

Desarrollo de carbones activados magnéticos para la recuperación de oro en soluciones de cianuro

Gustavo Muñoz Rivadeneira^{1*}

¹*Colegio de Ciencias e Ingeniería - El Politécnico, Universidad San Francisco de Quito
Diego de Robles y Vía Interoceánica, Quito, Ecuador*

**Autor principal/Corresponding author, e-mail: gmunoz@usfq.edu.ec*

Editado por/Edited by: A. Hidrobo, Dr.

Recibido/Received: 01/09/2010. Aceptado/Accepted: 04/28/2010.

Publicado en línea/Published on Web: 06/10/2010. Impreso/Printed: 06/01/2010.

Abstract

Activated Carbons owe its adsorptive properties to their highly developed porous structure. As a result, activated carbons have extensive specific surface areas. Currently, granular activated carbons produced from coconut shells are widely used for gold recovery from alkaline cyanide solutions. Magnetic activated carbons (MACs) for gold recovery, synthesized from sources different that the traditional ones, have been developed at the University of Utah, mixing a carbon source with a magnetic precursor, and putting the mixture under controlled conditions of temperature and gaseous phase composition. This document contains fundamental aspects and preliminary experimental results during the development of magnetic activated carbons.

Keywords. Activated carbons, magnetic, gold recovery.

Resumen

El carbón activado debe sus propiedades adsorptivas a su estructura porosa altamente desarrollada. Como resultado, éstos generalmente exhiben una elevada área superficial específica. En la actualidad, carbones activados granulares producidos a partir de cuecos de coco son ampliamente utilizados para la recuperación de oro disuelto en soluciones alcalinas de cianuro. Carbones activados magnéticos (MACs) para recuperación de oro, producidos de fuentes diferentes a las tradicionales, han sido desarrollados en la Universidad de Utah mezclando una fuente de carbono con un precursor magnético, y sometiendo la mezcla a condiciones controladas de temperatura y composición de gases oxidantes. En este documento se presentan los fundamentos y resultados experimentales iniciales en el desarrollo de los carbones activados magnéticos.

Palabras Clave. Carbón activado, área superficial, magnético, recuperación de oro.

Introducción

Carbón activado es un nombre genérico que se utiliza para identificar a compuestos poliméricos complejos con gran capacidad de adsorción, en donde el carbono es el elemento en mayor abundancia. Las características adsorptivas del carbón activado se deben a su estructura porosa altamente desarrollada, su extensa área superficial, y a los grupos funcionales generados durante el proceso de activación [1].

Los Estados Unidos de Norteamérica es el principal productor de carbón activado en el mundo, con 190 000 toneladas métricas en 1999 [2]. La demanda de carbón activado en los Estados Unidos, Europa, y Japón se ha incrementado en una tasa del 6 % anual durante las últimas dos décadas y se espera que el consumo de carbón

activado aumente, principalmente en el campo del tratamiento de aguas [3, 4].

Se puede producir carbón activado de una gran variedad de materias primas. Entre ellas se tiene huesos, carbón mineral, carbón vegetal, madera, cuecos de nueces, cuecos de coco, y semillas de frutas, entre otras [5]. De entre las diversas maneras de producción, el proceso en dos etapas de pirólisis y gasificación es el preferido para generar carbón activado para la recuperación de oro disuelto en soluciones alcalinas de cianuro.

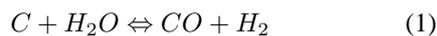
La pirólisis de la materia prima, también conocida como carbonización, se lleva a cabo en una atmósfera inerte a temperaturas entre 700 y 1100 K. El producto formado en el proceso se conoce simplemente como carbón. Durante la pirólisis, la mayoría de los componentes volátiles son removidos como gases, con la pérdi-

ISSN 1390-5384



da de parte del carbono en forma de gases tales como metano (CH_4), ácido acético (CH_3COOH), monóxido de carbono (CO), y dióxido de carbono (CO_2), principalmente. El carbono se reagrupa en unidades cristalográficas organizadas, conocidas como cristales grafiticos elementales o microcristales. El arreglo de estos microcristales es altamente irregular, quedando intersticios libres entre cristales. Alquitraneos que se forman durante el proceso de pirólisis tienden a llenar y bloquear estos intersticios. Los productos carbonáceos producidos durante la pirólisis tienen una reducida área superficial específica, y baja capacidad de adsorción [6, 7].

Posterior a la pirólisis viene el proceso de gasificación, también conocido como activación, durante el cual se genera la extensa microporosidad característica del carbón activado. La gasificación del carbón se realiza poniendo en contacto el producto carbonáceo obtenido en la pirólisis (carbono) con un gas oxidante a temperaturas entre 1100 y 1300 K. Las reacciones químicas de gasificación con vapor de agua, dióxido de carbono, y oxígeno como gases oxidantes son, respectivamente:



Se ha determinado que las las reacciones de gasificación en donde la especie oxidante es agua o dióxido de carbono son endotérmicas, mientras que la gasificación del carbono con oxígeno resulta en una reacción altamente exotérmica [8]. En condiciones prácticas de gasificación a una temperatura sobre los 1100 K, la reacción del carbono con el oxígeno es alrededor de 100 veces más rápida que las reacciones del carbono con vapor de agua o dióxido de carbono. Esto conduce a una reacción controlada por difusión con un excesivo consumo de carbono localizado en la superficie, y como resultado se produce un mínimo desarrollo de porosidad en el carbón resultante. Por estas razones, la activación con oxígeno no es utilizada industrialmente [6].

En ciertos casos los procesos de pirólisis y gasificación de un material carbonáceo se los puede realizar simultáneamente. Generalmente, los carbones activados tienen áreas superficiales específicas de 800 a 1500 m^2/g , con poros con un tamaño promedio de 0.5 a 20 nm. Las propiedades físicoquímicas de los carbones activados son altamente dependientes de la materia prima, y de las condiciones operativas de pirólisis y gasificación [5]. La $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ muestra una imagen de microscopía electrónica de barrido de la superficie pulida de un gránulo de carbón activado comercial utilizado en la recuperación de oro.

La IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*) ha clasificado el tamaño de poro para los carbones activados como sigue: Microporos aquellos que

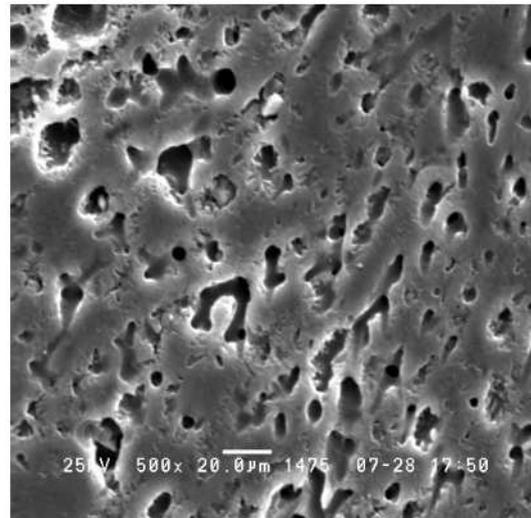


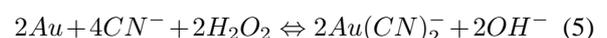
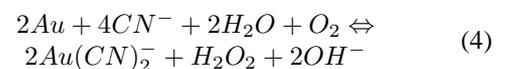
Figura 1: Imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido de la superficie pulida de un gránulo de carbón activado comercial utilizado en la recuperación de oro.

tienen aberturas menores a 2 nm, mesoporos tienen aberturas entre 2 y 50 nm, y los macroporos tienen aberturas que exceden los 50 nm. La abertura de un poro se define como la distancia entre las paredes de un poro que tiene la forma de una ranura, o el radio de un poro en forma cilíndrica [9]. Los microporos contribuyen en la mayor parte a la superficie interna de un carbón activado, y la mayor parte del fenómeno de adsorción ocurre en los microporos. Los mesoporos y macroporos son importantes en la estructura de un carbón activado ya que sirve como conductos para el transporte de las especies hacia los microporos. Los macroporos generalmente exhiben bajas áreas superficiales. A pesar de que la superficie de los macroporos no contribuye significativamente al área superficial específica del carbón activado, éstos pueden retener importantes cantidades de líquido, debido al gran volumen vacío que representan [10].

Metodología

Recuperación de oro con Carbón Activado.

El carbón activado ha encontrado una aplicación importante en la metalurgia extractiva del oro. Durante 1999, la cantidad de carbón activado adquirido por la industria en los Estados Unidos y el resto del mundo es estimado en 4000 y 7000 toneladas métricas, lo que representan ventas en el orden de 8 y 14 millones de dólares respectivamente [11]. Los métodos convencionales de recuperación de oro comprenden la trituración y molienda de la mena aurífera, seguido de la disolución de oro en una solución oxigenada y alcalina de cianuro. Las reacciones químicas que rigen el proceso de disolución de oro son:



El oro, disuelto como el complejo $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ (aurocianuro), es recuperado de la solución por diferentes métodos que utilizan carbón activado, tales como carbón en pulpa (CIP), carbón en lixiviación (CIL) y carbón en columna (CIC). Los Estados Unidos produjo 340 toneladas métricas de oro de mina en 1998, de las cuales el 78 % fue recuperado utilizando carbón activado [12, 13]. Luego de la separación del carbon activado de la pulpa o de la solución, el complejo auroso $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ es eluido del carbón activado para posterior precipitación y purificación.

Los circuitos convencionales de recuperación de oro por medio de carbón activado utilizan éste en partículas granulares, las cuales son significativamente de mayor tamaño que la mena molida, de tal manera de poder realizar una efectiva separación del carbon activado cargado con oro de la pulpa, a través de un cribado mecánico. El cribado mecánico es la manera más simple de separación de sólidos, y se basa únicamente en la diferencia de tamaños de las partículas a separar.

La separación del carbón activado de la pulpa por cribado presenta varios problemas. Las cribas pueden cegarse y romperse debido al uso excesivo, requieren considerable energía para operar, y requieren reemplazo y mantenimiento frecuente. Además, se pueden producir pérdidas por abrasión de carbon con oro adsorbido a la superficie externa. Las pérdidas debido a estos factores pueden ser de alrededor de 50 gramos de carbón por tonelada métrica de mena [12], y las pérdidas acumuladas de carbón fino pueden llegar a niveles en donde se requiere reemplazar hasta un 20 % anual del carbón fino perdido [14]. Esto representa significativas cantidades de oro adsorbido al carbón activado que no es recuperable por cribado. La Figura 2 muestra el efecto del tamaño de partícula de un carbón activado comercial en la cinética de adsorción de oro. A medida que el carbon activado disminuye de tamaño, se produce un incremento en la cinética de adsorción de oro. A pesar de las ventajas desde el punto de vista cinético que un carbón activado en polvo presenta, éste no se puede utilizar en circuitos convencionales de recuperación de oro, debido a que el carbon activado y la mena en suspensión tendrían tamaños similares, y la separación de éstos por cribado, filtración, o sedimentación no son opciones viables [15].

Carbón Activado Magnético.

El concepto de un carbón activado magnético (MAC, por sus siglas en inglés *Magnetic Activated Carbons*) surge a raíz de los aspectos mencionados en la discusión anterior. Al desarrollar un carbon activado, que además tenga propiedades magnéticas, se esperaría que éste pueda ser fácilmente separado de una solución o suspensión utilizando un separador magnético, inclusive si en la suspensión se tienen concentraciones significativas de sólidos en suspensión. Adicionalmente, al producirse un carbón activado magnético con un tamaño de partícula más pequeño que el carbón activado granular actualmente utilizado en la industria, se espera que el carbón

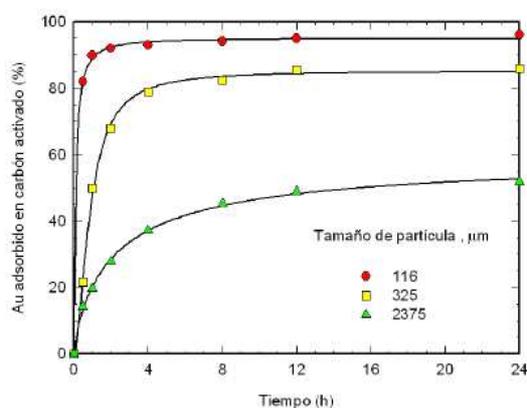


Figura 2: Efecto del tamaño de partícula en la cinética de adsorción de oro en un carbón activado comercial. Condiciones de adsorción: 1 g carbón activado/L solución, 100 mg Au /L solución, 0.01 M NaCN, pH 11, 200 RPM, 298 K.

activado magnético presente un incremento en la cinética de adsorción de oro, al compararlo con el anterior [15].

El uso de carbones activados magnéticos para otras aplicaciones, tales como tratamiento de aguas industriales, puede tener un notable impacto en las operaciones actuales, debido a que no es necesario remover los sólidos en suspensión de las corrientes a tratarse con el carbón activado magnético, lo que produce un incremento en el tipo de soluciones o suspensiones a procesarse [15].

La factibilidad de producir un carbon activado magnético se puede explicar utilizando un diagrama de equilibrio para el sistema Fe – O – C. Este diagrama es ampliamente conocido, y es extensamente utilizado en el análisis de reacciones gas-sólido que involucran la reducción de menas de hierro para producir hierro metálico.

La Figura 3 muestra el equilibrio entre hierro, oxígeno, y carbón a una atmósfera de presión total, en donde las regiones de predominancia para las especies Fe, FeO, y Fe₃O₄ se encuentran identificadas. El diagrama además incluye la reacción de gasificación del carbono (C) con dióxido de carbono (CO₂) para producir monóxido de carbono (CO) descrita en la Ecuación 2. Analizando el equilibrio de esta reacción en la Figura 3 se puede observar que a temperaturas sobre 1000 K, se favorece la formación de CO, y que a temperaturas superiores a los 1100 K, la conversión de C a CO es mayor al 90 %. Una atmósfera rica en dióxido de carbono favorecerá la gasificación del material carbonáceo. En la Figura 3 también se puede apreciar que en una atmósfera rica en CO₂, el óxido de hierro más estable es la magnetita (Fe₃O₄). Este análisis sugiere que un material carbonáceo en contacto con un óxido de hierro a una temperatura adecuada y bajo una atmósfera rica en CO₂, se encuentra en condiciones óptimas para la gasificación del carbón, y a su vez, se favorece la formación de magnetita como la especie de hierro predominante. Como consecuencia, la síntesis de un carbón activado magnético es termodinámicamente posible.

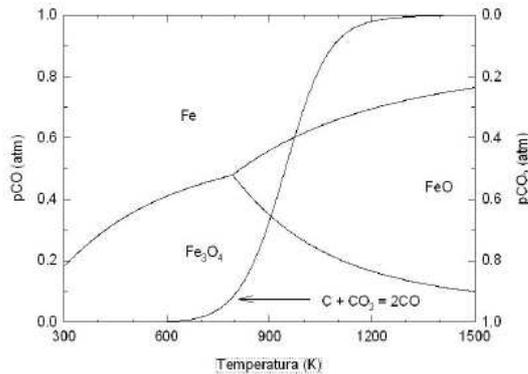


Figura 3: Diagrama de equilibrio para el sistema Fe – O – C, y para la reacción $C + CO_2 = 2CO$.

Síntesis de Carbones Activados Magnéticos.

En la Universidad de Utah se han desarrollado y patentado varios procedimientos para la síntesis de carbones activados magnéticos, mezclando una fuente de carbono con un precursor magnético, y sometiendo la mezcla a condiciones controladas de temperatura y composición de gases oxidantes. Detalles sobre la preparación de éstos y sobre los procedimientos utilizados para su caracterización y evaluación se pueden encontrar en la literatura correspondiente [15, 16, 17, 18, 1].

Se presentan a continuación algunos de los resultados obtenidos con un carbón activado magnético sintetizado a partir de aserrín de pino (fuente de carbono) con un tamaño de partícula entre 250 y 600 μm , e impregnado en una solución de 2.5 g Fe/L solución (Fe como citrato de hierro, precursor magnético). Este carbón activado magnético obtenido de aserrín de pino fue codificado como MAC-P, tiene un grado de activación de 55 % y un contenido de hierro de 5.2 % en peso. El grado de activación de un carbón activado se define como el porcentaje en peso que una muestra de carbón pierde durante el proceso de gasificación. La Figura 4 muestra una imagen de microscopía electrónica de barrido de varias partículas de MAC-P. En la Figura 5, se puede apreciar la porosidad generada en una partícula de MAC-P durante el proceso de gasificación.

Resultados y Discusión

Caracterización y Evaluación de MAC

Identificación de la fase magnética.

La Figura 6 muestra un difractograma de rayos X del MAC-P. Para efectos comparativos se incluyó un difractograma de un carbón activado preparado a partir de aserrín de pino sin impregnación de sales de hierro. Este carbón activado fue codificado como CA-P, tiene un grado de activación de 48 %, y no se detectó hierro durante el análisis químico. El difractograma del CA-P es característico de una muestra de carbón activado convencional. Las extensas bandas que se presentan en las regiones 2θ de 10-30 y 40-50 grados son características



Figura 4: Imagen obtenida por microscopía electrónica de barrido (SEM) de partículas de MAC-P.

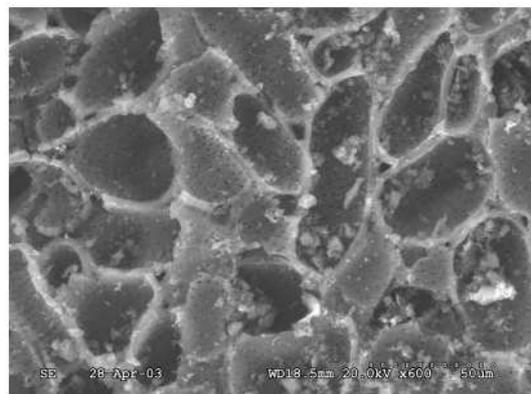


Figura 5: Imagen obtenida por SEM que permite observar la porosidad generada en MAC-P durante el proceso de gasificación.

de la naturaleza amorfa, no cristalina del carbón activado. En cambio, el difractograma correspondiente a la muestra de MAC-P, presenta además, picos muy definidos en las regiones 2θ de 35.42°, 56.94°, y 62.51° que son características, en posición e intensidad, de magnetita. Se puede concluir que análisis de difracción de rayos X confirman la predicción termodinámica que a altas temperaturas (1100 K) y en una atmósfera rica en CO_2 , la especie de hierro formada será magnetita. Hematita, maghemita, hierro elemental u otras especies de hierro no fueron detectadas durante el análisis de la muestra MAC-P, al menos dentro de los límites de detección del difractómetro de rayos X.

Área superficial específica y distribución de porosidad.

La Figura 7 muestra isotermas de adsorción-desorción de nitrógeno para el MAC-P. Con propósitos de comparación, se presenta además una isoterma de adsorción-desorción de nitrógeno de un carbón activado granular comercial, utilizado en la industria, el cual ha sido previamente molido a un tamaño de partícula similar al del MAC-P, esto es, 250-600 μm , y se lo llamó CC. La isoterma de adsorción-desorción de nitrógeno correspondiente al carbón activado comercial, CC, es de tipo I, característica de fenómenos de quimisorción o de fisiorción en materiales microporosos, como es el caso de carbones activados. La mayoría de la adsorción de nitró-

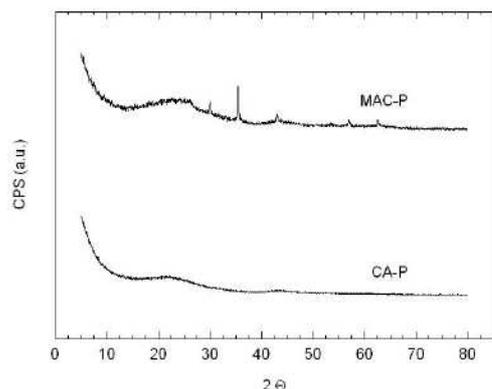


Figura 6: Difractogramas de rayos X para MAC-P y CA-P.

geno ocurre a bajas presiones relativas ($P/P_0 < 0,01$), para posteriormente alcanzar la plataforma. Es importante notar que la curva de desorción no muestra histéresis, lo que indica que el mecanismo de desorción es igual al mecanismo de adsorción. El área superficial específica fue calculada por medio de la ecuación BET en $1161 \text{ m}^2/\text{g}$ para el CC. La isoterma de adsorción-desorción de nitrógeno para el MAC-P muestra un comportamiento diferente. Se puede apreciar que hay una considerable adsorción de nitrógeno a bajas presiones relativas, ($P/P_0 < 0,01$), pero a moderadas y altas presiones relativas, la adsorción de nitrógeno continúa, sin formar una plataforma, como en el caso del CC. Este fenómeno se debe a la presencia de mesoporos y macroporos adicional a la microporosidad característica de carbones activados. Además la isoterma correspondiente al MAC-P muestra histéresis, esto es una indicación que el proceso de condensación de nitrógeno durante la adsorción sigue un mecanismo distinto al proceso de evaporación durante la desorción. Numerosos investigadores han sugerido que esto se debe a la presencia de mesoporos que poseen aberturas estrechas, las cuales se amplían a medida que el poro crece en longitud.

La Figura 8 presenta curvas de incremento de área superficial específica vs. distribución de tamaño de poro para MAC-P y CC. La muestra de carbón activado comercial, CC, muestra una distribución bimodal de porosidad. La mayoría del área superficial está dada por los poros en la región entre $0,4\text{-}1 \text{ nm}$, y por poros en una segunda región con tamaños entre $1\text{-}3 \text{ nm}$. En el caso del MAC-P, una distribución trimodal de la porosidad es evidente. La primera región abarca poros en el rango $0,4\text{-}1 \text{ nm}$, que es en donde la mayoría del área superficial del MAC-P es generada. La segunda región está localizada entre $1\text{-}2 \text{ nm}$, y la tercera región está $2,3\text{-}58 \text{ nm}$, correspondiente a mesoporosidad.

La Figura 9 muestra curvas de incremento de volumen de poro vs. distribución de tamaño de poro. El gráfico que corresponde a CC sugiere que la porosidad está dada por microporos, en el rango de $0,4\text{-}3 \text{ nm}$. La curva para MAC-P muestra claramente la presencia de mesoporos. Estos resultados están en concordancia con las formas

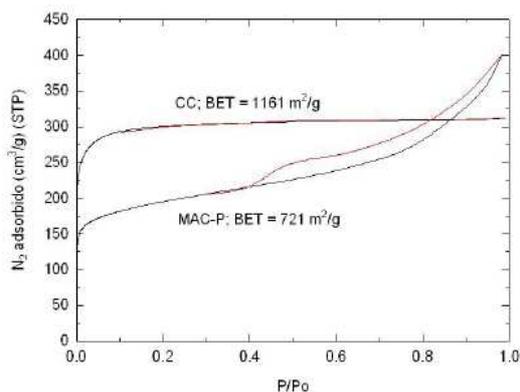


Figura 7: Isothermas de adsorción-desorción para MAC-P y CC utilizando N_2 como adsorbato en un baño de nitrógeno líquido a $77,35 \text{ K}$.

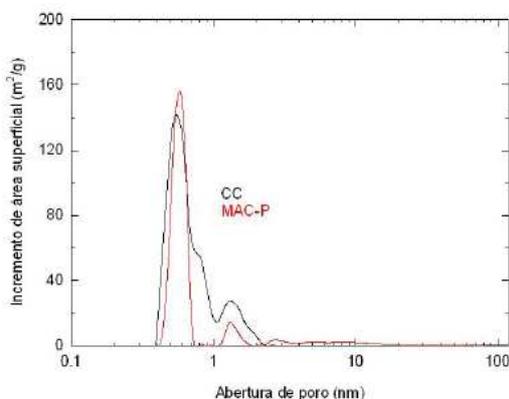


Figura 8: Incremento de área superficial vs. distribución de tamaño de poro para CC y MAC-P.

de las curvas de las isothermas de adsorción-desorción de nitrógeno presentadas en la Figura 7.

Cinética de adsorción de oro.

La Figura 10 muestra el porcentaje de oro adsorbido, en carbones activados analizados, de una solución inicial con 10 mg Au/L solución, $0,01 \text{ M NaCN}$, y $\text{pH } 10$. La solución fue agitada a 200 RPM , a temperatura ambiente (293 K). Por motivos de comparación, se incluyó el carbón activado comercial con su tamaño de partícula original ($1180\text{-}3350 \mu\text{m}$). Se puede apreciar claramente que el carbón activado granular tiene la cinética de adsorción más lenta. Luego de una hora de adsorción, menos del 3% del oro disuelto ha sido adsorbido por el carbon activado granular. En el caso de los carbones activados CC y MAC-P éstos presentan cinéticas de adsorción de oro más rápidas debido a su menor tamaño de partícula. Los dos carbones activados finos remueven más del 70% del oro en solución durante los primeros 10 minutos

La velocidad inicial de adsorción de oro, R , para CC-granular, con un tamaño de partícula de $1180\text{-}3350 \mu\text{m}$ fue calculado en $0,12 \text{ (mg/Au/g C)/min}$. El mismo carbón, luego de ser molido a un tamaño de partícula de $250\text{-}600 \mu\text{m}$, esto es, una reducción de 5 veces su tamaño original, tiene un valor R de $1,87 \text{ (mg Au/g C)/min}$.

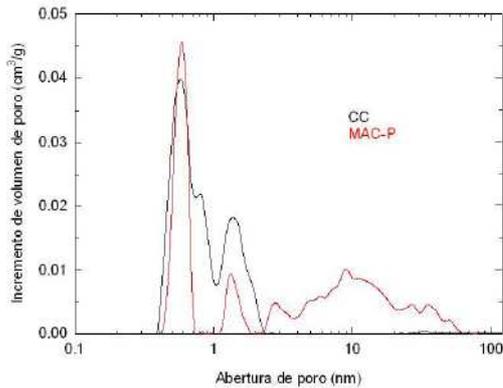


Figura 9: Incremento de volumen de poro vs. distribución de tamaño de poro para CC y MAC-P

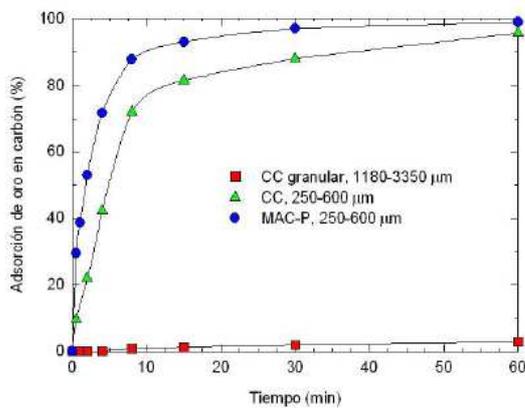


Figura 10: Adsorción de oro de CC-granular, CC y MAC-P. Condiciones de adsorción: 1 g carbón activado/L solución, 10 mg Au/L solución, 0.01 M NaCN, pH 10, 200 RPM, 293 K.

Esto representa un aumento en 16 veces en la velocidad de adsorción de oro. MAC-P presenta un valor de R de 7.12 (mg Au/g C)min. Esto representa un incremento en la velocidad de adsorción de oro de 59, cuando se compara con CC-granular.

Conclusiones

Carbones activados magnéticos han sido producidos mezclando un precursor magnético (citrato de hierro) con una fuente de carbono (aserrín de pino), y sometiendo la mezcla a condiciones controladas de temperatura y composición de gases oxidantes. Análisis de difracción de rayos X sugieren que la magnetita (Fe_3O_4) es la especie magnética predominante en los carbones activados magnéticos. Isotermas de adsorción-desorción de nitrógeno y gráficos de distribución de tamaño de poro con respecto a incremento de área superficial e incremento de volumen de poro muestran que un carbón activado convencional utilizado industrialmente en la recuperación de oro es básicamente microporoso. MAC-P contiene mesoporos, además de microporos. Las curvas de adsorción de oro revelan que MAC-P y el CC presentan mayores velocidades de adsorción de oro con respecto al CC-granular, debido al reducido tamaño de partícula que ellos exhiben. Se ha logrado obtener recu-

peraciones aceptables de los MAC, por sobre el 98 %, utilizando un separador magnético en húmedo de alta intensidad (WHIMS).

Agradecimientos

El presente estudio fue financiado por el proyecto S1001-069 de la Universidad de Utah "Removal of Metal Ions and Complexes from Aqueous Streams using Powdered Magnetic Activated Carbon" al cual el autor expresa su reconocimiento.

Referencias

- [1] Miller, J.D., Muñoz, G.A., y Duyvesteyn, S. 2004. "Design and synthesis of powdered magnetic activated carbons for aurocyanide anion adsorption from alkaline cyanide leaching solutions, Anion Separations: Fundamentals and Applications". B.A. Moyer, and R.J. Singh, eds., Kluwer Academic/Plenum Publishers. New York, NY. 277-292.
- [2] Silverberg, P. 1999. "Activated carbon, for the 'hole' cleanup job". *Chemical Engineering*. 33-37.
- [3] Freedonia Group. 1998. "Activated Carbon to 2002", Estudio 1065.
- [4] Roskill Consulting Group. 1998. "The Economics of Activated Carbon."
- [5] Jankowska, J., Swiatkoski, A., y Choma, J. 1991. "Active carbon." Ellis Horwood, Inglaterra.
- [6] Wigmans T. 1989. "Industrial aspects of production and use of activated carbons." *Carbon*. 27, 13-22.
- [7] Swiatowki, J. 1999. "Industrial carbon absorbents, in: Adsorption and its Application in Industry and Environment Protection." *Studies in Surface Science and Catalysis*. 120A, 69-94.
- [8] Muñoz, G.A. 2006. "Magnetic Activated Carbon for Gold Adsorption from Alkaline Cyanide Solution." Ph.D. Dissertation, The University of Utah, Salt Lake City, Utah, USA, 370
- [9] Bansal, R.C., Donnet, J.B., y Stoeckli, F. 1988. "Active Carbon." Marcel Dekker, Inc., New York.
- [10] Rodríguez-Reinoso F. 1991. "Controlled gasification of carbon and pore structure development" en: Fundamental Issues of Carbon Gasification Reactivity. Lahaye J., and Ehrburger P., eds., Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 533-571.
- [11] Faulkner, W. 2000. "PACCO International." Comunicación personal.
- [12] Marsden, J., y House, I. 1992. "The chemistry of gold extraction." Ellis Horwood, Cornwall.
- [13] US Geological Survey. 2000. "Mineral Commodity Summaries." Febrero.
- [14] American Norit Company. 1989. Inc Norit[®], RO 3515 Bulletin, 8.
- [15] Miller, J.D., Muñoz G.A, y Duyvesteyn S. 2001. "Magnetic activated carbon particles for adsorption of solutes from solution." Patente Provisional U2975.1P.

- [16] Duyvesteyn, S., Muñoz, G.A., y Miller, J.D. 2002. "Magnetic activated carbon: an old product with a new future, Hydrometallurgy." TMS Annual Meeting. Seattle, Washington.
- [17] Muñoz, G.A., Duyvesteyn, S., y Miller J.D. 2002. "Gold recovery from cyanide leaching solutions by powdered magnetic activated carbons." Proceedings of the 26th International Precious Metals Conference, IPMI. Miami, Florida.
- [18] Muñoz, G.A., Duyvesteyn, S., y Miller, J.D. 2003. "Características estructurales y efecto de la distribución de porosidad en la adsorción de oro en carbones activados magnéticos." Memorias del Seminario Internacional de Metalurgia, Minería y Medio Ambiente. Quito. 71-82.