[\text{CN}]\text{-pH}$ para el sistema $\text{Au-CN-H}_2\text{O}$ donde se observa el comportamiento del oro en soluciones de cianuro el cual es fuertemente dependiente.

FIGURA N°2 –DIAGRAMA Log[Au]-pH y log[CN]-pH PARA EL SISTEMA Au-CN-H₂O



2.2 ANÁLISIS TEÓRICO DEL PROCESO PROPUESTO

2.2.1 Conceptos Básicos del Fenómeno de la Adsorción

La adsorción es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material, en contraposición a la absorción, que es un fenómeno de volumen.

En química, la adsorción de una sustancia es su acumulación en una determinada superficie interfacial entre dos fases. El resultado

es la formación de una película líquida o gaseosa en la superficie de un cuerpo sólido o líquido.

Considérese una superficie limpia expuesta a una atmósfera gaseosa. En el interior del material, todos los enlaces químicos (ya sean iónicos, covalentes o metálicos) de los átomos constituyentes están satisfechos. En cambio, por definición la superficie representa una discontinuidad de esos enlaces. Para esos enlaces incompletos, es energéticamente favorable el reaccionar con lo que se encuentre disponible, y por ello se produce de forma espontánea.

La naturaleza exacta del enlace depende de las particularidades de los especímenes implicados, pero el material adsorbido es generalmente clasificado como fisisorbido o quimisorbido.

La cantidad de material que se acumula depende del equilibrio dinámico que se alcanza entre la tasa a la cual el material se adsorbe a la superficie y la tasa a la cual se evapora, y que normalmente dependen de forma importante de la temperatura. Cuanto mayor sea la tasa de adsorción y menor la de desorción, mayor será la fracción de la superficie disponible que será cubierta por material adsorbido en el equilibrio.

Para estos procesos, resultan interesantes materiales con una gran superficie interna, (y por lo tanto poco volumen) ya sea en polvo o granular, como el carbón activo, y llevan asociados otros fenómenos de transporte de material, como el macro transporte y micro transporte de los reactantes.

Termodinámica de la adsorción

La adsorción es el proceso mediante el cual un sólido poroso (a nivel microscópico) es capaz de retener partículas de gas en su superficie tras entrar en contacto con éste.

El adsorbente dispone de nanoporos, lo que se conoce como centros activos, en los que las fuerzas de enlace entre los átomos no están saturadas. Estos centros activos admiten que se instalen moléculas de naturaleza distinta a la suya, procedentes de un gas en contacto con su superficie. La adsorción es un proceso exotérmico y se produce por tanto de manera espontánea si el adsorbente no se encuentra saturado.

La aplicación más importante de la termodinámica de la adsorción es la de calcular los equilibrios de fase entre un sólido adsorbente y una mezcla gaseosa. En este desarrollo, por simplicidad, sólo tomaremos en consideración gases puros (monocomponentes). La base de todo este cálculo son las isothermas de adsorción, las cuales dan la cantidad de gas adsorbido en los nanoporos como

una función de la presión externa (del gas). La termodinámica sólo puede aplicarse a las isothermas de adsorción en el equilibrio. Esto significa que se debe poder llegar a cualquier punto de la curva elevando o disminuyendo la presión; en otras palabras, las curvas de adsorción y desadsorción tienen que coincidir. Esto ocurre sólo si no existe histéresis. La histéresis no se da en poros menores de 2 nm, sin embargo, se observa en poros lo suficientemente grandes como para que en su interior se condense gas para formar líquido.

La isoterma de adsorción para un gas puro es la relación entre la cantidad adsorbida específica n (moles de gas por kilogramo de sólido) y P , la presión exterior de la fase gaseosa. La mayor parte de isothermas se pueden ajustar mediante una ecuación del virial modificada:

$$P(n) = \frac{n}{K} \left[\frac{m}{m-n} \right] e^{[C_1n+C_2n^2+C_3n^3+\dots]} \quad \text{para } n < m \quad (1)$$

donde K es la constante de Henry (el valor de la isoterma de adsorción dn/dP cuando la presión tiende a cero), m la capacidad de saturación del medio sólido (mol kg^{-1}) y C_i son los coeficientes del virial. Normalmente tres coeficientes bastan para ajustar la curva a los datos experimentales.

Nótese que las isothermas han de obtenerse a partir de la interpolación de datos experimentales, aunque existen también

modelos moleculares, al margen de la termodinámica, de los que se pueden obtener teóricamente las propiedades del sistema. La interpolación de las isothermas de adsorción respecto de la temperatura se basa en la ecuación

$$\bar{h} = R \left[\frac{\partial \ln P}{\partial (1/T)} \right]_n \quad (2)$$

donde \bar{h} es la entalpía de adsorción diferencial, negativa porque la adsorción es un proceso exotérmico, como ya hemos comentado. El valor absoluto de \bar{h} se denomina "calor isostérico".

Normalmente la entalpía diferencial se calcula a partir de la ecuación (2) haciendo uso de dos o más isothermas de adsorción. El gran potencial juega un papel fundamental en la termodinámica de la adsorción. Se define como

$$\Omega = F - \sum_i n_i \mu_i = -PV \quad (3)$$

donde F es la energía libre de Helmholtz. Las variables independientes son temperatura, volumen y potencial químico. Para adsorción en un gas puro, el gran potencial se obtiene a partir de la integración de una isoterma:

$$\Omega = -RT \int_0^R \frac{n}{P} dP = -RT \int_0^n \left[\frac{\partial \ln P}{\partial n} \right]_T dn \quad (4)$$

se expresa en J kg^{-1} de adsorbente sólido. El significado físico del gran potencial es la variación de energía libre asociada a la inmersión isotérmica del adsorbente 'virgen' en el volumen del gas.

La entalpía de inmersión H es la integral de la entalpía diferencial:

$$H = \int_0^n \bar{h} dn \quad (5)$$

Al igual que Ω , tiene unidades de J kg^{-1} .

Una vez obtenidas la energía de inmersión (Ω) y la entalpía de inmersión (H), la entropía de inmersión es:

$$S = \frac{H - \Omega}{T} \quad (6)$$

A partir de estas ecuaciones se puede hacer todo el análisis termodinámico en un sistema formado por un adsorbente y un gas. No debemos dejar de tener en cuenta que la determinación de la ecuación (1), de donde hemos derivado todas las demás, se hace a partir de mediciones experimentales.

Fisorción

La fisorción es la forma más simple de adsorción, y es debida a débiles fuerzas atractivas, generalmente fuerzas de Van der Waals (véase fuerzas dispersivas). Dado que estas fuerzas son omnipresentes, resulta que rápidamente cualquier superficie limpia expuesta al ambiente acumula una capa de material fisorbido.

Quimisorción

La quimisorción ocurre cuando un enlace químico, definido en este caso como un intercambio de electrones, se forma. El grado de intercambio y lo simétrico que sea dependen de los materiales involucrados. A menudo hay un paralelismo con las situaciones encontradas en química de coordinación. La quimisorción es particularmente importante en la catálisis heterogénea, la forma más común en la industria, donde un catalizador sólido interacciona con un flujo gaseoso, el reactante o los reactantes, en lo que se denomina reacción en lecho fluido. La adsorción del reactante por la superficie del catalizador crea un enlace químico, alterando la densidad electrónica alrededor de la molécula reactante y permitiendo reacciones que normalmente no se producirían en otras circunstancias. La corrosión es un ejemplo de ello.

Aplicaciones

Una de las aplicaciones más conocidas de la adsorción en el mundo industrial, es la extracción de humedad del aire comprimido.

Se consigue haciendo pasar el aire comprimido a través de un lecho de alumina activa u otros materiales con efecto de adsorción a la molécula de agua. La saturación del lecho se consigue sometiendo a presión el gas o aire, así la molécula de aire es adsorbida por la molécula del lecho, hasta su saturación. La regeneración del lecho, se consigue soltando al exterior este aire comprimido y haciendo pasar una corriente de aire presecado a través del lecho.

Lo habitual es encontrar secadores de adsorción en forma de dos columnas y mientras una adsorbe, la otra es regenerada por el mismo aire seco de la columna anterior. Este sistema se conoce como "pressure spring" o PSA.

2.2.2 Adsorción por carbón activado

La adsorción es un proceso por el cual moléculas de impurezas se adhieren a la superficie del carbón activado. La adherencia es gobernada por una atracción electro-química. El carbón activado es preparado a partir de diversos materiales, tales como, carbón, madera, cáscaras de nueces, turba y petróleo. El carbón se transforma en "activado" cuando es calentado a altas temperaturas (800 a 1000°C) en la ausencia de oxígeno. El resultado es la creación de millones de poros microscópicos en la superficie del carbón. Esta enorme cantidad de área superficial proporciona grandes

oportunidades para que tenga lugar el proceso de adsorción. El carbón activado tiene una fuerte atracción adsorptiva para otras moléculas (orgánicas) basadas en el carbono, y es excelente en retener firmemente moléculas más pesadas tales como compuestos orgánicos aromáticos (aquellos que pueden ser oídos).

La adsorción es un proceso donde un sólido se utiliza para eliminar una sustancia soluble del agua. En este proceso el carbón activo es el sólido. El carbón activo se produce específicamente para alcanzar una superficie interna muy grande (entre 500 - 1500 m² /g). Esta superficie interna grande hace que el carbón tenga una adsorción ideal. El carbón activo viene en dos variaciones: Carbón activado en polvo (PAC) y carbón activado granular (GAC). La versión de GAC se utiliza sobre todo en el tratamiento de aguas, puede fijar las siguientes sustancias solubles por adsorción:

- Adsorción de sustancias no polares como:
 - Aceite mineral
 - BTEX
 - Poli-hidrocarburos aromáticos (PACs)
 - (Cloruro) Fenol
- Adsorción de sustancias halogenadas: I, Br, Cl, H y F
- Olor
- Sabor
- Levaduras

- Varios productos de fermentación
- Sustancias no polares (no solubles en agua)

Descripción de la adsorción

Las moléculas en fase de gas o de líquido serán unidas físicamente a una superficie, en este caso la superficie es de carbón activo. El proceso de la adsorción ocurre en tres pasos:

- Macro transporte: Movimiento del material orgánico a través del sistema de macro-poros del carbón activo (macro-poros > 50nm).
- Micro transporte: Movimiento del material orgánico a través del sistema de micro-poros del carbón activo (microporo < 2nm; meso-poro 2-50nm).
- Adsorción: Adhesión física del material orgánico a la superficie del carbón activo en los meso-poros y micro-poros del carbón activo.

El nivel de actividad de la adsorción depende de la concentración de la sustancia en el agua, la temperatura y la polaridad de la sustancia. Una sustancia polar (= soluble en agua) no puede ser eliminada o es malamente eliminada por el carbón activo, una sustancia no polar puede ser totalmente eliminada por el carbón activo. Cada clase de carbón tiene su propia isoterma de adsorción

y en el campo del tratamiento de aguas esta isoterma viene definida por la función de Freundlich.

Función de Freundlich:

$$\frac{x}{m} = K_f C_e^{1/n}$$

x/m = sustancia adsorbida por gramo de carbón activo

C_e = diferencia de concentración (entre antes y después)

K_f, n = constantes específicas

2.2.3 Consideraciones Teóricas en el Proceso Propuesto

El oro solubilizado durante la cianuración puede ser recuperado por precipitación sobre polvo de zinc (Proceso Merrill – Crowe) o por adsorción en carbón activado. Los metales preciosos (Au, Ag) adsorbidos en carbón activado son extraídos durante una subsecuente etapa usando varias tecnologías tales como la elusión en caliente o desorción a presión con soluciones hidro-alcohólicas antes de la recuperación final por métodos electroquímicos. Sistemas de descargado convencional incluye el uso de relativamente altas temperaturas (90 – 120 °C) y largos tiempos de elusión (12 – 72 h).

En el presente trabajo para determinar la eficiencia del alcohol usado en los procesos de descargado del oro a partir del carbón activado cargado previamente, se propone encontrar una

alternativa interesante para el descargado del oro, el cual puede ser más barato que los sistemas convencionales. En particular, los efectos del tiempo de extracción y de la temperatura sobre la velocidad de desorción es necesario ser investigado, en la presencia de diferentes eluentes hidro – alcohólicos (conteniendo NaOH y no cianuro) Adicionalmente, se propone determinar los datos cinéticos para ajustarlos con un modelo semi empírico de segundo orden y determinar los parámetros para obtener información concerniente a la cinética de la elusión.

2.3 PLANTEAMIENTO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación de los procesos para la recuperación del oro a partir de las soluciones cianuradas es de interés tanto como para la teoría de los procesos tecnológicos y, en particular, para el método de extracción o descargado del oro desde el carbón activado proveniente de los procesos de adsorción partir de las soluciones cargadas del cianuro provenientes del tratamiento de minerales conteniendo oro.

2.3.1 Planteamiento del Problema

Aunque la búsqueda de alternativas ha sido vigorosamente llevado a cabo por décadas el cianuro es aun el agente de extracción elegido en la hidrometalurgia del oro. Esto es debido a una combinación de su disponibilidad, efectividad, economía, un probado nivel de tecnología y una capacidad de uso.

La metalurgia extractiva del oro, empleando la técnica de lixiviación por cianuración, tiene como una de sus rutas el uso del

carbón activado para adsorber el oro en solución, para que más adelante pueda ser reextraído y recuperado por vía electrometalúrgica en forma de cátodos o más corrientemente empleando el método Merrill Crowe que consiste en la precipitación con polvo de zinc.

El proceso convencional de recuperación del oro a partir del carbón activado cargado es el empleo del método Zadra que consiste en la desorción del oro empleando soluciones de NaOH, o también se emplean métodos usando nuevamente soluciones cianuradas. En estos casos el problema radica en el uso de altas temperaturas, que implica mayores costos o en el caso del uso de cianuro tiene implicancias ambientales.

En tal sentido nos podemos plantear la siguiente interrogante:

¿Se podrá mejorar la recuperación del oro a partir de carbón activado cargado empleando soluciones hidro alcohólicas en la planta de cianuración de Laytaruma?

2.3.2 Hipótesis

Se mejorará la recuperación del oro a partir de carbón activado cargado empleando soluciones hidro alcohólicas en la planta de cianuración de Laytaruma

VARIABLES:

VARIABLES INDEPENDIENTES:

- Reactivos desorbedores (alcoholes)
- Dosificación de reactivos
- Tiempo de reacción

- Temperatura de operación

VARIABLE DEPENDIENTE

- Porcentaje de oro desorbido

CAPITULO III

ASPECTOS DE LA INVESTIGACIÓN

En este tercer capítulo de la tesis, se desarrolla la parte fundamental del estudio que considera las características actuales de operación y la metodología de investigación empleada, el aspecto experimental y la discusión de los resultados.

3.1 Características de la Planta

La planta tiene una capacidad de 80 TM/día, procesando una cabeza que tiene entre 10 y 15 gr Au/TM. Donde se obtienen aproximadamente 40 kg de bullion de oro con una ley de 90% Au.

El mineral que proviene de diferentes minas aledañas como Nazca, Aurífera Yuri, Puquio, etc. se caracterizan por contener sulfuros (piritas auríferas) y principalmente óxidos. Todos los propietarios de mineral que desean procesar alquilan ésta planta, para esto almacenan su carga en

una cancha de recepción de minerales, cuyo piso es de cemento y tiene una capacidad de almacenamiento de aproximadamente 300 TM para apilados de poca altura.

El movimiento de mineral en el circuito de chancado y clasificación es realizado en forma manual, para tal efecto se cuentan con dos chancadoras de quijada de 9"x12" y 8"x10", se emplea una zaranda estática, el transporte se realiza con carretillas, alimentándose un tamaño de $\frac{3}{4}$ " y el set de descarga esperado es de $\frac{1}{4}$ ".

El circuito de molienda comienza con la tolva de finos que tiene una capacidad de 25 TM, de aquí el mineral fino es molido en dos circuitos en paralelo comenzando en dos molinos 5'x5' y de 4'x5', en este caso para alimentar se emplean fajas de 9" de ancho. El producto de esta primera etapa de molienda se envían a dos cajas de distribución de pulpa que alimenta al sistema de cicloneo, para tal efecto se emplean dos ciclones de 4" de diámetro, el underflow de ambos pasa a dos molinos de 4'x5'.

El circuito de lixiviación comienza con una zaranda vibratoria de limpieza de 1 m x 0,8 m con malla N°20, al cual ingresa la pulpa molida, cuyo producto de molienda tiene una granulometría de 90% - malla 200. El sistema de lixiviación empleado es el de Carbón en lixiviación (CIL), sistema modificado del carbón en pulpa (CIP), donde el proceso de lixiviación propiamente dicho comienza en el circuito de molienda ya que la solución de cianuro lixivante es adicionada juntamente con el agua

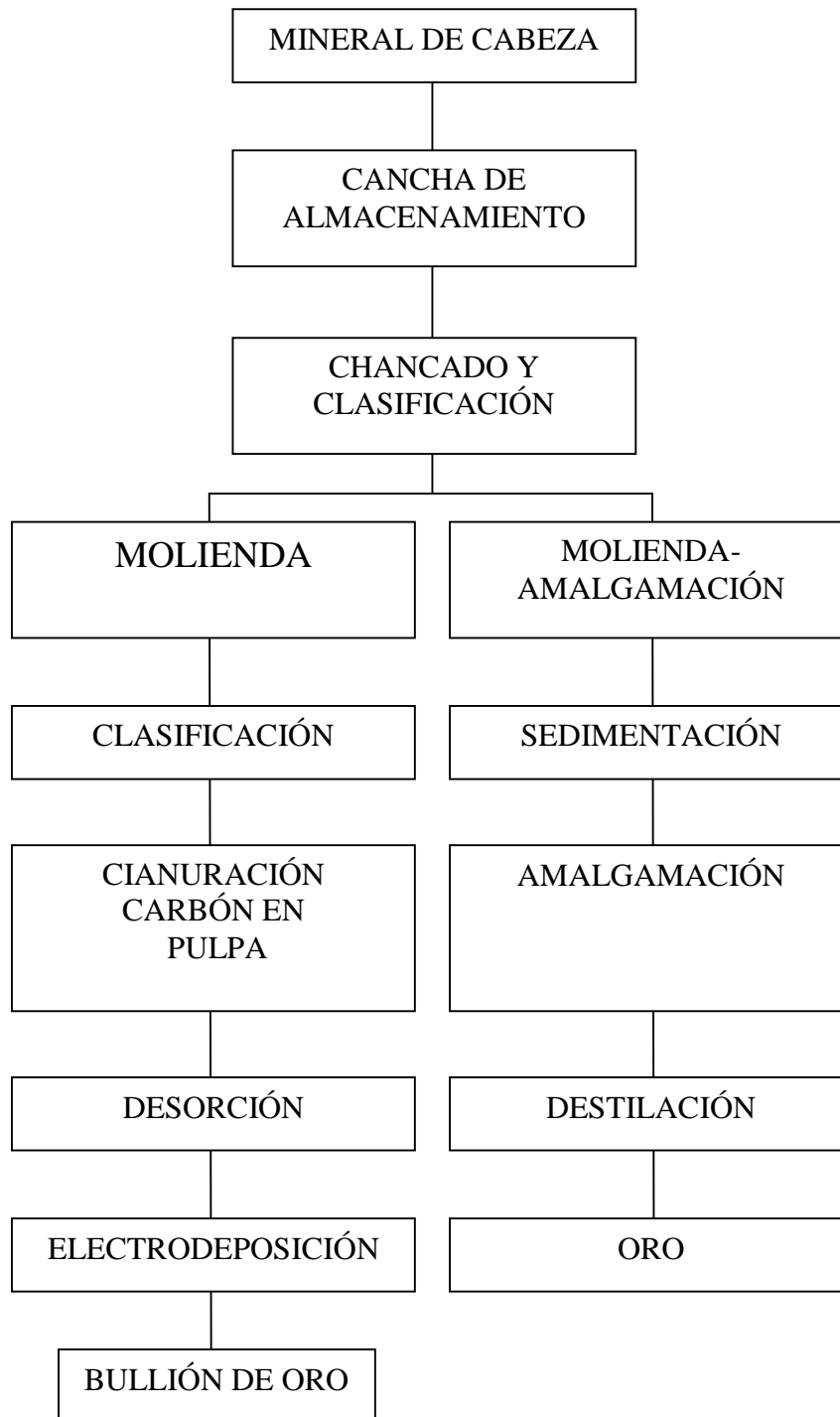
formadora de la pulpa. Este proceso se lleva a cabo en contracorriente para lo cual se cuenta con 11 tanques, 7 de ellos son agitados con mecanismos de hélice y los restantes son pachucas de agitación neumática, sus dimensiones oscilan entre 8'x8' y 14'x14'. El carbón activado fresco ingresa en el último tanque y el carbón cargado o rico sale del primer tanque para su posterior procesamiento. La cosecha se realiza cada 3 ó 4 días, obteniéndose de 3 a 4 g de Au/kg de carbón. La pulpa lixiviada final es enviada a un depósito de residuos de lixiviación, donde se realiza el proceso de decantación y las soluciones clarificadas son recirculadas al proceso.

El carbón activado cargado es procesado en la misma planta. Para tal efecto se cuenta con una columna de desorción, donde el oro se desorbe mediante el proceso ZADRA, en un 95% durante 48 horas. La solución cargada sirve como electrolito para el proceso de electrodeposición, para tal efecto cuentan como cátodo la lana de acero y como ánodo emplean carbón, este proceso se lleva a cabo con 340 Amp y 3 V.

El producto obtenido en la electrólisis es fundido y moldeado, obteniéndose el bullion de oro. Adicionalmente al circuito indicado la planta cuenta con un circuito de amalgamación donde procesan mineral rico de oro, para tal efecto, el mineral triturado a $-1/2''$ se alimenta a 4 molinos de 1,10 m x 0,70 m de diámetro que tiene 100 kg de capacidad cada uno, el cual se muele durante 2 horas a una densidad de pulpa de 1600 g/l con 1 kg de mercurio para dicha carga. Luego del proceso de

amalgamación la pulpa es enviada a pozas de sedimentación para recuperar el mercurio, inclusive el agua es recirculada, otras veces si el mineral tiene buena ley de oro fino que la amalgama no atrapó, la pulpa se envía al circuito de cianuración.

En todo el circuito se cuenta con trampas de recuperación de mercurio.



3.2 PARTE EXPERIMENTAL

El descargado de oro a partir de carbón activado fue llevado a cabo utilizando los siguientes reactivos de grado analítico: etanol, isopropanol, etileno glicol, hidróxido de sodio y agua desmineralizada. El carbón cargado con oro fue obtenido por cargado de carbón de coco a partir de la solución del proceso de cianuración conteniendo 5.55 mg Au/L, el carbón final cargado tuvo 2.56 g Au/kg carbón.

Las pruebas de extracción fueron desarrolladas en un sistema continuo en una columna de vidrio de 50 mL enchaquetado con agua conteniendo 10 g de carbón. Las soluciones de descargado fue bombeado a través del lecho con 10 mL de muestras retiradas durante el proceso. El oro fue recuperado a partir de la solución rica por electrodeposición, y la solución gastada fue reciclada a través del recipiente de descarga , después del precalentamiento.

Todas las pruebas de desorción fueron conducidas usando las siguientes condiciones experimentales: Temperatura: 40 – 60 – 80 °C; 8 h de extracción; pH 12 y un caudal de flujo de 4 mL/min. Pruebas preliminares verificaron que las velocidades de descargado no fueron controlados por abastecimiento de solución.

Las soluciones de descargado usados fueron agua conteniendo 20% v/v de etanol, isopropanol o etileno glicol, se añadió 1% en peso de NaOH, no se

usó cianuro. El error experimental fue estimado en 5% para las pruebas replicadas.

3.2.1 Análisis de datos del proceso de desorción

Los datos de la cinética de descargado fueron modelados con una ecuación de segundo orden tal como se ha reportado en varios trabajos de investigación para el proceso de adsorción. La concentración del oro en la fase carbón (q , mg/g) puede ser descrita por la siguiente ecuación de segundo orden:

$$\frac{dq}{dt} = -k \cdot q_{eq} \cdot \left(\frac{q}{q_{eq}} \right)^2 \quad (1)$$

donde k es una constante cinética (h-1), q_{eq} y q con las concentraciones del oro en el carbón antes y durante el proceso de descargado, respectivamente: q es la concentración de oro a un tiempo seleccionado t (h).

A partir de la ecuación (1), definiendo como X el porcentaje de oro desorbido a partir del carbón activado, es posible obtener:

$$\frac{dX}{dt} = k \cdot (1 - X)^2 \quad (2)$$

donde:

$$X = \frac{q_{eq} - q}{q_{eq}} \quad (3)$$

Integrando la ecuación (2) con condiciones iniciales $t = 0$, $X = 0$, la ecuación siguiente es obtenida:

$$X = \frac{k.t}{1 + k.t} \quad (4)$$

El valor de k puede ser derivado a partir de la ecuación de Arrhenius, tal que el modelo cinético completo puede ser descrito por la siguiente ecuación:

$$X = \frac{k_o . e^{-\frac{E_a}{RT}} . t}{1 + k_o . e^{-\frac{E_a}{RT}} . t} \quad (5)$$

donde k_o (h^{-1}) y E_a (kJ/mol) son el factor de frecuencia y la energía de activación, respectivamente. Estos son estimados durante el ajuste de datos usando análisis de regresión no lineal. La siguiente función objetivo () fue minimizada durante el ajuste de datos:

$$\phi = \sum_{i=1}^n (X_i - X_i^{calc})^2 \quad (6)$$

3.2.2 Regeneración del carbón

Después de la desorción, el carbón fue llevado a la etapa de regeneración por lavado ácido y un subsecuente tratamiento térmico. El lavado ácido para remover los compuestos inorgánicos solubles en ácido fue llevado a cabo en una columna por contactado con una solución con 3% HCl en dos lechos de volúmenes por hora (BV/h) hasta que se observe que el pH del efluente sea 2. La solución en la columna fue drenada. Se bombeó una solución de 1% de carbonato de sodio a través de la columna en un volumen de 2 BV/h hasta que se observe que el pH del efluente sea 10. Dos volúmenes de lechos de agua desionizada a 120 °C entonces fue bombeado a través de la columna. Todas las regeneraciones térmicas fueron conducidas usando un horno de tubo rotatorio de 50 mm calentado externamente, en una temperatura de aproximadamente 600 °C.

3.2.3 Presentación de Resultados

En todos los casos, la presencia del NaOH en la mezcla del solvente fue necesario para alcanzar altas velocidades de desorción y buenas proporciones de desorción; en efecto, experimentos preliminares demostraron que, sin NaOH, la extensión decrece el alrededor 30% Au.

Usando agua caliente/NaOH/NaCN, la cinética de la extracción de oro fue muy lenta: solamente 70% del Au fue recuperado después de 36 h y 78% después de 72 h. Pruebas preliminares con soluciones

hidro-alcohólicas conteniendo 25% y 30% v/v de alcohol presentó evaporación significativa, sin embargo, usando 15% v/v las recuperaciones fueron bajas (70 – 80 % después de 8 h a 80°C).

La Fig. 1 presenta los resultados obtenidos durante el paso de desorción realizado con etanol. La tendencia del proceso demuestra que la extracción producida es mejorada incrementando la temperatura de la solución de descarga. A 80°C, mayor a 95% de oro fue extraído después de 5 h. Las concentraciones de oro en la solución final fue de 5.6 mg/L de Au a 40°C, 12.5 mg/L de Au a 60°C y 15.8 mg/L de Au a 80°C.

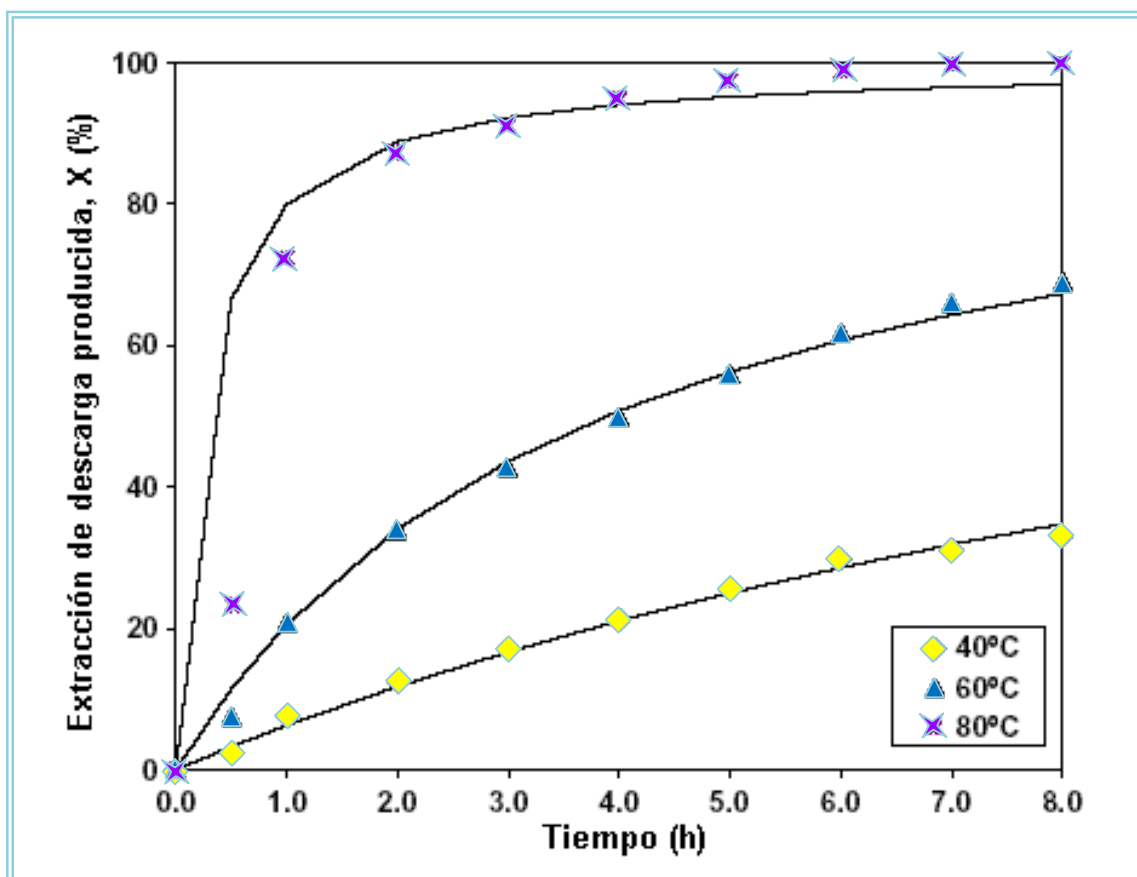


Fig. 1. Elusión del oro por etanol – agua a 40, 60 y 80 °C.

La Fig. 2 presenta los resultados para el isopropanol y nuevamente, la extracción producida fue mejorada con la temperatura. La velocidad de extracción es claramente más rápido que el etanol con más de 98% de oro eluido después de 1 h a 80°C. Al final del proceso de descarga, las concentraciones de oro en solución fue de 14.5 mg/L de Au a 40°C y 21.5 mg/L Au a 60°C, mientras que 37.7 mg/L de Au cuando la temperatura fue seleccionada a 80°C.

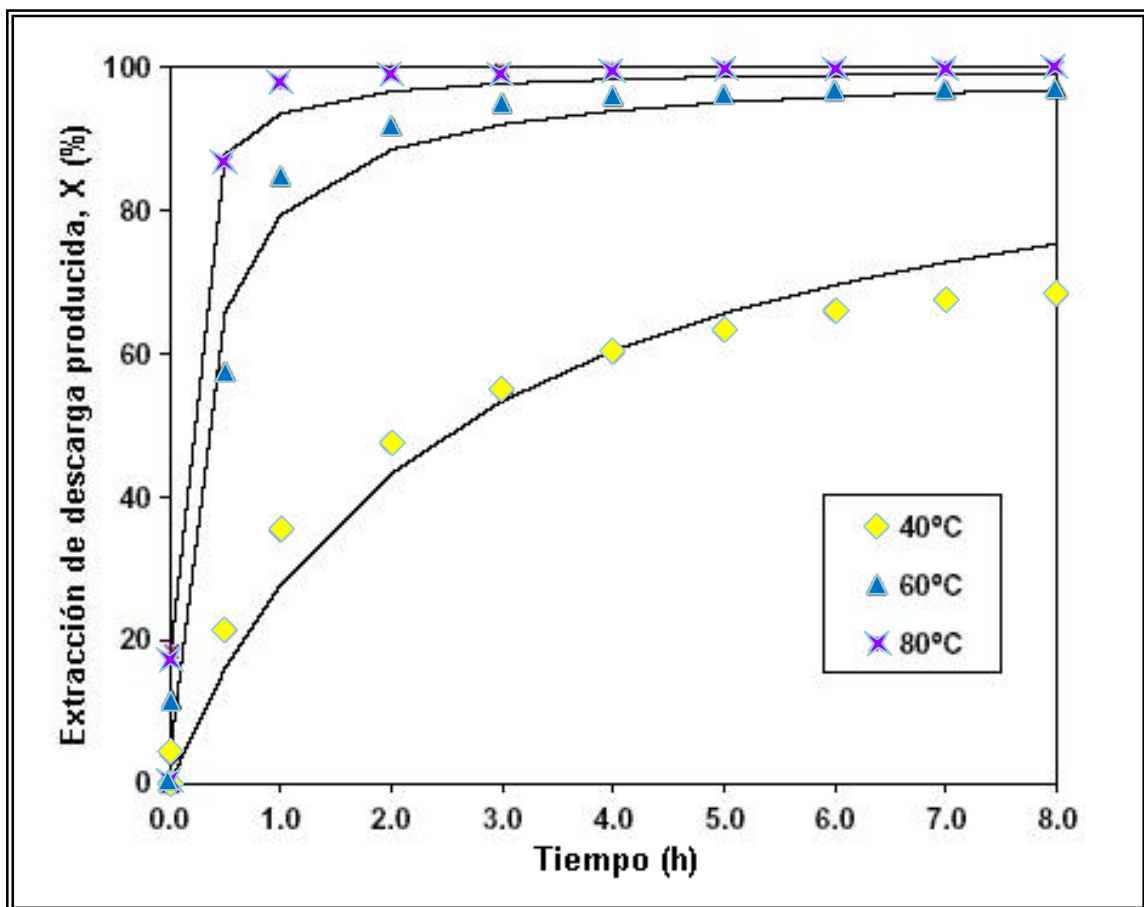


Fig. 2. Elusión del oro por isopropanol – agua a 40, 60 y 80 °C.

El la Fig. 3, se presenta la cinética de descarga con etileno glicol. El resultado más interesante es que cerca de 77% de Au fue extraído después de 8 h de elusión a 40°C. Las concentraciones de oro de las soluciones finales obtenidas después de 8 h de extracción fueron de

16 mg/L de Au a 40°C, 19.4 mg/L de Au a 60°C y 32.8 mg/L de Au a 80°C.

Como se esperó, la temperatura juega un rol positivo sobre la cinética de descarga y estas pruebas cuantificadas explican su comportamiento.

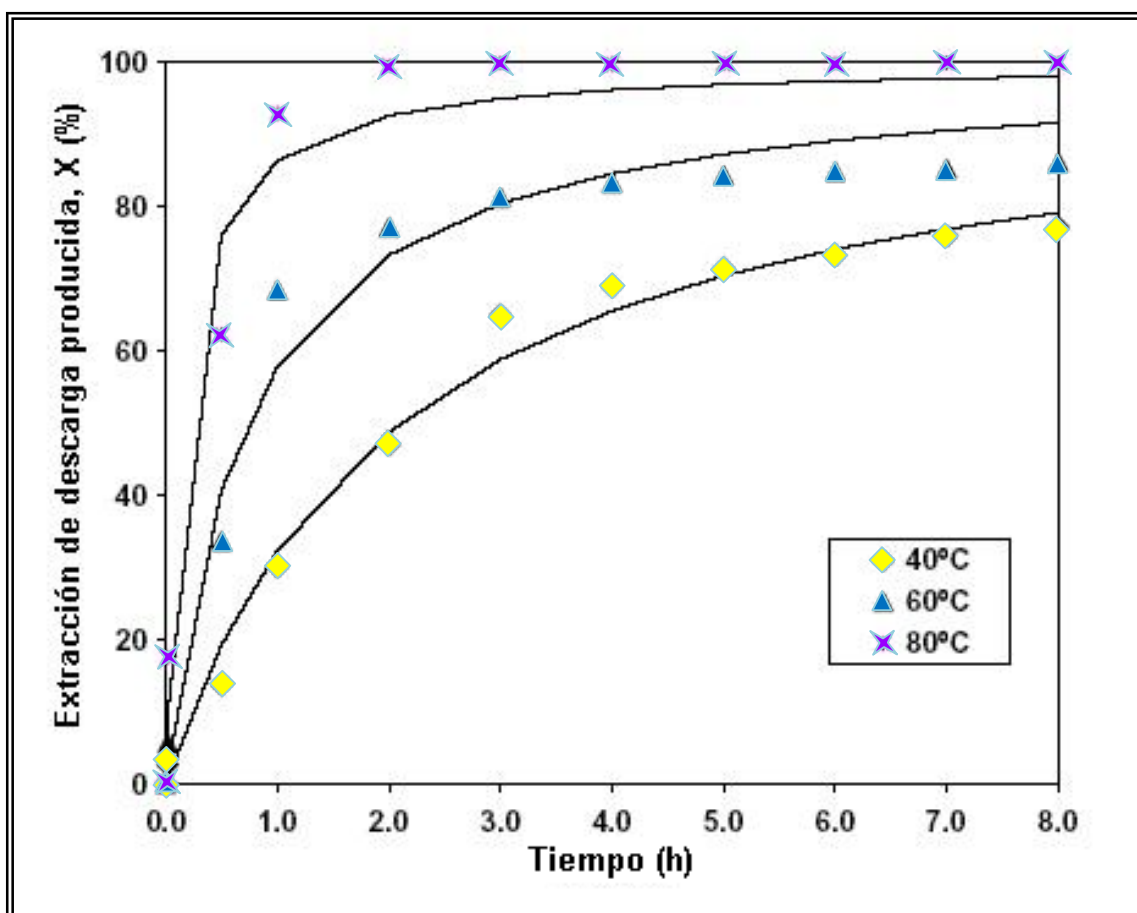


Fig. 3. Elusión del oro por etileno glicol – agua a 40, 60 y 80 °C.

El promedio de la composición química de las soluciones obtenidas después de las completas 8 h de desorción conducidos a 80°C por los diferentes alcoholes es dado en la Tabla 1. Es posible observar que las concentraciones de oro y la plata se incrementan después de

la extracción usando alcohol; en particular, las concentraciones de oro se incrementan de 5.55 mg/L de Au contenido en la solución lixiviada hasta alrededor de 16 mg/L de Au, mientras que las concentraciones de Cu, Zn, Fe y S cayeron hasta pocos mg/L.

Tabla 1

Composición química promedio (mg/L) de la solución final después del proceso de desorción por etanol, por isopropanol y por etileno glicol a 80°C

Elementos	Solución Lixiviada	Soluciones finales		
		Etanol	Isopropanol	Etileno glicol
Au	5.55	15.80	37.70	32.84
Ag	2.70	10.10	22.10	19.10
Cu	0.53 (g/L)	1.33	4.15	3.10
Zn	30	0.27	0.83	0.69
Cr	0.22 (g/L)	<0.10	<0.10	<0.10
Fe	0.15 (g/L)	0.68	2.19	1.68
S	1.69 (g/L)	38.84	63.50	70.40

También cuando el proceso de desorción fue conducido usando el etileno glicol, las concentraciones del oro y la plata se incrementaron después de la extracción (es decir para el oro desde 5.55 mg/L hasta alrededor de 33 mg/L) mientras que las concentraciones del Cu, Zn,

Fe y S decrecieron en sus valores en la solución de descarga. La concentración del oro fue más alta con respecto a las pruebas de descarga con etanol, pero más baja en comparación con el sistema isopropanol. En comparación con la solución original, la concentración del S decrece desde 1.60 g/L de S hasta 38.84 mg/L (por el etanol), hasta 63.50 mg/L (por el isopropanol) y 70.40 mg/L (por el etileno glicol), debido a la purificación con carbón (ver Tabla 1).

Se puede notar que las concentraciones del oro y plata de la solución sería significativamente más alto y los de los otros metales más bajos donde el proceso de desorción se detuvo después que el oro haya sido eluido después de 2 h.

Modelos semi empíricos fueron usados para ajustar los resultados de las pruebas de descarga. Los datos experimentales fueron ajustados por medio de un modelo cinético de primer orden y el modelo cinético de segundo orden descrito matemáticamente por la ecuación (5). Los resultados del modelo de ajuste de primer orden no han sido reportados debido a que ellos no fueron satisfactorios. Preliminarmente los parámetros de estimación desarrollados por medio de la ecuación (4) fueron utilizados como valores iniciales para desarrollar un análisis de regresión no lineal, llevado a cabo usando todos los datos de descarga a diferentes temperaturas para una clase dada de solución de descarga (es decir, etanol, isopropanol y

etileno glicol). La función objetivo (6) fue minimizado, considerando E_a y k_o como parámetros. Los resultados de este análisis de regresión no lineal son reportados en la Tabla 2, junto con los parámetros de errores estándar y el modelo de varianza residual. Se puede observar que los valores estimados para las energías de activación en el caso del etanol y el isopropanol fueron más altos que 80 kJ/mol, mientras que para el caso del etileno glicol la energía de activación estuvo alrededor de 57 kJ/mol. Estos valores indican que la reacción de desorción fue el limitante cinético. No obstante el valor más bajo estimado para el etileno glicol puede estar asociado con la viscosidad más alta del eluente. En efecto, el control cinético de transferencia de masa de la cinética del proceso puede tomar lugar en el caso de sistemas viscosos. Sin embargo, considerando las energías de activación estimadas, la viscosidad de los sistemas probados no es demasiado alta para implicar un control de transferencia de masa.

Las figuras 1 – 3 reportan las eficiencias de extracción de oro experimentales y calculados para los tres sistemas investigados. Estos resultados presentaron que la ecuación (5) es adecuado para describir los resultados de descarga obtenidos en este trabajo. Adicionalmente fue posible observar que los valores estimados para las constantes cinéticas fueron en el siguiente orden:

$$K_{\text{isopropanol}} > K_{\text{etileno glicol}} > K_{\text{etanol}}$$

El isopropanol es el mejor compuesto orgánico para el proceso de descarga del oro considerando los compuestos seleccionados investigados en este trabajo. Se ha presentado, que el isopropanol es el eluyente más efectivo en las condiciones de operación investigadas.

El etileno glicol dio una extracción de oro de 77% de Au después de 8 h, a 40 °C. Este hecho es muy importante, considerando que la mayor desventaja de los procesos donde se involucra a los alcoholes es su capacidad de producir incendios, pero los glicoles son virtualmente no inflamables; adicionalmente, este estudio demuestra que el etileno glicol puede ser usado a bajas temperaturas.

Un ciclo completo de extracción incluye consumos de ~ 0.3 L de alcohol/t de mineral, pero esto puede ser reducido vía el uso de sistemas de recuperación de alcohol, 0.04 kg/t de NaOH son perdidos por evaporación y rociado.

Otros buenos resultados concernientes al alto grado de purificación de la solución obtenida al final del proceso. Este hecho es demostrado a partir de las bajas concentraciones en las soluciones finales. En particular, la concentración del Cu estuvo entre 1.33 y 4.15 mg/L, después de la descarga a 80 °C. Este aspecto es muy

importante para la recuperación final del oro por la subsiguiente etapa de electrodeposición. Las soluciones agotadas contienen solamente alrededor de 0.1 mg/L de Au, después de la etapa de electrodeposición.

Adicionalmente, las pruebas de laboratorio han indicado que la actividad del carbón no es adversamente impactado por la descarga con alcohol. Las pérdidas de carbón fue de 0.1 kg/t de mineral para cada ciclo. Se encontró que el carbón fresco sirve para 6 ciclos de adsorción – desorción antes que se requiera de regeneración.

Tabla 2

Estimación de parámetros de la Eq. (5) para los tres sistemas de elusión investigados

	Etanol	Isopropanol	Etileno glicol
E_a kJ/mol	84±4	90±4	57±3
K_o h ⁻¹	4.6±0.4 10 ¹²	4.3±0.3 10 ¹⁴	1.6±0.1 10 ⁹
S^2_{res}	33.5	16.1	28.2

CONCLUSIONES

1. El análisis de los datos experimentales permitieron desarrollar un modelo adecuado (ecuación (5)) para describir los resultados de la descarga. Este modelo fue derivado a partir de un modelo estándar para la adsorción de metales pesados por la introducción del factor de Arrhenius.
2. Los valores estimados para las constantes cinéticas de la descarga del oro fueron estimados en el siguiente orden de magnitud, en alguna temperatura investigada:

$$K_{\text{isopropanol}} > K_{\text{etileno glicol}} > K_{\text{etanol}}$$

3. El isopropanol fue el mejor compuesto orgánico para el proceso de descarga del oro, considerando los compuestos seleccionados investigados en este trabajo.
4. El proceso permitió 95 – 100% de extracción de oro después de 8 h de desorción a 80 °C. La elusión con el etileno glicol presentó 77% de

eficiencia después de 8 h de elusión a 40 °C, justificando investigaciones adicionales. Concentraciones bajas de metales en la solución final demuestra un alto grado de purificación en las soluciones obtenidas al final del proceso. Las soluciones agotadas (después de la electrodeposición) contienen solamente 0.1 mg/L de oro.

5. El ciclo completo de extracción incluye un bajo consumo de alcohol (0.3 L/t de mineral), NaOH (0.04 kg/t), carbón (0.1 kg/t de mineral para cada ciclo de adsorción – desorción).

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda continuar pruebas de esta naturaleza en tal sentido se deben de realizar trabajos experimentales adicionales para el proceso de escalamiento.
2. En particular, durante las siguientes fases de estudio, adsorción – desorción, regeneración del carbón y electrodeposición debe ser llevado a cabo en operación continua.
3. Se debe de implementar un estudio de ingeniería económica adicional de tal forma que los datos técnico – económicos logrados permitan la evaluación para aplicaciones a escala comercial para el proceso estudiado

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. CEPECT, "El Oro", Cepect-Concytec, Lima, 1990.
2. CYANAMID; "Manual De Productos Químicos Para La Minería", Edición Comercial, México, 1988.
3. DANA, HULBURT; "Manual De Mineralogía", Editorial Reverté, S.A., Barcelona, España, 1965
4. HAUNG, H. H., TWIDWEL, L. G. Y MILLER, J. D.; "Hidrometalurgia" TOMOS I y II (Trad. Luis y Juan Chia A.) Ed. Popular. Lima.
5. HEINEN, H. J.; PETERSON, D. G.; LINDSTROM, R. E. "Processing Gold Ores Using Heap Leach-Carbon Adsorption Methods", US Bureau of Mines, Information Circular 8770, 1978.
6. MISARI CH., FIDEL; "Metalurgia del Oro", CEPECT, Lima - Perú, 1993, Tomo I y II.
7. MISARI CH., FIDEL; "Metalurgia Del Oro", CEPECT, Lima - Perú, 1993, Tomo I y II

8. MUNDO MINERO, "Oro, Tratamiento De Los Minerales De Oro" Separata del Periódico Mundo Minero, Lima, Perú.
9. NAGY, I.; MRKUSIC, P.; McCULLOCH, H.W. "Tratamiento Químico de Menas Refractarias de Oro", NIM RANDBURG, SOUTH AFRICA, 1966
10. POTTER, G.M.; BHAPPU, R.B.; "La Química de la Recuperación de Oro y Plata a Partir de Recursos Naturales" en Process and Fundamental Considerations of Selected Hydrometallurgical Systems, Martin C.Kuhn; SME-AIME, New York, 1981, pp27-35.
11. ROSENQVIST, T. "Fundamentos De Metalurgia Extractiva", Centro Regional de Ayuda Técnica (AID), México, 1987
12. SOHN, H.Y.; WADSWORTH, M.E. "Cinética de los Procesos de la Metalurgia Extractiva", Editorial TRILLAS, México, 1986.
13. XUE, T. y OSSEO-ASARE, K.; "Equilibrio Heterogéneo en los Sistemas Au-CN-H₂O y Ag-CN-H₂O" Metallurgical Transactions B; Volume 16B; Setiembre 1985; pp455-463.
14. YOPLAC, E.; PERALES, O. "Tratamiento del Oro Refractario", Revista MINAS, Universidad Nacional de Ingeniería, N°5, Lima, Agosto – Octubre 1996.