

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA CAPACIDAD DE
ADSORCIÓN DE ORO UTILIZANDO CARBÓN
ACTIVADO Y RESINAS EN MINERA
PUCAMARCA MINSUR**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA
PROFESIONAL**

Presentado por:

Bach. Angel de Jesús Orcon Quispe

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA - PERÚ

2024

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

ESTUDIO COMPARATIVO DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE ORO UTILIZANDO CARBÓN ACTIVADO Y RESINAS EN MINERA PUCAMARCA MINSUR

Trabajo de suficiencia Profesional sustentado y aprobado el 05 de julio del 2024; por el Bachiller Angel de Jesús Orcon Quispe; siendo el jurado calificador integrado por:

| | | |
|------------|---|---|
| PRESIDENTE | : |  Dr. Alberto Bacilio Quispe Cohalla |
| SECRETARIO | : |  Dr. Freddy Felipe Cori Nina |
| MIEMBRO | : |  MSc. Edgardo Teófilo Valdez Cortijo |
| ASESOR | : |  MSc. Daniel Jesús Zevallos Ramos |

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, **Daniel Jesús Zevallos Ramos** docente de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales, identificado con **DNI 01334339** y **Código ORCID 0000-0002-1818-3058** como asesor designado para realizar la evaluación a través del software de similitud textual **TURNITIN** del informe de **TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL**, modalidad de titulación acreditada por Resolución de Facultad N° **8731-2024-FAIN/UNJBG**, certifica que el informe titulado: **ESTUDIO COMPARATIVO DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE ORO UTILIZANDO CARBÓN ACTIVADO Y RESINAS EN MINERA PUCAMARCA MINSUR** presentado por el Bachiller **Angel de Jesús Orcon Quispe** para optar el **Título Profesional de Ingeniero Metalurgista**, cumple con lo establecido en el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la evaluación realizada a través del software de similitud textual **TURNITIN** con **código de identificación de reporte de similitud oid:23228:356277687** cuenta con el nivel de similitud que es permitido cuyo porcentaje es de **15%** por lo que doy fe de la veracidad y queda declarado no cometer el delito de falsedad genérica del contenido del **INFORME DE TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL** y está de acuerdo con el **NIVEL PERMITIDO**, para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Firmo el presente certificado con fines de continuar con los trámites respectivos para su publicación.

Tacna, 15 de Julio del 2024

Firma del Asesor




DNI: 01334339

Nombres y Apellidos: **Daniel Jesús Zevallos Ramos**



Firma del Titulante



DNI: 45316674

Nombres y Apellidos: **Angel de Jesús Orcon Quispe**



DEDICATORIA

A Dios, por estar siempre presente en cada proceso de formación, en mi vida.

A mi madre Ysabel, por su incansable apoyo y confianza por darme motivación que me ha permitido crecer y ser una persona de bien.

A mi familia, por el apoyo incondicional para poder terminar mis estudios.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann por haberme recibido y formar parte de su comunidad, así como a mis profesores por compartir conmigo sus conocimientos y experiencias académicas de manera dedicada.

También quiero expresar mi gratitud a minera Pucamarca, por darme la oportunidad de formar parte de su equipo.

Agradezco a todos aquellos que contribuyeron a la realización de este proyecto.

CONTENIDO

| | |
|---|------|
| DEDICATORIA..... | iv |
| AGRADECIMIENTO | v |
| CONTENIDO | vi |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | viii |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | ix |
| RESUMEN | x |
| ABSTRACT | xi |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO I..... | 2 |
| ASPECTOS GENERALES | 2 |
| 1.1. Descripción del tema | 2 |
| 1.2. Justificación..... | 3 |
| 1.3. Objetivos | 3 |
| 1.3.1. <i>Objetivo general</i> | 3 |
| 1.3.2. <i>Objetivos específicos</i> | 3 |
| CAPÍTULO II..... | 4 |
| FUNDAMENTO TEÓRICO | 4 |
| 2.1. Generalidades de planta | 4 |
| 2.1.1 <i>Ubicación de la minera Pucamarca</i> | 4 |
| 2.2. Mineralización..... | 5 |
| 2.3. Definición de adsorción | 6 |
| 2.4. Equilibrio de adsorción | 7 |
| 2.4.1. <i>Modelo de Langmuir</i> | 9 |
| 2.4.2. <i>Modelo de Freundlich</i> | 10 |

| | |
|---|----|
| 2.5. Cinética de adsorción..... | 10 |
| 2.6. Materiales adsorbentes | 11 |
| 2.7. Carbón activado..... | 12 |
| 2.7.1. Estructura | 12 |
| 2.7.2. Características físico químicas..... | 15 |
| 2.7.3. Características del carbón activado | 16 |
| 2.7.4. Propiedades de adsorción | 18 |
| 2.7.5. Adsorción de compuestos orgánicos sobre carbón activado | 19 |
| 2.7.6. Adsorción de compuestos inorgánicos sobre carbón activado..... | 19 |
| 2.7.7. Selección de un carbón activado para la recuperación de oro | 22 |
| 2.8. Interacción entre algunos complejos de au y el carbón activado | 25 |
| 2.8.1. Factores que afectan la adsorción de carbón activado | 26 |
| 2.8.2 Carbón en columnas (CIC) | 29 |
| 2.8.3 Resinas de intercambio iónico | 31 |
| 2.8.4. Cinética de la reacción de intercambio iónico | 34 |
| 2.8.5. Selectividad de la resina | 36 |
| 2.8.6. Resinas usadas en la recuperación de oro desde soluciones cianuradas | 38 |
| 2.8.7. Recuperación de oro desde soluciones cianuradas por intercambio iónico | 41 |
| CAPÍTULO III..... | 43 |
| FUNDAMENTO METODOLÓGICO..... | 43 |
| 3.1. Descripción de la metodología empleada..... | 43 |
| 3.2. Población y muestra | 43 |
| 3.3. Equipo, materiales y reactivos | 44 |
| 3.4. Ejecución de pruebas de adsorción con carbón activado y resinas | 48 |
| CONCLUSIONES..... | 58 |
| RECOMENDACIONES | 59 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 60 |
| ANEXOS..... | 63 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Tipos de poros..... | 16 |
| Tabla 2 Propiedades y características del carbón. | 17 |
| Tabla 3 Leyes de solución rica de cabeza. | 48 |
| Tabla 4 Resumen de porcentaje de eficiencia de adsorción de oro etapa I y II. | 49 |
| Tabla 5 Resumen de porcentaje de eficiencia de adsorción de oro etapa I y II. | 50 |
| Tabla 6 Prueba de eficiencia de Adsorción I etapa. | 71 |
| Tabla 7 Prueba de eficiencia de adsorción I etapa..... | 72 |
| Tabla 8 Prueba de eficiencia de adsorción II etapa..... | 73 |
| Tabla 9 Prueba de eficiencia de adsorción II etapa..... | 74 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 Ubicación en el mapa U.M. Pucamarca. | 5 |
| Figura 2 Representación esquemática de la estructura del grafito. | 13 |
| Figura 3 Átomos de carbono organizados en una estructura cristalina de grafito..... | 13 |
| Figura 4 Poros en el carbón activado y estructura del carbón activado de cáscara de coco. | 15 |
| Figura 5 Efecto del tamaño de partícula con respecto al rate de adsorción del oro. | 23 |
| Figura 6 Efecto de la adsorción de oro con respecto al área superficial | 24 |
| Figura 7 Agitador de paletas. | 44 |
| Figura 8 Balanza. | 45 |
| Figura 9 Vasos precipitados. | 46 |
| Figura 10 Pipetas. | 47 |
| Figura 11 Porcentaje de eficiencia de adsorción de Au, Carbón Vs Resina I Etapa. | 51 |
| Figura 12 Porcentaje de eficiencia adsorción de Au, Carbón Vs Resina II Etapa. | 52 |
| Figura 13 Porcentaje de eficiencia de adsorción de Au Etapa I y Etapa II. | 53 |
| Figura 14 Porcentaje de eficiencia de adsorción de Ag Etapa I y II..... | 54 |
| Figura 15 Porcentaje de Eficiencia de adsorción de Cu Etapa I y II..... | 55 |
| Figura 16 Porcentaje de Eficiencia de adsorción de Hg Etapa I y II..... | 56 |

RESUMEN

La presente evaluación tiene como objetivo incrementar la capacidad de adsorción de complejos cianurados de oro en función a un estudio comparativo entre el carbón activado usado en planta y resinas. En la minera Pucamarca, se utiliza el método CIC para el proceso de adsorción, el cual se lleva a cabo a través de un circuito en cascada compuesto por una serie de columnas. Este circuito incluye una batería de 5 columnas con dimensiones de 4.0m de diámetro por 5.34m de altura, así como un circuito adicional de adsorción presurizado en línea que consta de una batería de 6 columnas con medidas de 4.10m de diámetro por 5.34m de altura. Cada una de las columnas está cargada con 6,000 kg de carbón activado de malla 6 x 12. Se hizo un muestreo representativo de carbón activado desorbido, carbón virgen y resinas, se realizaron una serie de pruebas de adsorción con solución rica de ley de 0.35 ppm de Au, para determinar si se puede optimizar la eficiencia de adsorción utilizando resinas XIOS AuC-02. Los resultados de las pruebas experimentales determinaron que el porcentaje de adsorción con resinas es menor a comparación del carbón nuevo y desorbido lo cual no es beneficioso para la minera.

Palabras clave: Adsorción, resinas, carbón activado, método CIC.

ABSTRACT

The objective of this evaluation is to increase the adsorption capacity of cyanide gold complexes based on a comparative study between the activated carbon used in the plant and resins. At the Pucamarca mining company, the CIC method is used for the adsorption process, which It is carried out through a cascade circuit composed of a series of columns. This circuit includes a 5-column battery with dimensions of 4.0m in diameter by 5.34m in height, as well as an additional in-line pressurized adsorption circuit that consists of a 6-column battery with measurements of 4.10m in diameter by 5.34m in height. Each of the columns is loaded with 6,000 kg of 6 x 12 mesh activated carbon. A representative sampling of desorbed activated carbon, virgin carbon and resins was carried out, a series of adsorption tests were carried out with a rich solution with a grade of 0.35 ppm. of Au, to determine if the adsorption efficiency can be optimized using XIOS AuC-02 resins. The results of the experimental tests determined that the adsorption percentage with resins is lower compared to new and desorbed carbon, which is not beneficial for the mining.

Keywords: Adsorption, Resins, Activated carbon, CIC method.

INTRODUCCIÓN

Las continuas fluctuaciones en los precios de los metales colocan al oro en la posición esperada e impulsan el desarrollo utilizando la tecnología actual para ajustar los parámetros de operación y mejorar el proceso en la extracción de oro de baja ley mediante métodos hidrometalúrgicos.

Este estudio actual tiene como objetivo incrementar la capacidad de adsorción de complejos cianurados de oro en función a un estudio comparativo entre el carbón activado usado en planta y resinas.

En la actualidad, la empresa lleva a cabo el proceso de adsorción mediante el uso de carbón activado (CIC), este estudio comparativo pretende obtener más rentabilidad sustituyendo el carbón activado por resinas y así obtener una eficiencia máxima de adsorción.

El presente trabajo metalúrgico tiene por objeto realizar la evaluación y estudio comparativo del carbón activado y resinas mediante pruebas metalúrgicas de adsorción

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. Descripción del tema

En los últimos años; la resina está reemplazando al carbón activado como una alternativa para la recuperación de oro. Los circuitos de resina en lixiviación (RIL) y resina en pulpa (RIP) para la recuperación de oro poseen la misma configuración que los circuitos de carbón en pulpa (CIP) y carbón en lixiviación (CIL) para la recuperación de oro. Esta tecnología es popular en Rusia, Uzbequistan, Kazakstan y Sud África. Se dice que la recuperación de oro utilizando resinas ofrece las mismas ventajas que el carbón activado.

El presente estudio comparativo busca evaluar las propiedades de la resina IXOS AuC-02 comparando sus resultados con el carbón activado que se usa en planta ADR (Calgon DG-11), a fin de buscar alternativas para mejorar la eficiencia del circuito de adsorción y disminuir el porcentaje de carbón fino generado por el efecto de atricción.

1.2. Justificación

A través de los resultados obtenidos en este estudio comparativo se busca alternativas para mejorar la eficiencia del circuito de adsorción y disminuir el porcentaje de carbón fino generado por el efecto de atricción y Después adaptar los resultados obtenidos en el laboratorio al entorno de la planta industrial.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Evaluar la eficiencia de la resina IXOS AuC-02 en el proceso de adsorción de oro en Unidad Minera Pucamarca – Minsur.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar pruebas experimentales de adsorción de oro a nivel de laboratorio.
- Evaluar el porcentaje de finos generados por el efecto de la atricción.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

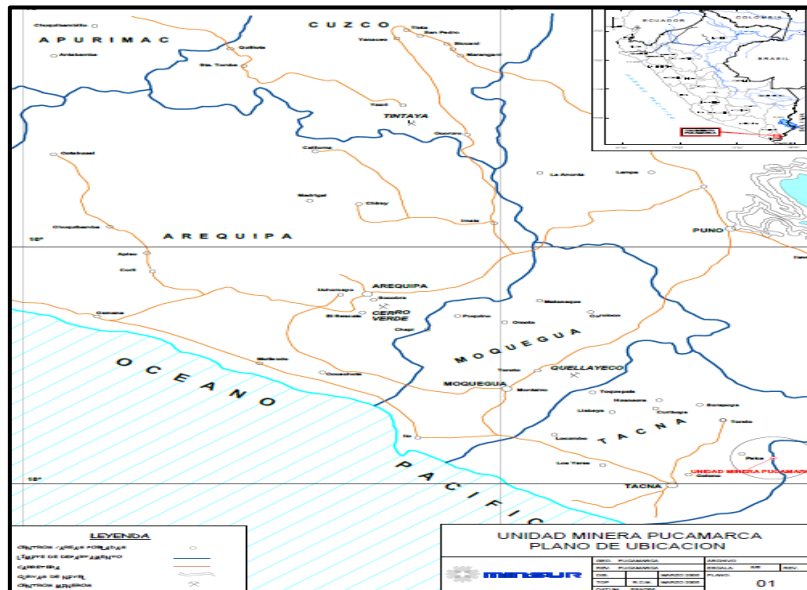
2.1. Generalidades de planta

2.1.1 Ubicación de la minera Pucamarca

La mina Pucamarca está ubicada en el distrito de Palca, en la provincia y departamento de Tacna. Se encuentra a una distancia de 1050 kilómetros al suroeste de Lima y a 55 kilómetros al noroeste de Tacna. Se sitúa en las cercanías del hito 52 de la frontera entre Perú y Chile, que marca el límite este de la mina. El área de la mina pertenece a la comunidad de Vilavilani y el campamento se encuentra en el territorio de la comunidad de Palca.

Figura 1

Ubicación en el mapa U.M. Pucamarca



Nota: MINSUR S.A.

2.2. Mineralización

Cerón (2010) afirma que “la mineralización del yacimiento Pucamarca se divide en dos categorías: la mineralización con presencia de sulfuros predomina en el cerro Caldero, mientras que el cerro Checocollo contiene el 90% del mineral oxidado”.

Precisa que la formación de depósitos de metales preciosos como el oro y la plata se produce de manera dispersa y está asociada con una etapa de deposición a una temperatura más baja que la fase rica en sulfuros. En esta etapa se pueden encontrar oro en estado libre, así como los minerales oropimente, rejalgar, cinabrio y azufre en su forma nativa.

2.3. Definición de adsorción

Gasca (2016) en su investigación Carbón activado de carácter básico para recuperar oro de lixiviados cianurados, sostiene que, “se denomina adsorción al fenómeno de transferencia de masa desde una fase líquida (adsorbato) hacia la superficie de una fase sólida. Este proceso es provocado por las fuerzas moleculares desequilibradas presentes en todas las superficies sólidas. De esta forma, al entrar en contacto una superficie sólida con un líquido o gas, se produce una interacción entre los campos de fuerza de dicha superficie y la del líquido o gas”.

Considera que la fisisorción se produce mediante fuerzas débiles que unen al adsorbato a la superficie, mientras que la quimisorción implica un intercambio de electrones entre las moléculas del adsorbato y la superficie del adsorbente, resultando en un enlace químico.

Explica también que, factores como la naturaleza y reactividad de la superficie del adsorbente, el área superficial, la temperatura y la presión de adsorción son determinantes en el tipo de adsorción que se llevará a cabo en un sistema adsorbente-adsorbato.

2.4. Equilibrio de adsorción

Gasca (2016) afirma “Las moléculas interactúan con la superficie de un sólido cuando está expuesta a un líquido o gas. Mientras que algunas de estas moléculas son repelidas, otras se adhieren a la superficie y son adsorbidas. A medida que la tasa de desorción aumenta, la velocidad de adsorción disminuye hasta que se llega a un punto de equilibrio entre ambas tasas. Este equilibrio se define por la concentración del soluto en el adsorbente (q) y la concentración final del soluto en la fase líquida (C_e), que se representa con una isoterma. La isoterma describe la cantidad de adsorbato que puede adsorberse en equilibrio a una temperatura constante y mide la afinidad del adsorbato por el adsorbente”.

Las isotermas se llevan a cabo utilizando un volumen de solución con una cantidad conocida de adsorbato y diferentes cantidades de adsorbente.

Una vez se ha alcanzado el equilibrio, se miden las concentraciones del adsorbato en la fase acuosa y se calcula la capacidad de adsorción mediante el balance de masa correspondiente.

$$q_e = \frac{V(C_o - C_e)}{m}$$

[1]

En esta situación, se hace referencia a la capacidad de retención del soluto por parte del adsorbente, donde C_o representa la concentración inicial del soluto en el sistema, C_e la concentración en equilibrio, m la cantidad de adsorbente utilizada y V el volumen total del sistema. Existe una variedad de modelos de ajuste de datos que se obtuvieron de los experimentos de equilibrio en adsorción en la literatura, Al igual que los diferentes modelos como Langmuir, Freundlich, Dubinin-Radushkevich, Temkin y la ecuación de isoterma BET de Brunauer, Emmet y Teller. Sin embargo, con el objetivo de comprender es necesario utilizar un enfoque más específico para mejorar el equilibrio de adsorción. Los modelos propuestos por Langmuir y Freundlich se utilizan con frecuencia para ajustar los datos del experimento.

2.4.1. Modelo de Langmuir

Gasca (2016) señala que, de acuerdo con la isoterma de Langmuir, el equilibrio entre la superficie y la solución se considera un equilibrio químico que puede ser reversible. Esta teoría se basa en cuatro premisas cruciales: (1) La adsorción tiene lugar en sitios específicos en la superficie (2) solo una molécula de adsorbato puede unirse a cada sitio. (3) Se asume que la energía de adsorción es constante en cada sitio y (4) no hay interacciones entre las moléculas adsorbidas adyacentes. La siguiente descripción ilustra el modelo mencionado.

$$q_e = \frac{bq_{max} C_e}{1 + bC_e}$$

[2]

La capacidad de un soluto para ser adsorbido se expresa mediante la constante q_e (mg adsorbato/g adsorbente), la concentración de equilibrio C_e (mg/L), la máxima capacidad de adsorción (mg adsorbato/mg adsorbente) y la constante de Langmuir (L/mg). El grafito consiste en capas de hexágonos fusionados unidos por fuerzas de Van der Waals, con enlaces covalentes entre átomos de carbono en la misma capa.

2.4.2. Modelo de Freundlich

Gasca (2016) señala que, en entornos diversos, donde la energía de los puntos activos sigue una distribución exponencial, el equilibrio se conoce como isoterma de Freundlich. Aunque este modelo ha sido utilizado para explicar algunas adsorciones físicas, es fundamental para los procesos de quimisorción. La relación empírica se describe como sigue:

$$q = KC_e^{1/n}$$

[3]

La capacidad de adsorción del soluto, expresada en miligramos adsorbidos por gramo de adsorbente, la concentración en equilibrio en miligramos por litro, y las constantes de Freundlich para la capacidad de adsorción e intensidad son denominadas como K y n, respectivamente.

2.5. Cinética de adsorción

La velocidad de adsorción, que depende de la interacción adsorbato-adsorbente, es un componente crucial del diseño de sistemas de adsorción, más allá de los datos de equilibrio. La cinética de adsorción está relacionada

con el diseño del adsorbedor (reactor) y la elección del adsorbente. Los modelos utilizados para el ajuste cinético de los datos experimentales se muestran en las siguientes secciones (Gasca, 2016).

2.6. Materiales adsorbentes

Gasca (2016) respecto a materiales adsorbentes indica que, la recuperación es una parte crucial del proceso productivo del metal, además del proceso de extracción de oro mediante el uso de agentes lixiviantes. La cementación con zinc es el método principal de recuperación industrial, pero su uso es imposible debido a las concentraciones diluidas de metal. Además, se ha propuesto la utilización de materiales adsorbentes en el proceso de recuperación de oro como una alternativa para abordar esta cuestión. Debido a esta necesidad, se han investigado varios materiales que pueden absorber este metal. Por ejemplo, se ha investigado la recuperación utilizando resinas de intercambio iónico, Se han investigado materiales como sílice y fibras de carbón activado, y además se ha explorado el potencial de utilizar biosorbentes como el bagazo en estudios previos.

Sin embargo, a pesar de los estudios de varios materiales adsorbentes, el CA sigue siendo una gran alternativa debido a su bajo costo de implementación y alta eficiencia de recuperación.

2.7. Carbón activado

Bockris (1996), Mattson (1971) sostienen que, la fabricación de carbón activado a partir de materiales carbonosos implica la creación de una sustancia similar al grafito con una estructura porosa y cristalina, obtenida a partir de una materia prima seleccionada y tratada para maximizar la cantidad de poros de diferentes tamaños dispersos de manera aleatoria. Este proceso se conoce como activación de este material.

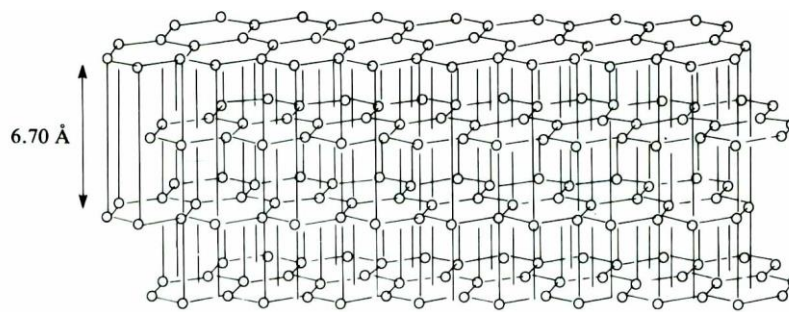
El carbón activado puede ser producido a partir de una variedad de fuentes de material carbonaceo, como la turba de las cáscaras de coco, pino, etc.

2.7.1. Estructura

Bockris (1996), Mattson (1971) respecto a los estudios de rayos-X, refiere que, la estructura del carbón activado térmicamente se asemeja a la del grafito. La siguiente Figura muestra la estructura ideal del grafito.

Figura 2

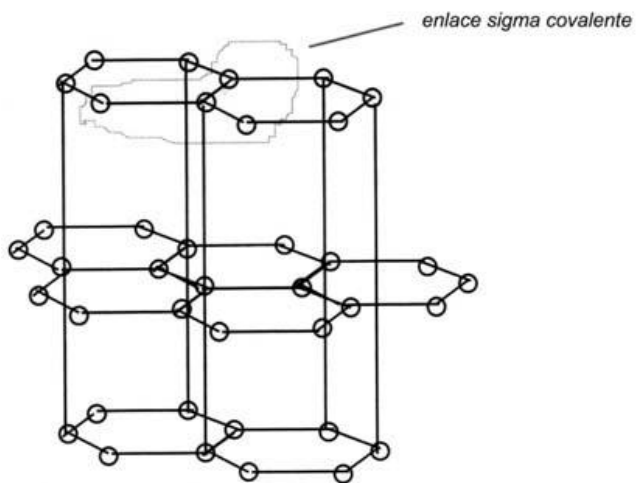
Diagrama simplificado que muestra la disposición de los átomos en la estructura del grafito



Nota: Tomado de Bockris.

Figura 3

Átomos de carbono organizados en una estructura cristalina de grafito



Nota: Tomado de Bockris.

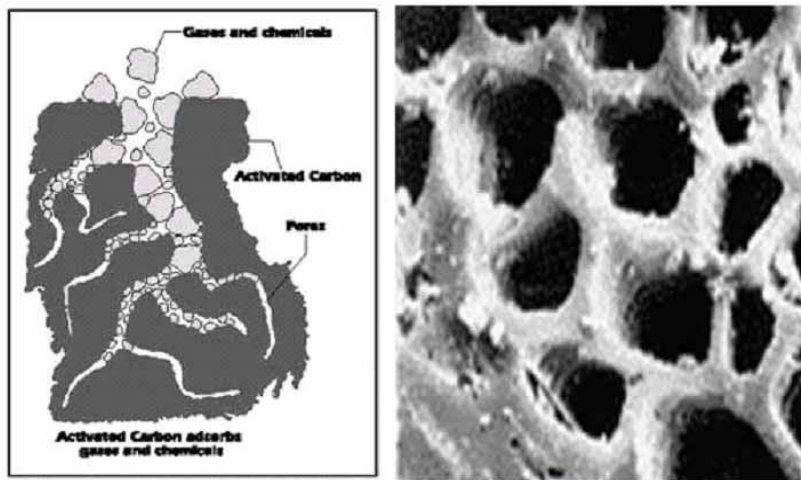
Las uniones entre átomos de carbono dentro de una misma capa suelen ser de tipo covalente, específicamente enlace sigma. Esto se debe a que los cristales de grafito están formados por capas de hexágonos interconectados mediante fuerzas de Van der Waals.

La estructura del carbón activado es diferente de la del grafito porque tiene un alto nivel de imperfección estructural, lo que da muchas oportunidades para reacciones de carbono en los filos.

Primariamente de grupos funcionales orgánicos que contienen dióxido de carbono, que se encuentran principalmente en los filos de los anillos de grafito que se han roto.

Figura 4

Poros en el carbón activado y estructura del carbón activado de cáscara de coco



Nota: Extraído de Bockris.

2.7.2. Características físico químicas

Bockris (1996) refiere que, el término "carbón activado" se usa con frecuencia para describir una familia de materiales carbonáceos de alta porosidad que no pueden ser identificados por una fórmula estructural o por análisis químico. Los materiales tienen un ancho de poros que oscila entre tres y muchos miles de Armstrong, y se clasifican generalmente por conveniencia en términos de sus diámetros.

Tabla 1

Tipos de poros

| Tipos | Radio en Å° | Contribución superficial (%) |
|-----------------------------------|---|-------------------------------------|
| Macro poros | 500 – 20000 | Muy poco |
| Meso poros (poros transicionales) | 100 – 500 | 5 |
| Micro poros | 8 – 100 | 95 |

Nota: Tomado de Bockris

Los poros grandes tienen una contribución mínima a la superficie interna total y su presencia está determinada principalmente por la composición del material carbonáceo original. Por otro lado, los poros de transición representan aproximadamente el 5% de la superficie interna total. Los poros micro son principalmente el resultado del proceso de activación y representan aproximadamente el 95% del área superficial interna (Bockris, 1996).

2.7.3. Características del carbón activado

Solo a través de propiedades físicas y químicas específicas, los diferentes tipos de carbón activado pueden distinguirse entre sí, como se muestra en el siguiente cuadro (Bockris, 1996):

Tabla 2*Propiedades y características del carbón*

| 1 | Propiedades físicas | |
|----------|---|-------------------------------|
| | Densidad de partículas (g/cc) | 0,80 – 0,85 |
| | Densidad Bulk o aparente (g/cc) | 0,48 – 0,54 |
| | Volumen de poros (cc/g) | 0,70 – 0,80 |
| | Contenido de cenizas (%) | 2 – 4 |
| | Contenido de humedad (%) | 1 – 4 |
| 2 | Características de adsorción química | |
| | Área superficial (N ₂ BET) | 1050 – 1200 m ² /g |
| | (*) número de I | 1000 – 1150 mg/g |

Nota: Tomado de Bockris.

La magnitud de la molécula de I es pequeña y se absorbe en poros de diámetro inferior a 10Å, Por lo tanto, el tamaño de la molécula I proporciona información sobre el tamaño de los poros correspondientes.

El carbón activado actúa a través del proceso de adsorción, donde ciertas sustancias se adhieren a las superficies internas de los poros que lo componen, permitiendo una mayor área de adsorción y una efectividad mayor en su función de adsorción (Hassler, 1982).

2.7.4. Propiedades de adsorción

En general, se le atribuyen al carbón activado sus propiedades de adsorción, su amplia área superficial interna y su variada distribución de tamaños de poros.

El mecanismo, por el cual, el carbón activado funciona es a través de la adsorción, donde ciertas sustancias se adhieren a las superficies internas de los poros. Así, la capacidad de adsorción aumenta a medida que hay más superficie de adsorción disponible.

Este proceso de adsorción ocurre cuando los átomos de carbón en las paredes de los poros experimentan un desequilibrio de fuerzas, lo que lleva a que las moléculas sean atraídas y sostenidas en la superficie para corregir este desequilibrio.

La adsorción puede ser física, con fuerzas de enlaces débiles y reversibles, o química, con fuerzas homopolares e irreversibles.

La temperatura, el pH de la solución, la concentración de las especies presentes y la naturaleza y distribución del carbón activado son algunos de los factores que afectan la adsorción en soluciones acuosas.

La difusión de las moléculas hacia las superficies internas de los microporos es crucial en este proceso, ya que determina el tiempo de reacción y la cinética de adsorción, la cual aumenta con el tamaño de la partícula.

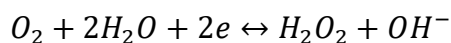
2.7.5. Adsorción de compuestos orgánicos sobre carbón activado

Se adsorbe mejor que los compuestos orgánicos y los compuestos inorgánicos no polares, especialmente el agua, porque es un material no polar.

Las interacciones de Van der Waals entre la superficie del carbón y el compuesto orgánico, junto con las fuerzas de enlace del hidrógeno en solución, suelen equilibrar el proceso de adsorción de especies orgánicas sobre el carbón activado.

2.7.6. Adsorción de compuestos inorgánicos sobre carbón activado

Varios investigadores han formulado teorías elaboradas para tratar de explicar el proceso de adsorción. La explicación electroquímica propuesta por Frumkin implica la reducción de O_2 en contacto con una suspensión acuosa de carbón a un ion hidroxilo (OH^-) con liberación de H_2O_2 .



[4]

El carbón tiene una carga positiva y proporciona electrones, lo que lo hace atractivo para adsorber aniones y mantener su neutralidad eléctrica. Por esta razón, el carbón no suele ser eficaz para adsorber cationes pequeños como el Ni^{+2} , aniones pequeños como el Cl^- y especies orgánicas cargadas. Cuando el carbón adsorbe una gran cantidad de complejos inorgánicos con carga negativa, pierde su capacidad de adsorción $Au(Cl)_4^-$, $Au(CN)_2^-$ y $Ni(CN)_4^{2-}$.

Claramente hay algo sorprendente sucediendo con el carbón. La capacidad de un polímero sintético adsorbente llamado Duolite S761 de aumentar su capacidad de adsorción del carbón con ciertas moléculas respalda esta afirmación.

La adsorción de compuestos inorgánicos sobre carbón activado se realiza mediante un mecanismo de reducción. La adsorción de Ag de soluciones de nitrato y Au de un medio clorhídrico es el resultado de este proceso.

A continuación, se presentan las reacciones que evidencian los procesos de reducción que tienen lugar en presencia de carbón activado, junto con otros ejemplos interesantes de dichos procesos.



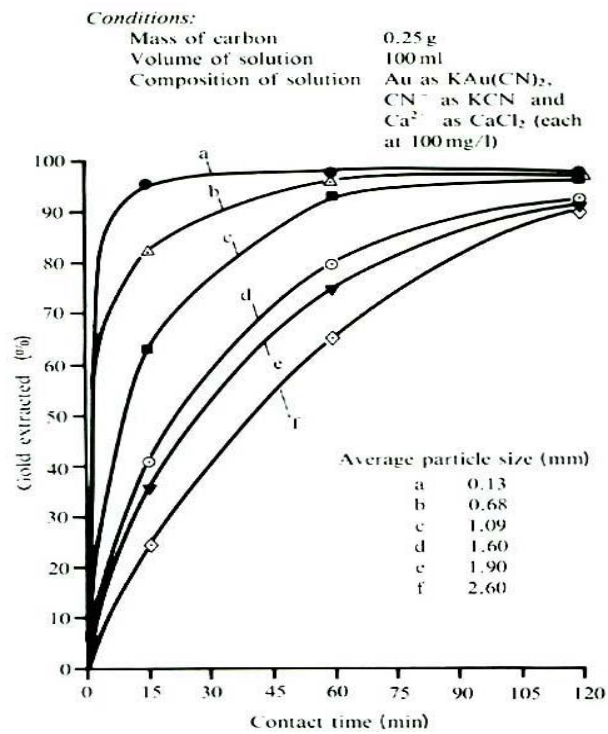
Los productos de las tres primeras reacciones son absorbidos por el carbón debido a su insolubilidad en el medio de adsorción; sin embargo, los productos de las dos últimas reacciones no son adsorbidos por el carbón en gran medida debido a su alta solubilidad en agua. Algunos ejemplos de procesos de adsorción de complejos son la adsorción de $Ag(CN)_2^-$, $Ni(CN)_4^{2-}$, $Au(CN)_2^-$.

2.7.7. Selección de un carbón activado para la recuperación de oro

A continuación, se presentan los criterios fundamentales para el uso del carbón granulado en el proceso de recuperación del oro. Dado que el carbón fino será cargado con el oro que se pierde, el carbón debe tener una alta actividad y ser resistente a la abrasión. Se realizaron correlaciones entre la capacidad de adsorción de oro en equilibrio de 24 carbones activados provenientes de la misma fábrica y diferentes parámetros del carbón, como la cantidad de yodo, el contenido de cenizas, la superficie específica y el pH del solvente utilizado. A pesar de esto, no se pudo determinar cuál era el mejor carbón para la adsorción de oro. De acuerdo con las investigaciones realizadas, es más favorable correlacionar los parámetros cinéticos de la adsorción de oro con las propiedades del carbón activado, como su área superficial. En la siguiente Figura se puede observar cómo el tamaño de las partículas de carbón activado afecta la velocidad de adsorción del oro, siendo las partículas más pequeñas las que presentan una mayor velocidad de adsorción en comparación con las partículas más grandes, aun teniendo la misma superficie.

Figura 5

Efecto del tamaño de partícula con respecto al rate de adsorción del oro

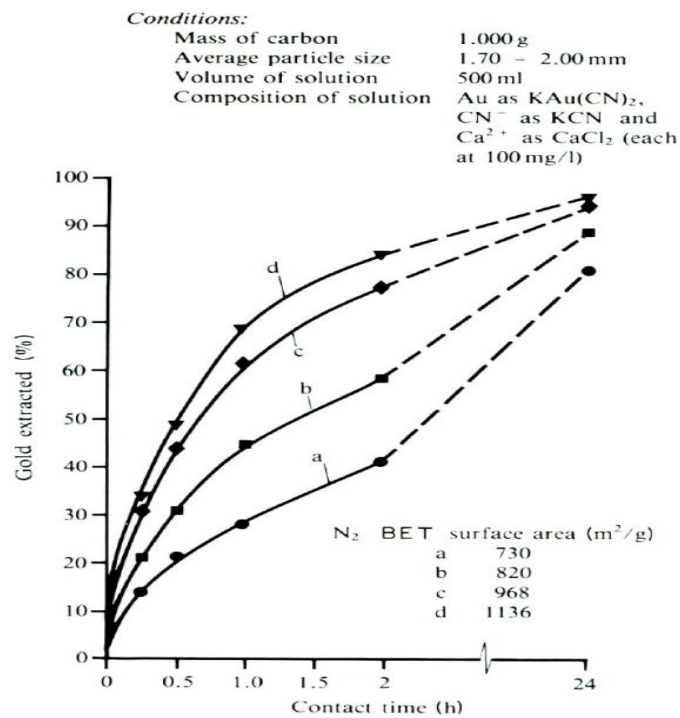


Nota: Tomado de McDougall.

La Figura muestra que, aunque las partículas tienen el mismo tamaño, pero, diferentes áreas superficiales, las áreas superficiales mayores tienen un mayor índice de adsorción.

Figura 6

Efecto de la adsorción de oro con respecto al área superficial de diferentes carbones



Nota: Tomado de McDougall.

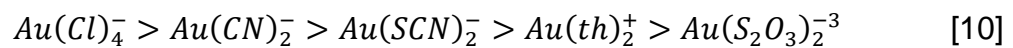
Es importante optar por carbón activado de alta actividad en lugar de oro, ya que la activación a altas temperaturas de vapor puede disminuir su resistencia a la abrasión y dureza. Por lo tanto, se debe elegir carbón activado

con una superficie específica elevada, así como una alta dureza y resistencia a la abrasión.

2.8. Interacción entre algunos complejos de au y el carbón activado

McDougall (1982) en su trabajo “The mechaniss of the adsortion of gold cyanide on activated carbon” señala que, muchos tipos de Au se pueden encontrar en numerosos complejos con diversos tipos de ligandos, como la tiourea (Au^+), tiocianato (Au^+), cianuro (Au^+), cloruro (Au^{+3}) y tiosulfatos (Au^+) entre otros. La interacción entre el carbón activado y los complejos de oro de cianuro y cloruro no ha sido explorada en la literatura, posiblemente debido a su relevancia en el proceso de recuperación hidrometalúrgica.

La siguiente secuencia muestra cómo el carbón activado adsorbe los complejos de oro (McDougall, 1982).



2.8.1. Factores que afectan la adsorción de carbón activado

- Temperatura:

Porque la adsorción es un proceso exotérmico, a mayor temperatura disminuye la capacidad de adsorción.

- Oro en solución:

Una mayor rapidez en la captura del oro por parte del carbón activado y una mayor capacidad de retención están asociadas con una mayor presencia del metal en la solución. En la industria, los valores habituales para la velocidad de adsorción son los siguientes:

10 - 100 gAu / h / ton CA

Carga: 5 - 10 KgAu/ton CA

- Concentración de cianuro libre:

La velocidad de carga de oro en el carbón activado y la capacidad de carga disminuyen a medida que aumenta la concentración de cianuro de sodio. Esto se debe a la competencia de adsorción de otros complejos cianurados. Las condiciones de operación típicas son las siguientes: 0.1 - 2 g/l NaCN.

- pH

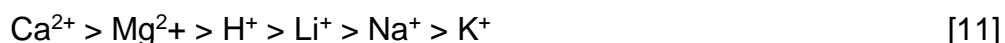
La adsorción de oro se promueve al reducir al mínimo el pH. Para evitar la hidrólisis del cianuro y la producción de ácido cianhídrico altamente tóxico, no se recomiendan valores inferiores a pH 10.

- Oxígeno disuelto

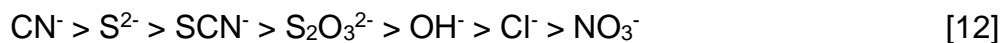
La presencia de oxígeno en la solución facilitará la adsorción del oro en el carbón activado al reducir la concentración de cianuro a través de su oxidación.

- Presencia de otros iones

Se ha demostrado que una mayor concentración de ion complementario en solución aumenta la capacidad de carga, y el orden preferido es el siguiente:



Sin embargo, la capacidad de carga de oro en el carbón disminuirá a medida que aumenta la concentración del anión complementario, en los siguientes pasos:

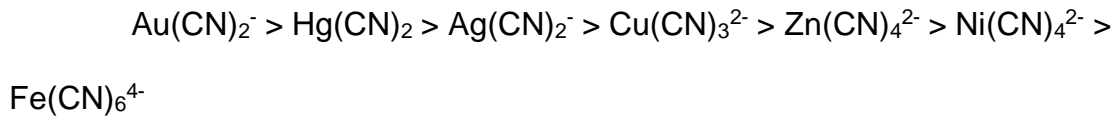


- Envenenamiento del carbón

Las sustancias orgánicas e inorgánicas pueden quedarse atrapadas o precipitarse en el carbón, obstruyendo los poros y reduciendo su capacidad de absorber oro. Entre las especies inorgánicas que provocan este problema se encuentran las sales de calcio y magnesio, los carbonatos, los compuestos de sílice y aluminio, así como las partículas de hierro y los precipitados de metales base como el cobre, el níquel, el plomo y el zinc. Por otro lado, el diesel, los aceites lubricantes, los anticongelantes, el ácido húmico, los productos del suelo en descomposición, los reactivos de flotación, los floculantes y otros agentes activadores de superficie son algunas de las sustancias orgánicas que pueden afectar la eficiencia del carbón activado.

- ***Adsorción de otras especies cianuradas***

No obstante, a pesar de que la selectividad de la adsorción de oro en carbón activado es alta, ciertas especies cianuradas pueden ser adsorbidas, principalmente según su concentración en la solución y su pH. Durante el proceso de adsorción, el orden de preferencia es el siguiente:



[13]

Si bien la adsorción de plata es beneficiosa, la adsorción de mercurio es dañina y causa dificultades en etapas posteriores, especialmente durante la refinación. La especie Cu(CN)_2^- se adsorbe fácilmente en el carbón a concentraciones bajas de cianuro y pH bajo, lo que reduce la capacidad de carga del oro. La presencia de las especies $\text{Cu(CN)}_3^{2-} > \text{Cu(CN)}_4^{3-}$ en el carbón se ve favorecida por un aumento en la concentración de cianuro y un pH más elevado, lo que resulta en una adsorción mínima.

2.8.2 Carbón en columnas (CIC)

En esta operación se emplean soluciones clarificadas o semi clarificadas que provienen de procesos de lixiviación en distintos equipos, como pilas, pozas, efluentes, espesadores o soluciones de reciclaje, con el fin de eliminar impurezas. En un lecho fluido, la solución se hace pasar por una

serie de columnas rellenas de carbón, ya sea en dirección ascendente o descendente.

La principal ventaja de este método es que reduce la probabilidad de que el carbón se rompa al no estar en movimiento ni tener contacto con la pulpa.

En la Unidad Minera de Pucamarca se producirá una poza de solución enriquecida, generada por la lixiviación en pilas (solución Pregnant) conocida como poza Pregnant. De esta poza se bombeará hacia un circuito de adsorción, el cual estará compuesto por cinco columnas con 6.0 TM de carbón activado cada una, con el objetivo de mantener los valores de oro y plata en él. La solución que sale de los circuitos de adsorción (solución barren) todas con valores de oro menores a 0.030 ppm. Cada una de las columnas tiene su el ingreso y salida de carbón activado, independientemente de si es carbón rico o empobrecido que sale de la desorción.

Después de 60 días, se espera que el sistema de lixiviación tenga un caudal de solución lixivante de 820 m³/h para procesar 14,000 TM de mineral por día. Por lo tanto, se ha diseñado una planta de adsorción con un circuito de adsorción para tratar 820 m³/h de solución enriquecida.

Las soluciones que salgan del circuito de adsorción, también conocido como solución barren, caerán por gravedad a un cajón de malla #35 instalado a la salida del circuito. Luego, las soluciones serán transportadas al tanque barren, donde se agregará el cianuro de sodio y el antiincrustante para bombear la solución a lixiviación. De esta manera, se creará un circuito cerrado permanente.

Una vez que el carbón activado haya absorbido la cantidad deseada de oro en una columna, será sometido a los procesos de desorción y electrodeposición para llegar finalmente a la etapa de fundición y obtener las barras doradas. Además, para restablecer sus propiedades de adsorción, el carbón activado descargado se someterá a reactivación química y térmica. Luego, será cargado nuevamente a la Columna N°5 para ser incorporado al proceso de adsorción.

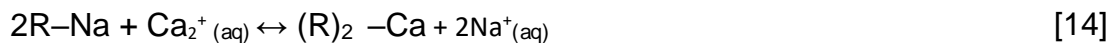
2.8.3 Resinas de intercambio iónico

Las resinas base fuertes que contienen una amina cuaternaria atada a un polímero (como el poliestireno) se prefieren a las resinas base débiles para la recuperación de oro y plata. Esto se debe a que las resinas de base débil generalmente tienen un pH menor a 8 y no son tan efectivas como las

resinas de base fuerte. Además, las resinas sólidas son más accesibles. Las resinas comerciales disponibles incluyen resinas de base fuerte de tipo I (con grupos funcionales de trietilamina) o tipo II (con grupos funcionales de trietiletanolamina), y se prefieren las resinas macroporosas con un diámetro de 0,8 mm. En el proceso de recuperación de cobre y oro, el oro se lixivia con el residuo sólido en una solución de resina en pulpa (RIP) o en lecho (RIL) (Chaparro, 2008).

Macotella & Osorio (2019), indican que, en términos generales, los intercambiadores iónicos están fabricados con materiales sólidos que contienen grupos ionogénicos, los cuales, poseen una carga eléctrica positiva o negativa.

Esta carga es contrarrestada por un ion de carga opuesta, conocido como contra ion. La reacción de intercambio iónico ocurre en estos sitios activos. La siguiente fórmula puede representar este proceso mediante la interacción entre el ion de sodio (Na^+) presente en los puntos activos de la matriz R, y el ion de calcio (Ca^{2+}) que se encuentra en la solución que entra en contacto con dicha matriz.



Cuando la solución atraviesa la resina, los iones de la solución reemplazan a los iones que estaban en el sitio activo. Algunos de los factores que influyen en la efectividad de este método son la atracción de la resina hacia ciertos iones, el nivel de acidez o basicidad de la solución, la cantidad de iones presentes y la temperatura.

Claramente, los iones deben pasar de la solución a la resina y viceversa para producir una reacción de intercambio iónico. Este movimiento se conoce como difusión. La difusión de los iones depende del tamaño, la carga electrostática y la temperatura, La difusión se produce a través de la matriz debido a la variación en la concentración de iones entre distintas zonas, y este proceso está relacionado con la configuración y tamaño de los poros presentes en la matriz. El movimiento de los iones ocurre desde zonas de mayor concentración hacia aquellas de menor concentración, hasta alcanzar un equilibrio en la distribución de los mismos.

Un dispositivo se considera intercambiador de aniones si el material puede transportar iones con carga positiva fija, ya que puede intercambiar aniones con los iones contrarios. De manera similar, un intercambiador catiónico tiene la capacidad de intercambiar cationes con sus iones contrarios.

Para intercambios aniónicos: $R + X^- + A^- \leftrightarrow R + A^- + X^-$

O sencillamente: $X^- (\text{resina}) + A^- (\text{solución}) \leftrightarrow A^- (\text{resina}) + X^- (\text{solución})$

Para un intercambio catiónico: $R-Y^+ + B^+ \leftrightarrow R-B^+ + Y^+$

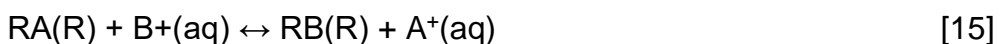
O sencillamente: $Y^+ (\text{resina}) + B^+ (\text{solución}) \leftrightarrow B^+ (\text{resina}) + Y^+ (\text{solución})$

Cuando una resina R contiene un grupo funcional reactivo uniforme de iones A^+ , suele representarse como RA. En presencia de otro catión B en la solución, se puede observar un equilibrio similar.



2.8.4. Cinética de la reacción de intercambio iónico

Las reacciones de intercambio iónico son diversas y constan de cinco fases consecutivas; la velocidad de la reacción total es determinada por la etapa más lenta. Tomando en consideración la siguiente reacción de intercambio iónico (Macotella & Osorio, 2019).



Las cinco fases son las siguientes:

- a) La difusión de la película de iones compuestos B⁺ a través de una película estancada en la superficie de la partícula de resina.
- b) La difusión de la partícula de iones compuestos B⁺ dentro de la partícula de resina.
- c) La reacción de intercambio entre los iones opuestos A⁺ y B⁺ en un grupo iónico fijo.
- d) La difusión de la partícula desde el interior hasta la superficie de la partícula a través del ion opuesto intercambiado A⁺.
- e) La difusión de la película de iones opuestos A⁺ a través de la capa estancada hacia la fase de solución gruesa.

La velocidad en la etapa 3 está regulada por la misma reacción química, lo que significa que generalmente depende de procesos de difusión. En resinas de intercambio iónico modernas, la ley de acción de masas se aplica en todas las situaciones, ya que la reacción de intercambio es reversible y el equilibrio es reproducible. Esto permite determinar una constante de equilibrio para soluciones diluidas, basada en concentraciones en lugar de actividades.

$$K = \frac{[R] [A^+]}{[R] [B^+]} \quad [16]$$

La constante de equilibrio K , que ha sido experimentalmente demostrado, es afectada significativamente por la naturaleza química de los iones A^+ y B^- , así como por sus concentraciones respectivas. Como resultado, la resina muestra preferencia por ciertos tipos de iones sobre otros, lo que da lugar al fenómeno de selectividad durante la etapa de carga en el intercambio iónico. K establece una relación entre las concentraciones de iones en la resina y en la solución acuosa.

2.8.5. Selectividad de la resina

La selectividad es la preferencia de la resina por iones particulares. Debido a que la tecnología no requiere este parámetro, la selectividad cambia ligeramente con la temperatura (Macotella & Osorio, 2019).

Las resinas de base fuerte muestran una mayor atracción hacia los aniones pequeños y lineales, lo cual, es influenciado por la estructura de la resina. La preferencia de la resina por los aniones de una sola carga en lugar de los aniones de múltiple carga, aunque estos últimos sean altamente polarizables, depende de la distribución de cargas en la estructura de la resina.

Por lo tanto, un anión bivalente necesitará dos grupos cargados positivamente juntos, lo que significa que su afinidad disminuirá a medida que aumenta la separación entre estos grupos, La afinidad de un anión monovalente no se ve influenciada ya que solamente requiere de un grupo para adsorberse.

Por otra parte, la capacidad de polarización de los aniones en resinas de alta prioridad está influenciada por su tamaño; dos aniones con idéntica carga y forma tendrán una mayor tendencia a unirse y formar un par de iones de manera más sólida, debido a su mayor grado de polarización.

Las aminas simples no son efectivas para la recuperación de oro en la cianuración debido a que carecen de la suficiente basicidad para ser protonadas. Por el contrario, las aminas cuaternarias son muy efectivas debido a su capacidad de mantener una carga positiva estable, lo que les permite adsorber fuertemente los complejos de cianuro de oro

La guanidina protonada, también conocida como catión de guanidina, tiene una carga catiónica más larga y una carga positiva más dispersa en comparación con los puntos de carga asociados con los grupos funcionales amino cuaternarios. El grupo funcional de guanidina muestra una carga positiva en todos sus átomos de nitrógeno y en el átomo de carbono central, a

diferencia de la protonación que solo se da en uno de los tres átomos de nitrógeno. En comparación con la resina básica fuerte, tiene un par, el cianuro de aluminio es selectivo.

2.8.6. Resinas usadas en la recuperación de oro desde soluciones cianuradas

Las resinas artificiales pueden ser obtenidas a través de la polimerización o la policondensación. Dado que el oro se encuentra en soluciones cianuradas en forma de complejo aurocianuro, $\text{Au}(\text{CN})_2^-$, las resinas necesarias para recuperar este compuesto deben ser aniónicas y pueden ser débiles o fuertes. A pesar de ello, cabe mencionar que las resinas catiónicas ácidas fuertes también pueden ser utilizadas con el complejo oro tiourea, aunque su uso principal se da en metales como el níquel, zinc, cobre, etc. (Macotela & Oosrio, 2019).

- Resinas sintéticas aniónicas de poli-condensación

Comenzaron utilizando aminas aromáticas, como la m-fenilendiamina, las cuales se combinaron con formaldehído (reagaron con el núcleo y los grupos $-\text{NH}_2$, B.A. Adam y E.L. Homes), logrando así la síntesis del primer tipo

de resina con la composición especificada en 1935. A pesar de esto, su definición no es completamente clara.

- Resinas sintéticas aniónicas de polimerización

Los intercambiadores de aniones de tipo estireno han logrado avances significativos y ventajas significativas, Dado que es posible crear resinas monofuncionales fuertes y débilmente básicas mediante un proceso de reticulación ajustable de manera simple y reproducible sin afectar las propiedades básicas de los grupos iónicos, se diferencia de los polímeros funcionales que inicialmente se condensaron. En estos últimos, la reticulación y las fuerzas básicas dependen del grupo amino que participa en la condensación. Por lo tanto, es importante tener en cuenta el concepto de reticulación, que implica la formación de estructuras tridimensionales utilizando agentes reticulantes. La proporción de DVB en un polímero de estireno-DVB determina su nivel de reticulación, donde un 4% de resina reticulada contiene 96% de estireno y otros monómeros, además del 4% de DVB. La resina tipo gel tiene un contenido de DVB del 8%, mientras que en la resina macroporosa es del 15% al 30%.

Las resinas poliméricas aniónicas presentan ventajas sobre las resinas de policondensación al ser más estables, no tener plasticidad

superficial y contar con una mayor capacidad de intercambio iónico. Además, se fabrican en forma de suspensión para obtener esferas uniformes, a diferencia de la reacción de policondensación que produce bloques sólidos de forma irregular al triturar y tamizar.

- Resinas mixtas

Estas resinas son resinas débilmente básicas que han sido reticuladas aún más. Una resina débil con un contenido de base fuerte del 12 al 16% y una distribución adecuada en la matriz mostrará una excelente selectividad hacia el oro y la plata; sin embargo, a medida que aumenta el contenido de base fuerte, esta selectividad se reduce.

Las resinas de base fuerte tienen una mayor capacidad de carga y velocidad, pero tienen poca selectividad (debido a la presencia de metales base) y son difíciles de eludir. Por otro lado, las resinas de base débil presentan una alta selectividad y su elución es más sencilla, pero tienen una capacidad de carga más baja (25-50% en comparación con las resinas de base fuerte) y una velocidad de extracción menor.

Las resinas de base débil cuentan con propiedades básicas sólidas, pero existen diversos tipos disponibles. Estas se obtienen mediante la

presencia de una pequeña cantidad (10–15%) de aminas cuaternarias, que se consideran las mejores aminas para la extracción de oro.

2.8.7. Recuperación de oro desde soluciones cianuradas por intercambio iónico

En Sudáfrica y Uzbekistán, así como en la antigua Unión Soviética (Planta de Muruntau), se ha desarrollado y aplicado esta tecnología alternativa.

Una característica destacada es la aplicación directa del proceso a la pulpa de lixiviación mediante agitación, conocido como RIP, o "resina en pulpa", similar al proceso CIP de pulpa de carbón.

La utilización de resina presenta un desafío en la competencia con la cianuración del oro, debido a problemas de baja selectividad, fragilidad de las partículas de resina en ciertas condiciones de desgaste y la necesidad de procesos complejos para regenerar y eluir la resina. No obstante, las resinas poseen ventajas químicas singulares.

Las resinas alcalinas fuertes y débiles se pueden utilizar para adsorber oro y plata de la solución de cianuro. Los metales fuertemente básicos tienen una alta capacidad y una cinética rápida, pero son difíciles de eluir y no son

muy selectivos para otros metales. Las resinas débilmente básicas tienen menor selectividad y son más fáciles de eluir que las resinas fuertemente básicas, pero su capacidad de carga es generalmente entre el 25 % y el 50 % mayor.

Además, la alcalinidad débil solo se puede adquirir en un rango de pH limitado debido a la alcalinidad débil, los valores de pH varían entre 6 y 8 y, cuando el pH es mayor a 8, la capacidad y la velocidad de adsorción se reducen de manera notable.

Las resinas con una leve tendencia alcalina. se pueden producir utilizando una pequeña cantidad de grupos funcionales de amina cuaternaria (10 % a 15 %), lo que les da ciertas características de resinas básicas fuertes. Esta combinación es ideal para obtener mejores resultados de recuperación de oro.

CAPÍTULO III

FUNDAMENTO METODOLÓGICO

3.1. Descripción de la metodología empleada

El fundamento metodológico del presente estudio busca evaluar las propiedades de la resina IXOS AuC-02 comparando sus resultados con el carbón activado que se usa en planta ADR Calgon Dg-11. En tal sentido, se asume la fundamentación descriptiva de carácter científico de los datos recopilados que van a permitir posteriormente una aplicación práctica y de esta manera buscar alternativas para mejorar la eficiencia del circuito de adsorción en planta ADR Pucamarca.

3.2. Población y muestra

- Población

Son muestras de carbón desorbido, carbón virgen (nuevo), resina IXOS AuC-02.

- Muestra

Las muestras llegan al Laboratorio Metalúrgico de Pucamarca donde se realizarán las respectivas pruebas de adsorción.

3.3. Equipo, materiales y reactivos

- Equipos

Figura 7

Agitador de paletas



Figura 8

Balanza



- Materiales

Espátula para pesado de muestras de carbón, malla Tyler #10.

Figura 9

Vasos precipitados



Figura 10

Pipetas



- Reactivos

Solución cianurada (Pregnant), carbón activado, resinas.

3.4. Ejecución de pruebas de adsorción con carbón activado y resinas

- Para las pruebas con carbón activado se tomaron 10 gr de carbón nuevo (virgen) y 10 gr de carbón desorbido (en ambas muestras carbón seco).
- Para las pruebas con resina, como la muestra llego sumergida en una solución que actúa como rehidratante y mantiene las propiedades requeridas; se realizó una prueba de 20 gr y 10 gr de resina húmeda (equivalente a 9 gr en seco).
- Para todas las pruebas de adsorción se usó 2 litros de solución rica.

Tabla 3

Leyes de solución rica de cabeza

| Leyes | |
|--------------|-------|
| [Au] ppm | 0.35 |
| [Ag] ppm | 1.17 |
| [Cu] ppm | 12 |
| [Hg] ppm | 13.52 |

Nota: Minera Minsur S.A.

- Para cada muestra se realizó 2 etapas de adsorción, en la primera etapa se agitó por 24 horas, luego el carbón se filtró y entro a una segunda etapa con solución rica fresca y nuevamente se agitó por 24 horas adicionales.

- Resultados

- A continuación, se muestran los resultados de las pruebas con las diferentes muestras de carbón y resina.

Tabla 4

Resumen de porcentaje de eficiencia de adsorción de oro etapa I y II

| | Tiempo | | Resina 10gr Adsorción (%) | | | | Carbón desorbido Adsorción (%) | | | |
|-------------|--------|------|------------------------------|------|-----|------|-----------------------------------|------|-----|------|
| | (min) | (hr) | Au | Ag | Cu | Hg | Au | Ag | Cu | Hg |
| I Etapa | 1440 | 24 | 86.8 | 43.6 | 3.2 | 45.5 | 90.6 | 66.1 | 6.5 | 15 |
| II Etapa | 1440 | 24 | 73.7 | 12.1 | 1.1 | 16.7 | 81.5 | 51.8 | 3.7 | 14.8 |

Nota: Minera Minsur S.A.

Tabla 5

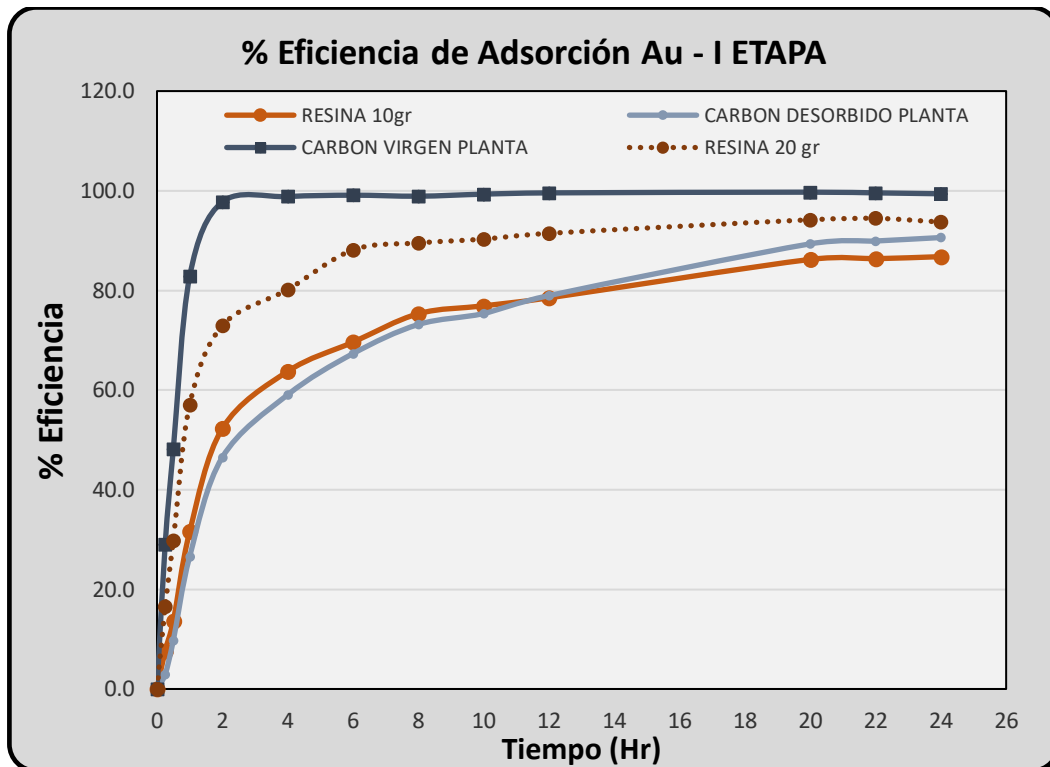
Resumen de porcentaje de eficiencia de adsorción de oro etapa I y II

| | Tiempo | | Carbón virgen Adsorción (%) | | | | Resina 20 gr Adsorción (%) | | | |
|-------------|--------|------|--------------------------------|------|------|------|-------------------------------|------|-----|------|
| | (min) | (hr) | Au | Ag | Cu | Hg | Au | Ag | Cu | Hg |
| I ETAPA | 1440 | 24 | 99.4 | 98.6 | 16.7 | 95.9 | 93.7 | 63.6 | 6.5 | 66.7 |
| II ETAPA | 1440 | 24 | 99.3 | 96.5 | 3.8 | 90.0 | 87.4 | 30.8 | 1.8 | 35.1 |

Nota: Minera Minsur S.A.

Figura 11

Porcentaje de eficiencia de adsorción de Au, Carbón Vs Resina I Etapa



- Se puede observar que el carbón virgen con respecto a la resina con 20 gr tiene una cinética y eficiencia de adsorción más alta.
- Las muestras con carbón desorbido y resina con 10 gr tienen resultados más bajos.

Figura 12

Porcentaje de eficiencia adsorción de Au, Carbón Vs Resina II Etapa

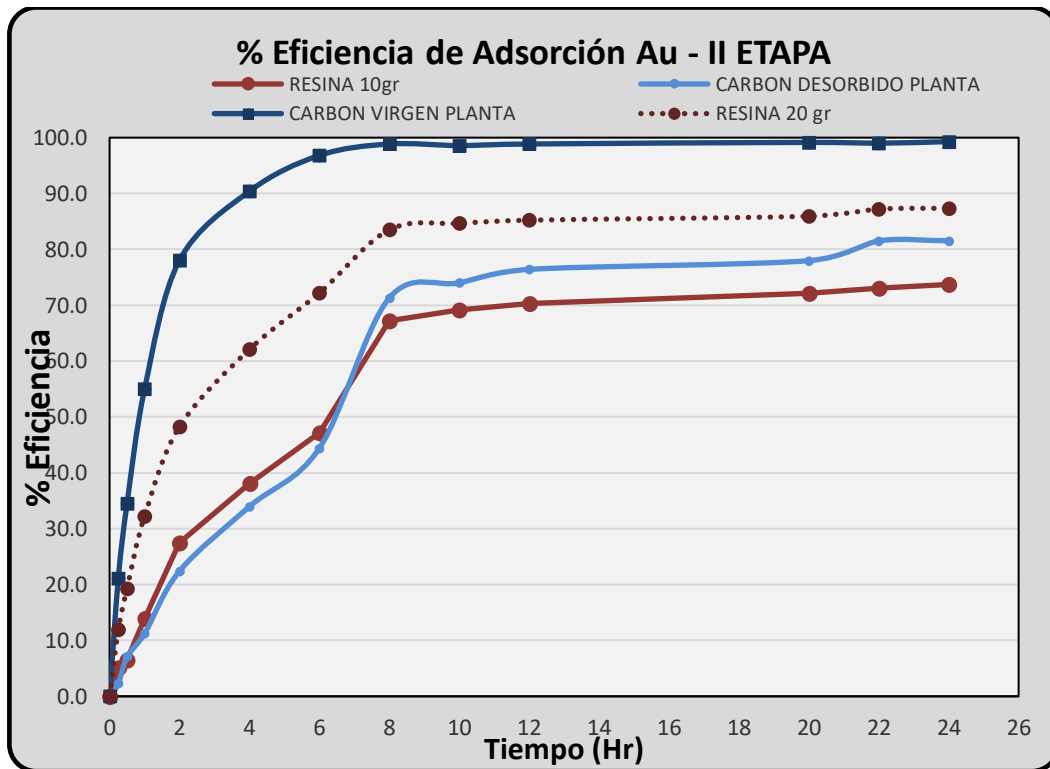
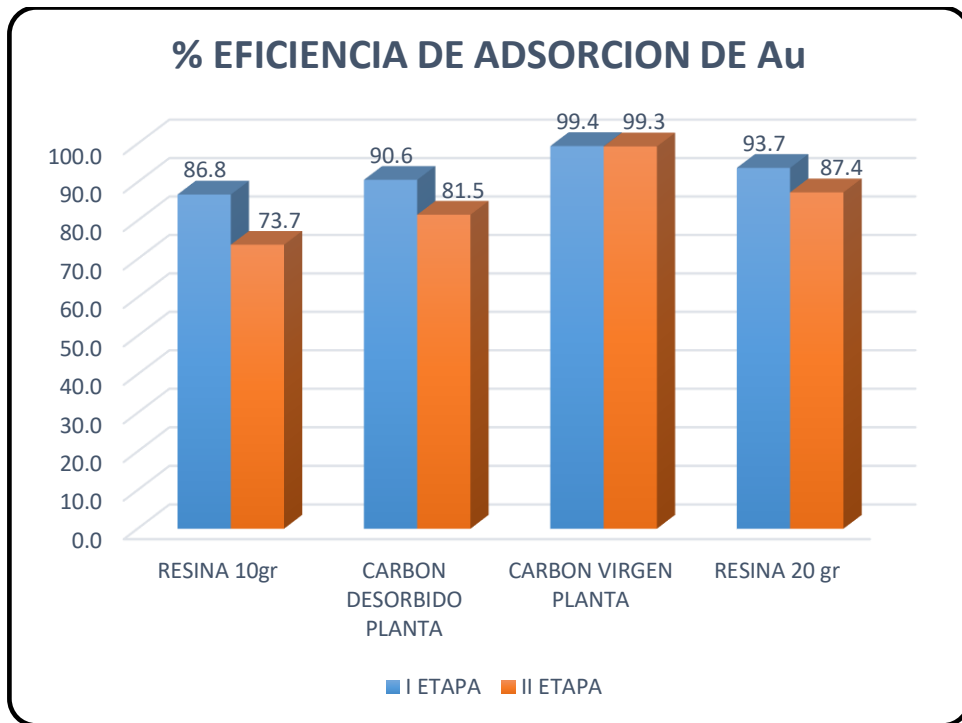


Figura 13

Porcentaje de eficiencia de adsorción de Au Etapa I y Etapa II

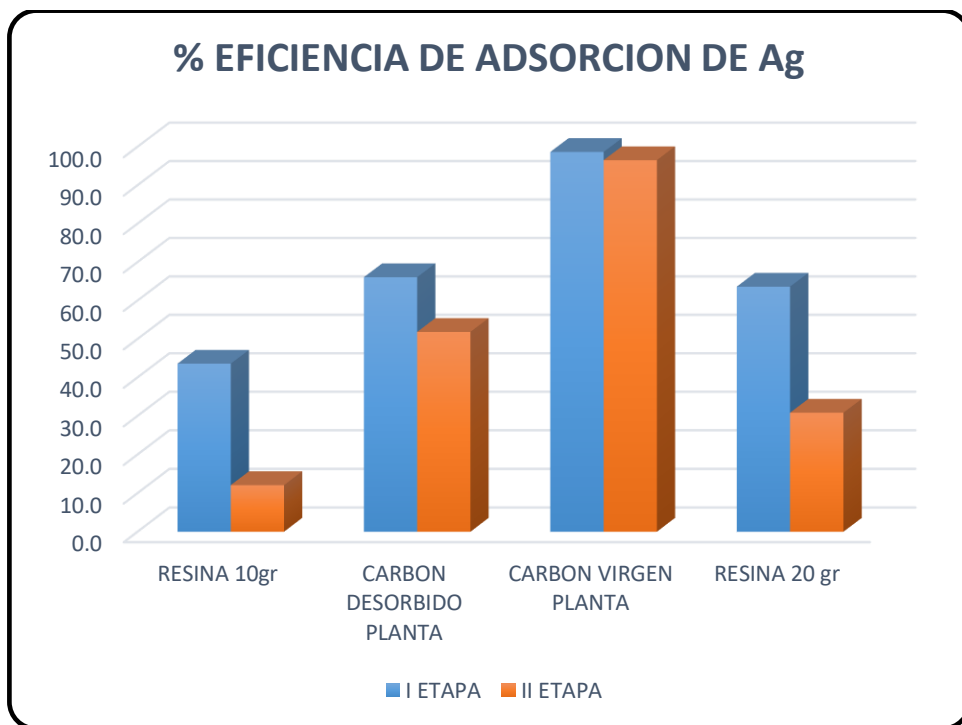


- En la segunda etapa, el carbón virgen sigue manteniendo una cinética y eficiencia de adsorción de Au más alta respecto a las otras muestras.
- La resina con 20 gr ha disminuido ligeramente su eficiencia, teniendo una brecha más marcada con los resultados de un carbón virgen.

- A continuación, se muestran los resultados de Adsorción de la Ag, Cu y Hg.

Figura 14

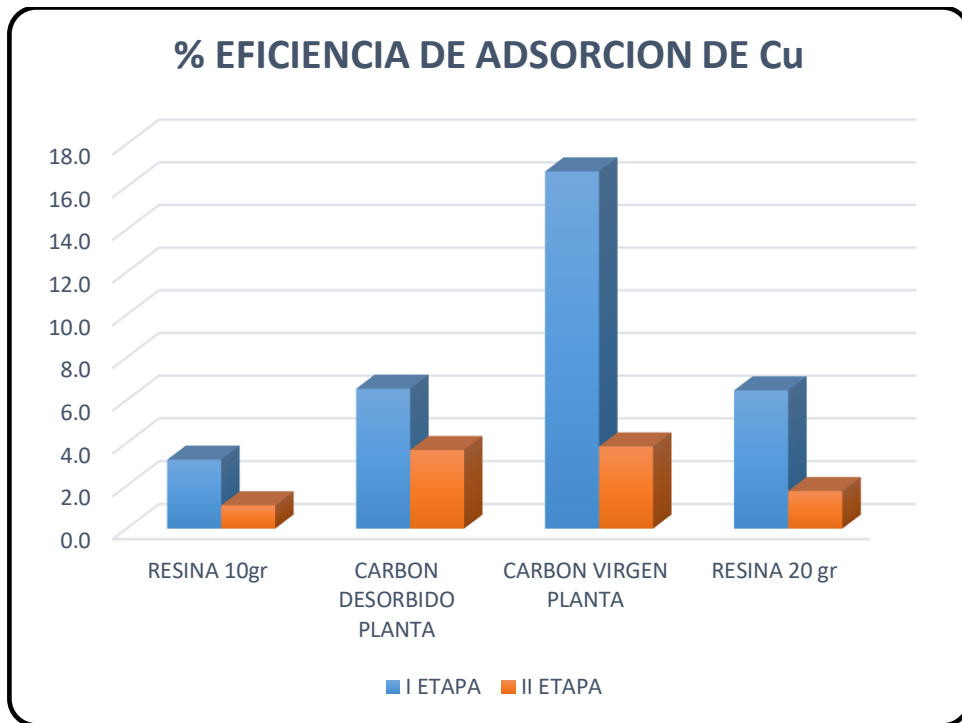
Porcentaje de eficiencia de adsorción de Ag Etapa I y II



- Las resinas en proporción adsorben alrededor de 50% de lo que capta el carbón nuevo.

Figura 15

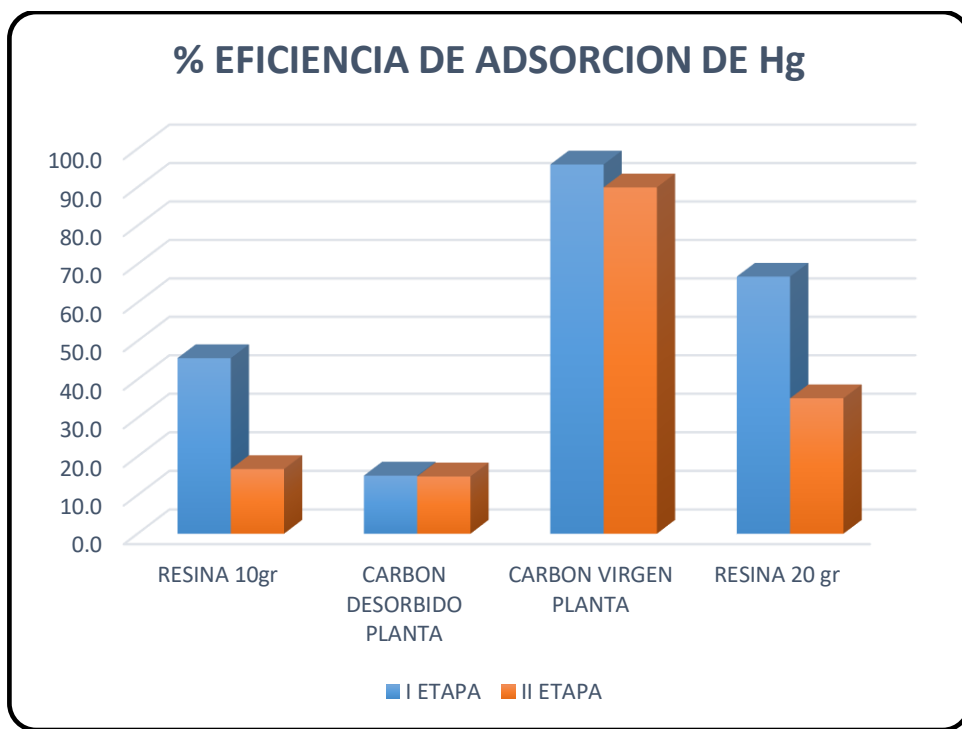
Porcentaje de Eficiencia de adsorción de Cu Etapa I y II



- El carbón nuevo inicialmente adsorbe mayor cantidad de Cu respecto al uso de resinas o un carbón usado; sin embargo, en el tiempo este efecto se reduce.

Figura 16

Porcentaje de Eficiencia de adsorción de Hg Etapa I y II



- El gráfico nos muestra que un carbón nuevo tiene buena selectividad para la adsorción del Hg; sin embargo, esta selectividad se reduce con el uso continuo de carbón. Las resinas

tienen menos afinidad por la adsorción de mercurio.

- Se tendría que evaluar cómo es su comportamiento durante varios ciclos de adsorción/desorción.
- En la operación una buena performance de un carbón activado es aquel que nos brinde una capacidad de adsorción y a la vez la menor pérdida de finos por atricción; haciendo una comparación con el uso de la resina, esta no ha mostrado problemas de atricción sin embargo su eficiencia de adsorción es menor respecto al carbón activado nuevo.

CONCLUSIONES

- El carbón activado virgen(nuevo) presento mejor performance de adsorción respecto al uso de la resina IXOS AuC-02.
- La resina IXOS Au-02 adsorbe menos Ag, Cu y Hg.
- El tamaño de las partículas de la resina sintética, son más consistentes que las partículas de carbón activado; no se observó atricción de la resina.
- El carbón virgen (nuevo) tiene una muy buena adsorción de Au, Ag, Cu Y Hg, sin embargo, este efecto se va perdiendo en el tiempo, tal como muestran los resultados de adsorción del carbón desorbido, el cual, fue una muestra del carbón que tiene varios usos en planta.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda seguir con la evaluación de las resinas y determinar su comportamiento después de varios ciclos de adsorción/ desorción.
- Asimismo, realizar esta prueba a una escala más grande para obtener más información de la resina.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cerón, F. (2010). *Pucamarca, nuevo yacimiento epitelmal de oro de alta sulfuración en el sur del Perú*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos].

<https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/799>

Chaparro, M. (2008). *Extracción del complejo oro tiosulfato utilizando guanidina en una resina de intercambio aniónico*. [Tesis de maestría, Universidad de Sonora].

http://repositorioinstitucional.uson.mx/bitstream/20.500.12984/303/1/c_haparrofelixmiriamedithm.pdf

Gasca, J.A. (2016). *Carbón activado de carácter básico para recuperar oro de lixiviados cianurados*. [Tesis de posgrado, Instituto de Investigación Científica y Tecnológica A.C.].

https://repositorio.ipicyt.edu.mx/bitstream/handle/11627/4911/TMIPIC_YTG3C32016.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Macotela Vilca, M.C.S., & Osorio Moriano, F.Y. (2019). *Evaluación del proceso de recuperación de oro en soluciones cianuradas empleando*

resinas seleccionadas. [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional San Luis Gonzaga]. <https://repositorio.unica.edu.pe/items/0065a087-6f9e-4b7b-8a2e-968c13613d6c>

McDougall, G., & Hancock, R. (1980). *The mechaniss of the adsortion of gold cyanide on activated carbon*. Institute Mine Metallurgical.

<https://www.911metallurgist.com/wpcontent/uploads/2016/12/Adsorpt ion-Capacity-of-gold-on-Activated-Carbon-1.pdf>

Misari Chuquipoma, F. S. (2010). *Metalurgia del Oro*. Lima: San Marcos E.I.R.L.

<https://es.scribd.com/document/684324229/Metalurgia-Del-Oro-Sergio-Misari-Tomo-I>

Sánchez, C. (2022). *Evaluación de la capacidad de adsorción del carbón reactivado térmicamente a diferentes intensidades en la planta ADR de Minera la Arena S.A. región La Libertad 2020*. [Tesis de posgrado, Universidad Daniel Alcides Carrión].

http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/3439/1/T026_73936020_T.pdf

Sevilla, U. D. (2013). Manual del Carbón Activado. Andalucía - España:

Aguapedia.ne

<http://www.elaguapotable.com/Manual%20del%20carb%C3%B3n%20activo.pdf>

ANEXOS

PROCEDIMIENTO OPERATIVO PRUEBA DE ADSORCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO

Objetivo

Evaluar la adsorción de oro y plata en muestra de carbón activado cumpliendo los lineamientos de seguridad, salud ocupacional y medio ambiente.

Alcance

Este procedimiento se aplica a todo el personal de Supervisión, Técnico multifuncional de planta y personal de empresa especializada.

ABREVIATURAS / DEFINICIONES

EPP: Equipo de protección personal.

IPEC: Identificación de Peligros. Evaluación de riesgos y Control de Riesgo.

ATS: Análisis de Trabajo Seguro.

ADSORCIÓN: Es un proceso por el cual átomos, iones o moléculas son atrapados o retenidos en la superficie de un material.

SOLUCIÓN PREGNANT: Solución rica en oro y plata provenientes del pad de lixiviación.

DOCUMENTOS DE REFERENCIA

DS-055-2010-EM Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional y otras medidas complementarias en minería

UM-PU-STD-006, Estándar de SSO para Selección y Uso de Equipos de Protección Personal.

UM-PU-STD-20, Estándar de SSO para protección respiratoria.

UM-PU-STD-029 Estándar de SSO para Inspecciones.

UM-PU-STD-009, Estándar de SSO para Almacenamiento y Manipulación de Productos Químicos Peligrosos

UM-PU-STD-004 Estándar de SSO para Orden y Limpieza

RESPONSABLES:

Jefe de Laboratorio Metalúrgico:

Responsable de asegurar que se cumplan las especificaciones detalladas en el presente documento.

Técnico Multifuncional de Planta / Personal de empresas especializadas:

Responsables de cumplir y aplicar el procedimiento.

EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL

Los supervisores, técnicos y operadores deben contar con el EPP completo, de:

- Lentes de seguridad
- Mameluco con cinta reflectiva

- chaleco con cinta reflectiva
- Guantes de látex y badana
- Respirador media cara con filtro para polvos
- Zapatos de seguridad

EQUIPO/HERRMIENTAS/MATERIALES

Equipos:

- Agitador de Paletas o agitador magnético

Materiales:

- Carbón activado
- Vaso de precipitado de 2000 ml
- Pipeta volumétrica de 10 ml
- Papel toalla
- Propipeta
- Tubos de ensayos de 15 ml

DESCRIPCIÓN

- a) Evaluar la adsorción de oro y plata en muestra de carbón activado.
- b) El personal debe tener pleno conocimiento de lo que indica la Hoja de Seguridad de cianuro de sodio, cal viva carbón activado, para tener cuidado en la manipulación de este producto en base a lo indicado en los lineamientos del Estándar de SSO para Almacenamiento y Manipulación de Productos Químicos Peligrosos (UM-PU-STD-009).
- c) Realizar orden y limpieza en la zona de trabajo, inspeccionar materiales y equipos a usar en base a lo indicado en los lineamientos del Estándar de SSO para Inspecciones (UM-PU-STD-029).
- d) Enviar por duplicado para análisis de oro, plata y cobre la solución Pregnant a utilizar.
- e) En un vaso de 2000 ml agregar 1000ml de solución Pregnant de ley conocida.
- f) Luego agregar 2.5 gr de carbón activado.
- g) Colocar el vaso de precipitado de 2000ml con la solución Pregnant más el carbón activado en el agitador de paletas.

- h) Agitar a la solución a 280 rpm durante 6 horas.
- i) Tomar muestras con alícuotas de 10ml, en intervalos de: 15 min,30 min,45 min, 60 min, 75 min, 90 min, 120 min, 150 min, 180 min, 210 min, 240 min, 270 min, 300 min, 330 min, 360 min.
- j) Poner las muestras sacadas en tubos de ensayo.
- k) Rotular las muestras y enviar a analizar por los elementos requeridos
- l) Realizar orden y limpieza según lo indicado en los lineamientos del Estándar de SSO para Orden y Limpieza (UM-PU-STD-004).

RESTRICCIONES

- a) No se iniciarán los trabajos si el personal no ha elaborado la matriz IPERC Continuo / ATS (UM-PU-PG-002-F-004), este documento debe ser firmado por el jefe de laboratorio metalúrgico / supervisores de planta.
- b) No se iniciarán trabajos si el personal no cuenta con el equipo de protección personal adecuado, el cual se debe utilizar en todo momento de la actividad de acuerdo a lo indicado en el Estándar de SSO para Selección y Uso de Equipos de Protección Personal (UM-PU-STD-006).

- c) Cumplir con lo indicado en el procedimiento de manejo de residuos (MA-PU-PO-001).
- d) No guardar ni consumir alimentos o bebidas, ni fumar en el área de trabajo.

EQUIPO DE TRABAJO

- a) Técnico Multifuncional de Planta y personal de empresa especializada:
Responsables de cumplir y aplicar el procedimiento.

Tabla 6**Prueba de eficiencia de Adsorción I etapa.**

| TIEMPO (min) | RESINA 10 gr ADSORCIÓN (%) | | | | CARBÓN DESORBIDO PLANTA ADSORCIÓN (%) | | | |
|-----------------|-------------------------------|-------|------|-------|--|-------|------|-------|
| | Au | Ag | Cu | Hg | Au | Ag | Cu | Hg |
| 15 | 7.67 | 6.84 | 0.56 | 7.12 | 2.97 | 5.73 | 4.56 | 8.35 |
| 30 | 13.60 | 9.72 | 0.80 | 10.10 | 9.75 | 7.77 | 4.64 | 8.39 |
| 60 | 31.58 | 15.47 | 1.20 | 14.26 | 26.57 | 13.85 | 4.70 | 8.94 |
| 120 | 52.29 | 23.59 | 1.35 | 21.05 | 46.51 | 24.28 | 4.68 | 9.29 |
| 240 | 63.74 | 27.60 | 1.82 | 26.05 | 59.05 | 31.63 | 5.27 | 9.41 |
| 360 | 69.61 | 30.34 | 2.17 | 31.23 | 67.31 | 37.42 | 5.64 | 9.73 |
| 480 | 75.31 | 30.45 | 2.30 | 28.01 | 73.15 | 39.76 | 5.75 | 9.88 |
| 600 | 76.90 | 31.57 | 2.39 | 31.57 | 75.36 | 44.29 | 5.96 | 11.06 |
| 720 | 78.50 | 33.72 | 2.38 | 32.86 | 78.96 | 48.26 | 6.01 | 11.59 |
| 1200 | 86.22 | 39.17 | 2.44 | 42.93 | 89.35 | 61.85 | 6.08 | 12.71 |
| 1320 | 86.36 | 39.64 | 2.67 | 43.48 | 89.91 | 62.92 | 6.20 | 13.45 |
| 1440 | 86.78 | 43.56 | 3.22 | 45.52 | 90.61 | 66.07 | 6.53 | 15.05 |

Nota: Minera Minsur S.A.

Tabla 7**Prueba de eficiencia de adsorción I etapa.**

| TIEMPO (min) | CARBÓN VIRGEN PLANTA ADSORCIÓN (%) | | | | RESINA 20 gr ADSORCIÓN (%) | | | |
|-----------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------------------------------|-------|------|-------|
| | Au | Ag | Cu | Hg | Au | Ag | Cu | Hg |
| 15 | 28.97 | 27.43 | 7.01 | 18.10 | 16.51 | 10.14 | 1.65 | 8.88 |
| 30 | 48.12 | 43.91 | 6.31 | 26.05 | 29.79 | 15.00 | 1.76 | 13.88 |
| 60 | 82.80 | 75.85 | 6.37 | 49.14 | 57.03 | 27.40 | 2.17 | 25.39 |
| 120 | 97.76 | 92.57 | 8.90 | 70.29 | 72.94 | 36.13 | 2.88 | 33.40 |
| 240 | 98.83 | 96.07 | 9.91 | 80.59 | 80.16 | 41.86 | 2.99 | 40.76 |
| 360 | 99.11 | 96.98 | 10.95 | 85.48 | 88.12 | 50.62 | 3.33 | 51.61 |
| 480 | 98.91 | 97.48 | 11.21 | 88.42 | 89.52 | 52.23 | 4.58 | 53.58 |
| 600 | 99.32 | 97.82 | 12.17 | 90.06 | 90.29 | 54.84 | 4.75 | 56.42 |
| 720 | 99.57 | 98.41 | 12.83 | 91.60 | 91.46 | 56.94 | 5.08 | 58.20 |
| 1200 | 99.72 | 98.85 | 16.36 | 92.98 | 94.18 | 62.23 | 5.17 | 64.14 |
| 1320 | 99.57 | 98.85 | 16.48 | 93.01 | 94.46 | 62.87 | 5.88 | 65.31 |
| 1440 | 99.39 | 98.64 | 16.72 | 95.91 | 93.72 | 63.60 | 6.45 | 66.73 |

Nota: Minera Minsur S.A

Tabla 8**Prueba de eficiencia de adsorción II etapa.**

| TIEMPO (min) | RESINA 10 gr ADSORCIÓN (%) | | | | CARBÓN DESORBIDO PLANTA ADSORCIÓN (%) | | | |
|-----------------|-------------------------------|-------|------|-------|--|-------|------|-------|
| | Au | Ag | Cu | Hg | Au | Ag | Cu | Hg |
| 15 | 5.11 | 1.53 | 0.33 | 1.32 | 2.27 | 2.39 | 1.33 | 3.83 |
| 30 | 6.53 | 1.11 | 0.50 | 2.28 | 7.10 | 4.09 | 1.46 | 4.50 |
| 60 | 13.92 | 2.39 | 0.58 | 2.72 | 11.22 | 6.65 | 1.96 | 5.09 |
| 120 | 27.46 | 5.32 | 0.61 | 5.43 | 22.41 | 12.46 | 2.35 | 6.05 |
| 240 | 38.14 | 6.86 | 0.67 | 6.99 | 33.96 | 18.48 | 2.83 | 6.79 |
| 360 | 47.15 | 8.35 | 0.72 | 8.90 | 44.42 | 23.80 | 2.98 | 7.38 |
| 480 | 67.19 | 10.23 | 0.67 | 12.10 | 71.31 | 39.47 | 3.17 | 7.53 |
| 600 | 69.18 | 10.57 | 0.75 | 14.08 | 74.01 | 43.01 | 3.33 | 10.43 |
| 720 | 70.31 | 10.95 | 0.80 | 14.81 | 76.42 | 46.59 | 3.42 | 10.49 |
| 1200 | 72.16 | 11.85 | 0.92 | 15.14 | 77.98 | 47.70 | 3.50 | 11.23 |
| 1320 | 73.01 | 12.36 | 1.00 | 16.08 | 81.53 | 50.55 | 3.58 | 11.84 |
| 1440 | 73.72 | 12.06 | 1.08 | 16.74 | 81.53 | 51.83 | 3.67 | 14.82 |

Nota: Minera Minsur S.A.

Tabla 9**Prueba de eficiencia de adsorción II etapa.**

| TIEMPO (min) | CARBÓN VIRGEN PLANTA ADSORCIÓN (%) | | | | RESINA 20 gr ADSORCIÓN (%) | | | |
|-----------------|---------------------------------------|-------|------|-------|-------------------------------|-------|------|-------|
| | Au | Ag | Cu | Hg | Au | Ag | Cu | Hg |
| 15 | 21.16 | 18.58 | 1.92 | 10.33 | 11.93 | 4.09 | 0.25 | 5.00 |
| 30 | 34.52 | 27.96 | 2.25 | 12.63 | 19.32 | 4.52 | 0.33 | 7.28 |
| 60 | 54.97 | 45.44 | 2.42 | 16.80 | 32.24 | 7.50 | 0.42 | 9.27 |
| 120 | 78.06 | 67.85 | 2.67 | 27.65 | 48.27 | 13.29 | 0.50 | 11.36 |
| 240 | 90.41 | 82.80 | 2.92 | 39.26 | 62.10 | 17.34 | 0.83 | 13.95 |
| 360 | 96.82 | 91.14 | 3.08 | 50.37 | 72.20 | 21.20 | 1.08 | 18.81 |
| 480 | 98.86 | 96.42 | 3.25 | 79.45 | 83.52 | 27.79 | 1.17 | 27.19 |
| 600 | 98.58 | 96.55 | 3.42 | 83.97 | 84.66 | 28.73 | 1.35 | 28.51 |
| 720 | 98.86 | 96.46 | 3.50 | 86.49 | 85.23 | 29.75 | 1.50 | 30.48 |
| 1200 | 99.15 | 96.50 | 3.67 | 87.83 | 85.94 | 30.82 | 1.54 | 32.65 |
| 1320 | 99.01 | 96.50 | 3.75 | 89.63 | 87.22 | 30.95 | 1.67 | 33.80 |
| 1440 | 99.29 | 96.50 | 3.83 | 89.95 | 87.36 | 30.82 | 1.75 | 35.09 |

Nota: Minera Minsur S.A.