

EFFECTO DE LAS PROPIEDADES FISICAS DEL CARBON ACTIVADO EN LA ABSORCION DE ORO EN MEDIO CIANURO

Patricio Navarro^{1}, Cristian Vargas¹, Carolina Aguayo²*

- ✓ Este artículo forma parte del "Volumen Suplemento" **S1** de la *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales (RLMM)*. Los suplementos de la RLMM son números especiales de la revista dedicados a publicar memorias de congresos.
- ✓ Este suplemento constituye las memorias del congreso "*X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)*" celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008.
- ✓ La selección y arbitraje de los trabajos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*, quien nombró una comisión *ad-hoc* para este fin (véase editorial de este suplemento).
- ✓ La *RLMM* no sometió estos artículos al proceso regular de arbitraje que utiliza la revista para los números regulares de la misma.
- ✓ Se recomendó el uso de las "Instrucciones para Autores" establecidas por la *RLMM* para la elaboración de los artículos. No obstante, la revisión principal del formato de los artículos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*.

EFFECTO DE LAS PROPIEDADES FISICAS DEL CARBON ACTIVADO EN LA ABSORCION DE ORO EN MEDIO CIANURO

Patricio Navarro^{1*}, Cristian Vargas¹, Carolina Aguayo²

1: Dpto. de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Santiago de Chile (USACH). Avda. Libertador Bernardo O'Higgins 3363, Santiago, Chile

2: Depto. de Ingeniería Química, Universidad de Santiago de Chile (USACH). Avda. Libertador Bernardo O'Higgins 3363, Santiago, Chile

- E-mail: patricio.navarro@usach.cl

Trabajos presentados en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET
Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008

Selección de trabajos a cargo de los organizadores del evento

Publicado On-Line el 29-Jul-2009

Disponible en: www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html

Resumen

Se estudió la adsorción de oro en carbón activado a partir de soluciones acuosas sintéticas, utilizando dos tipos de carbón activado de diferentes propiedades físicas: carbón A y carbón B. Estas pruebas experimentales consistieron en contactar el carbón activado con una solución sintética de oro a la forma de $\text{Au}(\text{CN})_2^-$, bajo diferentes condiciones experimentales. Entre las conclusiones más importantes de este trabajo destacan que los parámetros que ejercen mayor influencia en la adsorción en forma batch es la fuerza iónica a través de la presencia de diferentes cationes, especialmente el ión calcio, y la temperatura. Se encontró también que el fenómeno de adsorción de oro se ajusta satisfactoriamente a la isoterma de Freundlich para ambos carbones estudiados, encontrándose además que el proceso de adsorción en las condiciones de estudio tiene una energía de activación de 1,87 kcal/mol y una entalpía de adsorción de -701 cal/mol. Por otra parte, se evidenció que las propiedades físicas del carbón activado también tienen un rol importante en la adsorción de oro. Es así que destacan % de macroporos, el área superficial y el tamaño promedio de poros, como variables influyentes en el proceso de adsorción y que son particulares del tipo de carbón utilizado.

Palabras Claves: *Propiedades Físicas, Adsorción, Oro, Cianuro, Carbón Activado.*

Abstract

The gold adsorption onto activated carbon was studied coming from aqueous synthetic solutions using two types of activated carbon of different physical properties: Carbon A and Carbon B. These experimental tests consist in put in contact the activated carbon with a synthetic aqueous solution of gold to the form $\text{Au}(\text{CN})_2^-$, to different experimental conditions. Between the main conclusions of this work is possible to say that the bigger influence in the batch adsorption in the ionic force through the presence of different cations, specially calcium, and the temperature. Furthermore, the gold adsorption phenomenon is agreed to the Freundlich isotherm for both studied carbons, with activation energy of 1.87 kcal/mol and an adsorption enthalpy of -701 cal/mol. For the other hand, it was evident that the physical properties of activated carbon are very important in the gold adsorption. The properties such as macropores, superficial area and pores average size are very influent in the gold adsorption and are particular and different fro the each type of activated carbon.

Keywords: *Physical Properties, Adsorption, Gold, Cyanide, Activated Carbon.*

1. INTRODUCCIÓN

La alternativa de utilizar carbón activado para la recuperación del oro se conoce desde hace mucho tiempo, pero gracias al descubrimiento de la cianuración de oro, esta técnica se convirtió en un fuerte competidor del método de precipitación con zinc (Merrill-Crowe). Sin embargo, la utilización industrial de este proceso se vio restringida por

conceptos económicos, y por falta de una técnica que permitiese reutilizar el carbón sin necesidad de calcinarlo. Esta desventaja, sumado a los avances técnicos alcanzados en la precipitación con zinc, dejó al carbón activado postergado a un plano secundario durante un largo período.

Desde 1952, esta situación comenzó a cambiar debido al desarrollo del método de desorción y

electrodeposición de oro, con el cual el uso del carbón activado fue desplazando al proceso Merrill-Crowe, que provocaba un elevado consumo de zinc en la precipitación, y generaba reacciones muy sensibles en presencia de impurezas en la solución de cianuración. Desde entonces, se ha perfeccionado este método, mejorado las propiedades físicas y químicas del carbón activado, y se han desarrollado métodos altamente eficientes como: proceso de carbón en columna (CIC), carbón en pulpa (CIP) y carbón en lixiviación (CIL), (Marsden y House [1]).

El uso del carbón activado se ha incrementado en las últimas décadas en el campo de la Hidrometalurgia, especialmente en la recuperación de oro y plata desde soluciones cianuradas. Esto se debe a ser el más versátil de los adsorbentes sólidos usados en la industria, su extremadamente alta área superficial y su distribución de tamaño de poro, bimodal (a veces trimodal) proporciona el buen acceso de las moléculas del adsorbato al interior, (Merello y Zárate [2], Fleming [3]).

Hoy en día, numerosas plantas de cianuración de oro aplican la tecnología del carbón activado para este fin, gracias a las ventajas competitivas que ofrece este método respecto a la técnica de cementación, siendo en la actualidad el mayor proceso industrial utilizado para recuperar metales de interés desde soluciones acuosas. Además, el creciente interés por la explotación de yacimientos de oro de parte de diversas compañías se origina por dos motivos: el aumento en el precio del oro y la creación de métodos de operación cada vez más rentables para la explotación de yacimientos de baja ley, que antes no lo eran. Sin embargo, todavía existen situaciones industriales no optimizadas, como la velocidad de adsorción de oro en el carbón, y otros de conocimiento básico como el mecanismo o forma de adsorción. Estas son algunas de las interrogantes que aún no han sido resueltas en la actualidad.

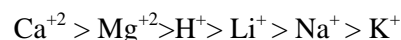
La adsorción de dicianuro de oro en el carbón activado ha sido extensamente estudiada y en general se concuerda que se ha encontrado el mecanismo por el cual el oro se adsorbe dentro del carbón activado. Adams y Fleming [4], Adams [5] y Jones et al. [6], reportaron que el dicianuro de oro es adsorbido sin ningún cambio químico desde soluciones alcalinas dentro del carbón activado, involucrando el mecanismo de par iónico del tipo $[M^{+n}][Au(CN)_2]_n$ en la superficie del carbón, donde M^{+n} representa un tipo de catión como Na^+ , K^+ , o Ca^{+2} , frecuentes en los sistemas químicos, e

identificaron factores que afectan el proceso, dentro de los cuales se encuentran el efecto de la fuerza iónica, y la temperatura. La fuerza iónica (F.I.) se define como:

$$F.I. = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N C_i \cdot Z_i^2 \quad (1)$$

Donde C_i es la concentración de la especie i y Z_i es la carga del ión i , de manera que a igual concentración los iones divalentes incrementan el efecto de la fuerza iónica comparado con los iones univalentes.

Se ha determinado que la fuerza de extracción de $[M^{+n}][Au(CN)_2]_n$ adsorbido sigue la siguiente secuencia:



Además demostraron que al aumentar la temperatura en un rango de 22°C a 80°C la capacidad de adsorción del carbón disminuye, y la razón de este comportamiento está relacionado por conceptos de solubilidad, ya que la solubilidad del $KAu(CN)_2$ en agua caliente es aproximadamente 14 veces mayor que en agua fría. Además se encontraron los calores de reacción con un valor promedio de 42 kJ/mol. Cho et al. [7], estudiaron la cinética y termodinámica de la adsorción de oro en carbón activado fabricado a partir de cáscaras de coco. Ellos demostraron que en un rango de 25°C a 55°C el control del mecanismo es por difusión en el interior de los poros del carbón, con una energía de activación muy pequeña: 8 a 13 KJ/mol.

En la actualidad existe escasa información actualizada sobre estudios que reflejen la importancia de las propiedades físicas de los carbones activados, y su implicancia en el mecanismo y cinética de adsorción de oro dentro del interior de la superficie del carbón estudiado. Estudios actuales predicen que la estructura graffítica del carbón activado es uno de los factores más importantes de proceso de adsorción de dicianuro de oro (Millar y Sibrell [8], Ibrado y Fuerstenau [9]). Sin embargo, muy pocas consideraciones han sido entregadas del rol de la estructura y propiedades físicas del carbón activado.

Dentro de la escasa información actualizada, Seke et al. [10] determinaron que existe una influencia de las condiciones superficiales del carbón activado en la adsorción del aurodicianuro, que involucra la distribución de tamaño de poro en la capacidad de

adsorción del carbón; tres carbones activados fueron sometidos a pretratamiento a 850°C con gas de nitrógeno, observando que se incrementó la capacidad de adsorción de los carbones pretratados, sin embargo no existió un cambio drástico en el volumen de los poros antes y después de los tratamientos.

Este trabajo tiene como objetivo estudiar la influencia de las propiedades físicas del carbón activado en el fenómeno de adsorción de oro desde medio cianuro y también corroborar aspectos mecánicos de éste.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Se utilizaron 2 carbones activados de diferentes propiedades cuya denominación y características se presentan en la tabla I.

Tabla 1. Características de los carbones activados utilizados.

Características	Carbón A	Carbón B
Naturaleza	Cáscaras de coco	Cáscaras de coco
Tamaño promedio de poros (nm)	1,82	2,35
Superficie específica (m ² /g)	985,69	786,27
% de macroporos	40,04	63,21

Para la preparación de las soluciones de oro se utilizó agua bidestilada y reactivos de grado analítico como dicianurato de potasio [K(Au(CN)₂)], CaCl₂, NaCl, KCl, LiCl, KOH y peróxido de hidrógeno [H₂O₂].

Los ensayos de adsorción batch se realizaron en un reactor de 500 mL con agitación mecánica y a temperatura constante, controlada a través de un baño termostático. Se mantuvieron constantes los siguientes parámetros:

- Concentración inicial de oro: 6 ppm
- Velocidad de agitación : 500 (rpm)
- Tiempo de adsorción : 6 (h)
- Masa de carbón : 0,1 (g)
- pH : 11

Las variables estudiadas y sus rangos de experimentación se presentan en la tabla II.

Tabla II. Variables y rangos de experimentación.

Variable	Rango de experimentación
Tipo de carbón	Carbón A y carbón B
Tipo y concentración de cationes	Na ⁺ , Li ⁺ , K ⁺ y Ca ²⁺ ; (0,01 - 0,1 - 0,5) (M)
Temperatura	5 - 20 - 50 (°C)
Agente oxidante	0,01 - 0,04 (M)

La metodología experimental seguida para cada prueba fue la misma, variando solo las condiciones propias de cada caso. Las etapas desarrolladas fueron las siguientes:

- Se agregaron 400 mL de la solución acuosa de oro en el reactor que se dispuso en un baño termostático.
- Se ajustó el valor de pH de la solución.
- Se controló la temperatura del baño termostático en forma paralela a los puntos anteriores.
- Se ajustó la velocidad del agitador mecánico a 500 rpm.
- Una vez acondicionada la solución se incorporó el carbón activado.
- Se tomaron muestras de 5 mL de la solución a diferentes tiempos de muestreo.
- Se midió la evolución del pH y potencial electroquímico.
- A las 6 horas se detuvo la experiencia.

Las muestras de solución acuosa fueron enviadas a análisis químico por absorción atómica. El oro adsorbido en el carbón tanto en términos porcentuales como la carga de oro, se determinó por balance de oro presente en las soluciones.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Efecto de cationes

En primer término, para dilucidar la concentración característica solo se trabajó con el carbón A. Los resultados se presentan en las figuras 1 a 4.

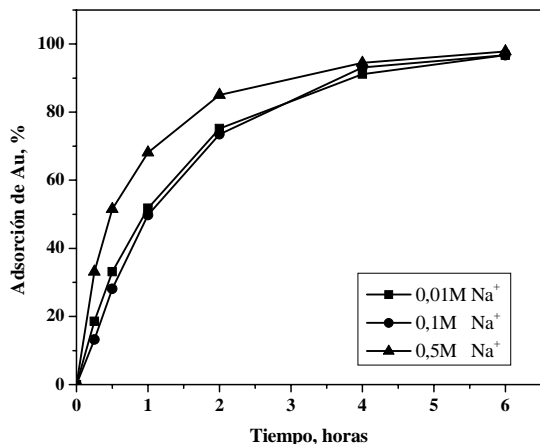


Figura 1. Efecto de la concentración de Na⁺ en la adsorción de oro. Condición experimental: Carbón A; 0,1 [g.] de carbón activado, pH inicial = 11, T° =20[°C].

Se encontró que al incrementar la concentración del ión Na⁺ de 0,1 a 0,5 [M], el porcentaje de adsorción de oro aumenta a tiempos cortos, haciéndose constante a tiempos mayores de 4 horas de adsorción en las tres concentraciones del ión sodio. Además, al comparar el efecto del ión Na⁺ a bajas concentraciones (0,01 [M] y 0,1 [M]) no tiene un efecto apreciable entre ambos, pudiéndose considerar este efecto similar en este rango de concentración. Esto puede explicarse ya que a bajas concentraciones iónicas el mecanismo predominante es el intercambio iónico y se haría independiente de la cantidad de iones en solución.

Por otro lado se observa que la velocidad inicial de carga es rápida en un inicio (0 a 2 horas), pudiendo estar entonces controlada por la difusión en el film, luego esta se vuelve lenta cambiando probablemente a difusión dentro de los poros del carbón, hasta alcanzar un equilibrio en la superficie interna del carbón cuando se detiene la adsorción. Para el caso del ión Litio y Potasio se observa el mismo comportamiento explicado anteriormente.

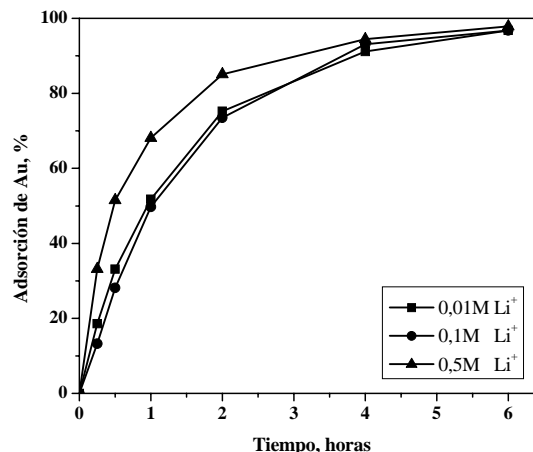


Figura 2. Efecto de la concentración de Li⁺ en la adsorción de oro. Condición experimental: Carbón A; 0,1 [g.] de carbón activado, pH inicial = 11, T° =20[°C].

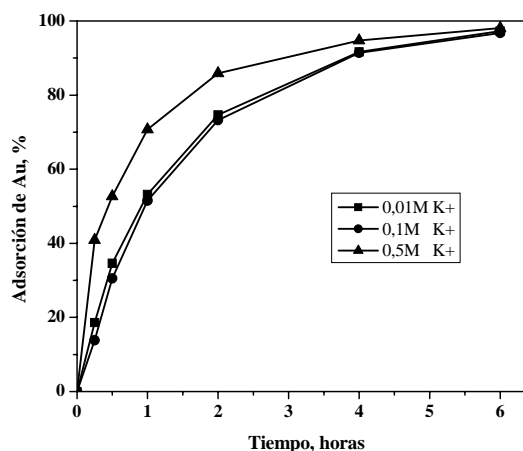


Figura 3. Efecto de la concentración de K⁺ en la adsorción de oro. Condición experimental: Carbón A; 0,1 [g.] de carbón activado, pH inicial = 11, T° =20[°C].

En el caso del catión Ca⁺², el efecto es similar en las tres concentraciones utilizadas, debido al efecto de fuerza iónica, ya que es un catión bivalente, y por esto, el efecto de fuerza iónica se cuadruplica, es decir en presencia del catión calcio, la carga del ión es el principal aporte en la adsorción, aumentando ésta y haciéndose independiente de la masa de cationes en solución

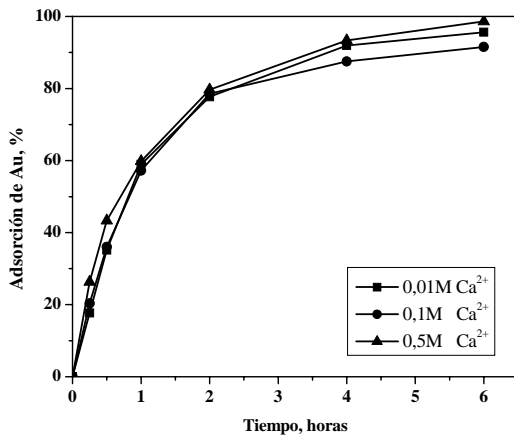
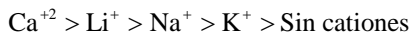


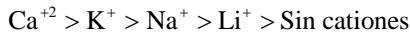
Figura 4. Efecto de la concentración de Ca^{2+} en la adsorción de oro. Condición experimental: Carbón A; 0,1 [g.] de carbón activado, pH inicial = 11, $T^\circ = 20[\text{C}]$.

En las siguientes pruebas se estudió la influencia de distintos cationes durante el proceso de adsorción de oro en carbón activado y el efecto de la concentración de estos iones en la cinética de adsorción de oro. El efecto de la presencia de diferentes cationes en la adsorción de oro se muestra en la figura 5.

El efecto de diferentes cationes en la adsorción de oro, utilizando el carbón A, sigue el siguiente orden:



Para el caso del carbón B se observa en la figura 5 (b) que el efecto de los cationes en la adsorción, sigue el siguiente orden:



3.2 Evolución del pH

La evolución del pH en el tiempo (figura 6) indica que durante el proceso de adsorción de oro en medio básico se adsorben iones hidroxilos, lo que se ve reflejado en una disminución del pH hasta mantenerse constante a las 2 horas de contacto y llegar a un equilibrio a las 6 horas de adsorción a un pH neutro.

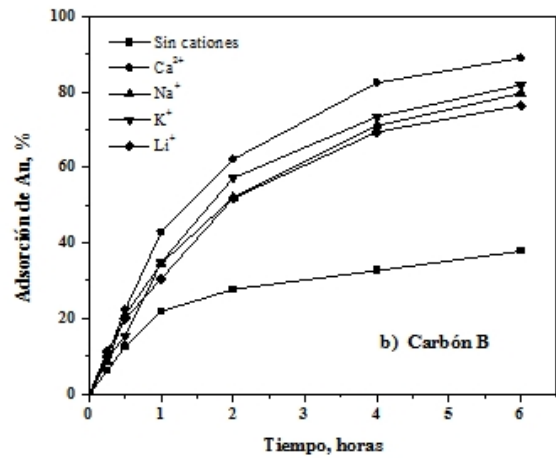
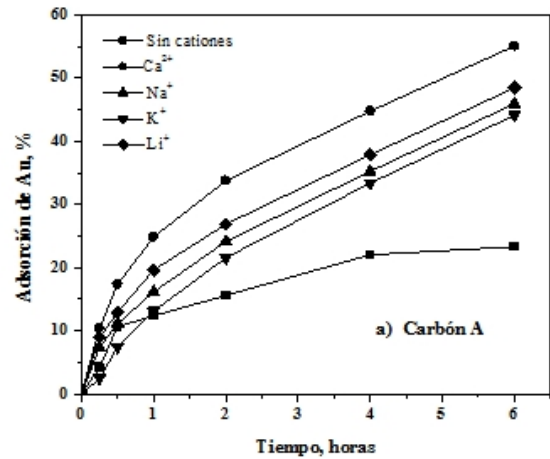


Figura 5. Efecto de la concentración de cationes en la adsorción de oro. Condición experimental: Carbón A y B; 0,1 [g.] de carbón activado, pH inicial = 11, $T^\circ = 20[\text{C}]$, cationes 0,1M.

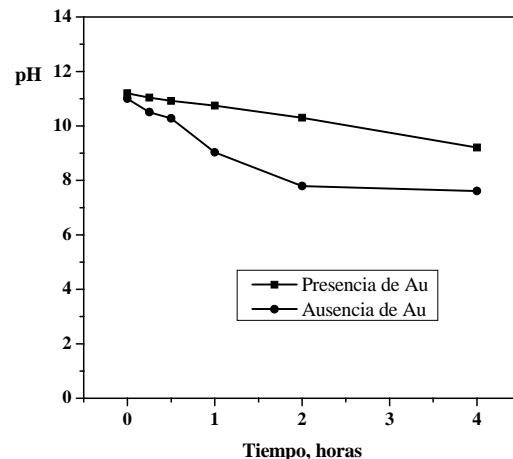


Figura 6. Evolución del pH en función del tiempo en presencia y ausencia del complejo aurocianurado. Condición experimental: Carbón A; 0,1 [g.] de carbón activado, pH inicial = 11, T° =20[°C], Cación: 0,1[M] Ca⁺².

La evolución del pH en ausencia de oro podría indicar que el carbón activado absorbe iones hidroxilos, lo cual se puede representar mediante la siguiente expresión:



3.3 Efecto de la temperatura

La isoterma de adsorción (figura 7) muestra que la capacidad de carga del carbón en pseudoequilibrio disminuye marcadamente cuando la temperatura de la adsorción es incrementada.

La razón de este comportamiento es descrita mediante consideraciones de solubilidad, ya que la solubilidad del complejo Au(CN)₂⁻ en agua caliente es aproximadamente 4 veces mayor que en agua fría.

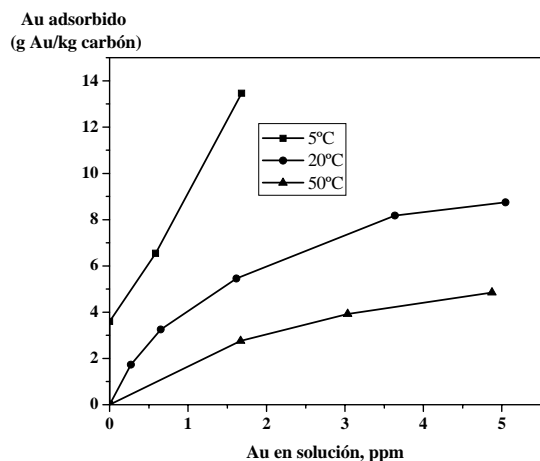


Figura 7. Influencia de la temperatura en la isoterma de adsorción. Condición experimental: Carbón A; 0,1 [g.] de carbón activado, pH inicial = 11, Cación: 0,1[M] Ca⁺².

3.4 Efecto del agente oxidante

En la figura 8 se graficó el porcentaje de adsorción con la incorporación de peróxido de hidrógeno a concentraciones de 0,04 y 0,14 [M]. En el rango de operación no se observa un efecto importante en la extracción de oro.

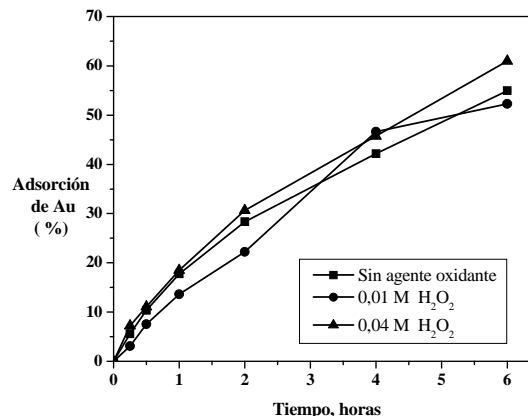


Figura 8. Efecto del agente oxidante en la adsorción de oro. Condición experimental: Carbón A; 0,1 [g.] de carbón activado, pH inicial = 11, T° =20[°C], Cación: 0,1[M] Ca⁺².

Pero al observar la figura 9, se verifica que el potencial de la solución referido al electrodo de hidrógeno se incrementa al introducir el peróxido de hidrógeno, como agente oxidante en la solución cianurada, aún así el efecto en la adsorción no es marcado dentro del rango de operación utilizado.

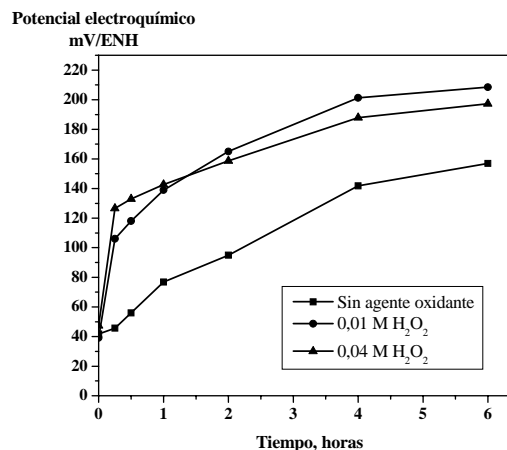


Figura 9. Efecto del agente oxidante en la evolución del potencial electroquímico. Condición experimental: Carbón A; 0,1 [g.] de carbón activado, pH inicial = 11, T° =20[°C], Cación: 0,1[M] Ca⁺².

Con el apoyo del programa Medusa 2.0, se realizó la especiación de las especies estables en solución acuosa. Se observa que la especie termodinámicamente estable es el Au⁺, por lo cual aunque se opere con agentes oxidantes altamente oxidantes, el oro no se oxida a su estado de

oxidación +3, lo cual se comprueba en la figura 10, en la cual se simuló una variación de la concentración de peróxido hasta un valor de 20 [M], y el oro en el complejo, se mantiene en su estado de oxidación +1.

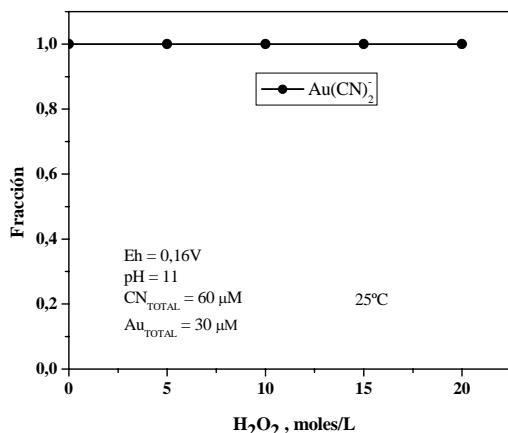


Figura 10. Especiación del sistema Au-CN-H₂O₂ variando la concentración de peróxido de hidrógeno. Condición experimental: Carbón 1; 0,1 [g.] de carbón activado, pH inicial = 11, T° =20[°C], Catión: 0,1[M] Ca⁺².

3.5 Efecto del diámetro de poros del carbón activado

Para observar el efecto del diámetro de poro sobre la adsorción de oro se realizaron experiencias a iguales condiciones pero distintos carbones que poseen su propia distribución de poros. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 11.

Se puede observar que el carbón B que posee mayor cantidad de macroporos (63,21%), posee una velocidad de adsorción mayor que el carbón A (41,04 % macroporos), a tiempos de adsorción de 6 horas, aún cuando en ambas curvas no se alcanza el equilibrio, pero, el carbón B presenta la pendiente de su curva menos pronunciada, con lo cual este carbón se encuentra más cercano de alcanzar un equilibrio próximo.

Se aprecia que las curvas son idénticas hasta un tiempo de adsorción de 15 minutos, en el cual el carbón B presenta una mayor capacidad de adsorción que prevalece hasta las 6 horas de proceso, con una velocidad de adsorción mayor y alcanzando un pseudoequilibrio en la solución luego de las 6 horas, en la que el porcentaje de oro adsorbido se hace pequeño y pendiente de la curva

disminuye notoriamente. En cambio el carbón A posee un porcentaje de adsorción menor y con una pendiente que está lejos de alcanzar un pseudoequilibrio, presentando una velocidad de adsorción menor en todo el rango experimental.

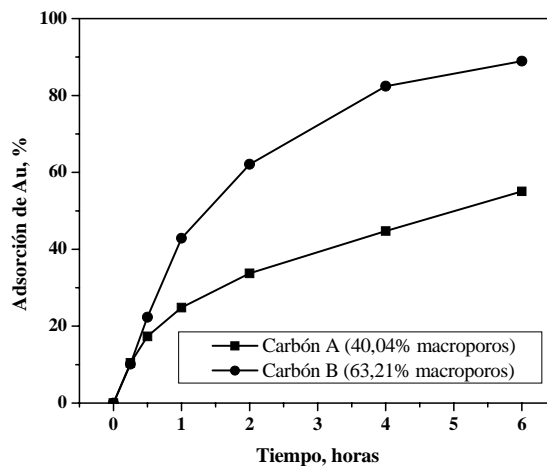


Figura 11. Efecto del % de macroporos en la adsorción de oro. Condición experimental: 0,1 [g.] de carbón activado, pH inicial = 11, T° =20[°C], Catión: 0,1[M] Ca⁺².

Lo anterior descrito indica que el mecanismo de adsorción del oro en el carbón activado implica una etapa de difusión rápida en la superficie del carbón activado, porque presenta una alta disponibilidad de sitios activos, luego transporte a través de las superficie porosa, ingresando por los poros que presentan una menor resistencia difusional, es decir se transporta primeramente a través de los macroporos y luego ingresa por los poros mas pequeños.

Como la carga de oro está directamente relacionada con el diámetro promedio de poro con el cual difunde hacia el interior de la partícula de carbón activado, se confeccionó una gráfica que representa esta tendencia mostrada en la Figura 12.

Como se puede observar al aumentar el diámetro promedio de poro la carga de oro por superficie de carbón activado aumenta, para todo tipo de catión, es decir, la carga de oro es mayor en el caso del carbón B ya que presenta un mayor diámetro interno de poro, y la molécula de aurocianuro ingresa en mayor proporción dentro del carbón activado, presentando una menor resistencia a la entrada del complejo, a su vez, el carbón A presenta la menor carga de oro por superficie del carbón para todos los

tipos de cationes involucrados en la reacción de Par iónico como mecanismo de adsorción de oro en el carbón activado.

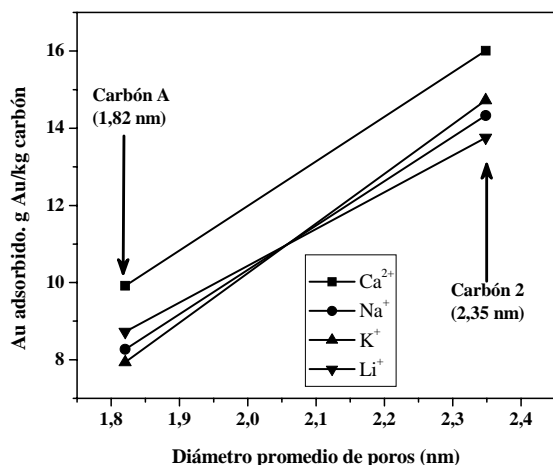


Figura 12. Efecto del diámetro promedio de poros en la carga de oro en el carbón en presencia de diferentes cationes. Condición experimental: 0,1 [g.] de carbón activado, pH inicial = 11, T° =20[°C].

3.6 Efecto del área superficial

En principio, cabría pensar que a mayor superficie específica mejores serán las características como adsorbente del carbón activado, puesto que también se debería tener un mayor número de centros para adsorber el adsorbato, por las interacciones electrostáticas. Sin embargo, esto no siempre es cierto, ya que se debe tener en cuenta el posible “efecto de tamiz molecular”. Así, dependiendo del tamaño de las moléculas del adsorbato, puede suceder que éstas sean mayores que algunos de los poros, y por tanto, no toda la superficie sea accesible a dichas moléculas.

En figura 13 se presenta la carga de oro por superficie de ambos carbones en estudio en función del tiempo. Se observa que el carbón B presenta una mayor carga de oro por área superficial de carbón durante el proceso de adsorción, más aún, éste alcanza a duplicar la carga de oro del otro carbón durante las primeras 6 horas de adsorción. Este efecto se puede discutir observando la tabla 1, siendo el carbón B el que posee mayor cantidad de macroporos (63,21%) y mesoporos (9,64%). El mayor grado de carga, no implica mayor área superficial -como podría esperarse- ya que el carbón B posee menor área superficial, aproximadamente 200 m² menos que el carbón A, y aún así el

complejo aurocianurado ingresa en mayor proporción al interior de las paredes de los poros. Además, a mayor área superficial del carbón, mayor es la cantidad de microporos en la distribución de tamaño de poros, siendo su cinética de adsorción más lenta.

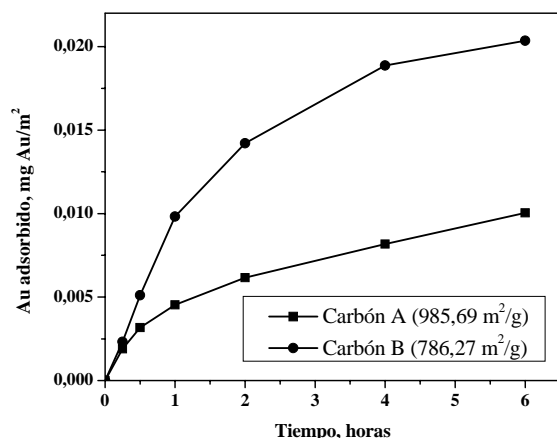


Figura 13. Efecto del área superficial del carbón en la adsorción de oro. Condición experimental: 0,1 [g.] de carbón activado, pH inicial = 11, T° =20[°C], Cation: 0,1[M] Ca⁺².

3.7 Carga Máxima

Se contactó el carbón con una solución de oro en un reactor agitado un tiempo de 6 horas por cada carga. Se detuvo la experiencia cuando el delta de concentración se aproxima a 0,4 ppm en la última etapa. Los resultados obtenidos se presentan en la figura 14.

Luego de más de 120 horas de adsorción, se obtiene la carga máxima para el carbón A con un valor de 62,76 g Au/Kg carbón, y para el carbón B de 64,5 g Au/Kg carbón. Se puede observar que la carga máxima determinada mediante pruebas batch, es bastante similar en ambos tipos de carbones, pero la diferencia es que en el caso del carbón B, este valor se obtiene con 2 cargas menos que con el carbón Industrial es decir posee una cinética de adsorción mayor.

La carga de oro por superficie a distintas etapas de adsorción se muestra en la figura 15. Si se observa la capacidad de carga por distintas etapas, se verifica la misma tendencia descrita anteriormente, observando que el carbón B alcanza un estado de pseudoequilibrio a las 9 etapas de contactar la solución de oro con el carbón. Sin embargo el carbón A luego de 11 etapas de proceso, todavía no

alcanza un valor constante, y puede que posean la misma capacidad de carga, diferenciándose solamente en la velocidad de carga (cinética) de adsorción, ya que el carbón B presenta una cinética mas alta, que el carbón A (con dos etapas de proceso de diferencia).

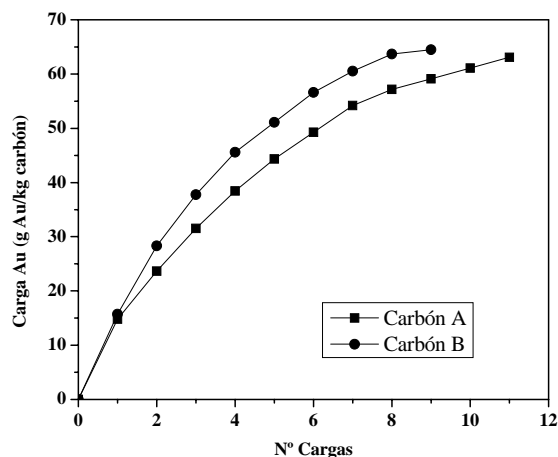


Figura 14. Capacidad de Carga de Oro para ambos carbones en estudio. Condición experimental: 0,1 [g.] de carbón activado, pH inicial = 11, T° =20[°C], Cation: 0,1[M] Ca⁺².

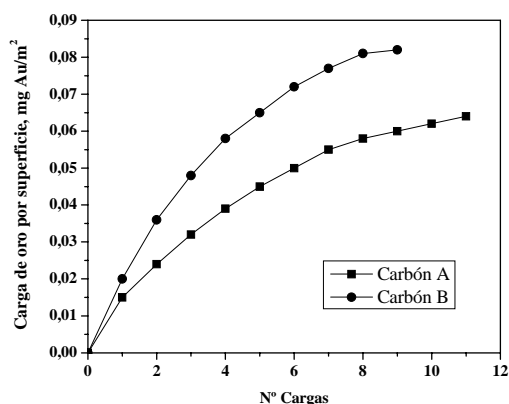


Figura 15. Capacidad de Carga de Oro por unidad de superficie del carbón activado. Condición experimental: 0,1 [g.] de carbón activado, pH inicial = 11, T° =20[°C], Cation: 0,1[M] Ca⁺².

3.8 Isoterma de Freundlich y Cinética de Adsorción

Además, se construyeron las isotermas de Freundlich a tiempos de 4 horas de pseudoequilibrio del sistema a diversas condiciones de razón carbón-

solución. En la tabla III se presentan las ecuaciones de Freundlich para los dos carbones estudiados.

Tabla III. Isotermas de Freundlich de los carbones activados a 4 horas de adsorción.

	Carbón A	Carbón B
Ecuación Freundlich	$Q = 9,25 \cdot 10^{-2} \cdot C^{1,763}$	$Q = 12,33 \cdot 10^{-5} \cdot C^{3,7397}$
R²	0,9866	0,9688

La ecuación de Freundlich se ajusta satisfactoriamente al proceso de adsorción en los dos carbones activados y presenta una pendiente menor a uno. Esto indica que la cantidad de aurocianuro adsorbido por masa de carbón disminuye al aumentar la razón carbón/solución, hecho que se refleja en la disminución de la cantidad adsorbida.

Se analizó la cinética por medio de dos modelos: cinética de primer orden y orden n. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

Tabla 4. Cinéticas de los carbones activados estudiados (C: mgAu/L, q: mg Au/Kg carbón).

	Carbón A	Carbón B
Primer orden	$r = 2,8153 \cdot C - 0,001 \cdot q(1/h)$	$r = 2,1361 \cdot C - 0,0001 \cdot q(1/h)$
CINÉTICA R²	0,5891	0,4423
Orden n	$r = 0,004 \cdot C^{6,1712} (1/h)$	$r = 0,2056 \cdot C^{2,4573} (1/h)$
R²	0,948	0,9732

La cinética de primer orden no se ajusta al comportamiento de los carbones utilizados en este estudio, pero utilizando una cinética de orden n se observa que poseen distintos ordenes de reacción ambos carbones, siendo el mejor ajuste cinético para la adsorción de oro utilizando el carbón B en el proceso, ya que posee una mejor correlación (R² = 0,9732) comparado con el carbón A (R² = 0,948).

Además, se realizaron pruebas a distintas temperaturas y se determinó que la energía de activación a tiempos cortos de adsorción (2 horas) tiene un valor de 1873,46 (cal/mol), y que la entalpía de la reacción de adsorción tiene un valor de -701,15 (cal/mol).

4. CONCLUSIONES

- La presencia de cationes favorece el proceso de adsorción de oro en medio cianuro,

especialmente los de mayor valencia.

- Durante el proceso de adsorción el pH evoluciona a valores mas bajos que el inicial, pudiéndose co-adsorber los iones hidroxilos en el carbón activado.
- El aumento de temperatura desfavorece el proceso de adsorción de oro.
- La presencia de un agente oxidante como el H_2O_2 no afecta significativamente el proceso de adsorción de oro, pese a que existe un aumento en el potencial electroquímico de la solución.
- Una mayor cantidad de macroporos en el carbón activado produce una mayor adsorción de oro.
- Al aumentar el diámetro promedio de poro, aumenta la carga de oro por superficie de carbón activado.
- Una menor área superficial del carbón activado produjo una mayor carga de oro y por ello con ese carbón se obtiene una mayor capacidad de carga.
- Las propiedades físicas del carbón es el factor de mayor importancia del proceso, ya que a mayor diámetro promedio de poro se ofrece menor resistencia para el proceso, favoreciendo el porcentaje de adsorción a tiempos de 6 horas y la cinética es más rápida. Además, al analizar el área superficial de cada carbón, es el carbón B el que posee menor superficie ($786,27 \text{ m}^2/\text{g}$) siendo el que posee mayor carga de oro por superficie ($0,02 \text{ mgAu}/\text{m}^2$) -contrario a lo que podría esperarse- a tiempos de adsorción de 6 horas, y en cambio el carbón con mayor área superficial ($985,69 \text{ m}^2/\text{g}$), carbón A, posee una cinética más lenta alcanzando sólo una carga de oro por superficie de $0,01 \text{ mgAu}/\text{m}^2$ con las mismas condiciones experimentales.
- Las pruebas experimentales determinan que la carga máxima de ambos carbones es similar, con valores de 62,76 y 64,5 (g Au/Kg carbón) utilizando el carbón A y B, respectivamente. Pero la diferencia relevante la posee la cinética de adsorción, ya que el carbón B posee una cinética más alta, y se verifica en la simulación industrial realizada, ya que al utilizar el carbón B se ahorran 2 etapas de proceso para un flujo de adsorción de $100 \text{ m}^3/\text{h}$.
- Se determinó la energía de activación de la reacción de adsorción teniendo un valor de 1,87 (Kcal/mol) para un proceso de 2 horas de adsorción, y se determinó la entalpía de reacción

(ΔH) para un tiempo de 6 horas que tiene un valor de $-701,15 \text{ (cal/mol)}$, por lo tanto la reacción de adsorción en bajo las condiciones experimentales es exotérmica.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) por el patrocinio otorgado para la realización de este trabajo científico a través del proyecto Fondecyt N°1070091.

6. REFERENCIAS

- [1] Marsden J, y House L. *The Chemistry of Gold Extraction*, 2ª ed. SME, 2006, p. 260-266.
- [2] Merello R, Zárate G. *Minerales*. 1985; **42**: 25-39.
- [3] Fleming, C. *Hydrometallurgy*.1992; **30**: 127-162.
- [4] Adams M, Fleming C. *Metall. Mater. Trans. B*. 1989; **20**: 315-325.
- [5] Adams M. J. S. *Afr. I. Min. Metall*. 1990; **90**: 37-44.
- [6] Jones W, Clauber C, Linge H, “Fundamentals Aspects of Gold Cyanide Adsorption on Activated Carbon”. En: Bhappu R, Harden R (eds.), *Gold Forum on Technology and Practices*. Littleton-Colorado (EEUU): Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc., 1989, p. 278-281.
- [7] Cho E, Dixon S, Pitt C. *Metall. Mater. Trans. B*. 1979; **10**: 185-189.
- [8] Sibrell P, Miller J. *Miner. Metall. Proc.* 1992; **9**:189-195.
- [9] Ibrado A, Fuersteanau D. *Hydrometallurgy*. 1992; **30**: 243-256.
- [10] Seke M, Sandenbergh R, Vegter N. *Miner. Eng.* 2000; **13**: 527-540.