



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA Y QUÍMICA

**PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA LA
DESORCIÓN DEL NÍQUEL, HIERRO Y COBRE
PRESENTES EN EL CARBÓN ACTIVADO QUE
ACTÚAN COMO IMPUREZAS, EMPRESA ORO
DESCANSO**

Tesis en opción al Título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales

MANUEL ALBERTO GARCÍA CABRERA

Moa, 2018
“Año 60 de la Revolución”



**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO**

“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”

FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA

DEPARTAMENTO DE METALURGIA Y QUÍMICA

**PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA LA
DESORCIÓN DEL NÍQUEL, HIERRO Y COBRE
PRESENTES EN EL CARBÓN ACTIVADO QUE
ACTÚAN COMO IMPUREZAS, EMPRESA ORO
DESCANSO**

Tesis en opción al Título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales

Autor: Manuel Alberto García Cabrera

Firma: _____

Tutores: Ms. C. Isidro Javier Cachandora Francisco

Firma: _____

Dr. C. Eulicer Fernández Maresma

Firma: _____

Ms. C. Carmen Hernández Fernández

Firma: _____

**Moa, 2018
“Año 60 de la Revolución”**



DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Manuel Alberto García Cabrera

Autor del Trabajo de Diploma Propuesta tecnológica para la desorción del níquel y otros cianicidas presentes en carbón activado que actúan como impurezas impidiendo la adsorción del oro en la Empresa Oro Descanso, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Manuel Alberto García Cabrera

Dr. C. Eulicer Fernández Maresma

Ms.C. Isidro Javier Cachandora Francisco

Ms.C. Carmen Hernández Fernández

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado en primer lugar a Dios que estuvo presente en todos los buenos y malos momentos de mi período de estudiante, a mis padres Manuel García Gonzales y Nilda Cabrera Cabrera que dieron todo lo que estuvo a su alcance para hacer posible mi formación como profesional, dándome sus fuerzas para seguir luchando cuando ya las mías se habían agotado y a mi novia Elianis Estupiñán Suarez quien fue mi principal apoyo en la universidad.

AGRADECIMIENTO

Agradezco de forma sincera la colaboración de todos aquellos que han contribuido a la realización de este trabajo, en especial:

- A mis tutores Javier Cachandora y Eulicer Fernández Maresma .
- A mis sobrinas Nayalis García Cabrera, Helen Nerey García y demás sobrinas.
- A mi abuela Clara Eliovigilda Gonzales.
- A mis hermanas Yanuska García Cabrera y Yanaice García Cabrera.
- A mis suegros Isnelvis Suarez, Miguel Estupiñán y mi cuñado Héctor Miguel Estupiñán.
- A todos mis compañeros del aula y de la beca, en especial a Felipe, Julio, Yurixander, Serguey, Héctor y Víctor, en fin, a toda persona que me ayudó de alguna manera a que fuera posible mi formación como ingeniero. Agradezco.

PENSAMIENTO

“Para lograr el éxito, tu deseo de ganar debe ser mayor que tu miedo al fracaso”

Bill Cosby

RESUMEN

En esta tesis se realiza la desorción de los cianicidas de níquel, hierro y cobre presentes en el carbón activado (CA) que actúan como impurezas en este, impidiendo la adsorción del oro, se plantea un experimento factorial completo de dos niveles y tres factores utilizando ácido clorhídrico, ácido sulfúrico y ácido nítrico con el fin de comparar y elegir el mejor resultado en cuanto a la desorción de los cianicidas de níquel, hierro y cobre. Los resultados de los experimentos mostraron que el ácido clorhídrico a un tiempo de tres horas, una concentración del 10 % y una temperatura de 70 °C presenta la mayor desorción de níquel, hierro y cobre de todos los experimentos realizados, obteniéndose una desorción de níquel contenido en el carbón del 82 % con respecto al contenido inicial, la desorción del hierro fue del 87 %, la del cobre de un 50 % y no se reportaron pérdidas de oro en el licor ácido, al realizar el balance de masa para 480 kg de carbón activado se logró una desorción en masa de níquel - 2 185 g inicial a 493 g final, hierro - 1 548 g inicial a 240 g final y cobre - 39 g inicial a 38 g final, lo que muestra la mayor eficiencia del ácido clorhídrico en el proceso de reactivación química del carbón activado.

Palabras claves:

Carbón activado, cobre, hierro, níquel, reactivación química, oro.

ABSTRACT

In this thesis desorption of nickel, iron and copper cyanicides present in activated carbon (CA) that act as impurities in it, preventing the adsorption of gold, a complete factorial experiment of two levels and three factors using hydrochloric acid, sulfuric acid and nitric acid in order to compare and choose the best result regarding the desorption of cyanicides of nickel, iron and copper. The results of the experiments showed that the hydrochloric acid at a time of three hours, a concentration of 10 % and a temperature of 70 °C showed the highest desorption of nickel, iron and copper of all the experiments carried out, obtaining a content of nickel desorption. in the coal of 82 % with respect to the initial content, iron desorption was 87 %, copper desorption 50 % and no losses of gold were reported in the acid liquor, when carrying out the mass balance for 480 kg of Activated carbon was achieved a desorption by mass of nickel - 2 185 g initial to 493 g final, iron - 1 548 g initial to 240 g final and copper - 39 g initial to 38 g final, which shows the highest efficiency of hydrochloric acid in the process of chemical reactivation of activated carbon.

Key Words:

Activated carbon, chemical reactivation, copper, gold, iron, nickel.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO	5
1.1 Historia del oro	5
1.1.1 Breve reseña de la historia del oro en Cuba	6
1.1.1.1 Período colonial (1511-1898)	7
1.1.1.2 Período neocolonial (1902-1958)	7
1.1.1.3 Período revolucionario (1959-2009)	7
1.2 Producción de oro a nivel mundial	9
1.3 Presencia del oro en la naturaleza	9
1.4 Tecnologías de extracción de oro	9
Fundamentos teóricos del proceso de cianuración	9
1.4.1 Métodos gravimétricos	10
1.4.2 Lixiviación en pilas (Merril-Crowe)	11
1.4.3 Lixiviación en reactores	11
1.4.3.1 Carbón en pulpa (CIP)	12
1.4.3.2 Carbón en lixiviación (CIL)	12
1.4.3.3 Carbón en columna (CIC)	12
1.5 Generalidades del carbón activado (CA)	13
1.5.1 Fundamento de activación	14
1.5.2 Propiedades del carbón activado	16
1.5.3 Materias primas	16
1.5.4 Cinética del fenómeno de adsorción de oro en carbón activado	17
1.5.5 Especificaciones de calidad y reactivación de carbón activado	18
1.5.6 Reactivación del carbón activado	20
1.6 Estado del arte	21
1.6.1 Antecedentes en Cuba	21
1.6.2 Antecedentes en el mundo	22
CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS	26
2.1 Materiales	26
2.2 Reactivos	27
2.3. Equipamiento	27

2.4 Metodología	28
2.5 Tipo de muestra	28
2.6 Composición de las muestras iniciales	28
2.7 Tipo de investigación	29
2.8 Flujo del proceso desde la toma y preparación de la muestra hasta la obtención del resultado final	29
2.8.1 Procedimiento para la toma y homogeneización de las muestras	30
2.8.1.1 Toma de las muestras	30
2.8.1.2 Homogeneización de las muestras	30
2.8.2 Preparación de las muestras	32
2.8.3 Preparación de reactivo	32
2.8.4 Filtración de las muestras	33
2.8.5 Absorción atómica	33
2.8.6 Calcinación del carbón activado lavado	34
2.8.7 Digestión ácida	34
2.8.8 Metodología de realización de los análisis	35
2.8.9 Espectrometría de absorción atómica (EAA)	36
2.8.10 Diseño de los experimentos	37
2.9 Balance de masa del reactor de lavado ácido	38
CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	40
3.1 Prueba de desorción	40
3.1.1 Prueba de desorción con ácido clorhídrico (HCL)	40
3.1.1.1 Análisis de la concentración de metales en el carbón, después del lavado con ácido clorhídrico (HCl)	40
3.1.1.2 Resultados de la concentración de metales desorbidos del carbón producto del lavado con ácido clorhídrico (HCl)	41
3.1.2 Prueba de desorción con ácido nítrico (HNO ₃)	43
3.1.2.1 Análisis de la concentración de metales en el carbón después del lavado con ácido nítrico (HNO ₃)	43
3.1.2.2 Análisis de la concentración de metales desorbidos del carbón producto del lavado con ácido nítrico (HNO ₃)	44
3.1.3 Prueba de desorción con ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)	46
3.1.3.1 Análisis de la concentración de metales en el carbón después del lavado con ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)	46

3.1.3.2 Análisis de la concentración de metales desorbidos del carbón activado producto del lavado con ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)	47
3.2 Interpretación de los resultados	49
3.3 Ensayos exploratorios	50
3.3.1 Análisis de los metales presentes en el carbón	50
3.3.2 Análisis de la concentración de metales desorbidos del carbón activado..	51
3.4 Prueba de desorción con H ₂ O (blanco).....	52
3.5.1 Análisis de metales presente en el carbón activado	53
3.5.2 Análisis de metales desorbidos del carbón activado.....	53
3.6 Determinación de la prueba con mayor eficiencia para el lavado ácido.....	53
3.7 Balance de masa del reactor del lavado ácido.....	54
3.8 Ubicación de la torre de lavado ácido	57
3.9 Valoración ecológica.....	57
CONCLUSIONES.....	59
RECOMENDACIONES	60
BIBLIOGRAFÍA	61
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

El yacimiento Oro Descanso, ubicado en la zona de Guaracabulla, en el municipio de Placetas, provincia de Villa Clara, están constituidas por rocas Serpentino-Carbonatadas, emplazado en el terreno ofiolítico de Cuba Central, el cual fue descubierto en la segunda mitad del siglo XIX, siendo objeto de explotaciones esporádicas hasta su cierre definitivo en 1960 (Frías, 2010).

Durante el período 1986-1999 fueron desarrolladas investigaciones tecnológicas por el Centro de Investigaciones para la Industria Minero-Metalúrgica (CIPIMM) donde se procesaron y caracterizaron diferentes muestras del yacimiento tomadas durante la investigación geológica, con el objetivo de valorar la posible explotación del yacimiento dentro del macizo rocoso en tres sentidos: hacia la profundidad, los flancos y las zonas que quedaron inconclusas de los antiguos laboreos mineros. Los resultados de esta investigación corroboraron la presencia de oro en todos los casos (Frías, 2010).

- Mineralogía de la zona:

Las menas de este yacimiento serpentino-carbonáticas que se diferencian de las ultramafitas serpentinizadas y serpentinitas. Como regla de minerales meníferos no ocupan más de 8-9 % del volumen de la roca. Dichas menas están constituidas por más de 20 minerales meníferos y más de 10 minerales no metálicos (Frías, 2010).

Los principales minerales presentes son: el oro nativo, que es el metal principal de la mena, presenta una distribución irregular, se asocia con la arsenopirita, entrecrecido a veces con esta, desgastándola y sustituyéndolo. También se desarrolla en asociación con otros sulfuros de generaciones anteriores, y el electrum que se encuentra más raramente que el oro nativo y está entrecrecido con la galenita (Frías, 2010).

Existen otros minerales metálicos presentes en la mena, pero estos se presentan en muy poca cantidad, tales como: Cuproaurita, Galenita, Altaíta, Calaverita, Petzita, Calcopirita, Troilita, Pentlandita, Pirrotina, Cobaltina, Esfalerita, Calcosina, Covelina, etc. La Magnetita aparece en formas de secreciones finas diseminadas en Lizardita y el Criotilo. La ilmenita forma en las rocas alteradas agregados esqueléticos constituidos por secreciones aciculares muy finas. La zona de mineralización oro-

arseno-sulfuros coincide con determinados tipos de rocas serpentina-carbonáticas las cuales responden al concepto de Listvenitas carbonáticas, contendoras de oro (Frías, 2010).

En la tabla 1 se observa la confirmación de la presencia de oro, en la cual se realizó la caracterización química de la muestra tecnológica (MTD-09) (Frías, 2010).

Tabla 1 Caracterización química de la muestra compósito (MTD-09)

MTD 09	Au (g/t)	Ag (g/t)	(%)											
			Ni	St	Cu	Pb	Zn	As	Sb	Fe	CaO	MgO	Al	SiO ₂
	36-41	15.37	0,1	0,6	0.01	0,2	0.01	0,67	0,3	7.68	6,2	28,3	2,9	31,6

La planta Oro-Descanso emplazada en las áreas de la antigua Empresa de Productora de Armaduras Ópticas (EPAO), en la zona suburbana al sur de la ciudad de Placetas, conocida como, Cumbre, comienza sus operaciones un 19 de mayo de 2012. Durante el tiempo de garantía del equipamiento industrial fueron apareciendo varios problemas técnicos, que fueron debidamente analizados y solucionándose en su gran mayoría, otros permanecieron, los cuales el personal técnico de la planta le ha dado solución de forma paulatina.

Los volúmenes de extracción de mineral, no fueron los estimados debido a que la geología de la mina aportaba resultados diferentes, a medida que se avanzaba en cualquier dirección, esto hizo que el laboreo minero tuviera que cambiar de método, extrayendo mayor cantidad mineral, por lo que se incrementó el factor dilución, es decir, valores de la ley de oro muy por debajo de lo estudiado (12 g/t) y ascenso de las cantidades de la roca encajante (serpentina).

A partir de 2013 aparecen anomalías en el consumo de cianuro en el proceso de lixiviación, en 2014 el incremento del consumo de cianuro aumenta, unido a un consumo de hipoclorito de sodio mayor que el utilizado en el tratamiento de los residuales de la planta, como método aplicado para destruir el cianuro residual, mostrando cantidades muy apreciables de níquel, hierro y cobre formando compuestos con el cianuro y adsorbidos en el carbón activado. La situación se hace crítica desde 2015, aumentando en 2016 y 2017, donde la eficiencia metalúrgica cae a valores muy

bajos para esta tecnología en el orden del 57 al 65 % y ocurren paradas en la planta por envenenamiento en el sistema pulpa-carbón por elevados contenidos de níquel que impedía la adsorción del oro y la plata por el carbón. Ante esta compleja situación se decide trabajar en los siguientes aspectos:

- Hacer una nueva caracterización del mineral que no formó parte de la muestra del estudio inicial.
- Trabajar en la propuesta de cambios tecnológicos que mejorarían los principales parámetros metalúrgicos, los que disminuyen la influencia tan negativa del níquel como cianida.
- Tener variantes de tratamiento de residual acorde al proceso, que fueran totalmente integrales.

De lo anterior surge el problema científico, hipótesis y objetivos de este trabajo de diploma que son:

Problema científico:

La presencia de los cianidas de níquel, hierro y cobre en el proceso metalúrgico de obtención de oro dificulta el proceso de lixiviación-adsorción, conllevando a altos costos de operación y baja eficiencia metalúrgica.

Objeto de estudio:

Lavado ácido del carbón activado para la desorción del níquel, hierro y cobre.

Campo de acción:

Proceso de desorción del oro y otros cianidas en el carbón activado.

Objetivo general:

Evaluar el proceso de lavado ácido o reactivación química del carbón.

Objetivos específicos:

- Establecer la técnica adecuada para la reactivación química de carbón activado con parámetros de control de: tiempo de residencia, concentración y temperatura de la solución ácida, a fin de obtener un carbón activado libre de adsorbatos no deseados.
- Comparar cuál de los reactivos químicos (Ácido Clorhídrico, Ácido Nítrico y Ácido Sulfúrico) es más eficiente a la hora eliminar adsorbatos no deseados presentes en el carbón activado, con el fin de elegir el que muestre mejores resultados.
- Realizar un balance material del reactor de lavado ácido, para determinar su eficiencia.
- Realiza una valoración ecológica del proceso.

Hipótesis:

Realizando cambios tecnológicos e introduciendo nuevas operaciones de lavado ácido, se minimizará el efecto negativo del níquel, hierro y cobre, recuperando la eficiencia metalúrgica de adsorción de oro a valores del proyecto.

CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO

En este capítulo se realiza la fundamentación teórica relacionada con la historia del oro en Cuba y en el mundo, así como los métodos de procesamiento y obtención del mismo, profundizando en la lixiviación con cianuro mediante el método de carbón en lixiviación, se fundamenta lo relacionado con el carbón activado, enfatizando en su utilización en la metalurgia del oro y la reactivación química del mismo.

1.1 Historia del oro

En el antiguo Egipto para la obtención del oro utilizaban el lavado en canaletas primitivas recubiertas fundamentalmente con cuero de animales para retener los granos de oro, el cual se fundía e incluso se refinaba en crisoles. Durante la edad media apenas hubo progresos significativos en la producción y extracción del oro. Influyeron en ello la ausencia de oro nativo grueso, y la inclinación del comercio al intercambio o trueque de productos naturales y artesanales, proliferaban en esa época los alquimistas, quienes buscaban la forma de transformar en oro otros materiales y metales conocidos, muchas personas tenían la creencia que existía un solo metal, el oro, y que los demás como el cobre y el plomo, era el oro cargado con diferentes grados de impurezas. La época del renacimiento del siglo XIV al XVI se caracteriza por el perfeccionamiento en los métodos de extracción de oro. Así fueron creados equipamientos para el lavado hidráulico de los minerales que contenían oro libre, se introduce la molienda húmeda, con el posterior lavado y aparece la amalgamación, aumentando la producción de oro y adquiriendo este un mayor valor monetario. En el siglo XVI, el valor de las reservas de oro en Europa apenas alcanzaba la cifra de 225 millones de dólares. Con el descubrimiento de América, y hasta comienzos del siglo XIX, la producción mundial alcanzó unos 4 665 000 kg (unos 150 millones de onzas troy). América del Sur y México se convirtieron en ese período en grandes productores. La afluencia de oro y plata transformó la economía del viejo continente, el metal precioso se convirtió en un instrumento político. En el siglo XVI la producción de México llegó a alcanzar el 9 % del total de la producción mundial. A partir del siglo XIX, se descubrieron nuevos yacimientos: California (Estados Unidos) en 1848, Australia en 1851 y Transvaal (República de Sudáfrica) en 1886. La invención de la máquina de vapor, la revolución industrial y el desarrollo de las formas capitalistas de

producción en el siglo XIX, provocaron un crecimiento acelerado en la producción industrial y el transporte, la mecanización permitió procesar los yacimientos de oro antes considerados no explotables, aparecieron fábricas de amalgamación, se procesaron los minerales sulfurosos mediante los métodos de calcinación o tostación y la lixiviación por cloración. La desaparición casi total de los yacimientos de oro libre y el descubrimiento de complejos yacimientos de oro asociado con otros minerales requería de nuevos y más efectivos métodos de extracción de oro, así en Europa comenzaron las investigaciones para lograr la disolución del oro en una solución cianurada en presencia del oxígeno a finales del siglo XIX. El proceso hidrometalúrgico para el tratamiento de minerales auríferos, consistente en la lixiviación con cianuro, seguida de una separación sólido-líquido y la cementación con polvo de zinc para recuperar el oro del licor lixiviado, permaneció inalterado durante los primeros 70 años del siglo XX. En la década de 1970, se demostró que el oro y la plata podían ser recuperados directamente de la pulpa cianurada sobre gránulos de carbón activado, ya en la década de 1980 casi la totalidad de la industria minera aurífera del mundo se desarrollaba mediante el proceso de carbón activado. En los finales del siglo pasado y en lo que va del actual, se han estudiado otros procesos alternativos de extracción de oro como son, procesos con resinas e intercambio iónico, la bio-metalurgia y otros que serán tratados en este material (Lobaina, 2007).

1.1.1 Breve reseña de la historia del oro en Cuba

La minería del oro en Cuba estuvo estrechamente ligada a la conquista de España y fue practicada en sus inicios por los aborígenes de la isla. La misma se caracterizó por ser recolectora, razón por la cual Calvache-Dorado (1944) la denominó “Minería Taína”; posteriormente, debido a los descubrimientos arqueológicos, se le denominó “Minería Indígena” (Soto-González, 1981). A la llegada de los conquistadores españoles, la isla de Cuba contaba con una población de 112 000 habitantes (Torres-Cuevas y Loyola-Vega, 2001), los cuales practicaban la llamada minería recolectora (“Minería Indígena”). En esta etapa las pepitas de oro se obtenían directamente de los aluviones de los ríos (Gibara, Jobabo, Guáimaro, Agabama, Arimao y Guaracabulla), con el objetivo de elaborar las guayzas que mostraban durante sus rituales.

Actualmente se conocen tres períodos importantes en el desarrollo de la minería del oro en la isla: colonial, neocolonial y revolucionario (Martínez, 1994).

1.1.1.1 Período colonial (1511-1898)

La etapa inicial de la colonización se caracterizó por la extracción de oro aluvionar, aunque se cree que, en la región central de Las Villas, llamada en lengua Taína Cubanacán, los indios lo extraían de las rocas. El inicio de la metalurgia del oro se remonta a finales de 1512 en Bayamo (en la actual provincia Granma) con la construcción de la primera fundición de oro en Cuba, la cual fue trasladada en abril de 1515 a la ciudad de Santiago de Cuba. En los cuatro años siguientes a la conquista (1512-1515) se remitieron a la corona española remesas valoradas en 1 2437 pesos en pago al impuesto denominado el quinto de la corona. Entre 1515 y 1538 estas remesas representaron una producción equivalente a 2 000 000 de pesos, aunque estimaciones de la época indican un valor de casi 3 000 000 de pesos (Martínez, 1994).

1.1.1.2 Período neocolonial (1902-1958)

En este período la pequeña minería del oro en Cuba se centró fundamentalmente en la región de Villa Clara y en Holguín. En la segunda mitad de la década del 30 del siglo XX se construyó una planta de beneficio, dirigida por el español Manuel Zamora. Esta etapa se consideró la de mayor bonanza para las pequeñas empresas mineras, la principal producción de oro provenía principalmente del yacimiento Nuevo Potosí. La búsqueda y extracción de pepitas de oro nativo se realizaba mediante el lavado de las arenas de los arroyos y cañadas (Martínez, 1994).

1.1.1.3 Período revolucionario (1959-2009)

En los primeros años de la revolución, los vecinos del poblado de Aguas Claras, decididos a reiniciar las operaciones mineras y reabrir la planta de beneficio de oro, crean una pequeña cooperativa, que solamente contaba con un camión de obras públicas. Un grupo de obreros se dedicó a repasar antiguas colas por mesas de concentración y a obtener oro por amalgamación. Estos obreros obtuvieron modestos resultados que ayudaron a aliviar la difícil situación económica de aquellos primeros años de revolución.

Al inicio de la década de los 90 se produce la apertura económica a la inversión extranjera en el sector de la minería en Cuba. Se crean las sociedades económicas mixtas Holmer Gold Mine S.A., Siboney S.A., Republic, Miramar, entre otras. En el año 1996 la asociación económica Minería Siboney-Geominera S.A. descubre la manifestación de Au-Cu La Unión a 16 km al SSE de Sibanicú en la provincia de Camagüey. En el año 1999 Spiteri Geological and Mining Consultants Inc. realiza estudios conceptuales en las vetas Beatriz, El Limón y Elena Sur en la región de Camagüey.

A partir del año 1995 la compañía australiana Rhodes Victoria S.A. asumió los estudios de exploración y evaluación de los yacimientos de oro del distrito Holguín. El Grupo Geominsal perteneciente al Ministerio de la Industria Básica ha asumido la responsabilidad de dirigir el programa de oro en el primer decenio del siglo XXI en el país. Se tiene previsto la explotación a cielo abierto del yacimiento Golden Hill en Jobabo, Las Tunas y Oro Barita en Santiago de Cuba y por vía subterránea del yacimiento Falcón en Placetas, provincia de Villa Clara.

Existen otros prospectos mineros en perspectiva de explotación como: Meloneras y Oropesa en Placetas, Villa Clara; Lote Grande en Sancti Spíritus (todos a procesar en la Planta de Placetas); Guáimaro en Camagüey e Isla Dorada (Delitas) en la Isla de la Juventud, que es la mayor reserva (Martínez, 1994).

Las mineralizaciones de oro en Cuba se localizan principalmente en una faja metalogenética de aproximadamente 400 km, que se extiende desde la porción sur de Santa Clara hasta el norte de Holguín como muestra el anexo 1 (Martínez, 1994).

1.2 Producción de oro a nivel mundial

La Tabla 2 muestra los principales países productores de oro en el mundo.

Tabla 2 Los 11 mayores productores de oro en el 2015 y 2016 (en toneladas)

Países	2015	2016	Variación (%)
China	460,3	463,7	1
Australia	279,2	287,3	3
Rusia	263,5	274,4	2
Estados Unidos	215,5	225,7	5
Perú	170,6	166,0	-3
Sudáfrica	165,1	165,6	-
Canadá	157,7	162,1	3
México	131,7	128,4	-2
Indonesia	114,2	109,5	-4
Brasil	96,4	96,8	1
Ghana	95,4	95,6	-

1.3 Presencia del oro en la naturaleza

En la naturaleza, el oro se encuentra en estado nativo, diseminado en rocas cuarcíferas, en vetas auríferas y en los depósitos aluviales o placeres, provenientes de la desagregación de estas rocas. El oro se encuentra asociado principalmente a los minerales de plata y cobre, aunque también se pueden encontrar en minerales de hierro, plomo-zinc y sulfoarseniuros más complejos (Vincent, 2009).

1.4 Tecnologías de extracción de oro

En la actualidad, gran parte de los minerales de oro en el mundo son tratados mediante el proceso de cianuración, en sus diferentes técnicas de lixiviación: por agitación, en pilas, y diferentes procesos de recuperación del oro lixiviado: precipitación con polvo de zinc o recuperación mediante carbón activado. También se utilizaba la amalgamación, el método gravimétrico y tecnologías experimentales como la bio-hidrometalúrgicos.

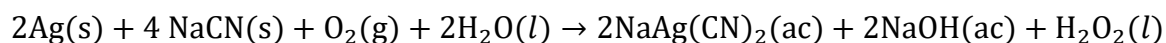
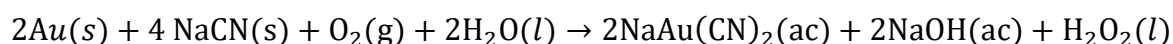
Fundamentos teóricos del proceso de cianuración

La esencia de este método consiste en la lixiviación de los metales nobles con ayuda de soluciones diluidas de sales cianuradas de los metales alcalinos o alcalinotérreos cianuro de potasio, cianuro de sodio y cianuro de calcio. Las soluciones auríferas

obtenidas se separan de la fase espesa (residuos de salida) condensándolas o filtrándolas, y para separar el oro y la plata de estas soluciones cianuradas pueden ser aplicados los métodos de sedimentación por el zinc, por el aluminio, por las resinas de intercambio iónico por carbón vegetal o carbones activados y por extracción (I. N. Maslenitski, 1972).

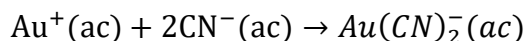
Termodinámica del proceso de la cianuración.

El mecanismo de la disolución del oro y la plata en cianuro fue descrito por Habashi (1966-1967), quien propuso la siguiente ecuación global (I. N. Maslenitski, 1972):



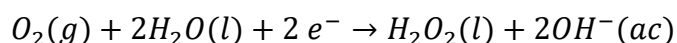
El cual procede de acuerdo al mecanismo siguiente:

Reacción anódica:



El potencial estándar de esta ecuación es cuando $\alpha_{Au(CN)_2^-} = 1$ y $\alpha_{(CN)} = 1$ es igual - 0,540 V

Reacción catódica:



El potencial estándar de esta ecuación es -0,15 V.

Estos métodos tienen muchos detractores desde el punto de vista ambiental, pues algunas compañías mineras y pequeñas asociaciones de mineros son ambientalmente irresponsables, ya que generan gran cantidad de desechos tóxicos que vierten al medio sin el debido tratamiento (Lobaina, 2007).

1.4.1 Métodos gravimétricos

El método de beneficio de minerales por gravitación comprende varios procesos tecnológicos, en los cuales la separación de las partículas minerales ocurre debido a

las diferencias de densidades existentes entre ellas, estamos hablando de densidad, forma, tamaño, en función de la velocidad de su movimiento en el medio, este puede ser aire, agua o la interfase agua aire, según se halla seleccionado el método a emplear. Existen tres métodos de separación gravimétrica (Lobaina, 2007).

1.- Separación por Gravedad: (Canales –sluisses-, cribas pulsantes, mesas de concentración y simples bateas –jaguas-)

2.- Separación por Gravedad y Fuerza Centrífuga: (Todos los anteriores, pero agregando hidrociclones, y concentradores centrífugos K-Nelson y similares entre otros)

3. Técnicas de separación combinadas (gravedad y centrifuga) con amalgamación y flotación.

1.4.2 Lixiviación en pilas (Merril-Crowe)

El funcionamiento de este proceso es muy simple: se colocan varias decenas de millares (hasta un millón de toneladas) de mineral en un montón (pila) y sobre un área impermeabilizada (con arcilla, plástico, asfalto, etc.). La solución con cianuro es enviada por medio de distribuidores sobre lo alto de la pila drenando a través de la misma por gravedad. Las aguas madres reunidas en la base de la pila, con la ayuda de una capa drenante, son colectadas y enviadas a la unidad de recuperación del oro (carbón activo en columna o precipitación sobre Zinc) (Lobaina, 2007).

En Cuba esta tecnología se utilizó en la década del 90 en Oro Castellanos y hasta el 2006 en Júcaro, ambos proyectos en Pinar del Río; en la actualidad se emplea en Oro Barita en Santiago de Cuba y Golden Hill en Jobabo provincia de las Tunas, el flujo tecnológico se muestra en el anexo 2.

1.4.3 Lixiviación en reactores

La lixiviación en tanque (VatLeaching): El mineral, después de ser molido, es introducido en forma de pulpa en los reactores (que son de 3 tipos: pachucas, agitadores Dorr y tanques agitados), para ser puesto en contacto con el cianuro. Hoy día esta técnica se está abandonando, si bien la utilización de reactores tipo cubas

agitadas, dado su menor consumo de energía, puede ser todavía viable económicamente (Martínez, 1994).

La tecnología que utiliza el carbón activado comprende tres técnicas de aplicación y son el carbón en pulpa (CIP), el carbón en columna (CIC) y el carbón en lixiviación (CIL) (Martínez, 1994).

1.4.3.1 Carbón en pulpa (CIP)

Consiste esencialmente en adsorber los iones complejos de oro directamente desde la pulpa cianurada con carbón activado. La disolución del oro por cianuración después de ser molido el mineral, el carbón es mantenido en suspensión en la pulpa, gracias a la agitación mecánica y suministro de aire. La pulpa avanza de un tanque hacia el siguiente por gravedad o un puente aéreo, de tal modo que el carbón activado sea retenido por un tamiz. El avance del carbón se realiza a contracorriente respecto a la pulpa y su cosecha se realiza en forma que satisface la producción diaria requerida, después que el carbón alcanza una carga satisfactoria, es lavado en cernidores y luego conducido al circuito de desorción del carbón como muestra en el anexo 3 (Óre, 2016).

1.4.3.2 Carbón en lixiviación (CIL)

El carbón en lixiviación es una modificación relativamente nueva del proceso de carbón en pulpa. En este caso, el oro lixiviado con cianuro y la adsorción de los iones sobre el carbón activado están simultáneamente acompañados en el mismo tanque. Además, los tanques usados para la lixiviación son reducidos en números (Óre, 2016).

En la actualidad es la tecnología empleada en la empresa Oro Descanso ubicada en Placetas provincia de Villa Clara.

1.4.3.3 Carbón en columna (CIC)

Los metales lixiviados son generados en la mayoría de las operaciones de lixiviación en pilas de minerales con baja ley de oro y están prácticamente libres de sólidos suspendidos. En tales operaciones la solución rica es circulada a través de columnas con carbón activado a contracorriente, véase en el anexo 4 (Óre, 2016).

1.5 Generalidades del carbón activado (CA)

El carbón activado es un material que se prepara en la industria para que tenga una elevada área superficial y así poder adsorber (retener sobre su superficie) una gran cantidad de compuestos muy diversos, tanto en fase gaseosa como en disolución (Espín, 2001).

Se trata de un material poroso que se obtiene por carbonización y activación de materiales orgánicos, especialmente de origen vegetal, hullas, lignitos y turbas, con el fin de obtener un alto grado de porosidad y una importante superficie entre partículas. La elevada superficie específica facilita la adsorción física de gases y vapores de mezclas gaseosas o sustancias dispersas en líquidos (Torre, 2004).

Dependiendo de la aplicación industrial, el carbón activado se comercializa en forma granular, en donde éste tiene una alta área superficial y un diámetro de poro muy pequeño, o en forma de polvo fino que posee mayor área superficial y un tamaño de poro mayor (Voys, 1983).

Es un material que tiene un área superficial excepcionalmente alta. El nombre de carbón activado se aplica a una serie de carbones porosos preparados artificialmente a través de un proceso de carbonización, para que exhiban un elevado grado de porosidad y una alta superficie interna (Nicol, Elution Theory , 1985).

La actividad del carbón en los procesos de adsorción viene dada fundamentalmente, por la naturaleza de la materia prima y el proceso de activación utilizado en la producción del mismo. El área superficial del carbón activado es interna. Cuando se desea remover una impureza orgánica que causa color, olor o sabor indeseable, normalmente la adsorción con carbón activado suele ser la técnica más económica y sencilla (Ayala, 2007).

Su capacidad de adsorción se ve muy favorecida por la estructura porosa y la interacción con adsorbatos polares y no polares, dada su estructura química; además las reacciones químicas en su superficie están influenciadas por centros activos, dislocaciones y discontinuidades, donde los carbones tienen electrones desapareados y valencias insaturadas presentando mayor energía potencial (Alarcón, 1971).

En la figura 1 se muestra la clasificación del carbón activado granular y en polvo, dependiendo del tamaño de grano del mismo (grano grueso o polvo).

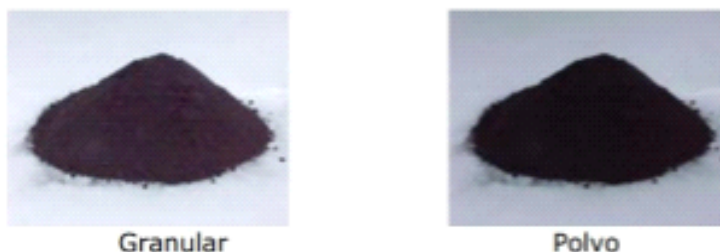


Figura 1 Carbón activado granular y carbón activado en polvo.

1.5.1 Fundamento de activación

El carbón activado es un producto que posee una estructura cristalina reticular similar a la del grafito; es extremadamente poroso y puede llegar a desarrollar áreas superficiales del orden de 1 500 metros cuadrados (incrementa su área superficial hasta 300 veces), por gramo de carbón (Bansal, 1988).

A nivel molecular, la estructura del carbón se asemeja a la red cristalina del grafito, con la diferencia que las capas de anillos hexagonales presentan defectos, la distancia entre éstas es desigual y cada capa tiene planos con distintas orientaciones (Espín, 2001).

Es justamente este alto nivel de imperfecciones en los microcristales del carbón activado el que incrementa la reactividad del carbón con sus alrededores. Debido a esto, los carbones activados no tienen una formula estructural definida ni pueden ser caracterizados por análisis químico. El carbón activado tiene una naturaleza anfótera, ya que en la superficie coexisten grupos de carácter ácido y básico (Alarcón, 1971).

Dependiendo del pH del medio, el carbón puede adoptar un comportamiento ligeramente ácido o básico y, por ende, la carga neta de la superficie dependerá de la concentración relativa de estos grupos. Adicionalmente, el carbón presenta un carácter hidrófobo, lo que permite una gran afinidad por adsorbentes no polares, incluyendo la mayoría de sustancias orgánicas, mientras que en medio acuoso la afinidad es

limitada. Sin embargo, la adición de grupos superficiales polares puede incrementar el carácter hidrófilo y la mojabilidad del carbón activado (Nicol, Elution Theory , 1985).

Al momento de seleccionar el carbón activado se debe tomar en cuenta que el volumen del poro limita el tamaño de la molécula que puede atraparse, mientras que el área superficial limita la cantidad de material a ser adsorbido. La estructura porosa y la capacidad de adsorción del carbón activado están predeterminada mayormente por el proceso de activación (Valencia, 1999).

La activación física consiste en carbonizar la materia prima para convertirla en carbón, seguido de una combustión controlada, a temperaturas entre 1100-1300 K en presencia de agentes oxidantes tales como vapor de agua, dióxido de carbono, aire o una mezcla de éstos. El oxígeno presente en estos agentes se combustiona con el carbón liberando monóxido de carbono e hidrógeno y creando microcanales en la estructura carbonácea. Los carbones sometidos a este tipo de proceso generalmente desarrollan una extensa área superficial debido a la formación de poros (Deventer, 1985).

La activación química requiere la impregnación de agentes deshidratantes fuertes, tales como cloruro de zinc y ácido fosfórico, sobre la materia carbonácea. La etapa de carbonización conlleva una extrusión y pirolización del agente impregnado a temperaturas entre 700-1100 K en ausencia de aire, que resulta en la degradación del material celulósico y la creación de una estructura porosa. La activación química del carbón generalmente resulta en la formación de poros más abiertos, ideales para la adsorción de moléculas grandes (Torre, 2004).

La extensa área superficial, la estructura microporosa y el alto grado de reactividad hacen del carbón activado un excelente adsorbente. Un carbón activado usado en aplicaciones industriales posee un área superficial en el orden de 800-1500 m²/g. Esta superficie se distribuye mayormente en los poros de menor tamaño llamados microporos (Sevilla, 2009).

En realidad, cuando se observa un carbón en un microscopio electrónico, la estructura del carbón activado asemeja a cintillos de papel arrugados y juntados en desorden con una red de poros compleja que se clasifican en microporos (diámetro menor a 2 nm),

mesoporos (diámetro entre 2 y 50 nm) y macroporos (diámetro mayor a 50 nm). Los macroporos no contribuyen grandemente al área superficial total, pero sirven como conductos para facilitar el paso del material a adsorberse hacia los meso y microporos (Nicol, Elution Theory , 1985).

1.5.2 Propiedades del carbón activado

Son dos las características fundamentales en las que se basan las aplicaciones del carbón activado: elevada capacidad de eliminación de sustancias y baja selectividad de retención.

En general, los microporos le confieren la elevada superficie y capacidad de retención al carbón, mientras que los mesoporos y macroporos son necesarios para retener moléculas de gran tamaño, como pueden ser colorantes o coloides, y favorecer el acceso y la rápida difusión de las moléculas a la superficie interna del sólido (Ayala, 2007).

Por otra parte, el carbón activado tiene escasa especificidad ante un proceso de retención, es un adsorbente “universal”. No obstante, por su naturaleza apolar y por el tipo de fuerzas implicadas en el proceso de adsorción, retendrá preferentemente moléculas apolares y de alto volumen molecular (hidrocarburos, fenoles, colorantes...), mientras que sustancias como nitrógeno, oxígeno y agua prácticamente no son retenidas por el carbón a temperatura ambiente (Sevilla, 2009).

1.5.3 Materias primas

Los carbones para aplicaciones industriales son mayormente preparados a partir de cuescos de coco y otras cáscaras de dura textura, hullas bituminosas, coque, aserrín y otros productos derivados de la madera. Normalmente al usar cuescos de fruta y coque se puede producir carbones duros, con gran resistencia a la abrasión y con una mejor distribución de poros que al usar carbón vegetal (Bansal, 1988).

La selección de la materia prima para la producción de carbón dependerá de los recursos disponibles, de la aplicación industrial del carbón y de la eficiencia del producto resultante. La evaluación de este último punto se realiza en base a los siguientes criterios:

- La posibilidad de obtener un carbón activado de alta calidad.
- La presencia mínima de compuestos inorgánicos.
- El volumen y costo de la materia prima.
- El tiempo de almacenamiento.
- La facilidad de procesamiento de la materia prima.

El bajo contenido de material inorgánico favorece los bajos niveles de cenizas después de la activación del carbón. Adicionalmente, materias primas con alta densidad y gran presencia de material volátil son necesarias para fortalecer la estructura del carbón activado y permitir la formación de poros, respectivamente. Sin embargo, dependiendo de la aplicación estos parámetros pueden ser alterados. El anexo 5 resume las características de algunas materias primas empleadas para la fabricación del carbón y su aplicación industrial (Bansal, 1988).

1.5.4 Cinética del fenómeno de adsorción de oro en carbón activado

La evaluación de la cinética de adsorción de oro sobre carbón activado debe partir del conocimiento de los fenómenos de difusión involucrados y de la identificación del paso limitante en el mecanismo de reacción. Se ha reportado que la velocidad de adsorción depende del paso limitante de entre tres potenciales fenómenos de transporte que ocurren durante el proceso (Sevilla, 2009).

El primero de ellos se identifica como la difusión de capa límite que se interpreta como la resistencia del aurodicianuro a difundirse a través del líquido en solución, y luego a través de una capa límite que recubre al carbón. Los siguientes dos fenómenos están relacionados a la difusión dentro del sólido y son la difusión intraporo, y difusión superficial (Sevilla, 2009).

Estudios hechos por Van Lier demuestran que estos dos últimos efectos muestran características muy similares, por lo que se puede combinar sus efectos en uno solo llamado difusión entre partículas. Varios estudios han demostrado que los procesos de mayor influencia son la difusión en la interfase y la difusión entre partículas (Voys, 1983).

La mayoría de los modelos matemáticos se han desarrollado a partir de considerar estos dos fenómenos como limitantes para la cinética de adsorción. Por lo tanto, la

velocidad de adsorción se puede describir como una fase limitada por la difusión interfacial, seguida de una fase limitada por la difusión entre partículas y una fase transitoria en la que ambos fenómenos limitan la velocidad de adsorción (Alarcón, 1971).

1.5.5 Especificaciones de calidad y reactivación de carbón activado

Como en el caso de cualquier producto industrial, las distintas propiedades del carbón activado se evalúan a través de métodos analíticos que han sido normalizados por diversas asociaciones. La mayoría de los productores los aplican con el objeto de estandarizar y de permitir al usuario la comparación de las especificaciones de diversos carbones (Sevilla, 2009).

La American Society for Testing Materials, por sus siglas en inglés (ASTM), de Estados Unidos es el organismo cuyos procedimientos de evaluación sigue la mayoría de los fabricantes de carbón activado. Sin embargo, existen otros a los que comúnmente se hace referencia. Entre ellos, la Deutssches Institut fur Normung, por sus siglas en Alemán (DIN), entre otras (Deventer, 1985).

- Índice de yodo y área superficial.

El índice de yodo disminuye en proporción al grado de saturación del carbón activado. En general, el carbón requiere cambiarse cuando el número de yodo llega al 50 % de su valor original; por lo tanto, este parámetro puede utilizarse para estimar el tiempo de vida útil que resta a un carbón en uso (Espín, 2001).

- Radio medio de poro.

Es función básicamente del tipo de materia prima y se ve poco afectado por las condiciones del proceso. El método analítico para obtener su valor es caro y lento y por eso no se evalúa con frecuencia (Torre, 2004).

- Volumen total de poro.

Esta variable se expresa en ml/g y es función tanto del tipo de materia prima, como del grado de activación. Es decir, su valor depende del radio medio de poro y del área superficial del carbón (Valencia, 1999).

- Densidad aparente.

Es el peso en g/cm³ de carbón totalmente seco en aire. Es decir, incluye el volumen de los poros y el de los espacios entre las partículas de carbón (Torre, 2004).

- Dureza.

Existen varios métodos para evaluarla, aunque desafortunadamente ninguno de ellos simula las condiciones reales que provocan la erosión y el rompimiento del carbón en las diferentes etapas de su uso, como el transporte y el retrolavado. Uno de estos métodos es el de la American Section of the International Association for Testing Materials (ASTM D3802) consiste en agitar la muestra de carbón junto con balines de acero (Valencia, 1999).

- Rango de tamaño de partícula, tamaño efectivo de partícula y coeficiente de uniformidad.

El rango de tamaño de partícula es el número de las dos mallas – estándar americanas – que encuadran todo el rango de partículas que conforman un lote de carbón activado granular (Ayala, 2007).

- Contenido de cenizas totales.

Son el residuo que queda después de calcinar el carbón a 650 °C, hasta llegar a peso constante, y se expresan en términos de porcentaje en base seca (Valencia, 1999).

- pH del extracto acuoso.

Los solubles en agua pueden tener carácter ácido o básico. Por ejemplo, en el caso de un carbón que se activa con ácido fosfórico, el producto que sale del proceso de fabricación tiene fosfatos que al disolverse en agua se convierten en ácidos y por lo tanto disminuyen el pH (Voys, 1983).

- Longitud de semidecloración.

Es la profundidad de cama requerida para disminuir el contenido de cloro libre en agua pura de 5 a 2,5 mg/L. se utiliza como una medida de la velocidad con la que el carbón activado granular declora (Alarcón, 1971).

1.5.6 Reactivación del carbón activado

El principal mecanismo por medio del cual se retienen contaminantes orgánicos en la superficie del carbón activado granular es el de la adsorción física y, como tal, es reversible. La teoría de adsorción señala que al cambiar las condiciones en las que se encuentra el carbón, se podrá lograr la desorción de los adsorbatos retenidos, dejando libre la superficie del carbón activado (Bansal, 1988).

Tipos de reactivos

- Reactivación con vapor de agua.
- Reactivación con gases calientes.
- Reactivación térmica.
- Reactivación mediante modificación de pH en la solución acuosa.
- Reactivación biológica.
- Reactivación térmica al vacío.
- Reactivación con ácidos.

Reactivación con ácidos:

Cuando las partículas de un carbón presentan un color entre blanco y gris claro, lo más probable es que se encuentran envenenadas o bloqueadas con carbonato o con hidróxido de calcio. En estos casos, la reactivación térmica no logra eliminar dichos compuestos; en cambio, un lavado de una solución ácida sí lo hace. Se puede utilizar cualquier tipo de ácido fuerte, pero el clorhídrico es el más común. Se prepara la solución de alrededor de 5 por ciento en peso y el carbón se inunda en ésta (Alarcón, 1971).

El proceso de disolución de las sales de calcio es lento. El tiempo exacto varía dependiendo de qué tan impregnado se encuentra el carbón, pero puede estar entre 10 y 40 horas. Para lograr mayor rapidez, se calienta la solución a 60 - 70 °C y se mantiene el proceso en agitación. Con esto el tiempo puede reducirse. Una vez terminada la reactivación, el carbón debe haber recobrado su color negro (Valencia, 1999).

1.6 Estado del arte

La búsqueda bibliográfica está orientada en trabajos que puedan servir de un punto de partida para la realización de esta tesis. El estudio bibliográfico comienza analizando el uso que se le daba a la reactivación ácida en la empresa Oro Descanso y posterior a esto se buscan los trabajos existentes en Cuba y el mundo.

1.6.1 Antecedentes en Cuba

Frías, et al (2010) elaboró un proyecto en el Centro de Investigación Para la Industria Minera Metalúrgica, por sus siglas en español (CIPIMM), donde fue utilizada por primera vez esta tecnología en la empresa Oro Descanso ubicada en placetas provincia de Villa Clara, Cuba, donde se realiza este proyecto. Este proceso se utilizaba posterior a la lixiviación y adsorción del oro en los tanques agitadores mediante el método CIL.

Una vez llena la columna con la cantidad de carbón de 480 Kg/ día comenzaba el proceso de lavado ácido en forma ascendente.

Este proceso se realizaba en tres etapas:

- La primera etapa denominada de calentamiento y lavado.
- La segunda el lavado ácido propiamente con ácido clorhídrico al 3 %.
- La tercera de enjuague y neutralización del carbón cargado.

El proceso de lavado ácido del carbón se realiza para eliminar **las sales de sulfato y carbonato de calcio** que se depositan sobre la superficie del carbón ocupando sus sitios activos disponibles, limitando así su capacidad y cinética adsorción (eficiencia de carga) en cada ciclo.

Rodríguez, et al (2016) estudian el efecto de la modificación química con soluciones diluidas de ácido nítrico, en las características fisicoquímicas del carbón activado de conchas de coco. Los cambios en la química superficial del material adsorbente fueron evaluados mediante varios métodos de análisis químicos: Titulación de Boehm, Titulación de pH y Análisis Próximo según las normas ASTM. El proceso de modificación incrementó los grupos superficiales ácidos oxigenados de forma proporcional a la concentración de la solución oxidante, provocando una disminución

del pH, el pH en el punto de carga cero, el contenido de cenizas y los compuestos solubles en agua y en ácido. La reducción del pH en el punto de carga cero y el aumento de la humedad resultaron aspectos positivos para la posible utilización del material adsorbente en la remoción de cationes presentes en soluciones acuosas.

Se concluyó que a la modificación química del carbón activado de conchas de coco con soluciones diluidas de ácido nítrico originó un incremento de los grupos ácidos (carboxílicos, lactonas y fenoles) existentes en la superficie del material adsorbente y de la humedad. El aumento de la humedad relacionado con el carácter hidrófilo y la disminución del pH en el punto de carga cero es positivo para su posterior empleo en la adsorción de cationes presentes en soluciones acuosas.

1.6.2 Antecedentes en el mundo

Alverca, (2014) utilizando reactivos químicos del carbón activado del tipo calgón americano 6 × 12 utilizando ácido nítrico, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico e hidróxido de sodio con el fin de realizar lavados ácidos al carbón activado para la eliminación de cianidas que actúan como impurezas interrumpiendo la adsorción del oro.

Los resultados que se obtuvieron de la investigación en la cual tenían como objetivo principal reactivar químicamente el carbón activado del tipo calgón americano 6 x 12 utilizado en la Sociedad Minera Promine para la adsorción de metales preciosos, indicaron que tenían una mejor reactivación química con el uso del ácido clorhídrico a una concentración del 5 % un tiempo de agitación de 3 horas, observaron también que al incrementar al doble el tiempo de agitación y la concentración aumenta en lo mínimo la reactivación química de este material carbonáceo, aumentando así el costo de este proceso.

Oré, (2016) realiza la reactivación química del carbón activado con ácido clorhídrico y ácido nítrico. Los resultados mostraron que en el uso de ácido nítrico (HNO_3) para la reactivación química, a pesar de aumentar la concentración de 3 % a 5 % para tiempos de agitación (3 y 6 horas), el índice de yodo decrece; e inclusive el decrecimiento es a mayor tiempo de agitación. Así mismo se observa que se tiene una mejor reactivación química con el uso del ácido clorhídrico (HCl) a una concentración del 5 % a un tiempo de agitación de 6 h, la cual presenta una adsorción de yodo de 881,81 mg/g CA Sin

embargo, cabe resaltar que, a pesar de ser el mayor valor de índice de yodo en las pruebas realizadas, es importante destacar que el uso de ácido clorhídrico al 3 % en un tiempo de agitación de 3 h alcanza un valor de índice de yodo de 829,48 mg/g CA, con solo 1,55 mg/g CA menos que el índice de yodo usando ácido clorhídrico al 5 % (831,03 mg/g CA) en el mismo tiempo de agitación de 3 h. Por lo tanto, se alcanza el 94 % (829,48 mg/g CA con respecto a 881,81 mg/g CA) de adsorción de yodo usando ácido clorhídrico al 3 % con un tiempo de agitación de 3 h.

Cáceres (2017) obtiene el carbón activado empleando como materia prima tallos y hojas de la Cañihua mediante activación química con H_3PO_4 al 85 %, la temperatura de carbonización fue 500 °C y tiempo 30 minutos de calcinación en un recipiente hermético, obteniéndose un rendimiento del 45,5 %. El carbón activado fue caracterizado mediante la determinación de sus propiedades físicas y químicas cuyos resultados fueron: humedad 7,41 %, ceniza 8,31 %, material volátil 11,89 %, carbono fijo 72,16 %, densidad aparente 0,36 g/cm³ y pH 5,75. La capacidad de adsorción del carbón activado fue determinada con azul de metileno para luego utilizarlo en adsorción de oro. Los resultados de adsorción del oro a partir de soluciones cianuradas utilizando carbón activado se logró adsorber al 98 % de oro, siendo las variables óptimas de adsorción: carbón activado 1,2 g; tiempo 420 min y temperatura 25 °C. Finalmente se recuperó el oro por el método de fusión.

Mendoza y Trujillo, (2014) evalúan la influencia de la concentración de ácido nítrico diluido sobre la eficiencia de remoción de carbonatos de calcio en la etapa de lavado ácido del proceso carbón en columnas (CIC) para la recuperación de oro. El propósito del estudio de este trabajo fue determinar la concentración adecuada de ácido nítrico que se debe utilizar para regenerar el carbón activado en la etapa de lavado. Las concentraciones utilizadas de ácido nítrico diluido fueron 1 %, 3 % y 5 %. Se utilizó en el lavado ácido, carbón activado a concentraciones de 13,8; 19,5 y 26,2 g $CaCO_3$ /kg carbón, en tiempos de 1, 3, 5 y 7 horas. Para determinar los carbonatos presentes en el carbón activado se utilizó el método volumétrico de titulación con sal disódica (EDTA). Para concentraciones de 13,8 y 19,5 g $CaCO_3$ /kg carbón se determinó que las mejores eficiencias se obtuvieron al utilizar ácido nítrico al 3 % con tiempo de residencia de 3 horas, brindándonos eficiencias de remoción de 82,1 % y 82,05 %

respectivamente. Asimismo para la concentración de 26,2 g CaCO_3/kg carbón la mejor eficiencia fue de 80,80 % y se obtuvo al utilizar ácido nítrico al 3 % con tiempo de residencia de 5 horas.

Estupiñán, et al (2011) analizan el efecto de la modificación de la química superficial de un carbón activado granular (CAG) por oxidación con ácido nítrico (CAG-N) y peróxido de hidrogeno (CAG-P) en la adsorción de iones níquel desde solución acuosa. Las muestras obtenidas se caracterizaron a través de diferentes técnicas; la química superficial se evaluó por determinaciones de acidez y basicidad total, punto de carga cero y espectroscopia IR, que muestran el efecto del agente oxidante. Los parámetros texturales, como área superficial y volúmenes de poro, se evaluaron mediante adsorción de gases. Los valores de área superficial de los sólidos se encuentran entre 816 y 876 $\text{m}^2.\text{g}^{-1}$, adicionalmente se determinaron entalpías de inmersión de los carbones activados en agua y benceno. Finalmente, los resultados experimentales de la adsorción desde solución se ajustaron a los modelos de Langmuir, Freundlich, Redlich-Peterson y Toth, y se encontró el mejor ajuste para este último. Los valores de la capacidad de adsorción determinadas por el modelo de Langmuir están entre 29,68 y 50,97 $\text{mg}.\text{g}^{-1}$, lo que indica que la capacidad de adsorción depende, en gran medida, de la química superficial del sólido.

Navarro, et al (2009) estudian la adsorción de oro en carbón activado a partir de soluciones acuosas sintéticas, utilizando dos tipos de carbón activado de diferentes propiedades físicas: carbón A y carbón B. Estas pruebas experimentales consistieron en contactar el carbón activado con una solución sintética de oro a la forma de cianuro de oro, bajo diferentes condiciones experimentales. Entre las conclusiones más importantes de este trabajo destacan que los parámetros que ejercen mayor influencia en la adsorción en forma batch es la fuerza iónica a través de la presencia de diferentes cationes, especialmente el ión calcio, y la temperatura. Se encontró también que el fenómeno de adsorción de oro se ajusta satisfactoriamente a la isoterma de Freundlich para ambos carbones estudiados, encontrándose además que el proceso de adsorción en las condiciones de estudio tiene una energía de activación de 1,87 kcal/mol y una entalpía de adsorción de -701 cal/mol. Por otra parte, se evidenció que las propiedades físicas del carbón activado también tienen un rol importante en la adsorción de oro. Es

así que destacan % de macroporos, el área superficial y el tamaño promedio de poros, como variables influyentes en el proceso de adsorción y que son particulares del tipo de carbón utilizado.

Quintana, et al (2008) obtienen el carbón activado a partir de cascarilla de café sometida a steam explosion para incrementar su contenido de lignina. El carbón fue elaborado mediante activación química con H_3PO_4 durante 48 horas y un tiempo de carbonización de 3 h. El máximo índice de yodo fue 1 005. El pretratamiento favorece la formación de mesoporos. El análisis establece que el área superficial es $1\,263\text{ m}^2/\text{g}$. El carbón activado presentó una mayor capacidad de remoción de Ni seguido de la cascarilla sin pretratamiento y la cascarilla pretratada.

Conclusiones Parciales

Tras la realización del presente capítulo se concluye:

Los ácidos empleados para la reactivación química del carbón son ácido clorhídrico, ácido nítrico y ácido sulfúrico, en concentraciones que varían entre 3 % y 10 %, la temperatura a la que se realizan los experimentos son $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el tiempo de duración oscila entre 1 h y 7 h.

CAPÍTULO II MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se realiza la fundamentación relacionada con el diseño del experimento para la desorción de adsorbatos no deseados presentes en el carbón activado, se profundiza en los materiales y métodos utilizados en el mismo, así como lo relacionado con la toma, homogeneización y preparación de la muestra, se realiza la elaboración de los reactivos ácidos y se plantea el balance de masa del reactor de lavado ácido.

2.1 Materiales

- Agitador magnético.
- pH-metro, se muestra en la figura 2.



Figura 2 pH - metro

- Baker de vidrio de 30 mL.
- Cápsulas de porcelana.
- Matraz de 250 mL.
- Erlenmeyer de 2000 mL.
- Probeta 100 mL.
- Embudo.
- Soporte plástico para los embudos.
- Papel de filtro.
- Máscara antigás con filtro 413 K2.

- Guantes antiácidos.
- Bata de laboratorio.
- Termómetro.

2.2 Reactivos

- Ácido clorhídrico (HCl) al 10 %.
- Ácido nítrico (HNO₃) al 65 %.
- Ácido sulfúrico (H₂SO₄) 96 %.

2.3. Equipamiento

- Espectrofotómetro de Absorción Atómica modelo: PG990, se muestra en la figura 3.



Figura 3 Espectrofotómetro de Absorción Atómica.

- Balanza Técnica, se muestra en la figura 4.



Figura 4 Balanza técnica.

- Estufa, memmert, modelo 100 – 800.
- Mufa, Nabertherm, se muestra en la figura 5.



Figura 5 Mufa utilizada para la calcinación.

2.4 Metodología

Al carbón procedente del proceso de lixiviación con contenidos altos de cianicidas no deseados, se le aplica el procedimiento de reactivación química en la cual se emplean reactivos como el ácido nítrico, ácido clorhídrico y ácido sulfúrico, los cuales serán comparados para analizar su efectividad en la reactivación química del carbón o lavado ácido teniendo como indicador el contenido de níquel, hierro, cobre y oro en la muestra antes y después del proceso.

Las pruebas de lavado ácido se realizaron en la misma planta metalúrgica “Oro Descanso”, en la cual se realizaron varios experimentos, variando los porcentajes de concentración, la temperatura y el tiempo de duración del lavado, con la finalidad de determinar los parámetros óptimos para la desorción de los adsorbatos no deseados, principalmente el níquel, presente en la superficie del carbón activado.

2.5 Tipo de muestra

En esta investigación se tomó una muestra representativa del carbón que sale del proceso de lixiviación y adsorción, (salida de los reactores de lixiviación) en Oro Descanso.

2.6 Composición de las muestras iniciales

De la bolsa de plástico se tomaron 3 muestras (M_1 , M_2 , M_3) cada una de 50 g y se enviaron al laboratorio de la planta, para ser analizadas y determinar el contenido de níquel, cobre, hierro y oro inicial en el carbón, los resultados se muestran en la tabla 3

Tabla 3 Contenido de metales presentes en la muestra inicial

Muestras	Contenido de metales en g/t			
	Au	Cu	Ni	Fe
M ₁	688,83	127,4	5 340	1 357
M ₂	812,47	192,6	5 777	4 474
M ₃	763,38	163,6	5 617	5 349
Promedio	754,89	161,2	5 578	3 726,67

2.7 Tipo de investigación

El tipo de investigación fue analítica cuantitativa porque pretende determinar la cantidad o concentración en que se encuentra una sustancia específica en una muestra.

2.8 Flujo del proceso desde la toma y preparación de la muestra hasta la obtención del resultado final

La figura 4 representa el flujo para la toma y procesamiento de la muestra hasta la obtención del resultado final, en el cual se explicará de manera detallada cada uno de los pasos realizados.

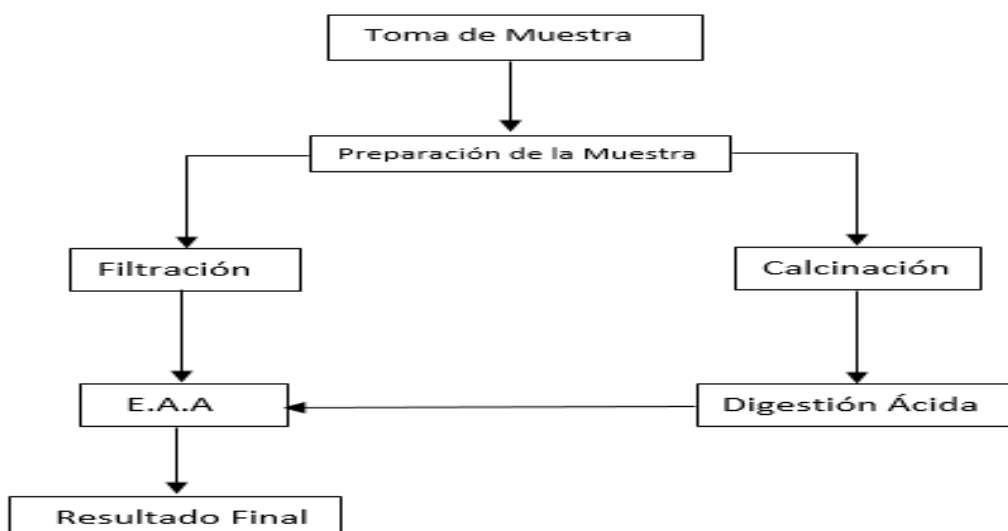


Figura 4 representa el flujo del proceso

2.8.1 Procedimiento para la toma y homogeneización de las muestras

La toma de la muestra se realizó siguiendo los requisitos que se utilizan en la planta para realizar este proceso, se llenaron tres bolsas de plásticos con el carbón cargado de cianicidas que sale del proceso de lixiviación tomando una muestra diaria por dos semanas, en el caso de la homogenización de la muestra se realizó con ayuda de la información bibliográfica para elegir el mejor método que se debe utilizar.

2.8.1.1 Toma de las muestras

- ✓ Para la recolección de muestra se llevaron los implementos de seguridad.
- ✓ Se procedió a la recolección de la muestra in situ con la ayuda de una cuchareta.
- ✓ Para la toma de la muestra sólida se utilizó bolsa plástica con su respectiva rotulación de fecha, código y peso neto.
- ✓ Se llenaron tres bolsas plásticas con el carbón que sale del proceso de lixiviación.

2.8.1.2 Homogeneización de las muestras

Con el objetivo de homogeneizar las muestras tomadas, se realizó el método del cono y el anillo o lanzamiento en cono descrito por Mitrofánov, Barski y Samygin (1982). Para su realización se dispuso la muestra en forma de cono y con ayuda de una pala se distribuyó uniformemente todo el carbón que quedó a los lados del cono. Luego se selecciona una tabla de madera delgada y se introduce de forma horizontal en el material, aproximadamente a una profundidad equivalente al ancho de la tabla, se realizan dos cortes a todo lo largo hasta obtener una división de cuatro partes iguales. Enumerándose las partes, como se muestra en la figura 6, se escogen los cuadrantes opuestos (1 y 3) y se pesan. Luego, a los cuadrantes escogidos, se les realiza nuevamente el procedimiento del lanzamiento en cono, mientras que los otros pasan a formar parte de la reserva. Este procedimiento se repite hasta obtener tres muestras de la masa requerida (50 g), una de cada bolsa.



Figura 6 Representación esquemática del método del cono y anillo.

Fuente: (Mitrofánov, Barski, & Samygin, 1982)

El proceso de homogeneización se realizó según la figura 7, logrando una muestra con un alto grado de homogeneidad.

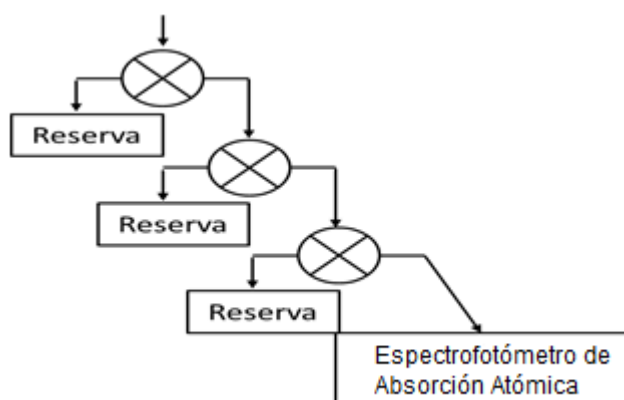


Figura 7 Esquema de homogeneización y cuarteo empleado.

De la muestra general se obtuvieron tres muestras, y se pesaron 50 g con el objetivo de realizarles la reactivación ácida como se muestra en la figura 8.



Figura 8 Carbón activado cargado.

2.8.2 Preparación de las muestras

- Se lava, seca y se limpia el carbón de cualquier tipo de impureza que pueda afectar el resultado del experimento.
- Se pesa el carbón activado que se necesita, para la experimentación de la práctica 50 g.
- Con relación de 1:1,5 (1 parte de material carbonáceo, y 1,5 de solución reactivante) preparamos la disolución de ácido clorhídrico, ácido nítrico y ácido sulfúrico al 5 % y al 10 %.

2.8.3 Preparación de reactivo

Preparación del reactivo ácido clorhídrico (HCl)

Se toma la solución de HCl al 10 % que será diluida al 5 % y 10 %, se prepara para un volumen de 100 mL.

Para la preparación del HCl al 5 % se toman 50 mL de H₂O de agua y se le añaden a los 50 mL de HCl, para la preparación del HCl al 10 % solo se añaden los 100 mL en la probeta.

Preparación del reactivo ácido nítrico (HNO₃)

Se parte de la solución de HNO₃ al 65 % que será diluida al 5 % y 10 %, se prepara para un volumen de 100 mL

Para la preparación del HNO₃ al 5 % se toman 7,7 mL de HNO₃ y se añaden en 92,3 mL de agua, para la preparación del HNO₃ al 10 % se toman 15 mL de HNO₃ y se añaden en 85 mL de agua.

Preparación del reactivo ácido sulfúrico (H₂SO₄)

Se parte de la solución de H₂SO₄ al 96 % que será diluida al 5 % y 10 %, se prepara para un volumen de 100 mL.

Para la preparación del H₂SO₄ al 5 % se toman 5,2 mL de H₂SO₄ y se añaden en 94,8 mL de agua, para la preparación del H₂SO₄ al 10 % se toman 10,4 mL de H₂SO₄ y se añaden en 89,6 mL de agua.

La figura 9 muestra los tres reactivos utilizados para el lavado ácido del carbón



Figura 9 Ácidos utilizados HCL, HNO₃, H₂SO₄

- Se procedió a hacer una limpieza preliminar con agua al material carbonáceo previo a su reactivación con los ácidos hasta que el pH alcance valores de 7 para eliminar todo rastro de cianicidas presentes en el carbón, utilizando el pH – metro para controlar el pH.
- Se realizan tres lavados con agua caliente a 80 °C y se deja reposar en baño maría por espacio 20 minutos a 70 °C.
- Se le adiciona la solución ácida ya preparada se agita por espacio de 20 minutos y se deja reposar según los requisitos del experimento que se realice.
- Se lava el carbón con abundante agua para eliminar la solución ácida presente en él y se le añade hidróxido de sodio hasta que el pH alcanza valores superiores a nueve.

2.8.4 Filtración de las muestras

Se filtra el licor producto del lavado ácido utilizando papel de filtro, con el fin de obtener un licor clarificado el cual será enviado al Espectrofotómetro de Absorción Atómica para determinar la concentración de los metales de interés.

2.8.5 Absorción atómica

La absorción atómica se realiza mediante el Espectrofotómetro de Absorción Atómica el cual tiene como objetivo obtener la concentración de los metales presente en el carbón activado y en el licor producto del lavado ácido, para cuantificar la desorción de los adsorbatos presentes en el carbón activado que actúan como impurezas

impidiendo la adsorción del oro, además este equipo permitirá evaluar y comparar la efectividad de los reactivos presente en dicho experimento con el fin de elegir los que mejores resultados de desorción aporten.

2.8.6 Calcinación del carbón activado lavado

Se pesan dos gramos de carbón activado en una cápsula de porcelana y se envía a la zona de preparación de reactivos donde se encuentra una estufa la cual será la encargada de secar el carbón a 120 °C para eliminar el contenido de humedad presente en el mismo, posterior a este proceso se introduce la cápsula de porcelana en una mufa para calcinar el carbón, proceso el cual ocurre en los siguientes pasos:

- ✓ Cuatro horas de rampa hasta que alcanza el punto de calcinación.
- ✓ Cuatro horas de calcinación a 740 °C.
- ✓ Pasada las cuatro horas en el horno para la calcinación, se deja enfriar el carbón.
- ✓ Después de 24 h se sacan los carbones del horno.

El objetivo de la calcinación es obtener un carbón capaz de disolverse en el agua regia.

La figura 10 muestra la apariencia del CA después de ser calcinado.



Figura 10 Carbón calcinado.

2.8.7 Digestión ácida

- Después de calcinado el carbón se prepara el agua regia y se le añaden 30 mL por cada dos gramos de carbón calcinado.
- La solución de agua régia con el carbón es puesta en un beaker tapado y puesta en calor, hasta que se disuelva el carbón y se elimine más de la mitad del contenido del licor.

- Se le añade ácido clorhídrico al 10 % y se pone a reposar.
- Por último, el licor producto de la digestión ácida es leído en el espectrómetro de absorción atómica para determinar el contenido de los metales de interés.

2.8.8 Metodología de realización de los análisis

Método electroanalítico

El pH-metro es un sensor utilizado en el método electroquímico para medir el pH de una disolución.

El electrodo de vidrio es relativamente inmune a las interferencias del color, turbidez, material coloidal, cloro libre oxidante y reductor. La medida se afecta cuando la superficie de la membrana está sucia con grasa o material orgánico insoluble en agua, que le impide hacer contacto con la muestra, por lo tanto, se recomienda la limpieza escrupulosa de los electrodos.

Requisitos para el empleo del pH-metro

- Los electrodos tienen que ser enjuagados con agua destilada entre muestras.
- No se deben secar con un paño, porque se podrían cargar electrostáticamente.
- Se deben colocar suavemente sobre un papel, sin pelusa, para quitar el exceso de agua.
- El electrodo debe mantenerse humedecido siempre, se recomienda que se guarde en un buffer de solución de pH 4 o 7.
- No se debe guardar el electrodo en agua destilada, porque eso causaría que los iones resbalaran por el bulbo de vidrio y el electrodo no funcionaría.

Fue necesario la utilización del pH-metro para controlar la eliminación de cualquier tipo de sustancia cianídica, evitando que el anión cianuro (CN^-) entrara en contacto con los ácidos formando el cianuro de hidrógeno sustancia muy volátil y perjudicial para la salud, también se controló que el pH del licor estuviera por debajo de 2,5 punto máximo donde deja de ocurrir el lavado ácido.

2.8.9 Espectrometría de absorción atómica (EAA)

La espectrometría de absorción atómica (EAA), tiene como fundamento la absorción de radiación de una longitud de onda determinada.

Se basa en la excitación de los átomos cuya energía absorbida es detectada por el equipo, y es linealmente proporcional con la concentración del analito según la ley de Beer:

$$A = a \cdot b \cdot c$$

a- Coeficiente de absortividad.

b- Longitud del trayecto de la luz a través del vapor atómico.

c- Concentración.

Se considera un método analítico cuantitativo para determinar metales y, en menor medida, no metales.

Equipo que mide la cantidad de luz absorbida por una sustancia en disolución y compara intensidades espectrales con respecto a una longitud de onda.

La fuente de radiación es dirigida a través de la muestra atomizada, en donde se lleva a cabo la absorción selectiva. La porción de radiación transmitida entra entonces al monocromador, el cual aísla la longitud de onda analítica y la envía al detector. Se obtiene una señal eléctrica la cual es proporcional a la intensidad de la radiación. La señal es procesada por el amplificador y finalmente traducida a una lectura digital por medio de un dispositivo electrónico.

➤ Curva de calibración

La curva de calibrado es empleado para medir la concentración de una sustancia en una muestra, se basa en la existencia de una relación en principio lineal entre un carácter medible (por ejemplo la absorbancia en los enfoques de espectrofotometría) y la variable a determinar (la concentración).

Para ello, se efectúan diluciones de unas muestras de contenido conocido y se produce su lectura y el consiguiente establecimiento de una función matemática que relacione ambas; después, se lee el mismo carácter en la muestra de interés y

mediante la sustitución de la variable independiente de esa función, se obtiene la concentración de esta.

El equipo de absorción atómica fue utilizado para determinar el contenido de hierro, níquel, oro y cobre de la muestra inicial y el contenido de los mismos elementos tanto en el licor como en el carbón al finalizar el lavado ácido.

2.8.10 Diseño de los experimentos

Será necesario definir adecuadamente las variables que inciden en el proceso de desorción de estos metales, dentro de las variables que intervienen en el proceso se tienen:

- Variable dependiente.

Desorción de los metales de interés en g/t.

- Variables independientes.

Controlable:

Dosificación del reactivo ácido clorhídrico, ácido nítrico y ácido sulfúrico.

Tiempo de reactivación química (min).

Temperatura del experimento (°C).

De acuerdo a conceptos estadísticos de ingeniería se definen adecuadamente tres variables independientes que inciden sobre la variable dependiente o respuesta.

Variación de parámetros

Los parámetros fueron variados en función de la investigación bibliográfica, experiencias y procesos anteriormente empleados en la planta, lo cual nos llevó a que se planteara un diseño de experimento factorial completo de dos niveles y tres factores $N = 2^n$.

donde

- n es el número de variables o factores (x_1, x_2, x_3): 3
- N es el número de ensayos: 8

La tabla 4 muestra el diseño experimental planteado para dar solución al problema.

Tabla 4 Diseño de experimento

CARBONES PROCESO CIL DESCANSO				Concentración. de los ácidos		
No de Ensayos	Factor					
	X1	X2	X3	X ₁	-1	1
1	-1	-1	-1		Temperatura. °C	5 %
2	1	-1	-1	X ₂		-1
3	-1	1	-1		Tiempo. (min)	25 °C
4	1	1	-1	X ₃		-1
5	-1	-1	1		60 min	120 min
6	1	-1	1			
7	-1	1	1			
8	1	1	1			

donde

Factores: X₁- concentración, X₂- temperatura, X₃- tiempo.

El mismo diseño de experimento será aplicado con los tres ácidos, con el fin de comparar y elegir el de mejores resultados.

2.9 Balance de masa del reactor de lavado ácido

La figura muestra la representación del reactor de lavado ácido mediante el cual se determinará la concentración de Ni, Fe, Cu y Au presentes en el carbón a la entrada y salida del reactor para 450 g de CA.

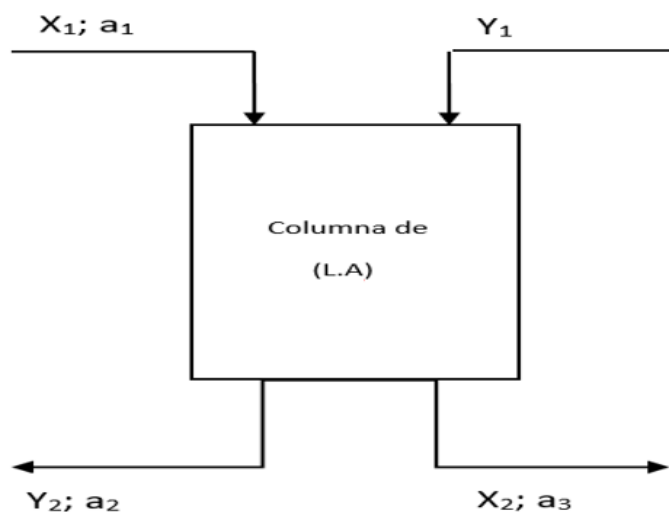


Figura 3 Reactor de lavado ácido

donde

X₁ Cantidad de carbón activado que se alimenta al reactor Kg/día.

X₂ Cantidad de carbón activado lavado que sale del reactor kg.

Y₁ Volumen inicial del reactivo ácido que se alimenta al reactor m³.

Y₂ Volumen final de reactivo que sale del reactor m³.

a₁ Concentración de adsorbatos no deseables presente en la superficie del carbón activado inicial g/t.

a₂ Concentración adsorbatos desorbidos del carbón activado g/t.

a₃ Concentración de adsorbatos no desorbidos del carbón activado g/t.

Planteamiento del balance de masa

El contenido inicial de adsorbatos no deseados presentes en el carbón activado se determina por la ecuación 1.

$$a_1 = a_2 + a_3 \quad (1)$$

El contenido de adsorbatos no deseados presentes en el carbón activado se determina mediante la ecuación 2.

$$a_3 = a_1 - a_2 \quad (2)$$

La concentración de adsorbatos desorbidos del carbón activado y arrastrados por el lavado ácido se determina por la ecuación 3.

$$a_2 = a_1 - a_3 \quad (3)$$

Conclusiones parciales

Después de terminar este capítulo se puede concluir:

El método de muestreo y preparación de la muestra garantizan la representatividad de la misma. El diseño experimental y las técnicas analíticas empleadas garantizan la fiabilidad y reproducibilidad de los resultados.

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se realiza la fundamentación práctica del diseño de experimento planteado en el capítulo anterior, se determina la desorción de los adsorbatos no deseados en cada uno de los ensayos del experimento con el objetivo de comparar y elegir el de mejores resultados para su posterior uso.

3.1 Prueba de desorción

Después de realizar las pruebas experimentales de desorción al carbón activado procedente del proceso de lixiviación por el método carbón en lixiviación (CIL), de la planta de oro ``Oro Descanso`` con el objetivo de eliminar los adsorbatos de níquel, hierro, y cobre preservando el oro en los carbones, se pudo observar una serie de resultados condicionados por la variación de parámetros.

3.1.1 Prueba de desorción con ácido clorhídrico (HCL)

La prueba de desorción con HCl será realizada bajo las condiciones del diseño de experimento planteado, teniendo como indicador el contenido inicial del carbón que aparece en la tabla 3, con el objetivo de obtener un carbón lo más limpio posible de adsorbatos no deseados y comparar los ensayos para elegir el que mejores resultados muestre, los cianicidas que se desorben del carbón se determinan por diferencia.

3.1.1.1 Análisis de la concentración de metales en el carbón, después del lavado con ácido clorhídrico (HCl)

En esta tabla se muestra la concentración de adsorbatos presentes en el carbón activado después de ser lavado con HCl.

Tabla 5 Composición del CA producto del lavado con HCl, en g/t.

Experimentos	Au	Cu	Ni	Fe
HCl 1	715,9	136,3	5 576	503
HCl 2	675,2	135,6	4 875	845
HCl 3	718,2	118,7	3 994	855
HCl 4	728,6	127,7	3 994	481
HCl 5	712,6	141,1	3 918	1 304
HCl 6	724,8	137,9	3 857	688
HCl 7	682,5	139,6	3 344	176,2
HCl 8	686,2	87,2	2 322	125,75

Según los resultados de la tabla 5 y las figuras 4 y 5 se puede concluir que en los ensayos uno y dos a temperatura ambiente, tiempo de duración de una hora y concentración de 5 % y 10 % respectivamente, al compararlo con la lectura inicial de los carbones, prácticamente no hubo desorción del níquel y cobre, aunque se desorbió el 72 % del contenido de hierro inicial. En los ensayos tres y cuatro con las mismas condiciones excepto por la temperatura del lavado que se realiza a 70 °C durante todo el experimento se observa una mejoría en comparación con los ensayos uno y dos al obtenerse un contenido de níquel en el carbón de 71 %, en el ensayo cuatro, el cobre e hierro también disminuyen ligeramente, manteniendo prácticamente todo el oro en el carbón, todo parece indicar que la temperatura del lavado influyó en los cambios ocurridos, también se puede observar que los ensayos que utilizan mayor concentración de reactivo presentan mejores resultados. En los ensayos cinco y seis con las mismas condiciones del uno y el dos variando el tiempo de duración a dos horas, se muestra una ligera mejoría encontrándose el níquel en el carbón en un 70 % manteniendo la desorción de los demás metales similares, mostrando mejores resultados, el experimento seis. Los experimentos siete y ocho con las mismas condiciones que los dos anteriores variando la temperatura a 70 °C muestran mejores resultados que los demás ensayos, siendo el ensayo ocho el más efectivo de todos con un contenido de níquel en el carbón de 41 %, el hierro en un 3 % y el cobre en un 54 % en cuanto al oro mantiene los parámetros similares con los demás experimentos, lo que demuestra que a mayor tiempo se obtienen mejores resultados, esto combinado con una concentración del 10 % y una temperatura de 70 °C.

3.1.1.2 Resultados de la concentración de metales desorbidos del carbón producto del lavado con ácido clorhídrico (HCl)

En la tabla 6 se muestran las concentraciones de metales desorbidos del carbón después de lavar el carbón con HCl.

Tabla 6 Concentración de los metales de interés desorbidos del CA en g/t.

Experimentos	Au	Cu	Ni	Fe
HCl 1	38,99	24,9	2	3 223,67
HCl 2	79,69	25,6	703	2 881,67
HCl 3	36,69	42,5	1 584	2 871,67
HCl 4	26,29	33,5	1 584	3 245,67
HCl 5	42,29	20,1	1 660	2 422,67
HCl 6	30,09	23,3	1 721	3 038,67
HCl 7	72,39	21,6	2 234	3 550,47
HCl 8	68,69	74	3 256	3 600,92

En la tabla 6 y las figuras 4 y 5 se muestra la concentración de metales desorbidos del carbón activado, esto confirma lo planteado por el análisis de los metales presentes en el carbón, alto contenido de los metales de interés en los ensayos siete y ocho demostrando que el tiempo de duración de los experimentos a dos horas, la temperatura a 70 °C y la concentración al 10 % muestran los mejores resultados.

Las figuras 4 y 5 muestran el comportamiento del níquel, hierro, cobre y oro en cada uno de los ensayos con HCl.

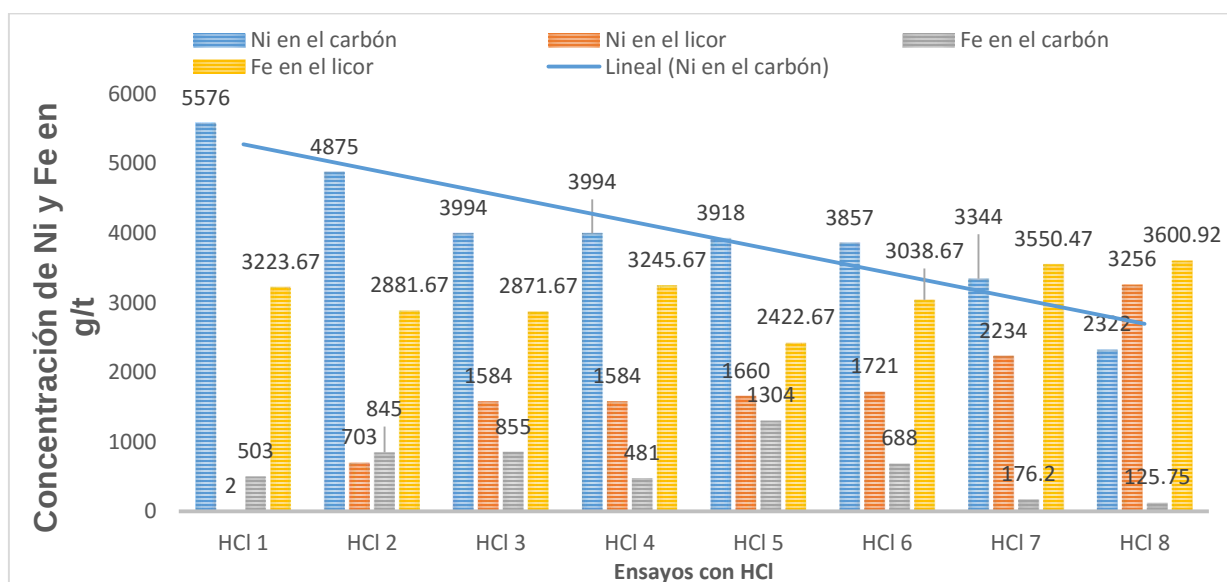


Figura 4 Concentración de Ni y Fe en el CA y desorbidos del mismo, en los ocho ensayos con HCl.

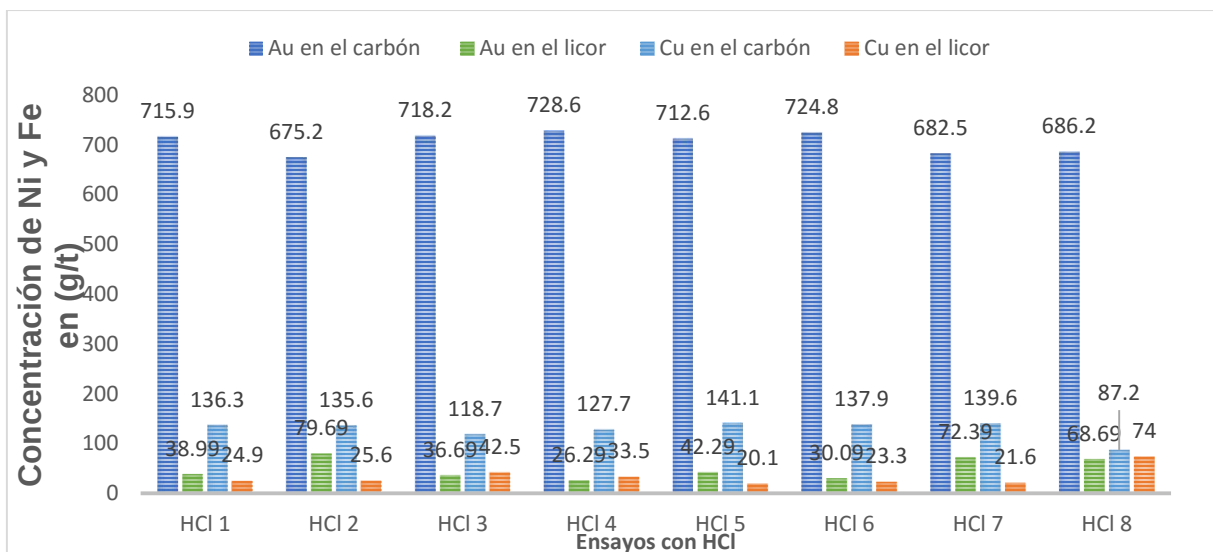


Figura 5 Concentración de Au y Cu en el CA y desorbidos del mismo, en los ocho ensayos con HCl.

Las figuras 4 y 5 muestran la comparación entre los ensayos con HCl donde se observa que los mejores resultados en cuanto a la desorción de adsorbatos no deseados, los muestra el ensayo ocho, la línea de tendencia de la figura 4 muestra la desorción del níquel del carbón activado donde se observa su punto más bajo en el ensayo 8.

3.1.2 Prueba de desorción con ácido nítrico (HNO_3)

La prueba de desorción con HNO_3 se realiza según el ensayo de experimento (tabla 4). La concentración promedio de los metales de interés que se muestran en la tabla 3 son los indicadores de desorción; con el contenido inicial de estos cianicidas y la concentración de los mismos presentes en el carbón se determina los metales desorbidos del carbón activado.

3.1.2.1 Análisis de la concentración de metales en el carbón después del lavado con ácido nítrico (HNO_3)

En la tabla 7 se muestra la concentración de adsorbatos presentes en el carbón activado después de ser lavado con HNO_3 siguiendo los requisitos del diseño de experimento planteado.

Tabla 7 Composición del CA producto del lavado con HNO₃, en g/t.

Experimentos	Au	Cu	Ni	Fe
HNO ₃ 1	688,2	127,18	5 558	206
HNO ₃ 2	655,7	140,7	5 174	3 124
HNO ₃ 3	706,8	114,6	4 812	1 889
HNO ₃ 4	700,4	122,7	5 535	686
HNO ₃ 5	686,2	114	3 532	2 813
HNO ₃ 6	722,1	139,7	4 450	1 031
HNO ₃ 7	752,7	160	3 499	3 580
HNO ₃ 8	750,4	143	3 027	1 295

En la tabla 7 y las figuras 6 y 7 se observan los resultados de la concentración de metales presentes en el carbón de lo cual se puede concluir que en los seis primeros experimentos prácticamente no hay desorción Cu, Ni y Fe sin importar la variación de los parámetros, en los dos últimos experimentos se observa una ligera mejoría en la desorción de estos metales demostrando que la temperatura a 70 °C y el tiempo a dos horas siguen siendo factores claves, el ensayo 8 muestra los mejores resultados logrando una desorción de: Ni – 46 %, Fe – 65 %, Cu – 11 % y Au – 1 %.

3.1.2.2 Análisis de la concentración de metales desorbidos del carbón producto del lavado con ácido nítrico (HNO₃)

En la tabla 8 se muestran la concentración de los metales presentes en el licor después de lavar el carbón con HNO₃.

Tabla 8 Concentración de los metales de interés desorbidos del CA en g/t.

Experimentos	Au	Cu	Ni	Fe
HNO ₃ 1	66,69	34,02	20	3 520,67
HNO ₃ 2	99,19	20,5	404	602,67
HNO ₃ 3	48,09	46,6	766	1 837,67
HNO ₃ 4	54,49	38,5	43	3 040,67
HNO ₃ 5	68,69	47,2	2 046	913,67
HNO ₃ 6	32,79	21,5	1 128	2 695,67
HNO ₃ 7	2,19	1,2	2 079	146,67
HNO ₃ 8	4,49	18,2	2 551	2 431,67

La tabla 8 y las figuras 6 y 7 muestran la concentración de metales desorbidos del carbón, donde existe poca presencia de los metales de interés excepto por los dos últimos ensayos, aun así, siguen siendo insuficiente, también se puede observar que la concentración no es un factor clave ya que los resultados en algunos casos manteniendo los mismos parámetros son mejores con menos concentración como es el caso del experimento tres y cinco, siendo así resultados muy inestables y con poca desorción en todos los experimentos.

Las figuras 6 y 7 muestran el comportamiento del níquel, hierro, cobre y oro en cada uno de los ensayos con HNO_3 .

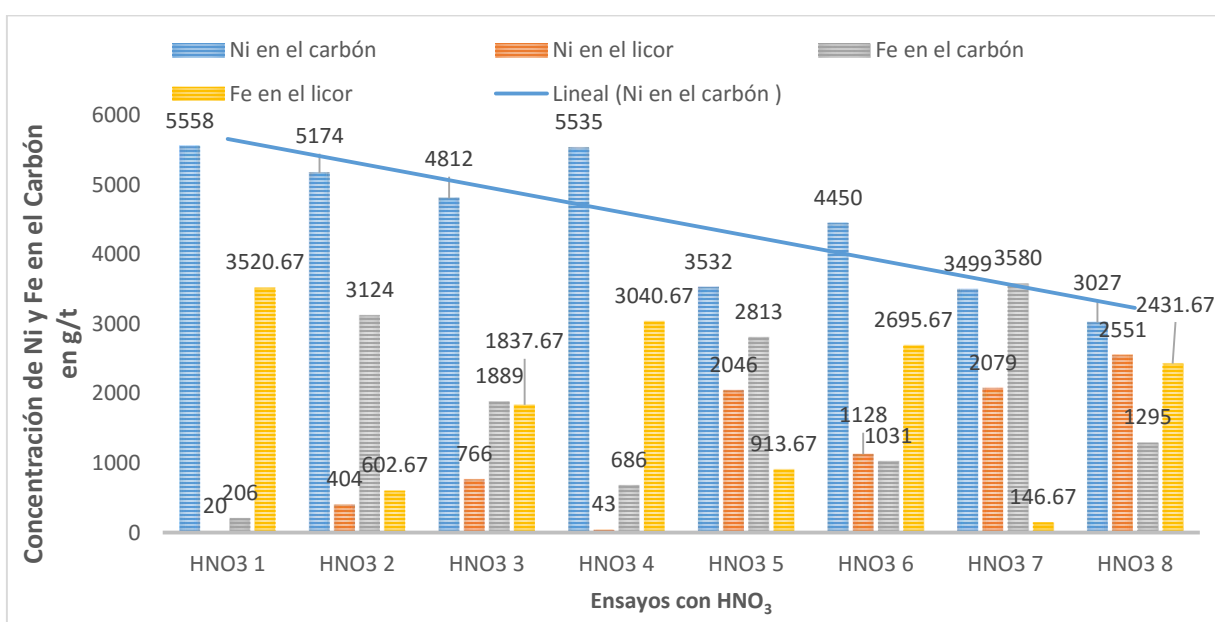


Figura 6 Concentración de Ni y Fe en el CA y desorbidos del mismo, en los ocho ensayos con HNO_3 .

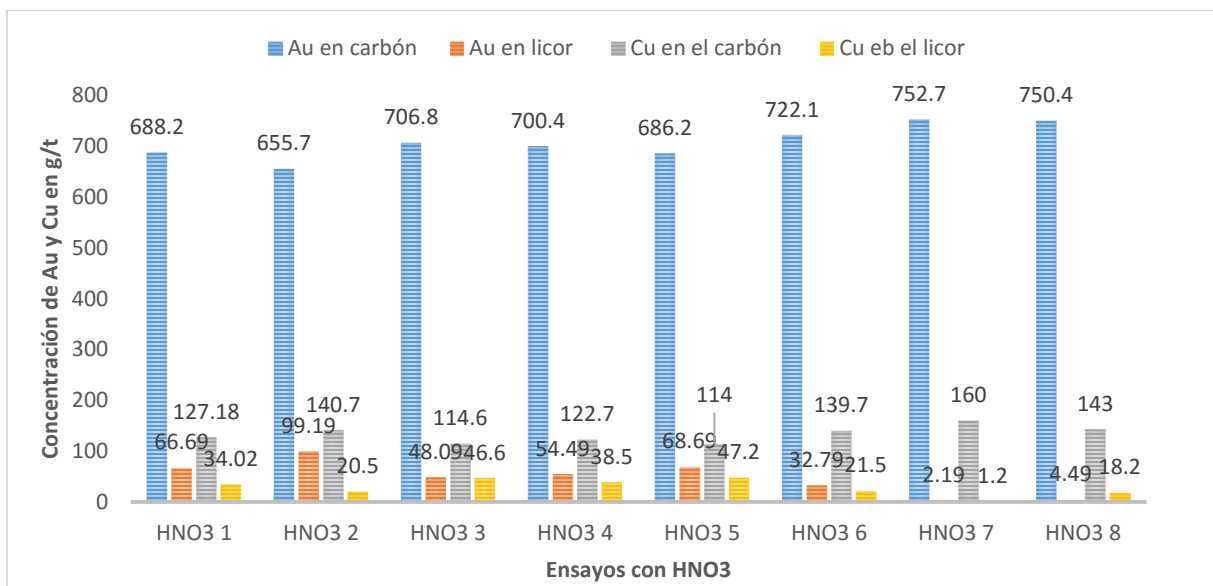


Figura 7 Concentración de Au y Cu en el CA y desorbidos del mismo, en los ocho ensayos con HNO₃.

Las figuras 6 y 7 muestran la comparación entre los ensayos con HNO₃ donde se observa que los mejores resultados en cuanto a la desorción de adsorbatos no deseados, lo muestra el ensayo ocho, la línea de tendencia de la figura 6 muestra la desorción del níquel del carbón activado donde se observa su punto más bajo en el ensayo 8.

3.1.3 Prueba de desorción con ácido sulfúrico (H₂SO₄)

La prueba de desorción con H₂SO₄ se realiza bajo las condiciones del diseño de experimento de la tabla 4. La concentración promedio de los metales de interés que se observan en la tabla 3 (muestra inicial) es empleado como indicador de desorción de estos cianicidas. Los metales desorbidos del carbón se determinan por diferencia.

3.1.3.1 Análisis de la concentración de metales en el carbón después del lavado con ácido sulfúrico (H₂SO₄)

En esta tabla se muestra la concentración de adsorbatos presentes en el carbón activado después de ser lavado con H₂SO₄ siguiendo los requisitos del diseño de experimento planteado.

Tabla 9 Composición del CA producto del lavado con H₂SO₄, en g/t.

Experimentos	Au	Cu	Ni	Fe
H ₂ SO ₄ 1	753,2	121	4 102	156
H ₂ SO ₄ 2	754,1	130	3 867	90
H ₂ SO ₄ 3	710,8	127	2 992	603
H ₂ SO ₄ 4	616,0	119	2 976	1 298
H ₂ SO ₄ 5	584,02	136	2 974	1 097
H ₂ SO ₄ 6	600,5	89	2 259	438
H ₂ SO ₄ 7	674,6	108	2 646	874
H ₂ SO ₄ 8	673,6	93	2 062	160

La tabla 9 y las figuras 8 y 9 muestran la concentración de metales presentes en el carbón. En los ensayos con H₂SO₄ se observan los peores resultados en el experimento uno y dos, donde prácticamente no hay desorción de los metales de interés excepto por el hierro que lo elimina casi en su totalidad, se empieza a observar una mejoría a partir de los experimentos tres y cuatro donde el contenido de níquel en el carbón se encuentra en 53 % con respecto al contenido inicial, manteniendo el oro prácticamente intocable, el hierro sigue eliminándose más que cualquier otro metal. En los experimentos cinco y seis se observa un carbón más limpio de adsorbatos no deseados que en los experimentos anteriores y los mejores resultados se observan en el últimos experimentos logrando una desorción de: Ni – 63 %, Fe – 96 %, Cu – 42 % y Au – 11 %, corroborando lo que ha pasado en los experimentos con los otros reactivos, que a una temperatura de 70 °C un tiempo de dos horas y una mayor concentración de reactivos existe mayor desorción.

3.1.3.2 Análisis de la concentración de metales desorbidos del carbón activado producto del lavado con ácido sulfúrico (H₂SO₄)

En la tabla 10 se muestran la concentración de metales presente en el licor después de lavar el carbón con H₂SO₄.

Tabla 10 Concentración de los metales de interés desorbidos del CA en g/t.

Experimentos	Au	Cu	Ni	Fe
H ₂ SO ₄ 1	1,69	40,2	1 476	3 570,67
H ₂ SO ₄ 2	0,8	31,20	1 711	3 636,67
H ₂ SO ₄ 3	44,09	34,2	2 586	3 123,67
H ₂ SO ₄ 4	138,89	42,2	2 602	2 428,67
H ₂ SO ₄ 5	170,87	25,2	2 604	2 629,67
H ₂ SO ₄ 6	154,39	89	3 319	3 288,67
H ₂ SO ₄ 7	80,29	53,2	2 932	2 852,67
H ₂ SO ₄ 8	81,29	68,2	3 516	3 566,67

La tabla 10 y las figuras 8 y 9 muestran la concentración de metales desorbidos del carbón activado lo cual corrobora lo dicho por el análisis de metales presentes en el carbón, mayor presencia de adsorbatos en los ensayos siete y ocho con una gran desorción de níquel, hierro y cobre superior a todos los ensayos anteriores, pero se observa un ligero aumento de la concentración de oro en el licor.

Las figuras 8 y 9 muestran el comportamiento del níquel, hierro, cobre y oro en cada uno de los ensayos con H₂SO₄.

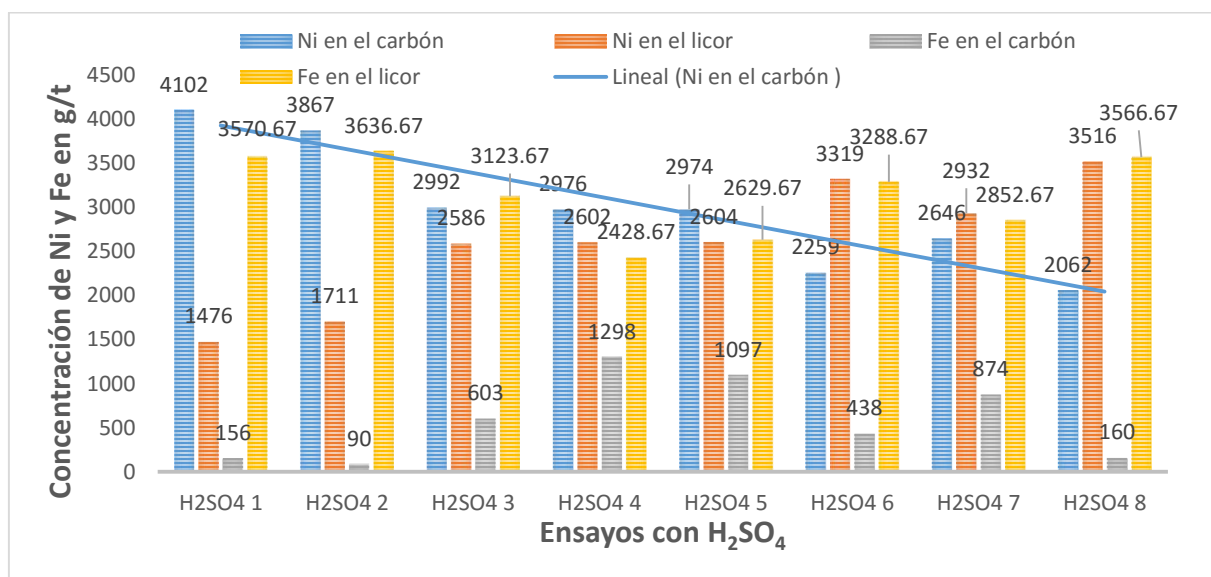


Figura 8 Concentración de Ni y Fe en el CA y desorbidos del mismo, en los ocho ensayos con H₂SO₄.

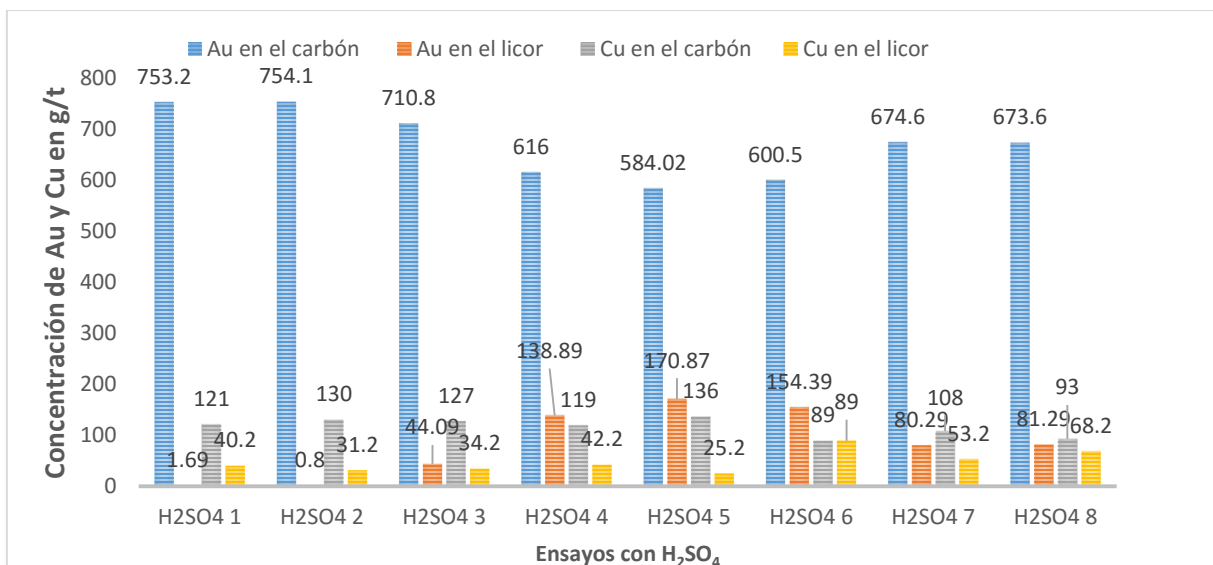


Figura 9 Concentración de Au y Cu en el CA y desorbidos del mismo, en los ocho ensayos con H_2SO_4 .

Las figuras 8 y 9 muestra la comparación entre los ensayos con H_2SO_4 donde se observa que los mejores resultados en cuanto a la desorción de adsorbatos no deseados, los muestra el ensayo ocho, la línea de tendencia de la figura 8 muestra la desorción del níquel del carbón activado donde se observa su punto más bajo en el ensayo 8.

3.2 Interpretación de los resultados

Según los resultados de los 24 experimentos con los tres reactivos del carbón activado se puede llegar a la siguiente conclusión:

Los mejores resultados de desorción de los adsorbatos no deseados fueron mostrados por los experimentos con ácido clorhídrico y ácido sulfúrico debido a que en el ácido nítrico a pesar de que se mantuvieron los mismos parámetros para cada reactivo dio resultados muy inestables y mostró poca desorción de níquel, hierro y cobre. En el caso de los experimentos con ácido clorhídrico los mejores resultados fueron los del ensayo ocho, a una temperatura de 70 °C un tiempo de duración de dos horas y una concentración del 10 %, quedando sin ser desorbido un contenido de níquel en el carbón de 41 %, de hierro solo un 3 % y de cobre un 54 % , a pesar de que el oro presente en el carbón es del 89 %, tratándose de oro hay que considerar esa desorción

para la ubicación de la torre de lavado ácido. En el caso del ácido sulfúrico el mejor resultado también fue arrojado por el experimento ocho, lo cual demuestra que a un tiempo de dos horas, una temperatura de 70 °C y una concentración del 10 % son los parámetros que mejores resultados aportan, en este ensayo se observa la mayor desorción de níquel de todos los ensayos anteriores, encontrándose presente en el carbón solo un 36 % con respecto al contenido inicial, en el caso del hierro solo queda en el carbón el 4 %, de cobre queda un 50 %, el oro se encuentra presente en un 89 %, aun así se debe considerar este arrastre de oro para la ubicación de la torre de lavado ácido.

3.3 Ensayos exploratorios

Antes de la elección de un reactivo con las condiciones planteadas por el diseño de experimento, y observando que al aumentar el tiempo de duración de experimento aumentaba la desorción de los adsorbatos no deseados presente en el carbón se decidió repetir los experimentos **ochos** con ácido clorhídrico y el ácido sulfúrico bajo las mismas condiciones, pero variando el tiempo de duración a **tres horas** período máximo al que permite operar la torre de lavado ácido de la planta, los resultados arrojaron lo siguiente.

3.3.1 Análisis de los metales presentes en el carbón

La tabla 11 muestra los resultados de los experimentos ochos repetidos manteniendo los mismos parámetros de concentración del ácido y temperatura iguales, pero aumentando el tiempo de duración a 3 h. Se tiene como indicador de desorción el contenido promedio inicial del carbón que aparece en la tabla 3.

Tabla 11 Concentración de metales en carbón activado producto del lavado ácido con ácido clorhídrico y sulfúrico, en g/t.

Experimentos	Au	Cu	Ni	Fe
HCL 8	754,89	80	1 024	500
H ₂ SO ₄ 8	754,89	83	1 328	638

La tabla 11 de los experimentos repetidos aclara que el tiempo de duración de la reactivación es un factor clave mostrando muy buenos resultados. En el ensayo ocho

con ácido clorhídrico el contenido de níquel en el carbón solo se encuentra en un 18 %, el hierro solo se encuentra en un 13 %, el cobre en un 49 %, y no hay desorción de oro lo cual es muy bueno porque el lavado ácido puede realizarse antes del proceso de elución y electrólisis, sin que ocurran riesgos de pérdida de oro en el licor ácido. En el caso del ácido sulfúrico los resultados fueron muy buenos, pero superados por los del ácido clorhídrico, también se observó que el aumento del tiempo de duración de la reactivación ácida no aumenta la desorción del hierro, del cobre, ni del oro, lo cual nos indica que el níquel necesita un mayor tiempo para ser separado del carbón que el hierro y el cobre.

3.3.2 Análisis de la concentración de metales desorbidos del carbón activado

La tabla 12 muestra la concentración de metales desorbidos del CA después de repetir los experimentos ocho manteniendo los mismos parámetros de concentración del reactivo y temperatura iguales, pero aumentando el tiempo de duración a 3 h.

Tabla 12 Concentración de los metales de interés desorbidos del CA en g/t.

Experimentos	Au	Cu	Ni	Fe
HCL 8	0	81,2	4 554	3 226,67
H ₂ SO ₄ 8	0	78,2	4 250	3 088,67

La tabla 12 y las figuras 10 y 11 muestran los metales desorbidos del CA donde se confirma el análisis de la concentración de metales en el carbón, alto contenido de los adsorbatos considerados como impureza en el licor ácido y no hay oro en ninguno de los dos experimentos, de los dos experimentos el de mejores resultados fue el que se utilizó ácido clorhídrico logrando una desorción de: níquel - 82 %, de hierro - 87 % y cobre - 51 %, manteniendo todo el oro en el carbón.

Las figuras 10 y 11 muestran la concentración de hierro, níquel, cobre y oro, en carbón y el licor utilizando los reactivos de ácido clorhídrico y ácido sulfúrico, manteniendo las condiciones de los ensayos ocho repetidos a tres horas, en la cual se demuestra lo planteado en la explicación de las tablas 12 y 13.

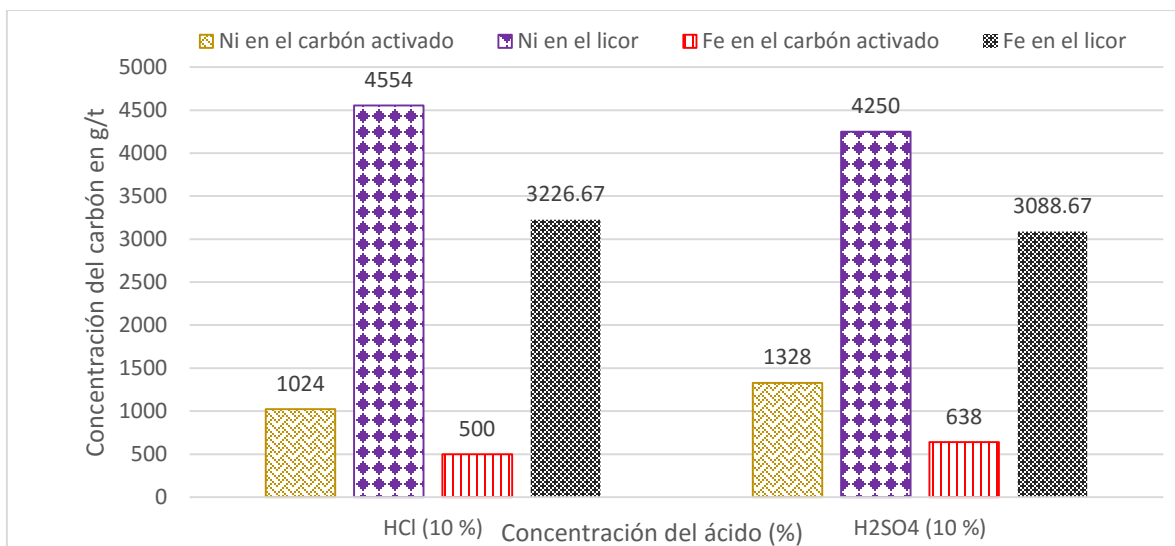


Figura 10 Concentración de Ni y Fe en el CA y desorbidos del mismo, en el ensayo ocho a tres horas con H₂SO₄ y HCl.

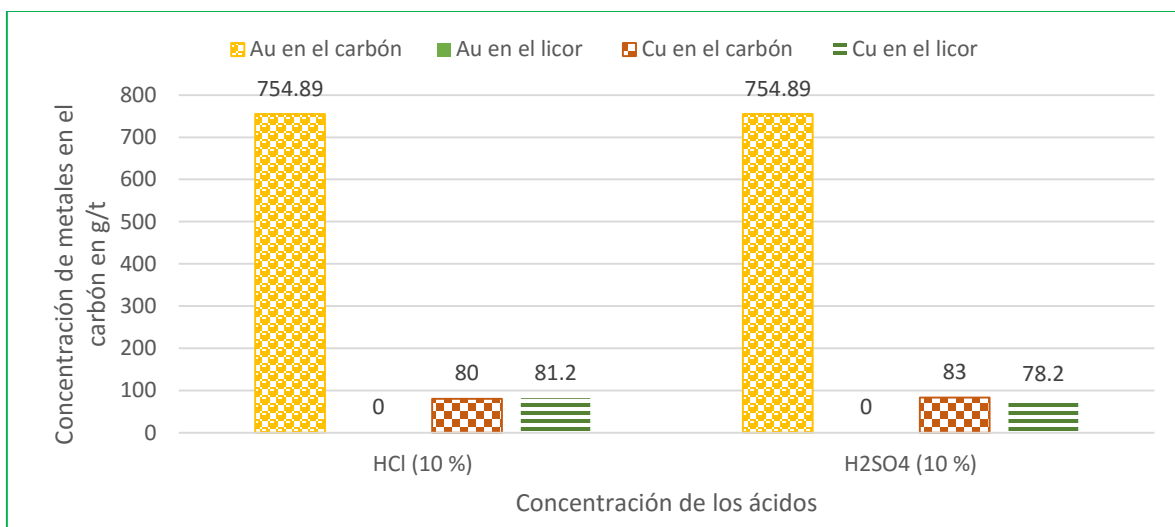


Figura 11 Concentración de Au y Cu en el CA y desorbidos del mismo, en el ensayo ocho a tres horas con H₂SO₄ y HCl.

3.4 Prueba de desorción con H₂O (blanco)

Con la prueba de desorción con agua se demostrará la necesidad de utilizar reactivos para el lavado ácido del CA.

3.5.1 Análisis de metales presente en el carbón activado

La tabla 13 muestra la concentración de metales presentes en el carbón activado producto del lavado con agua. Se tiene como indicador de desorción el contenido promedio inicial del carbón que aparece en la tabla 3.

Tabla 13 Composición del carbón activado producto del lavado con agua en g/t.

Experimento	Au	Cu	Ni	Fe
H ₂ O	720	121	5 000	1 357

La tabla 13 muestra la prueba de desorción con agua, siguiendo los mismos pasos que los experimentos anteriores y puestos en baño maría por 3 horas, se puede observar que existió una pequeña desorción de los metales, pero no fue suficiente, demostrando que es imprescindible la utilización de reactivos para la desorción de los metales de interés.

3.5.2 Análisis de metales desorbidos del carbón activado

La tabla 14 muestra la concentración de metales desorbidos del CA después de realizarse el lavado con agua.

Tabla 14 Concentración de los metales desorbidos del CA g/t.

Experimento	Au	Cu	Ni	Fe
H ₂ O	34,89	40,2	578	2 369

Como se puede observar en la tabla 14 existen metales de interés desorbidos del carbón activado, pero en muy bajas cantidades, excepto por el hierro que se encuentra presente en un 50 % en el licor, pero aun así sigue siendo necesario la utilización de los reactivos.

3.6 Determinación de la prueba con mayor eficiencia para el lavado ácido

Después de realizar los experimentos requeridos para la selección del reactivo adecuado, bajo los parámetros de temperatura, concentración y tiempo de duración de la reactivación ácida, se ha llegado a la siguiente conclusión.

El reactivo que será utilizado para la eliminación de los adsorbatos no deseados en la superficie del carbón activado será el ácido clorhídrico bajo las condiciones del ensayo exploratorio ocho que se realizó en un tiempo de tres horas, una temperatura de 70 °C y una concentración de reactivo del 10 %. Este ensayo supera con mejores resultados al experimento ocho del ácido sulfúrico a tres horas. Se selecciona el experimento con HCl por que presenta los valores de desorción de impurezas más elevado de todas las pruebas realizadas, eliminando la mayor cantidad de níquel, hierro y cobre de todos los experimentos, además de mantener todo el oro en el carbón y eliminar un alto contenido de hierro y cobre.

3.7 Balance de masa del reactor del lavado ácido

Mediante el balance de masa se determinará la cantidad de adsorbatos no deseados desorbidos del carbón activado y el contenido de adsorbatos presentes todavía en el carbón partiendo de 480 kg de carbón a lavar mediante las condiciones experimento exploratorio a tres horas con ácido clorhídrico, con una concentración del 10 % y una temperatura.

La tabla 15 muestra la concentración de adsorbatos promedio presente en el carbón activado antes del lavado ácido.

Tabla 15 Promedio de adsorbatos presentes en el carbón activado antes del lavado ácido.

muestras	Contenido de metales en g/t			
	Au	Cu	Ni	Fe
M _p	754,89	161,2	5578	3726,67

Determinación de la desorción de níquel

Se procede a determinar el contenido de níquel, hierro, oro y cobre existente a la salida del reactor con el licor ácido al desorberse del carbón activado y la concentración de estos mismos metales que no fueron separados del carbón activado por el lavado ácido, para una masa de 480 kg/día de CA siguiendo las condiciones del experimento 8 con ácido clorhídrico a tres horas (experimento exploratorio).

Concentración de níquel en 480 kg de carbón inicial (a_1):

$$5578 \frac{g}{t} = 5,578 \frac{g}{kg} \cdot 480 \text{ kg} = 2677,44 \text{ g}$$

Concentración de níquel en 480 kg de carbón a la salida del reactor según la tabla 15 (a₃):

$$1024 \frac{g}{t} = 1,024 \frac{g}{kg} \cdot 480 \text{ kg} = 492,544 \text{ g}$$

Concentración de níquel en el licor (a₂) será determinado por la ecuación 2:

$$2677,44 - 492,544 = 2184,896 \text{ g}$$

Determinación de la desorción de hierro

Concentración de hierro en 480 kg de carbón inicial (a₁).

$$3726,67 \frac{g}{t} = 3,726 \frac{g}{kg} \cdot 480 \text{ kg} = 1788,48 \text{ g}$$

Concentración de hierro en 480 kg de carbón a la salida del reactor según la tabla 15 (a₃).

$$500 \frac{g}{t} = 0,5 \frac{g}{kg} \cdot 480 \text{ kg} = 240 \text{ g}$$

La concentración del hierro en el licor (a₂) será determinado por la ecuación 2.

$$1788,48 - 240 = 1548,48 \text{ g}$$

Determinación de la desorción cobre

Concentración de cobre en 480 kg de carbón inicial (a₁).

$$161,2 \frac{g}{t} = 0,161 \frac{g}{kg} \cdot 480 \text{ kg} = 77,376 \text{ g}$$

Concentración de cobre en 480 kg de carbón a la salida del reactor según la tabla 15 (a₃).

$$80 \frac{g}{t} = 0,08 \frac{g}{kg} \cdot 480 \text{ kg} = 38,4 \text{ g}$$

La concentración del cobre en el licor (a₂) será determinado por la ecuación 2

$$361,92 - 38,4 = 323,52 \text{ g}$$

Determinación de la desorción oro

Concentración de oro en 480 kg de carbón inicial (a_1).

$$754,89 \frac{g}{t} = 0,754 \frac{g}{kg} \cdot 480 \text{ kg} = 361,92 \text{ g}$$

El lavado ácido con las condiciones del experimento elegido no influye sobre la adsorción de oro en el carbón activado, por lo tanto, no hay arrastre de oro con el licor ácido y sale el 100 % del oro que hay en el carbón.

La tabla 16 muestra el contenido de níquel, hierro, oro y cobre presente en el carbón a la entrada del reactor y el contenido de estos metales desorbidos del carbón y salen con licor ácido y los metales que no fueron separados de carbón por el lavado ácido y salen del proceso todavía adsorbidos en el carbón.

Tabla 16 Balance de masa de los cianicidas presentes en 480 kg carbón activado (g).

Entrada (g)			
Au	Cu	Ni	Fe
361,92	77,37	2 677,44	1 788,48
Salida de metales con carbón (g)			
361,92	38,4	492,544	240
Salida de metales con el licor ácido (g)			
0	38,97	2 184,896	1 548,48
Total (g)			
361,92	77,37	2 677,44	1 788,48

El balance de masa muestra una gran desorción de adsorbatos no deseados presentes en el carbón activado, lo cual hace que el lavado ácido haya cumplido su objetivo, logrando una desorción de níquel del carbón de 82 % con respecto al contenido inicial, la desorción del hierro fue del 87 %, la del cobre de un 50 % y no hubo desorción de oro.

3.8 Ubicación de la torre de lavado ácido

La ubicación del lavado ácido está dada por la desorción de oro del carbón activado, según los resultados del ensayo ocho no hay desorción de oro, lo cual permite colocar el lavado ácido después de la lixiviación en tanques por el método CIL y antes del proceso de elución y electrólisis, ya que no hay arrastre de oro en el licor ácido, esto deja preparado el carbón activado libre de adsorbatos no deseados, para su posterior proceso de elución y electrólisis.

3.9 Valoración ecológica

Toxicidad del ácido clorhídrico

El ácido clorhídrico es irritante y corrosivo para cualquier tejido con el que tenga contacto. La exposición breve a bajos niveles de concentración produce irritación en la garganta. La exposición a niveles más altos de concentración produce respiración agitada, estrechamiento de los bronquiolos, coloración azul de la piel, acumulación de líquidos en los pulmones e incluso la muerte. La exposición a niveles de concentración aún más altos puede producir hinchazón, espasmo de la garganta y asfixia. Algunas personas pueden sufrir una reacción inflamatoria al ácido clorhídrico. Esta condición es conocida como el síndrome de mal funcionamiento reactivo de las vías respiratorias (en inglés, RADS) que es un tipo de asma causado por ciertas sustancias irritantes o corrosivas.

Dependiendo de la concentración, el ácido clorhídrico puede producir desde leve irritación hasta quemaduras graves de los ojos y la piel. La exposición prolongada a bajos niveles de concentración puede causar problemas respiratorios, irritación de los ojos, la piel y decoloración de los dientes.

El licor ácido que sale del proceso de lavado del carbón activado se le adiciona óxido de calcio para ajustar el pH hasta valores superiores a los 10,5 para evitar el contacto de los iones hidronios con el anión cianuro (CN^-) y que se forme el cianuro de hidrógeno (HCN^-) compuesto muy volátil y perjudicial para la salud el hombre y el medio ambiente, luego es enviado a la presa de cola para su posterior neutralización con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y sulfato de cobre (CuSO_4) lo cual provoca la separación de metales pesados y cianicidas del licor.

Conclusiones parciales

Después de realizar los experimentos con ácido clorhídrico, ácido nítrico y ácido sulfúrico siguiendo los requisitos del diseño de experimento planteado, los experimentos exploratorios con ácido clorhídrico, ácido sulfúrico y el experimento con agua (blanco), se demostró que:

- El ensayo 8 con ácido clorhídrico en un tiempo de duración de 2 h, con una concentración de ácido de 10 % y una temperatura de 70 °C mostro los mejores resultados de todos los experimentos con ácido clorhídrico logrando una desorción de: níquel – 59 %, hierro – 97 %, cobre – 46 % y oro – 11 %.
- El ensayo 8 con ácido nítrico en un tiempo de duración de 2 h, con una concentración de ácido de 10 % y una temperatura de 70 °C mostro los mejores resultados de todos los experimentos con ácido nítrico logrando una desorción de: níquel – 46 %, hierro – 65 %, cobre – 11 % y oro – 1 %.
- El ensayo 8 con ácido sulfúrico en un tiempo de duración de 2 h, con una concentración de ácido de 10 % y una temperatura de 70 °C mostro los mejores resultados de todos los experimentos con ácido sulfúrico logrando una desorción de: níquel – 63 %, hierro – 96 %, cobre – 42 % y oro – 11 %.
- El experimento exploratorio 8 con ácido sulfúrico en un tiempo de duración de 3 h, con una concentración de ácido de 10 % a una temperatura de 70 °C mostro una desorción de: níquel – 76 %, hierro – 82 % y cobre 48 % manteniendo el oro en carbón, siendo este resultado mejor que el ensayo 8 a 2 h.
- El experimento exploratorio 8 con ácido clorhídrico en un tiempo de duración de 3 h, con una concentración de ácido de 10 % a una temperatura de 70 °C mostro una desorción de: níquel - 82 %, de hierro - 87 % y cobre - 51 %, manteniendo todo el oro en el carbón, este experimento es el de mejores resultados de todos los experimentos realizados.
- El experimento con agua (blanco) en un tiempo de 3 h y una temperatura de 70 °C mostro una desorción de: níquel – 13 %, cobre 24 %, hierro – 50 % y oro – 4 %, demostrando la necesidad de utilizar los reactivos ácido.

CONCLUSIONES

- Se utiliza un diseño experimental completo de dos niveles y tres factores y experimentos exploratorios, los parámetros que deben utilizarse son: concentración del ácido (10 %), temperatura del lavado ácido (70 °C), tiempo de duración del experimento (3 h).
- El reactivo químico que se emplear para el lavado ácido del carbón es el ácido clorhídrico, ya que, supera al ácido nítrico, en cuanto a la desorción de níquel en 36 %, hierro en 22 % y cobre 40 %, y supera al ácido sulfúrico en cuanto a la desorción de níquel 6 %, hierro en 5 % y cobre en 3 %.
- La eficiencia del lavado con ácido clorhídrico respecto a desorción es de: níquel - 82 %, hierro - 87 % y cobre - 51 %.
- En el diagnóstico ecológico del proceso se mostraron los peligros del ácido clorhídrico para la salud del hombre y el medio ambiente, el licor ácido producto del lavado del carbón activado se le ajusta el pH y se envía a la presa para su neutralización con peróxido de hidrógeno y sulfato de cobre.

RECOMENDACIONES

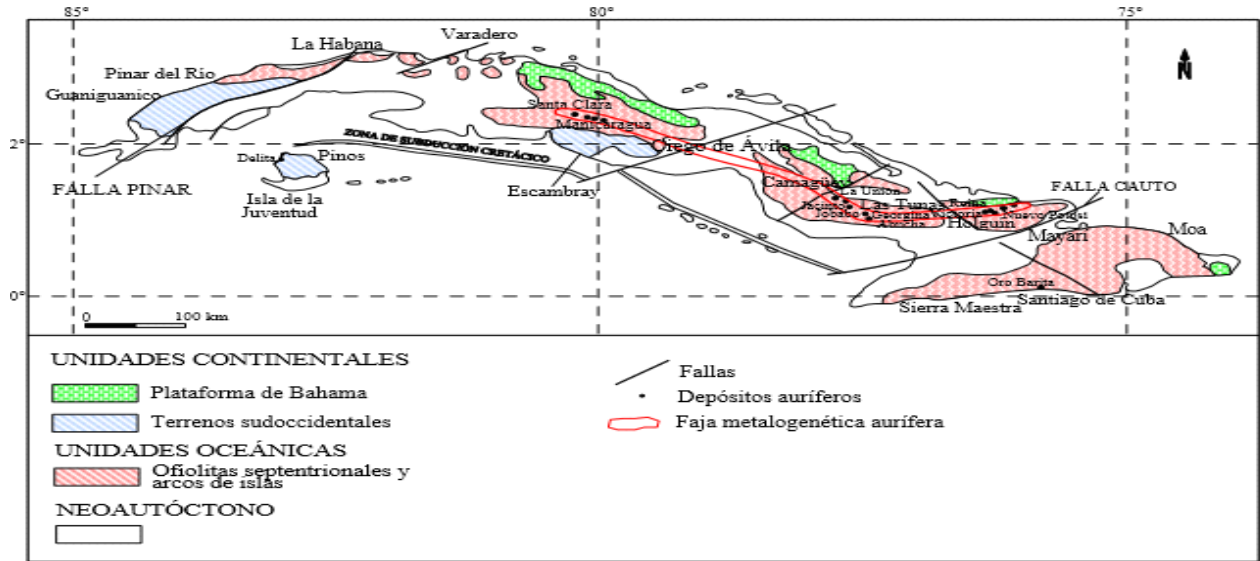
- Estudiar la influencia de la agitación en la cinética de desorción de los adsorbatos no deseados, incluyéndola como una nueva variable.
- Mediante un estudio más detallado determinar el tiempo exacto de desorción de cada metal presente en carbón activado.
- Realizar un balance de masa por componentes con el objetivo de determinar el consumo de ácido clorhídrico.
- Realizar una valoración económica del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

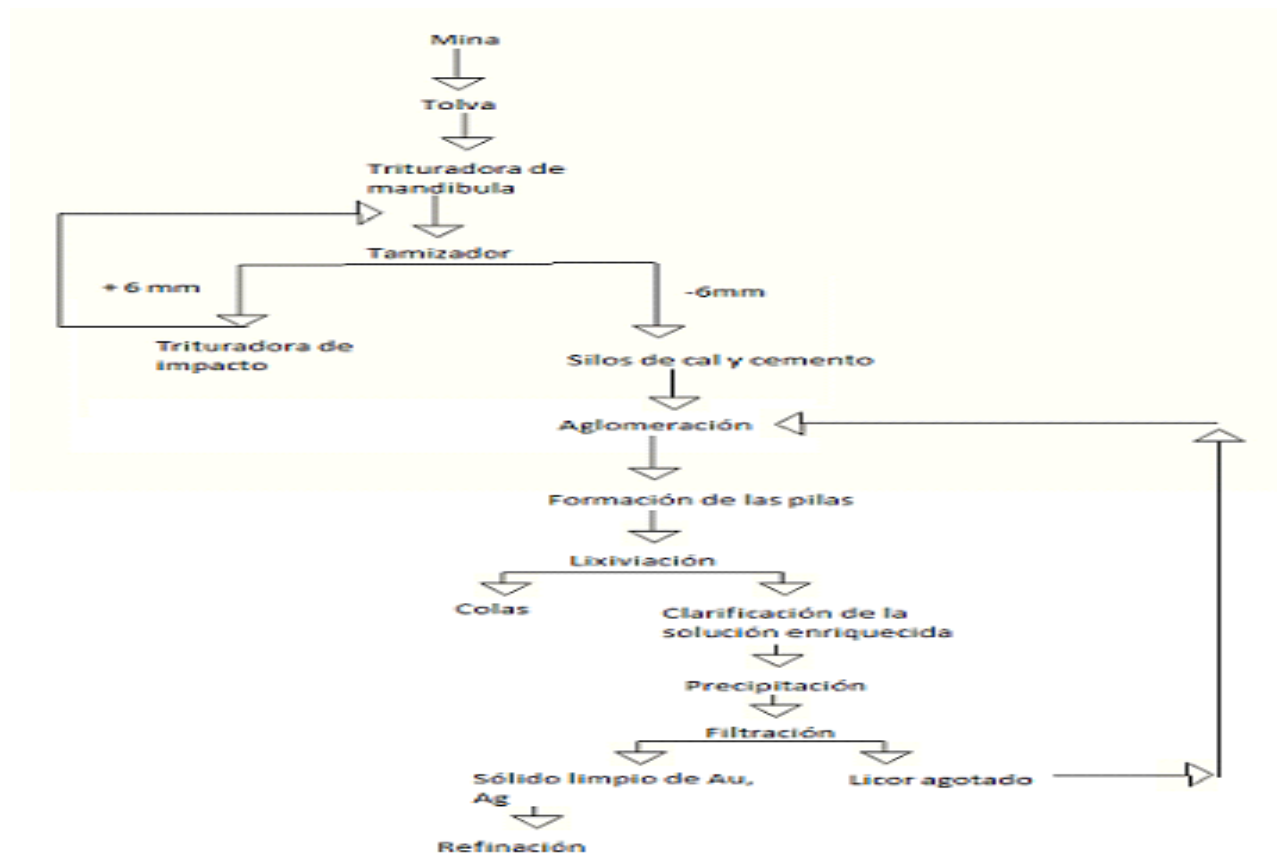
- Alarcón, M. (1 de Octubre de 1971). *Especificaciones de Calidad y Reactivación del Carbón Activado*.
Obtenido de <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/20980/Capitulo2.pdf> índice de yodo 1 .
- Alverca, J. A. (2014). *Reactivación química del carbón activado del tipo calgón americano 6×12 utilizado en la sociedad minera "PROMINE" para el proceso de adsorción de metales preciosos*. Machala. Ecuador .
- Ayala, J. H. (2007). *Generalidades del carbon activado* . España .
- Bansal, R. C. (1988). *Stoeckli Active Carbon*. New York.
- Cáceres, O. Y. (2017). *Adsorción del carbón activado de tallos y hojas de cañihua (Chenopodium pallidicaule), para la recuperación del oro en la minera colibrí S.A.C*. Perú: Universidad Nacional del Altiplano.
- Deventer, J. S. (1985). *Kinetic model for the reversible adsorption of gold cyanide on activated carbon*. South Africa : University of Stellenbosh .
- Espín, J. A. (2001). *El libro de la Minería de Oro en Iberoamérica* . Monterreina: Madrid .
- Estupiñan, P. R., Giraldo, L., & Moreno, J. C. (2011). Oxidación de la superficie de carbón activado mediante HNO₃ y H₂O₂: Efecto sobre la remonación de níquel en solución acuosa. *Revista Colombiana de química. volumen 40* , 349-364.
- Frías, M. F. (2010). *Investigación a escala ampliada del yacimiento Oro Descanso*. La Habana.
- I. N. Maslenski, L. C. (1972). *Metalurgia de los metales nobles*. Moscú: Metalurgia.
- Lobaina, N. C. (24 de Mayo de 2007). Curso de capacitación a mineros. Santa Cruz de la Sierra, Estado de Bolivia.
- Martínez, R. D. (1994). *La pequeña minería del oro en Cuba*. Moa.
- Mendoza, L. J., & Vera, J. A. (2014). *Efectos de la concentración de ácido nítrico del lavado ácido en la eficiencia de remonación de carbonatos del proceso carbón en columnas*. Trujillo : Universidad Nacional de Trujillo.
- Mitrofanov, S. I., Barski, L. A., & Samygin, V. D. (1982). *Investigación de la capacidad de enriquecimiento de minerales*. Moscú: Mir.
- Navarro, P., Vargas, C., & Aguayo, C. (2009). Efecto de las propiedades físicas del carbón activado en la adsorción de oro en medio cianurado. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* , 829-838.
- Nicol, M. J. (1985). *Elution Theory* . New York : Council for Mineral.
- Óre, G. A. (2016). *Diseño evaluativo y balance del proceso de desorción de oro en es carbón activado y sus reactivos en la U.M. Antonio Raymondi*. Arequipa. Perú.

- Qudenne, P. D. (1990). *La experiencia en la carbonización, activación y regeneración de carbón activado*. Lima, Perú: Simposio Internacional de Metalurgia Extractiva y Manufacturera.
- Quintana, G., Velásquez, J., Gómez, C., & Echavarría, Y. (2008). Adsorción de níquel en carbón activado de cascarilla de café. *Revista Investigaciones Aplicadas*, 1-6.
- Rodríguez, M. H., Calvis, A. O., Falcón, J., & Yperman, Y. (2016). Características fisicoquímicas del carbón activado de concha de coco modificado con HNO₃. *Revista Cubana de Química. volumen 29 número 1*, 26-38.
- Sevilla, U. (26 de Abril de 2009). *Universidad Politécnica*. Obtenido de <http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf> (accessed Octubre 2013).
- Torre, E. P. (2004). *Caracterización de un compuesto de carbón activado poliácido acrílico para el tratamiento más limpio de minerales portadores de oro*. Chile : Proceedings of the Clean Technologies for the Mining Industry.
- Valencia, C. (1999). *Estudio del Proceso del Carbón en Pulpa para Minerales Auríferos*. Ecuador : Escuela Politécnica Nacional .
- Vinent, M. A. (2009). *Geología de Cuba para todos*. La Habana: Científico Técnica .
- Voys, F. D. (1983). *The poresize distribution of activated carbon*. Canadá .

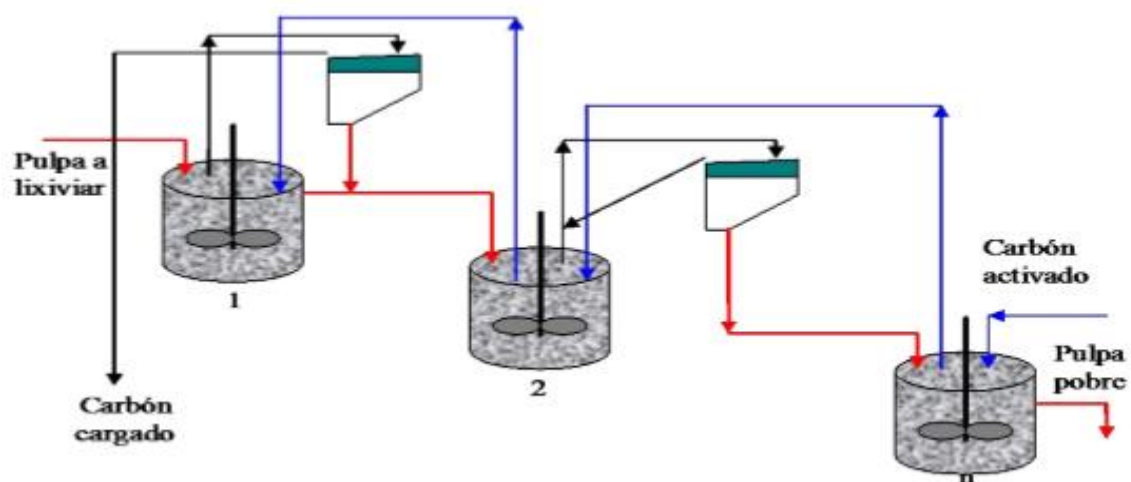
ANEXOS



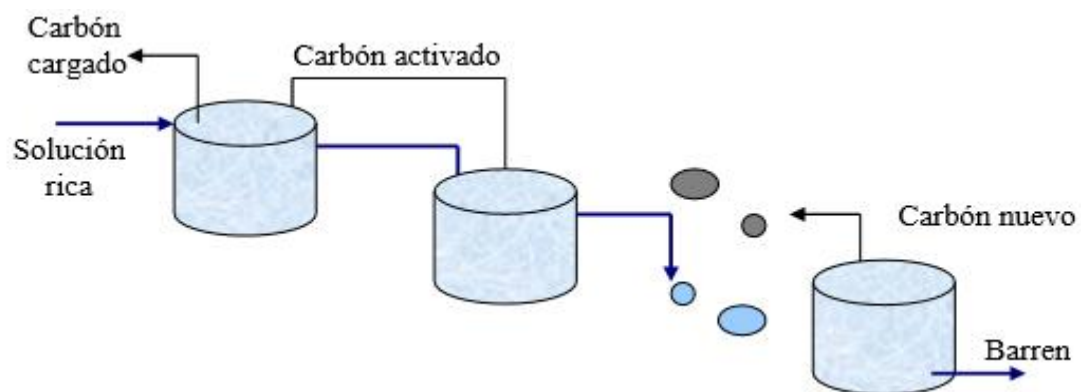
Anexo 1 principales depósitos de oro en Cuba



Anexo 2 Flujo tecnológico de la planta Golden-Hill



Anexo 3 Circuito CIP



Anexo 4 Circuito CIC

Materia prima	Carbón (%)	Volátiles (%)	Densidad (g/cm3)	Ceniza (%)	Textura del carbón activado	Aplicación del carbón activado
Madera suave	40 - 45	55 - 60	0.4 - 0.5	0.3 - 1.1	Suave, gran volumen de poro	Adsorción en fase acuosa
Madera dura	40 - 42	55 - 60	0.55 - 0.80	0.3 - 1.2	Suave, gran volumen de poro	Adsorción en fase acuosa
Lignina	35 - 40	58 - 60	0.3 - 0.4	—	Suave, gran volumen de poro	Adsorción en fase acuosa
Cáscaras de nuez	40 - 45	55 - 60	1.4	0.5 - 0.6	Duro, gran volumen de microporo	Adsorción en fase de vapor
Lignito	55 - 70	25 - 40	1.00 - 1.35	5 - 6	Duro, reducido volumen de poro	Tratamiento de aguas residuales
Carbón suave	65 - 80	20 - 30	1.25 - 1.50	2 - 12	Medianamente duro, volumen de microporo mediano	Adsorción en fase líquida y gaseosa
Coque	70 - 85	15 - 20	1.35	0.5 - 0.7	Medianamente duro, volumen de poro mediano	Tratamiento de aguas residuales
Carbón semiduro	70 - 75	10 - 15	1.45	5 - 15	Duro, gran volumen de poro	Adsorción en fase gaseosa
Carbón duro	85 - 95	5 - 10	1.5 - 1.8	2 - 15	Duro, gran volumen de poro	Adsorción en fase gaseosa

Anexo 5 Propiedades de materias primas usadas para la producción de carbón activado