

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS PROPIEDADES
FÍSICAS DEL CARBÓN ACTIVADO EN
LA ADSORCIÓN DE ORO DESDE
SOLUCIONES CIANURADAS**

TESIS

Presentada por:

Bach. Edwin Yasmani Pilco Arocutipa

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA – PERÚ

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**ESTUDIO DEL EFECTO DE LAS PROPIEDADES
FÍSICAS DEL CARBÓN ACTIVADO EN LA
ADSORCIÓN DE ORO DESDE SOLUCIONES
CIANURADAS**

TESIS

Tesis sustentada el día 26 de diciembre del dos mil diecisiete por el Bachiller Edwin Yasmani Pilco Arocutipá, siendo el Jurado Calificador integrado por:

PRESIDENTE


.....
Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez

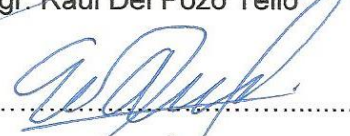
SECRETARIO


.....
Dr. Freddy Cori Nina

VOCAL


.....
Mgr. Raúl Del Pozo Tello

ASESOR


.....
Ing. Zoilo Edgardo Valdivia Infantas

DEDICATORIA

A:

Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por haber puesto en mi camino aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Mi madre María Arocutipa, por darme la vida, quererme mucho, creer en mí y por apoyarme en cada momento y a Papá.

Mi novia, mi hermana, y a mis amigos por estar conmigo y apoyarme siempre. Gracias a todos.

AGRADECIMIENTO

Dios, tú amor y tu bondad no tienen fin, me permites sonreír ante todos mis logros que son resultados de tu ayuda.

A la Universidad Nacional Jorge Basadre de Grohmann – Tacna, por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

Al Ing. Zoilo Edgardo Valdivia Infantas asesor de tesis, por su esfuerzo y dedicación, quien, con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado que pueda terminar la tesis.

También me gustaría agradecer a mis profesores durante toda mi carrera profesional porque todos han aportado con un granito de arena a mi formación y enseñanzas. Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional a las que me encantaría agradecerles su amistad, consejos, apoyo, ánimo y compañía en los momentos más difíciles de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en mi corazón, sin importar en donde estén quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones.

Para ellos: Muchas gracias y que Dios los bendiga.

CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE ANEXOS	xi
RESUMEN	xii
INTRODUCCIÓN	1

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema	3
1.1.1. Antecedentes del problema.	7
1.1.2. Problemática de la investigación.	8
1.2. Formulación del problema	9

1.3.	Justificación e importancia	11
1.4.	Alcances y limitaciones	11
1.5.	Objetivos	12
	1.5.1. Objetivo General.	12
	1.5.2. Objetivos Específicos.	12
1.6.	Hipótesis	12

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes del estudio	13
2.2.	Bases teóricas	14
	2.2.1. Propiedades del carbón.	14
	2.2.2. Carbón activado.	21
	2.2.3. Disolución de los metales preciosos.	27
	2.2.4. Termodinámica de la cianuración.	29
	2.2.5. Factores que afectan la disolución de oro.	32
	2.2.6. Adsorción a partir de soluciones de cianuro.	40
	2.2.7. Aplicaciones en soluciones cianuradas.	46
	2.2.8. Tecnología de fabricación.	49
2.3.	Definición de términos	50

CAPÍTULO III
MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y Diseño de la investigación	53
3.2. Población y muestra (según el caso)	54
3.3. Operacionalización de variables	54
3.4. Técnicas e instrumentos para recolección de datos	55
3.5. Procesamiento y análisis de datos	55
3.5.1. Materiales.	55
3.5.2. Equipos utilizados.	55
3.5.3. Reactivos.	56
3.5.4. Generalidades del carbón activado.	56
3.5.5. Análisis de oro.	57
3.5.6. Pruebas.	57
3.5.7. Técnica experimental.	58
3.5.8. Capacidad de carga del carbón.	59

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados	60
4.2. Discusión	62
CONCLUSIONES	64
RECOMENDACIONES	65
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
ANEXOS	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades de algunas materias primas usadas para la producción de carbón activado.	23
Tabla 2. Propiedades físicas del carbón activado de cascara de coco.	23
Tabla 3. Propiedades de carbón Calgon.	56
Tabla 4. Variables que fueron estudiadas y su rango de evaluación.	58
Tabla 5. Concentración de oro en solución a diferentes pesos de carbón activado.	60
Tabla 6. Recuperación de oro soluble.	61
Tabla 7. Peso del oro adsorbido por tonelada de carbón.	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática del sistema poroso de un carbón y clasificación de los poros según su tamaño.	27
Figura 2. Diagrama potencial de óxido-reducción vs pH del sistema Au-H ₂ O a 298°K con la concentración de oro de 10 ⁻³ Kmol/m ³ .	30
Figura 3. Diagrama potencial de óxido-reducción vs pH para el sistema CN-H ₂ O a 298°K con una concentración de 10 ⁻³ Kmol/m ³ de cianuro.	31
Figura 4. Diagrama potencial de óxido-reducción vs pH para el sistema Au-CN-H ₂ O a 298°K con concentraciones en Kmol/m ³ : [Au] = 10 ⁻³ . (a) [CN] = 10 ⁻³ ; (b)[CN] = 10 ⁻⁶ ; (c) [CN] = 10.	32
Figura 5. Cinética del cargado de oro sobre carbón activado.	44
Figura 6. Procedimiento de la técnica experimental.	53
Figura 7. Adsorción de oro sobre el peso de carbón/ litro de solución.	62
Figura 8. Recuperación de oro solubles vs tiempo.	63
Figura 9. Peso del oro adsorbido por tonelada de carbón.	63

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Imágenes del proceso

RESUMEN

La estructura porosa y la capacidad de adsorción del carbón activado está predeterminada mayormente por el proceso de activación física y química, diferentes estudios aún no han logrado entender el mecanismo de adsorción del carbón activado.

En el presente trabajo de tesis se estudia una de sus principales propiedades del carbón activado, la cual se relaciona directamente con la capacidad de adsorción del carbón de soluciones cianuradas que contienen oro, esta propiedad varían según cantidad de carbón activado utilizado en el proceso. Los resultados del presente trabajo indica que la adsorción del oro es mayor con cantidades de carbón de 16 gramos a las 4 horas se estaría logrando la adsorción de oro en solución logrando una recuperación del 98,75 %. Asimismo, la mayor recuperación de oro se logra a las 24 horas, llegando al 99,38 % de adsorción del oro para 16 gramos de carbón activado. Asimismo, se puede concluir que cuando se considera 8 gramos de carbón activado la recuperación en 24 horas es de 99,25 %. Lo que no se logra con 2 gramos de carbón activado donde la recuperación en 24 horas es de 94,38 %.

El peso de oro adsorbido por tonelada de carbón es 943,75 kilos de oro, considerando como carga máxima del carbón activado Calgon para estas pruebas de laboratorio.

INTRODUCCIÓN

La actividad metalúrgica, a través de los tiempos, ha formado parte de la historia y del impulso económico del Perú, siendo una causa de desarrollo definitivo en el crecimiento económico de nuestro país. Durante el año 2012, nuestro país seguí ocupando el 6to lugar siendo uno de los mayores productores de oro del mundo. Según el reporte anual del concejo mundial del oro y datos oficiales de Thomson Reuters GFMS. En diferentes regiones del país; se desarrolla una intensa actividad minera del oro, que participan directamente en la producción del mineral. La mayoría de plantas de beneficio se encuentran localizadas en Región de Arequipa. Para la extracción aurífera, dichas plantas, utilizan generalmente el proceso de carbón en pulpa (CIP), como es el caso de la planta de Pucamarca – Minsur, Yanacocha -Cajamarca; dicho proceso de cianuración tiene varios factores que afectan la solubilidad del oro como son: la concentración de cianuro, la concentración de oxígeno, la alcalinidad, el tamaño de partícula, el efecto de la agitación, la densidad de pulpa, la temperatura, el tiempo y finalmente los constituyentes de la mena.

En la evaluación del proceso a utilizado en la recuperación del oro de soluciones cianuradas con carbón activado, se deberá prestar atención en el estudio del proceso de adsorción al utilizarlo en los métodos CIC, CIP y CIL, realizando ensayos necesarios a nivel de laboratorio tal como se presenta en el presente trabajo de investigación.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

El proceso hidrometalúrgico más utilizado en la recuperación del oro de sus menas, es aquel en donde el oro es disuelto mediante soluciones alcalinas cianuradas, en presencia de oxígeno (Udupa et al 1990; Ellis y Senanayake 2004).

El mineral de mina debe ser reducido de tamaño hasta alcanzar una granulometría que permita a la solución lixivante alcanzar el metal valioso y llevarlo a solución. La granulometría de operación se consigue, mediante la aplicación de molienda en molinos de bolas operando en húmedo. En esta etapa es donde comienza la lixiviación del oro, pues es práctica común agregar al molino cianuro de sodio y cal; esto es para que en la medida que la partícula se quiebre y deje expuesta la superficie fresca del mineral de oro, la solución comience a actuar y a disolver a este último (Chaves, 1985). Dependiendo de la refractariedad del mineral, en esta etapa, se puede alcanzar un porcentaje importante en la

disolución de este metal (Fivaz, 1988). El resto del oro no disuelto aun, es lixiviado en una serie de tanques agitadores, cuyo volumen es determinado en función del tiempo de residencia, obtenido previamente en ensayos de laboratorio. La agitación puede ser mecánica, mediante el insuflado de aire (Ellis y Senanayake, 2004), o mediante la aplicación de ambas (Marsden y House, 1992).

En el proceso convencional, también denominado CCD (counter current decantation) o decantación en contra corriente más filtración, la solución con oro es separada del sólido por decantación y por sucesivos lavados de la pulpa en contracorriente y finalmente es filtrada. La torta que sale de los filtros, presenta aproximadamente un 10 % de humedad. Esta humedad, no es otra cosa más que solución con algo de oro disuelto, que será enviado junto con los sólidos, previa destrucción del cianuro, al dique de colas. Por último, la solución rica es clarificada, desoxigenada, y el oro precipitado con polvo de zinc muy fino, de alta pureza y doblemente sublimado. El precipitado Zn-Au-Pb, es separado de la solución mediante filtros de presión, luego es secado y enviado a fundición, en donde se obtiene un bullion (Pb, Zn, Au), factible de enviar a refinación. La solución con oro disuelto regresa al circuito de lixiviación. El oro que por alguna razón (normalmente falta de

molienda) quedo ocluido dentro de la partícula de mineral, más algunas partículas que no tuvieron suficiente tiempo de contacto con la solución (partículas gruesas), más el oro disuelto contenido en solución que acompaña a los sólidos hacia el dique de colas, constituyen las pérdidas del proceso y estas estarán reflejadas en el valor de la recuperación final del oro (Chaves, 1985; Marsden y House, 1992; Nicol et al, 1987).

El proceso CIP (carbon in pulp), que fuera desarrollado en Sud África en la década del 70, es considerado el avance tecnológico más significativo de los últimos tiempos en cuanto a métodos aplicados a la recuperación de oro (Afenya, 1991; Hausen y Bucknam, 1985). No obstante, esto en nuestro país aún no se ha implantado un sistema de recuperación de oro utilizando este proceso. En este, es utilizado el carbón activado para adsorber el oro directamente de la pulpa cianurada, a medida que se va disolviendo o pasando a solución. La pulpa se agita en tanques de gran tamaño y fluye en forma continua desde el principio al último de la serie, mientras que el carbón lo hace en la dirección opuesta (en contra-corriente), en forma discontinua y mediante la utilización de un air lifth. Una tela de abertura apropiada se ubica en la dirección del flujo de la pulpa entre los tanques a fin de limitar el

paso del carbón de un tanque a otro, en el sentido de la corriente. El oro en solución es adsorbido por el carbón (Rees y Van Deventer, 2001), resultando finalmente la pulpa totalmente lixiviada, y la solución prácticamente con rastros de oro. En este caso no es necesario el espesado y filtrado de la pulpa como en el proceso CCD. Por último, el carbón cargado es desadsorbido, mediante un lavado con una solución cianurada y fuertemente alcalina, y luego el oro es recuperado de la elusión por electrólisis (Pizarro y Antonio, 1981; Davinson y Schoeman, 1991; Deventer y Merwe, 1994).

Para minerales de baja ley o de alta ley, pero con problemas de lixiviabilidad por la presencia de elementos cianicidas y que contienen una cantidad excesiva de lamas, la aplicación del proceso CIP provee una alternativa viable al proceso convencional de cianuración. Este sistema además puede ser implantado y operado con el 65 % al 75 % del costo convencional CCD más filtración.

1.1.1. Antecedentes del problema

El uso del carbón activado se ha incrementado en el campo de la Hidrometalurgia, especialmente, en la recuperación de oro y plata desde soluciones cianuradas, por ser el más versátil de los adsorbentes sólidos usados en la industria, debido a su elevada área superficial y su distribución de tamaño de poro, bimodal (a veces trimodal), que proporciona el buen acceso de las moléculas del adsorbato al interior de las partículas.

Carbón activado es un término genérico que designa a una familia de materiales carbonáceos, altamente porosos, que no pueden ser caracterizados por una fórmula estructural o por análisis químico. Los poros son cavidades pequeñas en las partículas de carbón, que acogen en sus paredes internas agentes moleculares contenidos en fluidos que rodean las partículas.

En esta forma, actúa como una malla molecular que posee una alta especificidad y logra separar especies muy definidas molecularmente. El volumen de los poros en carbones activados es, habitualmente, definido como mayor que 0,2 ml/g y el área superficial interna es, generalmente, entre 400 a 1,500 m²/g. Esta área es bastante grande, si se tiene en cuenta que la superficie

específica de una esfera de carbón sin porosidad alguna es alrededor de $3,86 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{g}$. Estudios de difracción de rayos X han demostrado que la estructura del carbón activado es similar a la del grafito. El grafito ideal consta de átomos de carbono enlazados covalentemente en los planos hexagonales de su estructura y enlazados entre planos por débiles fuerzas de Van der Waals.

1.1.2. Problemática de la investigación

El tratamiento que usan la mayoría de las industrias mineras para la recuperación de oro de soluciones cianuradas con carbón activado, estos son los métodos, carbón en pulpa (CIP), carbón en lixiviación (CIL) y carbón en columna (CIC); este método usado no resulta del todo eficiente por la generación de altos costos operativos, contaminación al ambiente y bajas recuperaciones de valores. Por tal motivo se realizó una serie pruebas de adsorción el cual será capaz de retener las partículas finas y realizar la desorción considerando parámetros operacionales.

será factible conocer los parámetros de adsorción para lograr la mejor extracción del oro de soluciones cianuradas, así lograr recuperaciones de oro mayor a 90 %.

1.2. Formulación del problema

¿Es posible conociendo el efecto de las propiedades físicas del carbón activado lograr una mayor recuperación en la absorción de oro desde soluciones cianuradas?

En las décadas pasadas se ha realizado gran cantidad de investigación acerca de la adsorción de especies de aurocianuro en carbones activados. Davidson, propuso que el oro es adsorbido involucrando el mecanismo de par iónico del tipo $Mn^+ [Au (CN)^{-2}]_n$ en la superficie del carbón, donde Mn^+ representa un tipo de catión como Na^+ , K^+ , o Ca^{+2} . Este mecanismo propuesto ha sido ampliamente aceptado en estudios de adsorción de oro. Mc Dougall et al., utilizando espectroscopía de Rayos X, mostraron que la adsorción de aurocianuro en presencia o ausencia de electrolitos y ácidos se realiza por mecanismos iguales.

Aunque la identidad del aurocianuro adsorbido no se conoce, el mecanismo tendría una etapa inicial de adsorción, que involucra la adsorción de un par iónico, donde Mn^+ es un ión metálico que tiene una solubilidad más baja que el $Au (CN)^{-2}$ en el medio de adsorción, seguida por una etapa de reducción, en la cual

se forman especies del tipo $\text{Au}(\text{CN})$ en la superficie del carbón. Mc Dougall y Hancock y, en forma más reciente, López-Ramón et al., confirmaron el mecanismo anteriormente propuesto y concluyeron que el mecanismo más probable de carga del oro bajo condiciones típicas de operación CIP involucra la adsorción de aurocianuro sin cambio químico.

Adams y Fleming, encontraron que bajo condiciones alcalinas típicas de un proceso CIP, el oro es extraído como un par iónico. A bajos valores de pH (<3), el oro es cargado en el carbón, predominantemente, como ácido aurocianuro, $\text{HAu}(\text{CN})_2$, mientras que, a pH intermedios, el par iónico y el ácido son cargados simultáneamente. Cuando el oro era cargado en el carbón a bajos valores de pH, algo de oro era descompuesto a AuCN , pero la cantidad descompuesta era significativa solo a cargas muy altas. Adams, M.D. plantea que el desacuerdo entre diferentes investigadores con respecto al mecanismo exacto involucrado en la adsorción de aurocianuro en carbón activado es debido a diferencias en las condiciones experimentales que ellos han utilizado.

Teniendo en cuenta lo mencionado, en el proyecto se pretende estudiar los efectos físicos que conllevan a la adsorción del oro a partir de soluciones cianuradas, con el objetivo de mejorar el proceso de adsorción del oro.

1.3. Justificación e importancia

La adsorción de oro es un fenómeno físico - químico aun no comprendido, el oro adsorbido se considera que es atrapado como un complejo cianurado de oro dentro de la matriz de carbón activado se produce por el contacto del carbón activado cargado con una solución de cianuro. Seguir estudiando el proceso de absorción nos ayuda a entender mejor el proceso ya que se ha intensificado el uso del carbón en plantas metalúrgicas.

1.4. Alcances y limitaciones

El presente trabajo de investigación trata de estudiar propiedades físicas del carbón activado en la adsorción de oro desde las soluciones cianuradas.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

1. Estudio de las propiedades físicas del carbón activado en la adsorción de oro desde soluciones cianuradas.

1.5.2. Objetivos específicos

1. Estudio de la capacidad de carga del carbón activado en soluciones cianuradas.
2. Estudio de las variables del proceso de adsorción del oro.

1.6. Hipótesis

1. Con el estudio propuesto de determinación de carga de oro en el carbón activado, lograremos una mayor recuperación de oro.
2. Con el estudio de las variables de adsorción del oro, se logrará entender mejor sus propiedades físicas del carbón activado.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

El empleo de carbón activado en los procesos de carbón en pulpa (CIP) y carbón en lixiviación (CIL) se establecieron firmemente en la industria de extracción de oro en la década de 1980, inicialmente en Sudáfrica y Australia, desde donde se extendieron rápidamente a todas las regiones productoras de oro del mundo.

El porcentaje de producción mundial anual de oro por procesos basados en carbón activado creció de cero en la década de 1970 a casi 70 % para el cambio de siglo, lo que representó un índice fenomenal de aceptación de una nueva tecnología por parte de una industria tradicionalmente conservadora.

La razón principal de esta rápida aceptación de la nueva tecnología fue el hecho de que las primeras grandes plantas industriales en Sudáfrica demostraron de manera convincente mejores recuperaciones de oro que el proceso tradicional de

filtración / Merrill Crowe, con menores costos de capital y de operación. Y a medida que las plantas desarrollaron una trayectoria operativa en sus primeros años de vida, demostraron ser notablemente robustas mecánicamente y altamente tolerantes a alteraciones en la planta, cambios en la composición de la alimentación y contaminantes de la fase de solución que causaron grandes problemas en las plantas de Merrill Crowe.

2.2. Bases teóricas

2.2.1 Propiedades del carbón.

El carbón vegetal tiene muchas propiedades entre ellas están las propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y físicas. El criterio de clasificación para que un carbón sea de buena calidad dependerá para que aplicación vaya destinado dicho carbón. Propiedades mecánicas tenemos: Dureza, abrasividad, cohesión, friabilidad, fragilidad, triturabilidad.

a. Dureza.

Se mide por el tamaño y profundidad de la raya producida por un cuerpo penetrante de forma diversa (cono, esfera, pirámide) y con dureza extrema.

b. Abrasividad.

Es la capacidad del carbón para desgastar elementos metálicos en contacto con él. Esta propiedad nos va a condicionar enormemente el material que se tenga que usar en la maquinaria (molinos, trituradoras, etc).

c. Cohesión.

La cohesión es la acción y efecto que tiende a unir los componentes de la materia carbonosa. Se trata de una propiedad positiva o de resistencia.

d. Fragilidad.

Es la facilidad que presentan los carbones para romperse o quebrarse en pedazos. Es lo opuesto a la cohesión. Se trata de una propiedad negativa, que va a depender de su tenacidad y elasticidad, de las características de su fractura y de su resistencia.

e. Triturabilidad.

Es la facilidad con la que el carbón se desmenuza sin reducirse totalmente a polvo. Es una combinación de dureza, resistencia, tenacidad y modo de fractura.

Propiedades térmicas.

Entre las propiedades térmicas tenemos: Potencia calorífica, conductividad térmica, calor específico, grado de ignición.

a. Potencia calorífica.

Es la propiedad más importante en esta división, ya que la potencia calorífica es el calor producido del carbón en una unidad de tiempo. Esta depende de la cantidad de humedad y de cenizas, así como de la composición de la materia orgánica.

b. Conductibilidad térmica.

Es la capacidad que presenta el carbón para conducir el calor. Tiene importancia sobre todo en los hornos de coquización, ya que el hecho de que el calor aplicado se transmita lo más rápidamente posible permite que el proceso tenga un mayor rendimiento.

c. Calor específico.

Es la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura de 1 gramo de carbón a 274 °K También es importante esta propiedad en el proceso de coquización.

d. Grado de Ignición.

Es la facilidad con la cual una muestra de carbón logra el punto de ignición esta depende de las propiedades del carbón e influye en la velocidad de combustión.

Propiedades eléctricas.

Entre las propiedades eléctricas tenemos: Conductividad eléctrica, constante dieléctrica.

a. Conductividad Eléctrica

Es la capacidad para conducir la corriente eléctrica a través de él. Se define en términos de resistencia específica, que es la resistencia de un bloque de carbón de 1 cm de longitud y 1 cm² de sección. Esta propiedad depende de la presión, de la temperatura y del contenido en agua del carbón. El carbón es considerado en términos generales como un semiconductor.

La razón por la cual el carbón conduce la electricidad es la posesión de anillos bencénicos y radicales libres.

b. Constante Dieléctrica.

Esta propiedad es más tenida en cuenta que la conductividad eléctrica. Se trata de una medida de la polarizabilidad electrostática del carbón dieléctrico. Esto está

relacionado con la polarización de los electrones que existen en los anillos bencénicos de la estructura del carbón. Está esta propiedad muy relacionada con el contenido en agua del carbón y varía con los diferentes tipos de carbón.

Propiedades físicas.

Entre las propiedades físicas tenemos: Densidad, peso específico, humedad, contenido de cenizas, contenido de volátiles y carbón fijo, humedad superficial, humedad residual, humedad total, tamaño.

a. Densidad.

La densidad del carbón no es más que la relación entre su masa y el volumen desplazado de este.

Se deberá pesar una cantidad determinada de carbón y esta misma cantidad de carbón se le medirá el volumen, de tal forma que la densidad está dada por la siguiente formula:

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Cantidad de carbón}}{\text{Volumen de la cantidad de carbón}} \quad [1]$$

b. Peso específico.

Es el peso contenido en la unidad de volumen de un trozo de carbón en su estado natural (poros, humedad y materia mineral incluida).

c. Humedad.

El carbón contiene agua tanto por su proceso de formación en origen como por las transformaciones sufridas. En el carbón el agua se presenta de 3 diferentes formas: Agua de hidratación, agua de imbibición y agua ocluida.

Agua de Hidratación.

Es la que está combinada químicamente. Forma parte de la materia mineral que acompaña al carbón.

Agua de Imbibición.

Es la que contiene debido a procesos artificiales en la extracción y procesos posteriores, sobre todo procesos de lavado. Esta agua queda adsorbida en la superficie. Se elimina fácilmente calentando a (373 - 378) °K.

Agua Ocluida.

La que queda retenida en los poros del carbón. Puede proceder del lugar donde se formó el carbón o de las reacciones posteriores a esa formación.

d. Contenido de cenizas.

Es la cantidad de ceniza que queda del carbón después de pasar por el proceso de combustión y quemarse en su totalidad.

e. Contenido de volátiles y carbón fijo.

Esta propiedad se puede definir como la cantidad de combustible que el carbón posee, entre más alto el contenido de volátiles y carbón fijo más combustible tiene el carbón para quemar.

f. Humedad superficial.

Es la humedad que el carbón gana gracias al medio circundante.

g. Humedad residual.

Es la humedad que tiene el carbón después de ser secado por convección por medio de una fuente de calor.

h. Humedad total.

Es la suma de la humedad superficial y la humedad residual.

i. Tamaño.

Determinado por el grado de rotura que sufre en la manipulación, pero regulado por la trituración que se realiza durante el proceso.

2.2.2 Carbón activado

Los carbones activados se utilizan por su estructura granular, los que tienen una gran superficie específica, las que permiten un alto grado de adsorción del oro y la plata, desde las soluciones cianuradas ricas a la superficie de estos carbones. A nivel industrial el método de adsorción por carbón activado es el más usado.

El carbón activado se fabrica a partir de la corteza del coco debido a su dureza lo que lo hace más resistente a la abrasión y la rotura, además su capacidad de adsorción es mayor que otros carbones activados fabricados a partir de otros materiales.

Tipos de carbones

La constitución química de los carbones es variada de poca importancia práctica. Carbones de composición química diferentes y fabricados según distintos métodos pueden tener igual poder de

adsorbente; su poder adsorbente está determinado por su estructura porosa de gran superficie, y por distintos tipos de centros activos.

Existen varios tipos de carbones, estos dependen de la materia prima usada vegetal blando y voluminoso, que sirve para algunas aplicaciones en la industria química como se menciona más adelante.

Otra materia prima importante es la cascara de coco que da un carbón denso y resistente apropiado en la adsorción de iones metálicos, preferentemente usado en oro por su selectividad hacia éste. Nombraremos las características principales del carbón activado fabricado a partir de la cascara de coco, ya que es propósito de esta memoria. Aunque el Carbón Activado puede fabricarse a partir de un sin número de materiales carbonosos, solamente se utilizan a nivel comercial la madera de pino, el carbón mineral lignítico, el carbón mineral bituminoso y la cascarilla de coco, debido a su disponibilidad, bajo costo y a que los productos obtenidos a partir de ellos tienen las propiedades que cubren toda la gama de aplicaciones que el Carbón Activado puede tener.

Tabla 1.
Propiedades de algunas materias primas usadas para la producción de carbón activado.

Propiedad	Cascara de coco	Carbón bituminoso	Lignita	Madera
Microporos	Altos	Altos	Medianos	Bajos
Macroporos	Bajos	Medianos	Altos	Altos
Dureza	Alta	Alta	Baja	Mediana
Cenizas (%)	5	10	20	5
Cenizas solubles en agua	Altas	Bajas	Altas	Medianas
Polvo	Bajo	Mediano	Alto	Mediano
Regeneración	Buena	Buena	Pobre	Regular
Densidad aparente (g/ml)	0,48	0,48	0,3	0,35

Fuente: <https://es.slideshare.net/renatolachira/carbn-activado>. (10/07/2017)

Tabla 2.
Propiedades físicas del carbón activado de cascara de coco.

Característica	Unidades	Valores
Superficie específica total	m ² /g	800 a 1300
Densidad real	g/cm ³	2 a 2,2
Densidad aparente del lecho	g/cm ³	0,45 a 0,48
Volumen del poro dentro de la partícula	cm ³ /g	0,70 a 0,80
Factor de huecos en el lecho compactado	%	38 a 42
Calor específico a 373 °K	°K	273,2 a 273,25
Cenizas	%	3 a 5
Tamaño	m Tyler	-6 a +28#
Resistencia a la abrasión	%	80 a 95

Constante de actividad cinética	1/h	800 a 1200
Constante capacidad en equilibrio	Kg Au/t	20 a 50

Fuente: Elaboración propia.

Adsorción en carbón activado

El proceso de recuperación de oro con carbón activado ha revolucionado el método de la obtención de este metal. Este proceso generalmente se utiliza para tratar grandes volúmenes de soluciones a baja concentración de oro o soluciones de cianuración que contienen oro. las ventajas que presenta, se puede tratar mineral fino sin que se efectúe una separación mecánica de la solución cargada con oro del mineral lixiviado evitándose con esta técnica el costo de filtración. Debido a estas características el proceso de carbón activado presenta la mejor alternativa para recuperar oro de arcillas en las cuales el proceso de filtración no es muy eficiente. Las desventajas que presenta, se manejan a altas temperaturas y/o presión el proceso es rápido, pero más caro. El carbón se tiene que reactivar, es llevado a cabo lavando el carbón con una solución diluida de ácido nítrico. Se manejan temperaturas entre 873 - 973 °K durante 30 minutos. La disolución del oro del carbón activado es efectiva si se utiliza un anión que forme un complejo fuerte con el oro y un solvente orgánico el cual

incrementa la reactividad del cianuro y estabiliza el ión cianuro en solución.

Propiedades de la estructura porosa del carbón activado

La estructura submicroscópica del carbón no es conocida con certeza, pero se puede evidenciar la existencia de poros por los siguientes hechos:

- a. Se adsorben grandes cantidades de vapor o líquidos, sin cambios apreciables en el tamaño del grano.
- b. La diferencia entre el volumen del carbón granulado y el volumen real es usualmente considerable.
- c. Es posible forzar bajo presión mercurio en los gránulos evacuados del carbón.
- d. Cuando la isoterma de adsorción no coincide con la desorción, se explica por la presencia de los finos capilares.
- e. La gran superficie del carbón activo comparada con la pequeña área geométrica de los gránulos o partículas, requiere la existencia de considerable superficie interna, que sólo puede ser provista por pequeños capilares.

Estructura del microporo.

Arbitrariamente se define el microporo por el tamaño del diámetro medio en el rango de 100 a 1000 Amstrong. Existen varios métodos para caracterizar el microporo en tamaño:

- a. A través de la isoterma de desorción de agua
- b. Midiendo el volumen de helio desplazado por el carbón.

Los poros pueden ser clasificados según su tamaño característico:

- Macroporos $x > 100$ a 200 nm
- Mesoporos $1,6 < x < 100$ a 200 nm
- Microporos $x < 1,6$ nm

Podemos decir que la estructura gráfica, tiene una superficie específica extremadamente grande ($> 1000 \text{ m}^2/\text{g}$) debido a una estructura íntimamente porosa.

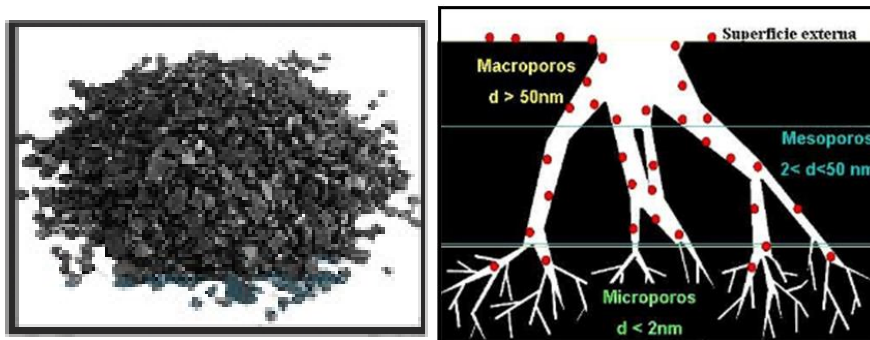
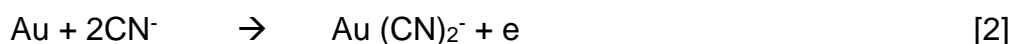


Figura 1. Representación esquemática del sistema poroso de un carbón y clasificación de los poros según su tamaño.

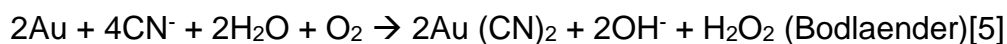
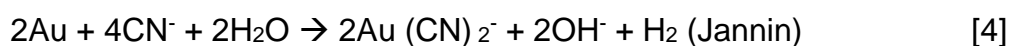
Fuente: [https://es.slideshare.net/renatolachira/carbn-activado.\(11/07/2017\)](https://es.slideshare.net/renatolachira/carbn-activado.(11/07/2017))

2.2.3 Disolución de los metales preciosos

En su forma más simple la reacción para la disolución de oro metálico en una solución de cianuro es:



Se ha observado en la práctica que el oro no se disuelve sin aireación intensa consecuentemente las siguientes reacciones han sido propuestas para la disolución del oro en soluciones diluidas de cianuro.



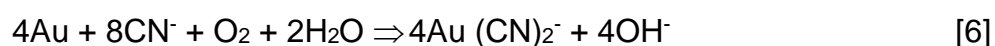
Barsky Swainson y Hedley determinaron la energía libre de formación de iones complejos de oro cianuro y plata-cianuro. De los datos obtenidos ellos calcularon los cambios de energía libre en las diferentes reacciones sugeridas y puntualizaron cuales de ellas son teóricamente posibles bajo condiciones corrientes de cianuración. Para la energía libre del ion aurocianuro $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ encontraron un valor de 69 064 calorías. Con otros datos disponibles fueron calculadas las constantes de equilibrio para las ecuaciones propuestas anteriormente:

Para la ecuación de Elsner $K = 10^{66}$

Para la ecuación de Jannin $K = 10^{9,9}$

Para la ecuación Bodlaender $K = 10^{16}$ y $10^{12,1}$

Sus resultados demostraron que para la ecuación de Elsner, la reacción continua hasta su terminación es decir hasta que prácticamente todo el cianuro es consumido o todo el metal es disuelto. Consecuentemente la ecuación de Elsner es la que realmente expresa la reacción de la disolución del oro en soluciones de cianuro, o sea:



Para la ecuación de Jannin las constantes de equilibrio son tan desfavorables que la formación de hidrógeno puede considerarse imposible bajo las condiciones normales.

Para las ecuaciones de Bodlaender las constantes de equilibrio son favorables consecuentemente las reacciones propuestas son posibles.

2.2.4 Termodinámica de la cianuración

La química de la óxido-reducción de la lixiviación con cianuro del oro se presenta en los diagramas Eh vs. pH de tres sistemas:

1. Oro-agua (Figura 2)
2. Cianuro-agua (Figura 3)
3. Oro-cianuro-agua (Figura 4)

El ion aúrico (Au^{+3}) puede estar en equilibrio con el oro metálico (Au°) en el sistema oro-agua (Fig. 2), o con el ion cianuro auroso $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ en el sistema oro-cianuro-agua (Fig. 4), hasta aproximadamente pH 1. El ion de oro predominante es el aurico (Au^{+3}), y no el auroso (Au^+) porque la reacción $\text{Au}^{\circ} = \text{Au}^{+3}$ está bien por debajo el límite de estabilidad de la reacción $\text{Au}^{\circ} = \text{Au}^+$. El campo de estabilidad del oro metálico, a potenciales de reducción

relativamente bajos, cubre el rango del pH completo, coincidiendo con el campo de estabilidad del agua (vea las Figuras: 2, 3 y 4).

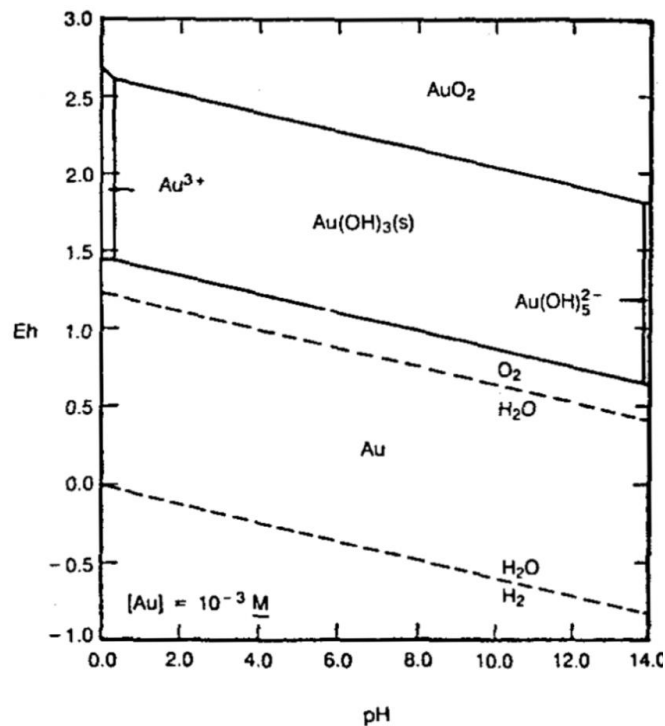


Figura 2. Diagrama potencial de óxido-reducción vs pH del sistema Au-H₂O a 298 °K con la concentración de oro de 10⁻³ Kmol/m³.

Fuente: J. Hiskey, 1988.

El oro puede formar especies oxidadas insolubles (óxido aúrico hidratado - $Au_2O_3 \cdot 3H_2O = 2Au(OH)_3$ o el peróxido de oro, AuO_2) a potenciales relativamente altos. Los dos óxidos son termodinámicamente inestables y de ahí que son oxidantes poderosos. Las figuras 2 y 4 indican que el poder oxidante (potencial) de estos óxidos depende de la acidez del sistema y

disminuye con el aumento del pH. El cianuro de hidrógeno (HCN) e iones de cianuro (CN^-) son las especies estables a potenciales muy bajos (vea la Figura 3), donde el último es predominante a pH superior a 9,24. A potenciales altos, el cianato (CNO^-) es la única especie estable.

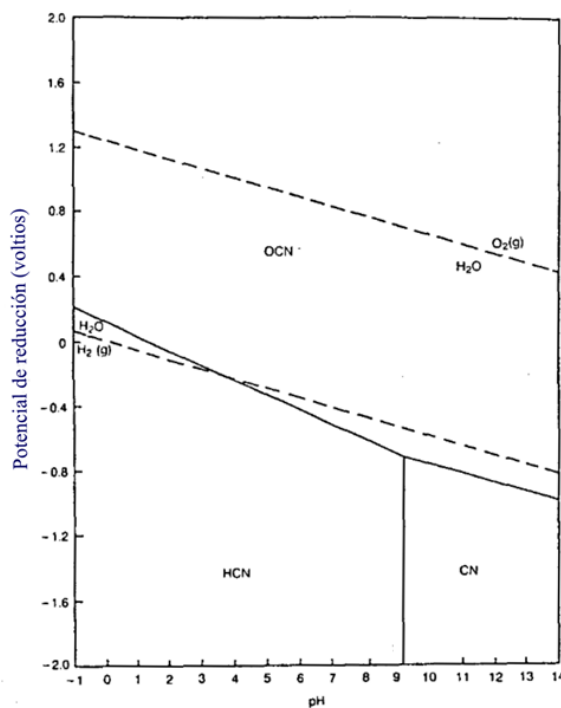


Figura 3. Diagrama potencial de óxido-reducción vs pH para el sistema CN-H₂O a 298 °K con una concentración de 10^{-3} Kmol/m³ de cianuro.

Fuente: J. Hiskey, 1988.

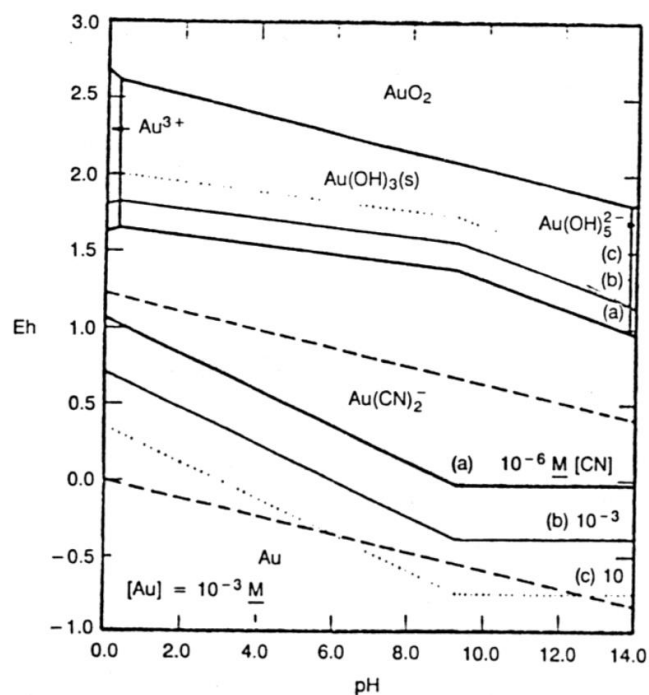


Figura 4. Diagrama de estabilidad potencial - pH para el sistema Au-CN-H₂O a 298 °K con concentraciones en Kmol/m³: [Au] = 10⁻³. (a) [CN] = 10⁻³; (b) [CN] = 10⁻⁶; (c) [CN] = 10.

Fuente: Metalurgia del Oro Fidel Sergio Misari

2.2.5 Factores que afectan la disolución de oro

Dado que la concentración de oro en el mineral es baja (entre 0,1 - 20 g/t en minerales y 300 - 1000 g/t en concentrados), se debe señalar que el consumo del cianuro y oxígeno en la lixiviación de minerales auríferos, depende de las reacciones secundarias de disolución de otros minerales portadores de cobre, cinc, hierro, arsénico, antimonio, que se presentan en valores superiores a 5000 g/t en minerales. Entre los minerales cianicidas

(consumidores de cianuro) más importantes se debe mencionar; la pirrotina, la marcasita, minerales oxidados de cobre, óxidos de cinc, esfalerita, smithsonita.

Un exceso en la concentración de cianuro aumenta la disolución de elementos indeseables (cobre, cinc, hierro) los cuales además de formar complejos estables que dificultan la recuperación posterior del oro, causan serios problemas de envenenamiento de la solución, que no permiten su recirculación. Producen, además, mayor contaminación de elementos pesados en suelos y ríos, al ser desechada la solución al ambiente. Los principales factores que se deben tener en cuenta en el proceso de cianuración son:

a) Concentración de cianuro

La razón de disolución del oro en soluciones cianuradas aumenta linealmente con la concentración de cianuro, hasta que se alcanza o se produce un máximo, más allá del cual, un incremento adicional en la concentración de cianuro no aumenta la cantidad de oro disuelto, sino por el contrario tiene un ligero efecto retardante.

En la práctica la mayoría de plantas tratan las menas de oro usando soluciones que contienen menas de 0,05 % de NaCN (0,5

g/l); el promedio general está probablemente del 0,02 al 0,03 % de NaCN (0,2 a 0,3 g/l).

b) Concentración de oxígeno

La concentración de cianuro es relativamente fácil de controlar, no así la del oxígeno, debido a su escasa solubilidad en agua bajo condiciones atmosféricas, a nivel del mar y 298 °K se puede tener en solución 8,2 mg O₂/litro (0,082 g/litro). Por esta razón se dice que la cianuración está controlada por fenómenos de transporte. El cianuro es fácil de adicionar, pero el oxígeno es difícil de controlar en solución.

Se ha determinado, con valores experimentales y prácticos, que es adecuado tener una relación [CN⁻]/ [O₂] cercana a 6, para tener la máxima velocidad de disolución de oro.

La máxima concentración de oxígeno en la solución podrá ser de 8 mg/l, entonces la máxima razón de disolución del oro sobre condiciones ideales de agitación y aireación pueden tener lugar en soluciones que contengan 0,0098 % NaCN (0,098 g/l).

c) pH y alcalinidad

Para prevenir pérdidas excesivas de cianuro por hidrólisis, el proceso de cianuración se lleva a cabo a valores de pH superiores a 9,4. El efecto del pH en la disolución de oro a valores mayores a 9,5 depende de los minerales que se encuentren como constituyentes de la mena, así como también del álcali empleado para su regulación.

En algunos casos la velocidad de disolución del oro puede disminuir con el incremento del pH, ya que se aumenta la velocidad de las reacciones que interfieren en el proceso. El valor óptimo de pH al que se debe trabajar deberá ser determinado de acuerdo a las características de cada mineral en particular.

En el proceso de cianuración es muy importante considerar que, para disolución del oro, se requiere tener en solución, el ion CN^- . Si se opera a un valor de pH menor que 10, el cianuro libre estará en mayor proporción como HCN, que es muy volátil a temperatura ambiente, y genera problemas de salud por inhalación, ya que este es un gas venenoso. En la práctica se debe trabajar con valores de pH superiores a 10,5 para evitar la formación de HCN y favorecer la presencia del ion CN^- .

Con respecto a la alcalinidad, el compuesto universalmente usado para regular el pH y mantener una alcalinidad protectora en el proceso de cianuración, es la cal (CaO).

Las funciones del hidróxido de calcio en cianuración son las siguientes:

- Previene las pérdidas de cianuro por hidrólisis.
- Previene las pérdidas de cianuro por acción del dióxido de carbono del aire.



- Descompone bicarbonatos en el agua antes de que entre al proceso de cianuración.



- Neutraliza componentes ácidos como sales férricas y sulfato de magnesio en agua antes de añadir al circuito de cianuración.
- Neutraliza los componentes ácidos de la mena.
- Neutraliza los componentes ácidos que resultan de la descomposición de varios minerales en la mena, en soluciones cianuradas.

- Ayuda a la sedimentación de pequeñas partículas de la mena, es decir clarifica la solución fuerte.
- Mejora la extracción cuando se tratan menas que contienen, por ejemplo, telururos los cuales se descomponen más rápido en alta alcalinidad.

Se ha encontrado que la velocidad de disolución de oro disminuye si el pH alcanza valores superiores a 11 y esta disminución puede ser significativa con valores superiores a 12,2.

Probablemente esta disminución debe a la formación de peróxido de calcio en la superficie del metal. El peróxido de calcio se forma por la reacción de la cal con el peróxido de hidrógeno que se produce de la reducción del oxígeno en el área catódica de la superficie del oro durante la lixiviación.

d) Temperatura

Cuando se incrementa la temperatura en soluciones cianuradas que contienen oro metálico, se espera que también se incremente la actividad de la solución, y de este modo aumente la razón de disolución del oro. Sin embargo, se debe considerar que la cantidad de oxígeno en la solución puede disminuir porque

la solubilidad de los gases disminuye con el incremento de temperatura.

Julian y Smart determinaron la solubilidad del oro en solución de 0,25 % de KCN a temperaturas entre 273 y 373 °K y encontraron que la razón de disolución del metal precioso se incrementa hasta un máximo a 358 °K, sobre esta temperatura la solubilidad del oxígeno en la solución disminuye y la velocidad de disolución del oro también.

e) Área superficial y tamaño del oro

La velocidad de disolución del oro es proporcional a la superficie expuesta del oro, la misma que depende del tamaño de la partícula mineral y del grado de liberación del metal precioso. En general, la velocidad de disolución aumenta con el menor tamaño de partícula (mayor liberación de oro). Sin embargo, al decrecer el tamaño de la partícula, se incrementan también las reacciones de competencia de otros elementos, por tanto, se debe encontrar un compromiso entre el tamaño de la partícula, el porcentaje de extracción del oro y el consumo de cianuro.

Se ha establecido que para una relación $[\text{CN}^-]/[\text{O}_2] = 6$, la máxima velocidad de disolución del oro es de $3,4 \mu\text{m/h}$, requiriéndose, por tanto, un tiempo de 44 horas para disolver partículas de oro de $150 \mu\text{m}$ (malla #100) y 13 horas para granos de $45 \mu\text{m}$ (malla #325).

f) Efecto de la agitación

La disolución de oro está usualmente controlada por el transporte de masa y depende del espesor de la capa de difusión, es por esto que, si se incrementa la agitación, aumenta la velocidad de disolución, hasta un máximo sobre el cual este efecto ya no tendrá mayores beneficios.

g) Constituyentes de la mena o procedentes de otros procesos

Ciertos constituyentes de la mena o reactivos de operaciones anteriores, pueden ejercer un efecto positivo o negativo sobre las reacciones de cianuración. Así, los reactivos de flotación ejercen un efecto inhibitorio sobre dichas reacciones.

Compuestos minerales de la mena, donde se incluyen algunas especies de cobre, hierro, zinc, plomo, arsénico, antimonio, entre otros, consumen cianuro y oxígeno, requiriéndose,

por consiguiente, mayor concentración en solución para lograr tasas aceptables de extracción.

Las sustancias carbonáceas adsorben el oro disuelto, disminuyendo la extracción del metal precioso y el material arcilloso genera problemas de recuperación si el oro está asociado directamente a las arcillas en tamaños similares al de ellas, como se ha señalado anteriormente

2.2.6 Adsorción a partir de soluciones de cianuro

Los carbones producidos usando diferentes métodos o materias primas tienen un amplio rango de propiedades físicas y químicas, lo cual afecta la velocidad de adsorción y la capacidad de carga. En general los carbones de más alta activación son los más suaves, debido a la gran estructura de poros, lo cual reduce su fuerza mecánica. Las pérdidas por atricción son importantes, no solamente porque pueden representar pérdidas de oro.

El tipo de carbón requerido para la aplicación en proceso particular depende de muchos factores incluyendo el tipo de proceso de adsorción (CIP, CIL o CIC) la concentración de oro,

velocidad de flujo, rapidez de producción de oro, rapidez de atrición del carbón y severidad de las condiciones de proceso.

Tamaño de partícula del carbón

Aunque la distribución de tamaño de partícula tiene un efecto significativo sobre el área superficial externa, tiene solamente un efecto muy pequeño sobre el área superficial específica debido a que tiene una estructura de poros internos altamente desarrollada. Como resultado de lo anterior, la capacidad de carga es virtualmente independiente del tamaño de partícula. Sin embargo, el tamaño de partícula tiene un gran efecto en la longitud media del poro dentro de la partícula del carbón y la velocidad de adsorción aumenta con la disminución del tamaño de partícula.

Este es un factor importante en los sistemas de adsorción industrial porque la mayoría opera bien a cargas de oro debajo de la verdadera capacidad de carga de equilibrio del carbón. Los rangos de tamaño de partícula utilizada en aplicaciones industriales generalmente varían de 6 - 30 malla tyler.

Eficiencia de mezclado

Las condiciones de mezclado tienen un efecto importante en la velocidad de adsorción de oro. Este efecto se debe a que la mayoría de los sistemas de adsorción de carbón son operados en un peso - equilibrio, por debajo de la capacidad de carga de equilibrio máxima, donde la velocidad de adsorción depende en cierto grado de la difusión a través de la capa límite entre el sólido y el líquido. Consecuentemente, el grado de mezclado de carbón en una solución o pulpa debe ser suficiente para:

- a) Mantener al carbón, solución y sólido suspendidos y mantener la mezcla tan homogénea como sea posible.
- b) Maximizar la velocidad de transporte de las especies de cianuro hacia la superficie del carbón y de ser posible mantenerla más rápida que la velocidad actual de adsorción en la superficie.

Efecto de sólido

La velocidad de adsorción del complejo oro-cianuro disminuye al aumentar la densidad de la pulpa. Este efecto se atribuye a:

1. Disminución en la eficiencia del mezclado como resultado de los aumentos en la viscosidad y disminución del suministro de energía por unidad de masa de la solución.
2. Obstrucción física de la superficie del carbón y de los poros por las partículas finas del mineral.
3. Una disminución en la relación solución-carbón al usar altas densidades de la pulpa.

Temperatura

La adsorción de oro sobre carbón es un proceso exotérmico. Consecuentemente, la capacidad de carga disminuye cuando aumenta la temperatura. Esto se aplica en la elución de oro a temperaturas relativamente altas. La velocidad de adsorción aumenta ligeramente con aumentos de temperatura debido a la acelerada difusión de especies oro-cianuro, siguiendo un comportamiento descrito por la ecuación de Arrhenius.

Concentración de oro en la solución

La velocidad de adsorción de oro y el equilibrio de la capacidad de cargado, ambos se incrementan con el incremento de la concentración de oro en la solución. Típicamente velocidades de cargado de oro de 10 a 100 g Au/h/t carbón y cargados de 5 a 10 Kg

Au/t carbón son llevadas a cabo en la práctica en concentraciones de oro producidas por procesos estándares de lixiviación con cianuro.

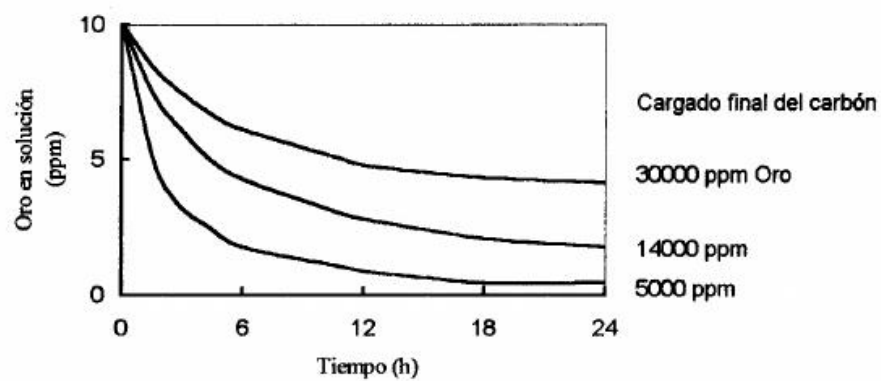


Figura 5. Cinética del cargado de oro sobre carbón activado.

Fuente: Elaboración Propia.

En la figura 5, se observa la velocidad de carga de oro de 10 - 100 g Au/h/t carbón y cargados de 5 - 10 kg Au/t carbón son llevadas a cabo en la práctica en concentraciones de oro producidas por procesos estándares de lixiviación con cianuro.

Concentración de cianuro

Tanto la velocidad de adsorción como la capacidad de carga de oro en carbón disminuyen al aumentar la concentración de cianuro libre. Esto se atribuye a una mayor competencia de las especies de cianuro libre por los sitios de adsorción. Sin embargo, la

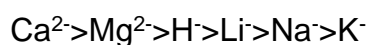
selectividad del carbón activado por el complejo oro-cianuro con respecto a otras especies metal-cianuro aumenta al aumentar la concentración de cianuro.

pH de la solución

Un decrecimiento en el pH de la solución incrementa tanto la velocidad de adsorción y la capacidad de cargado. El efecto sobre la velocidad de adsorción es completamente pequeño sobre el rango de pH entre 9 a 11, aplicado en circuito de cianuración, con sólo una pequeña ventaja de ser aumentado reduciendo el pH. La capacidad es incrementada aproximadamente 10 % cuando el pH es bajado de 11 a 9.

Concentraciones de otros metales

Bajo condiciones de laboratorio, la capacidad de carga de oro se incrementa con el aumento de la concentración de cationes en la solución en el orden:



y decrece con la concentración de aniones en el orden:



Esto resulta en una baja cinética de adsorción y reduce la capacidad de equilibrio para el oro.

2.2.7 Aplicaciones en soluciones cianuradas

El uso del carbón activado cumple su función de recuperar el oro contenido en soluciones originadas en diversos procesos de cianuración, entre los métodos que figuran actualmente es carbón en columna (CIC), carbón en pulpa (CIP) y carbón en lixiviación (CIL), a diferencia de otros procesos, este sistema no necesita mucho control y sus recuperaciones llegan hasta 99 %. En el presente trabajo veremos el proceso CIC.

Proceso de adsorción CIC

Las columnas empacadas de carbón activado se utilizan en el proceso Carbón en Columna (CIC) para la recuperación de oro a partir de soluciones cianuradas previamente clarificadas, el diseño de columnas de adsorción involucra la determinación de la cantidad de carbón que se requiere para tratar un volumen conocido de solución, especificando la altura del lecho y el área transversal al flujo.

En este método existen dos formas de tratar las soluciones provenientes de la lixiviación:

Sistema de lechos fijos o empacados

La solución rica proveniente de la lixiviación es percolada hacia abajo a través de una capa fija de carbón activado, en este sistema para la misma concentración de solución la cantidad de carbón activado que se necesita es menor en comparación con el sistema de lecho fluidizado.

Sistema de lechos fluidizados

La solución rica proveniente de la lixiviación se bombea hacia arriba a través de una cama de carbón activado a una velocidad suficiente para mantener el lecho del carbón en estado fluido o suspendido en la corriente de solución rica y sin que sea llevado fuera del sistema. El sistema de lecho fluidizado tiene las ventajas de un mejor transporte de masa y evita la canalización de la solución, mientras que el sistema de lecho empacado es efectivo en el tratamiento de soluciones muy limpias.

Resulta muy importante considerar la granulometría del carbón, ya que carbones muy finos impiden la percolación por

gravedad de la solución, por el contrario, carbones de granulometría gruesa, no retienen la solución el tiempo suficiente para que se alcance la concentración final requerida.

El proceso CIC se emplea para soluciones con bajas concentraciones de oro y es una alternativa a la cementación en el caso de procesos de cianuración por percolación en piscinas y en pila. Pueden emplearse circuitos en serie o en contracorriente y con lechos de carbón fijos o fluidizados en función del contenido de sólidos suspendidos de la solución a tratarse.

La solución embarazada de cianuro atraviesa las columnas del carbón, que es situado generalmente en la manera de paso, de modo que el rebose de la columna de más alto flujo por gravedad pasa a la columna siguiente, aliviando el sistema para bombear. El carbón cargado es quitado periódicamente de las columnas, y enviado al circuito de desorción. El carbón entonces se sujeta generalmente a una solución calentada (366,48 a 394,26) °K con 1 % de hidróxido de sodio y 0,1 % de cianuro de sodio y el oro es retirado de la superficie del carbón. A este punto, la solución de NaOH/CN se envía a electrowinning, donde el oro es depositado sobre los cátodos del acero inoxidable. El oro es quitado de los

cátodos con agua a alta presión, a veces el cátodo se pone en un horno a 1366,48 °K que derrite el oro del cátodo.

2.2.8 Tecnología de fabricación

La fabricación industrial del carbón activado es simple, se puede elaborar a partir de 2 métodos:

- a. Por la acción de gases, casi siempre vapor de agua, sobre carbón vegetal calentado. (coque de parafina, cáscara de nueces o turba).
- b. Por carbonización de la madera o de otro tipo carbonizable como turba, cáscara de nueces por vía química.

En cambio, el carbón activado en la aplicación metalúrgica extractiva principalmente en oro, es más complicada en costos mayor, ya que el carbón debería de tener características que lo hagan selectivo, un ejemplo de este tipo de carbón es el de cascara de coco, el cual es óptima, especialmente por resistencia mecánica, lo cual es muy importante ya que el carbón está sometido a la abrasión, choque, compresión, etc.

Regeneración del carbón

La reactivación del carbón, se realiza después del proceso de elusión., calentando el carbón en hornos, a temperaturas entre 923 °K y 1023 °K, en ausencia de aire durante unos treinta minutos. Se puede inyectar vapor de agua durante el proceso, para producir una reactivación más intensiva. Es práctica común el realizar un lavado ácido del carbón, antes o después de la elusión, para limpiar las superficies de impurezas inorgánicas tales como precipitados de carbonato de calcio. Se utiliza una solución al 3% de HCl, en caliente. Para evitar que ciertos compuestos de calcio y magnesio, usuales en el agua, puedan precipitar en la superficie del carbón al trabajar a temperaturas más altas, se utiliza agua blanda (con bajo contenido en calcio y magnesio).

2.3. Definición de términos

a. Cianuro

El solvente más comúnmente utilizado es el cianuro de sodio. El cianuro se prepara con agua no ácida a un pH neutro cuya concentración es 10 % en peso.

La concentración mínima en la solución lixiviante está entre 0,05 - 0,10 % de NaCN como máximo.

b. Cal

La cal se agrega directamente con el mineral en el circuito de chancado, la función es mantener una alcalinidad de 10 a 11, su consumo varía de acuerdo a cada mineral y está entre 0,5 a 5 kg/TM.

La pureza de CaO libre debe estar entre 60 y 70 % para evitar transporte de carga inútil.

c. Zinc

Se agrega en una proporción que varía de 0,6 a 1,5 por parte de oro y plata, para obtener estos consumos debe utilizarse un zinc de la más alta calidad.

d. Carbón activado

Es utilizado para precipitar oro y plata de las soluciones ricas, se recomienda generalmente cuando el mineral tiene solo o mayores proporciones de oro con respecto a la plata, el carbón usado en estos casos está entre mallas -6+16, -8 + 18 y -10 +20, a veces acompañado de una precipitación opcional de plata con Na₂S cuando la relación plata/oro en la solución es muy alta. Los

carbones más usados son la corteza de coco debido a su dureza y mayor poder adsorbente.

Sin dejar impactos de largo plazo. El gas de cianuro se disipa rápido en espacios abiertos como el aire libre. La luz del sol descompone el cianuro cuando está expuesto al aire o cerca de aguas superficiales. Al igual que otros químicos de uso industrial, el cianuro se puede manejar de forma segura para proteger a las personas y el medioambiente.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de la investigación

En el diseño del trabajo de investigación, se consideraron variables significativas que influirán en los resultados, se estimó diversas pruebas experimentales en la adsorción de oro a partir de soluciones cianuradas:

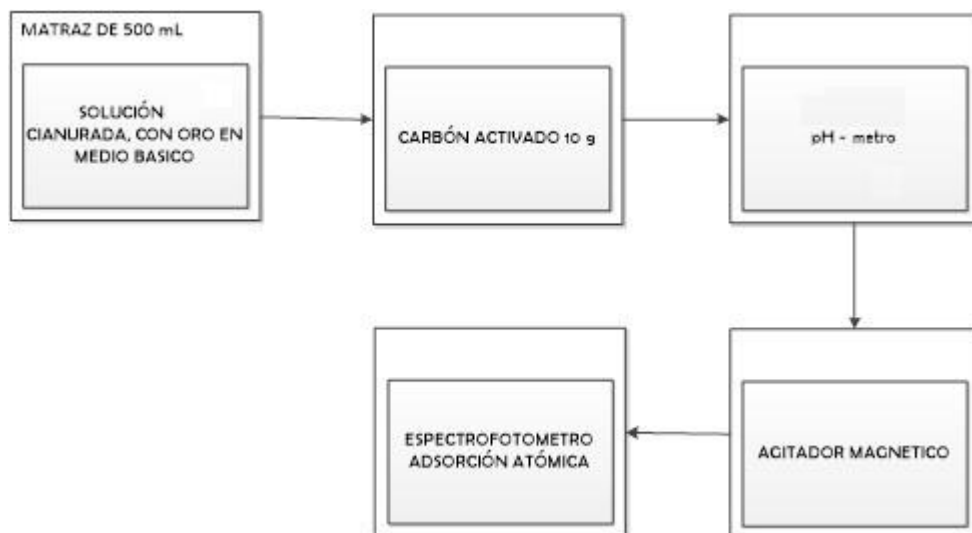


Figura 6. Procedimiento de la técnica experimental.

Fuente: Elaboración Propia.

3.2. Población y muestra (según el caso)

De 10 kilos de carbón activado marca “Calgon” se cuarteo, para tener 15 muestras representativas de 10 gramos cada una, para las distintas pruebas de adsorción a partir de soluciones cianuradas cargadas de oro; las pruebas se realizaron en laboratorio de biolixiviación de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.

3.3. Operacionalización de variables

Las variables estudiadas en forma detallada es la capacidad de carga del carbón activado en soluciones cianuradas, la adsorción de Au (CN)⁻², concentración de oro en solución y velocidad de agitación del tratamiento.

Las variables que afectan la adsorción del oro en carbón activado, la adsorción de oro está influenciada por una serie de factores.

Variable Independiente:

- Concentración de oro en solución, pH de la solución y velocidad de agitación.

Variable Dependiente:

- Capacidad de carga del carbón.

3.4. Técnicas e instrumentos para recolección de datos

La muestra de solución cianurada se obtuvo de la cianuración de minerales auríferos procedentes la Región de Moquegua, se logró obtener 20 litros de esta solución rica en oro. Con respecto al carbón activado, se consideró 10 kilos de muestra.

3.5. Procesamiento y análisis de datos

3.5.1 Materiales

- Reactor batch.
- Placa caliente con agitación.
- Probetas.
- Carbón activado (Marca CALGON malla Tyler GRC 6 x 12).
- Cronómetro.
- Matraces volumétricos.
- Vasos de precipitados.
- Agitadores magnéticos.

3.5.2 Equipos utilizados

- Espectrofotómetro de absorción atómica.
- Potenciómetro.

- Agitador magnético.
- Tacómetro.
- Balanza analítica.

3.5.3 Reactivos

Todos los reactivos utilizados son de grado reactivo y las soluciones se prepararon con agua destilada.

3.5.4 Generalidades del carbon activado

El Carbón activado tiene las siguientes propiedades

Tabla 3.
Propiedades de carbón Calgon.

Carbón Calgon tipo GRC -m6x12	
Número de abrasión, min	98
Densidad aparente, min (g/ml)	0,44
Contenido de ceniza %, max	4
Humedad %, max	4
Tamaño de tamiz	6x12
Diámetro partícula (mm)	1180 - 3350

Fuente: Especificaciones del fabricante para el carbón CALGON tipo GRC-22. (10/07/2017).

3.5.5 Análisis de oro

Las muestras de oro se analizaron en un Espectrofotómetro de Absorción Atómica, con lámpara de cátodo hueco para oro, a una longitud de onda de 242,7 nm, slit de 0,2 nm, linealidad de 15 mg/l = 0,26 Abs, Amp. de 5, se calibró con solución de 2 mg/l (0,034), 4 mg/l (0,064) y 6 mg/l (0,104), y flama aire-acetileno de acuerdo con el manejo del equipo.

3.5.6 Pruebas

Se realizaron pruebas donde se evaluó el efecto de la variación de los parámetros a controlar como pH, la concentración inicial de oro, la relación carbón activado/solución, se obtuvieron las isotermas de adsorción. El número de pruebas se definió por criterio técnico, se consideró para los resultados que se obtuvieron el tiempo de contacto, agitando mecánicamente, etc. Se utilizó un carbón activado virgen CALGON, cual fue evaluada por adsorción de oro a partir de soluciones de oro con cianuro de sodio.

3.5.7 Técnica experimental

Los experimentos fueron efectuados en vasos de precipitación de capacidad de 500 ml, con 250 ml de solución, con agitación magnética, manteniendo constantes las variables de concentración inicial de oro en solución, temperatura ambiental 298 °K, la agitación magnética de 500 rpm; variando tiempo de contacto de 2 a 24 horas y cantidad de carbón activado. En la Tabla 4 se muestran las variables que fueron estudiadas y su rango de evaluación en la experimentación. En esta etapa se evaluó el porcentaje de adsorción de oro y la carga de oro en el carbón activado (Kg Au/tonelada carbón) en función del tiempo, para diferentes condiciones experimentales.

Tabla 4.
Variables que fueron estudiadas y su rango de evaluación.

Variables	Rango experimentación	
Concentración de oro	8	mg/l
Concentración de cianuro de sodio	200	PPM
Velocidad de agitación	500	RPM
Tiempo de contacto	2,4, 6,12 y 24	Horas
pH	10 - 10,5	
Temperatura	298	°K

Fuente: Elaboración Propia.

3.5.7 Capacidad de carga del carbón

En la medición de la capacidad de carga máxima se consideró una muestra de solución cianurada de 8 g/l y se mantuvo constante, variando el peso de carbón activado para cada prueba. Este valor denominado, carga de saturación, fue bastante importante para las pruebas ya que gobernó el volumen de solución utilizada. A escala laboratorio fue posible determinar la carga para el sistema, ya sea por una variación de la relación de volúmenes de acuosos y carbón, o por repetidos contactos del carbón con solución fresca de oro. Estos datos de saturación o de equilibrio también fueron utilizados para construir una isoterma de extracción o isoterma de distribución.

capacidad máxima de carga en la extracción de oro al utilizar carbón activado es: $[Au]_i = 8 \text{ mg/l}$; 200 ppm NaCN; 500 rpm; 2 a 16 g de carbón activado; pH= 10,5; T= 298 °k; tiempo de contacto igual 2 a 24 horas.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

En la tabla 5, se aprecia la adsorción del oro a diferentes tiempos de soluciones cianuradas; considerando diferentes pesos de carbón activado para las pruebas de laboratorio de 2 g, 8 g y 16 g.

Tabla 5.
Concentración de oro en solución a diferentes pesos de carbón activado.

Tiempo (h)	Concentración de Oro en Solución (ppm)		
	2 (g)	8 (g)	16 (g)
0	8	8	8
2	4,6	1,5	0,4
4	3,2	0,6	0,1
6	1,9	0,3	0,08
12	0,8	0,15	0,06
24	0,45	0,06	0,05

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 6, se presenta la recuperación de oro en los diferentes tiempos de adsorción del oro de soluciones cianuradas en carbón activado a diferentes pesos de carbón 2 g, 8 g y 16 g.

Tabla 6.
Recuperación de oro soluble.

Tiempo (h)	Recuperación de Oro Soluble		
	(%)		
	2 (g)	8 (g)	16 (g)
0	0,00	0,00	0,00
2	42,50	81,25	95,00
4	60,00	92,50	98,75
6	76,25	96,25	99,00
12	90,00	98,13	99,25
24	94,38	99,25	99,38

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 7, presenta las toneladas de oro adsorbido por carbón activado a distintos tiempos (carbón activado: 2 g, 8 g y 16 g)

Tabla 7.
Peso del oro adsorbido por tonelada de carbón.

Tiempo (h)	Peso de Oro Adsorbido por Tonelada de Carbón		
		2 (g)	8 (g)
0	0,00	0,00	0,00
2	425,00	203,13	118,75
4	600,00	231,25	123,44
6	762,50	240,63	123,75
12	900,00	245,31	124,06
24	943,75	248,13	124,22

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Discusión

En la figura 7 se observa cómo va ocurriendo la adsorción de oro sobre el peso de carbón/ litro de solución con respecto al tiempo. Teniendo en cuenta diferentes pesos de carbón activado de 2 g, 8 g hasta 16 g.

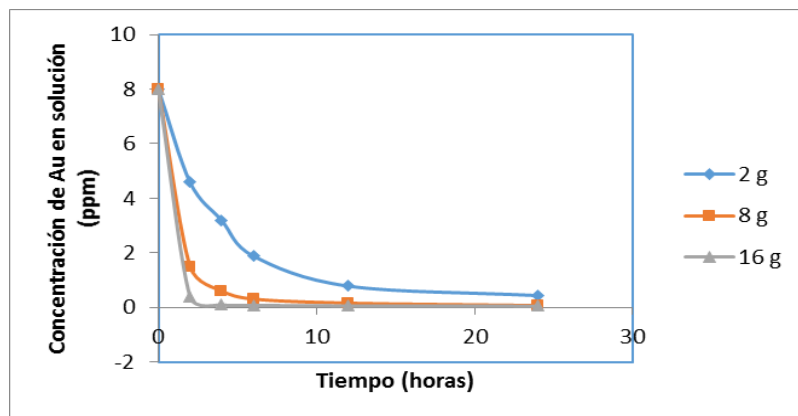


Figura 7. Adsorción de oro sobre el peso de carbón/ litro de solución.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 8, se aprecia la recuperación de oro solubles vs tiempo en horas. A diferentes pesos de carbón activado 2 g, 8 g y 16 g.

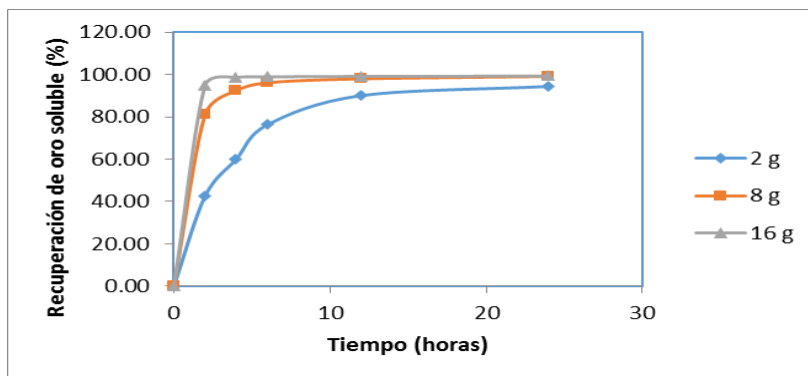


Figura 8. Recuperación de oro solubles vs tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 9, se observa el peso adsorbido por tonelada de carbón activado. A diferentes pesos de carbón activado 2 g, 8 g y 16 g. se puede ver claramente a menor peso de carbón utilizado en proceso de carga va ser mayor durante la adsorción, es decir que la cinética va ser exponencial.

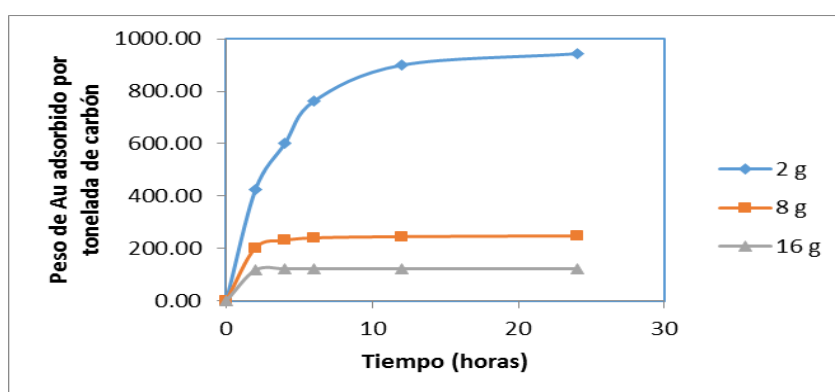


Figura 9. Peso del oro adsorbido por tonelada de carbón.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

- La adsorción del oro de soluciones cianuradas varían según la cantidad de carbón activado utilizado en el proceso. La adsorción del oro es mayor utilizando cantidades de carbón de 16 gramos a las 4 horas estaría logrando la adsorción de oro en solución.
- La mayor recuperación de oro se logra a las 24 horas, llegando al 99,38 % de adsorción del oro en el tiempo indicado para 16 gramos de carbón activado, para 8 gramos la recuperación en 24 horas es de 99,25%. Asimismo, se puede concluir que cuando se considera 2 gramos de carbón activado la recuperación en 24 horas es de 94,38 %.
- La recuperación de oro a las 2 horas de adsorción es de 95 % para 16 gramos de carbón activado. Lo que no se logra con 2 gramos de carbón activado donde la recuperación es 42,5 %.
- El peso de oro adsorbido por tonelada de carbón se logra hasta 943,75 kilos de oro, considerando como carga máxima del carbón activado Calgon para estas pruebas de laboratorio.

RECOMENDACIONES

- Tener un profundo estudio morfológico del carbón activado para un mayor entendimiento de la adsorción del oro.
- Entre las propiedades relevantes del carbón activado se debe considerar el tamaño de partícula y la dureza del carbón, seguir investigado estas propiedades es de mucho interés, por la magnitud de carbón fino que se produce durante el proceso de adsorción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Calgon Carbón Corporation, (1995), product bulletin granular activated carbón GRC.

Fleming C. A. & Nicol M. J., (1984), The absorption of gold cyanide onto activated carbon. III. Factors influencing the rate of loading and the equilibrium capacity, J. South African Inst. Min. Metall., Vol. 84, No. 4, pp. 85-93.

Houng, D.H.H.; Twidwel, D.L.G. & Miller, D.J.D. (1986). Hidrometalurgia, Tomo II Editorial San Marcos, Lima.

Hiskey J.B & Aturi V.P., (1988), "Dissolution chemistry of gold and silver in Different Lixiviants", Mineral processing and extractive metallurgy review, vol.4, pp 95-134.

Jankowska H., Swiatkowski A. & Choma J., (1991), Active Carbon, Ellis Horwood: Chichester, 280 pp.

Misari, Ch., Fidel Sergio, (1993). Metalurgia del Oro, Volumen I y II, Primera Edición, editorial Litoral, Lima-Perú.

Marsden J. & House I., (1993). The Chemistry of Gold Extraction, Ellis Horwood: New York. 597 pp.

Mattson J. & Mark H., (1971), Activated Carbon, Marcel Dekker, Inc.: New York, 237pp.

Nicol, M., Fleming, C, Paul, R. (1987). The Chemistry of the extraction of Gold. The Extractive Metallurgy of gold in South Africa. The South African Institute of Mining and Metallurgy, 831-901.


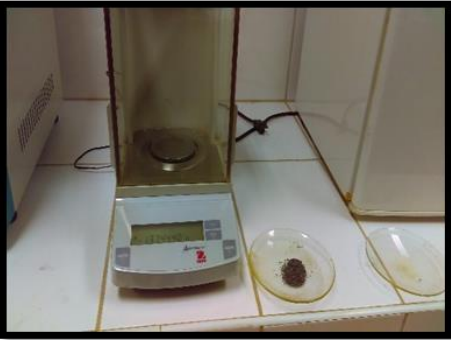
Rees K. & Van Deventer J., 2000, The mechanism of enhanced gold extraction from ores in the presence of activated carbon, Hydrometallurgy, Vol. 58, pp. 151–167.

Tecsup (2010). Metalúrgia Extractiva del Oro. Convenio de Cooperación Técnica.

Vargas Gallardo, Juan, (1995). Metalurgia del Oro y la Plata, Editorial San Marcos, Lima-Perú.

ANEXOS

Anexo 1. Imágenes del proceso

	
<p>Carbón fresco.</p>	<p>Lixiviación en botellas.</p>
	
<p>Carbón obtenido después de la lixiviación.</p>	<p>Peso del carbón cargado para análisis.</p>



Obtención del Dore