

## **EL CARBÓN ACTIVADO, UN MATERIAL ADSORBENTE**

**Rolando Padrón, Clara Rodríguez, Alaín Gómez,**

**MSc. Ariel García, Dr. C Lourdes González.**

*Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, Vía  
Blanca Km.3, Matanzas, Cuba.*

## **Resumen**

El carbón activado es una sustancia cuyas propiedades adsorbentes lo convierten en un material de amplio uso en la industria. Se elabora haciendo uso de métodos físicos y químicos, este último posee ventajas sobre el primero debido a las propiedades del producto obtenido y las bajas temperaturas de síntesis. La calidad de estos materiales es valorada mediante procedimientos analíticos establecidos, entre los que se encuentran la determinación de los índices de yodo y azul de metileno, la densidad aparente, entre otros. El objetivo del presente trabajo es brindar al lector una panorámica teórica sobre el tema, así como establecer la línea analítica a seguir para la caracterización de estos materiales por parte de estudiantes e investigadores que trabajen en la temática.

**Palabras claves:** Carbón activado, adsorción, índice de azul de metileno.

---

## Introducción

El carbón activado (CA) es una sustancia de amplio uso en la industria debido a que es un material con excelentes propiedades adsorbentes. Este material se caracteriza por poseer una alta superficie interna, variedad de grupos funcionales y una buena distribución de poros, propiedades que le permiten atrapar una gran diversidad de moléculas.

Los carbones activados son materiales porosos con una gran área superficial interna, se usan en variedad de aplicaciones industriales como la separación y purificación de líquidos y gases; así como, la eliminación de sustancias tóxicas, entre otras (Henning y Schäfer, 1993). La popularidad de estos carbones como adsorbentes puede ser evidenciada por su enorme producción y comercialización en la actualidad.

La acción y efecto de adsorber, se conoce como: “Adsorción”, siendo este un término usado para describir la existencia de una alta concentración de sustancias en la interfase entre el fluido y el sólido. Esta puede ser dividida en adsorción física o fisisorción y adsorción química o quimiadsorción. En la adsorción física, las impurezas se unen a la superficie del carbón mediante las débiles fuerzas de Van der Waals, mientras que en la quimiadsorción, las fuerzas son relativamente grandes y aparecen en sitios específicos en la superficie llamados sitios activos. La eficiencia de la adsorción de los carbones dependerá, por lo tanto, de su área superficial accesible, pero también de estos sitios activos en la superficie, donde la quimiadsorción pueda ocurrir. (Glasstone, 1968; Atkins, 2006)

Generalmente, la capacidad de adsorción está directamente influenciada por la naturaleza porosa de los CA definida por su área superficial interna. Los CA son usualmente preparados a partir de diferentes materias primas utilizando métodos físicos y químicos (Ahmadpour y Do, 1996).

Aunque es ahora reconocido que la estructura del poro es la más importante propiedad de los carbones activados, se creía que los carbones tenían que ser activados mediante tratamiento químico y con calor antes que estos remuevan color u otra impureza, de aquí el nombre de Carbón Activado. Ahora es sabido que la remoción de impurezas presentes en gases y líquidos es por adsorción y el proceso de activación simplemente incrementa el área superficial interna y el número de sitios disponibles para la adsorción (NORIT), aumentando, por ende, sus propiedades adsorbentes.

Los carbones activados pueden tener un área entre 500 a 1500 m<sup>2</sup>/g de carbón. Esta enorme área los convierte en un excelente adsorbente.

Los poros presentes en el CA se clasifican (establecida por la IUPAC), según el diámetro de los mismos, en: microporos (menores de 2 nm de radio), mesoporos (de 2 a 50 nm de radio) y macroporos (mayores de 50 nm, típicamente de 200 a 2000 nm). (Grosso y Brosa, 1999).

Otros autores concuerdan con esta clasificación, por ejemplo Gad y El-Sayed (2009), (citado por Kurniawan e Ismadji, 2011), reportan tamaños de poros que van desde los

microporos (<20 Å ancho de hendidura) hasta los macroporos (>500 Å ancho de hendidura).

La mayor porción del área superficial corresponde a los microporos y los mesoporos, y estos, juegan el papel más importante en la adsorción en fase gaseosa y líquida. Los macroporos por su parte, están pocos relacionados con la adsorción, sin embargo, podrían afectar la velocidad de difusión hacia los meso y microporos.

La preparación de este tipo de material se lleva a cabo a través de procesos físicos o químicos, mediante la interacción con gases o la adición de químicos, respectivamente.

Los carbones activados son utilizados generalmente en procesos de descontaminación de aguas, recuperación de solventes, control de emisiones, decoloración de líquidos, eliminación de olores, soportes catalíticos, entre otros procesos (Groso y Brosa, 1999).

Un aspecto a tener en cuenta es la disminución de los costos de transportación de las materias primas utilizadas para la producción de los CA mediante la construcción de industrias cercanas a las fuentes de abasto, trayendo consigo la disminución de los costos de producción.

## **Desarrollo**

### **Materiales carbonáceos en la industria**

Debido a que los carbones activados, que se fabrican industrialmente provienen de materiales ricos en carbono, resulta de interés mostrar algunas características de las diferentes formas de carbones usadas industrialmente. Las formas de carbones que se muestran son: Diamante, Carbones Negros, Fibras de carbono, Grafito y Carbones porosos.

**Diamante:** Es la única forma de carbono que resulta mejor utilizarla tal y como se encuentra en la naturaleza, debido a su calidad obtenida bajo las condiciones extremas de presión y temperatura necesarias a la cual fue obtenida. Gracias a su dureza, poseen un amplio uso en la industria. Los diamantes sintéticos, no son comparables en calidad con los verdaderos, además de no ser abundantes, ni fácil de encontrarlos.

**Carbones negros:** Estos materiales son producidos por la combustión parcial de hidrocarburos líquidos y gaseosos con suministro restringido de aire. Poseen una baja composición de constituyentes inorgánicos. Su contenido en carbono se encuentra entre 90 y 99% dependiendo del método de producción. Se usan como agentes de refuerzo en gomas y pigmentos negros de pinturas, cubiertas y plásticos.

**Fibras de carbono:** Son conocidos desde muchos años atrás. Edison pirolizó algodón para hacer filamentos de carbono para sus lámparas eléctricas hace más de 100 años. Entre las materias primas para su fabricación están el rayón viscoso y poliacrilamida. Entre los usos que posee, destaca el uso como material de fabricación de aviones y naves espaciales donde el peso es un factor crítico.

**Grafito:** Es otra forma cristalina del carbono. Los usos del grafito son tan numerosos que aún se siguen encontrando aplicaciones. Inicialmente fueron desarrollados para la fabricación de electrodos, pero también fueron usados para la fabricación de resistencias y otros accesorios eléctricos. Su estabilidad a altas temperaturas e inercia química ha

propiciado su uso en la fabricación de crisoles. Es también usado como moderador de neutrones en reactores nucleares, donde sirven para disminuirles su velocidad sin absorberlos.

Carbones porosos: Son obtenidos como residuo después que los componentes volátiles de un material carbonáceo son removidos mediante un tratamiento termal en ausencia de aire o en atmósfera inerte. El material carbonáceo podría ser tanto un líquido, como un sólido. En la fabricación de carbones porosos industriales son generalmente usados materiales naturales como: carbón mineral, lignito, turba y madera. Los productos más importantes de esta clase de carbono son: el coque, chars (término del inglés que significa carbón de hueso o carbón animal), y los carbones activados. Grandes cantidades de coque y chars son usados en la producción de hierro y acero, mientras que los carbones activados son productos especiales con un mercado amplio (NORIT, año de referencia).

### **Producción de los carbones activados**

Como se ha mencionado, la elevada capacidad de eliminación de sustancias por el CA, se debe principalmente a la alta superficie interna que posee, aunque la porosidad y distribución de tamaño de poros juegan un papel importante en el proceso de adsorción.

En general, los microporos le confieren la elevada superficie y capacidad de retención, mientras que los mesoporos y macroporos son necesarios para retener moléculas de gran tamaño, como pueden ser colorantes o coloides, y favorecer el acceso y la rápida difusión de las moléculas a la superficie interna del sólido. Por otra parte, el carbón activado tiene escasa especificidad ante un proceso de retención, es un adsorbente “universal”. No obstante, por su naturaleza apolar y por el tipo de fuerzas implicadas en el proceso de adsorción, retendrá preferentemente moléculas apolares y de alto volumen molecular (hidrocarburos, fenoles, colorantes y otros) mientras que sustancias como nitrógeno, oxígeno y agua prácticamente no son retenidas por el carbón a temperatura ambiente (Schrodter, 1991).

### **Materias primas para la fabricación de carbón activado**

Actualmente el carbón activado puede ser producido a partir de cualquier material rico en carbono, pero sus propiedades estarán muy influenciadas por la naturaleza de la materia prima con que es producido y por la calidad del proceso de activación.

Para la producción de carbón activado se debe partir de una materia prima con propiedades bien definidas tales como abundancia, dureza, estructura inherente de poros, alto contenido de carbono, bajo contenido de cenizas y alto rendimiento en masa durante el proceso de carbonización. Se ha demostrado que materias primas como la madera, lignito, endocarpios y huesos de algunas frutas como el coco (cáscara) y los huesos de olivas, presentan buenas propiedades para la activación.

Aunque el carbón activado puede fabricarse a partir de un sin número de materiales carbonosos, solamente se utilizan unos cuantos a nivel comercial, debido a su disponibilidad, bajo coste, y a que los productos obtenidos a partir de ellos tienen las propiedades que cubren toda la gama de aplicaciones que el carbón activo puede tener

Además de las materias primas antes mencionadas, también han sido utilizadas otras como el bagazo de caña, meollo de caña, semillas de frijoles, desechos de maíz, alquitrán, resinas, asfalto, algas marinas, huesos, cáscara de arroz, cachaza, turba, paja de caña (Rodríguez y Molina, 1998).

La gran disponibilidad de materia prima para la producción de carbón activado se muestra al tener en cuenta los 14,7 millones de toneladas de maní que produjo China en el año 2008, con un estimado de generación de la biomasa del 30 % por concepto de desperdicio (Li *et al.*, 2010). Las cáscaras del maní representarían un total de 4,4 millones de toneladas de materia prima para la producción de CA

### **Métodos de fabricación**

En general, el proceso de manufactura del C.A contiene dos etapas: carbonización de las materias primas carbonáceas en una atmósfera inerte seguido por la activación de los productos carbonizados. El proceso de activación puede ser de dos formas, física o química. La activación química posee mayor aplicación en la actualidad debido a su baja temperatura de activación y alto rendimiento comparado con la física. (Guo y Rockstraw, 2007).

*Activación física (térmica):* La mayor cantidad de carbón activado que se produce en el mundo, se hace mediante activación con vapor de agua. El proceso completo se lleva a cabo en dos etapas: la carbonización, donde se produce un material conocido como coke, cuyo proceso elimina hidrógeno y oxígeno para dar lugar a una estructura porosa rudimentaria, cuyos poros son tan pequeños y constreñidos para ser considerado un material adsorbente. Una segunda etapa es la etapa de alargamiento de la estructura porosa tal que sea creada una superficie interna accesible (NORIT,). Grosó y Brosa (1999), plantean que en la segunda etapa se lleva a cabo un proceso de gasificación del carbonizado, donde el mismo se expone a una atmósfera oxidante que elimina productos volátiles y átomos de carbono, aumentando el volumen de poros y la superficie específica. Esto se hace en hornos específicos a temperaturas cercanas entre 900°C y 1100°C. A esta temperatura el factor que determina la velocidad del proceso es la reacción química entre el carbón y el vapor. La temperatura es un factor muy importante, ya que por debajo de 900°C, la reacción es tan lenta que no es económicamente factible y por encima de 1100°C, la reacción es controlada por la difusión y ocurre en el exterior de la partícula de carbón, la cual se reduce en tamaño y el interior no es entonces activado. Los agentes activantes que se suelen usar son: oxígeno (raramente a escala industrial), aire, vapor de agua (el más usado) y dióxido de carbono. Un aspecto importante es el gran tamaño de los hornos utilizado en la industria, pues deben ser lo suficientemente grandes (que permitan altos tiempos de residencias), como para lograr el éxito de la activación debido a la reacción relativamente lenta entre el carbón y el vapor. (NORIT). Un diagrama mejorado del proceso de fabricación de carbón activado mediante activación física se muestra en el anexo. El diagrama corresponde a la fábrica de Baracoa, única de su tipo en Cuba.

*Activación química:* Este método solo puede aplicarse sobre materiales orgánicos relativamente blandos y que están formados por moléculas de celulosa. El material se impregna con un agente químico y se calienta en un horno a temperaturas entre 500 y 700 °C. Los agentes químicos reducen la formación de material volátil y alquitrán, aumentando el rendimiento del carbón. El material resultante se lava para la eliminación de agente activante. El tamaño de la partícula con el que se produce el carbón activado

afecta el tamaño de los poros y las características de regeneración del mismo. Los dos tipos de clasificación son: carbón activado en polvo, con diámetro menor o igual a 0,25 mm y el carbón granular, con diámetro superior a los 0,25mm. (Rodríguez y Molina, 1998).

Los agentes químicos que se han utilizado son: cloruro de cinc, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido fosfórico, ácido nítrico y otros. Además, pueden ser empleados hidróxidos alcalinos como hidróxido de potasio e hidróxido de sodio (Macia-Agullo *et al*, 2004; Tseng, 2006), aunque el hidróxido de sodio ofrece mayor interés porque reduce el costo de la activación química y los efectos medioambientales en comparación con la activación con hidróxido de potasio (Perrin *et al*, 2004). Se plantea que el método químico tiene como desventaja, ser más contaminante que el método de activación física o de vapor, pero depende también del agente activante que sea utilizado. Mientras que por otro lado, su ventaja es que se logra un mayor ahorro de energía y un rendimiento más alto. Por lo que se debe valorar en conjunto los beneficios y/o perjuicios del mismo a la hora de utilizarlo.

### **Aplicaciones del carbón activado**

Según Grosó y Brosa (1999), las propiedades del carbón activado, permiten que el mismo tenga un gran número de aplicaciones tanto en fase líquida como en fase gaseosa.

- *Procesos de separación en fase líquida*

En fase líquida, se utiliza carbón activado tanto en polvo como granular y en casos muy particulares, también el peletizado. Entre las principales aplicaciones están la remoción de impurezas que causan color, olor y sabor en agua potable en potabilizadoras, refresqueras y purificadores caseros; en otros líquidos de procesos alimenticios (ejemplo: zumos, vinos, vinagres, destilados), en líquidos de procesos químicos (ejemplo: solventes y fármacos). Se usan para remover compuestos orgánicos y metales ligados a moléculas orgánicas en aguas residuales de origen municipal o industrial, precursores de color que pueden no tener color original, pero que lo causan en una etapa posterior del proceso o después de que el producto se ha envasado y vendido (ejemplo: glucosa de maíz), contaminaciones que interfieren en la cristalización y en el rendimiento de la formación de cristales (ejemplo: industria azucarera), compuestos que causan espumas, impurezas que causan turbidez o precursores de la misma.

Otras de las aplicaciones del CA, se basan en la recuperación de sustancias deseadas: la concentración de un material valioso contenido en una solución diluida, por medio de adsorción y con la posterior recuperación de dicho material por elusión (ejemplo: recuperación de oro y plata).

- *Procesos de separación en fase gaseosa.*

En este caso se utiliza el CA granular. Las principales aplicaciones pueden clasificarse de acuerdo a la remoción:

1- De olores en objetos y lugares públicos, así como en la fabricación de mascarilla para gases, boquillas de cigarrillo, adsorbedores de ozono y vapores de gasolina en el interior de automóviles.

2- De vapores de ácidos, bases u otros compuestos, teniendo en cuenta que cuando los compuestos a adsorber no son adsorbibles en CA, se procede impregnando el carbón en un compuesto químico que reaccione con el contaminante que requiere eliminarse,

3- De etileno generado por frutas y otros vegetales almacenados, mediante adsorción en CA impregnado con un agente oxidante (mediante este procedimiento, se evita la maduración prematura).

4- De compuestos orgánicos en aire o gases de escape provenientes de desengrasado de metales y partes automotrices, recubrimiento de películas, cintas magnéticas, mallas y cintas adhesivas.

- *Filtros para aire, gas comprimido, purificación de agua y aplicaciones biomédicas.*

Los filtros con carbón activado se utilizan generalmente en la purificación de aire, agua y gases, para quitar sabores, olores y otros hidrocarburos del aire y de gases comprimidos.

Se utiliza en purificación del agua de lluvias en zonas donde esta, es usada para usos domésticos. El tamaño del poro del carbón activado y el tamaño de las partículas a filtrar también influyen en la vida útil y capacidad de filtración del filtro. Por lo que, la única forma de saber si un filtro de carbón activado ha dejado de funcionar es hacer un análisis del agua resultante del filtro, pues ni el sabor ni el olor, pueden ser un referente certero. Una vez que se ha saturado un filtro de carbón activado, el agua que pase por él, resultará más contaminada que si no se filtrara.

El carbón activado es usado como agente adsorbente (pastillas de carbón), para tratar envenenamientos y sobredosis por ingestión oral, previendo la absorción del veneno en el estómago, entre otros usos biomédicos.

El incremento en el uso del carbón activado hace necesario mejorar sus propiedades de adsorción. El recubrimiento de carbón activado con material de origen biológico es un nuevo método para la modificación de las propiedades activadas del carbón. Estos materiales son muy abundantes ambientalmente, se ha comprobado que el proceso es efectivo y no canceroso. Uno de materiales biológicos utilizado es la quitosana (Rinaudo, 2006), la cual poseen variados usos en aplicaciones biomédicas.

### **Procedimientos analíticos a utilizar en la caracterización de los carbones activados.**

La fabricación de un producto, lleva aparejado el control de su calidad. En el presente trabajo se realiza una selección de los principales procedimientos analíticos utilizados para el control de la calidad de los carbones activados. Los procedimientos fueron extraídos de artículos internacionales referenciados, por lo que responden a métodos estandarizados. El trabajo con estos procedimientos podría ser de gran utilidad para estudiantes e investigadores en la temática.

***Caracterización de los óxidos superficiales mediante valoración Boehm (Boehm, 2002)***



Una cantidad de muestra de carbón (0,5 g), se deposita en erlenmeyers que contienen 50 mL de soluciones 0,05 mol/L de hidróxido de sodio, carbonato de calcio, hidrógeno carbonato de calcio y ácido clorhídrico. Se homogenizan y se sitúan en agitación durante 24 h a temperatura ambiente. Pasado el tiempo establecido, la suspensión es decantada. Se extrae una alícuota de 10 mL de la solución remanente y se valora con soluciones de ácido clorhídrico o hidróxido de sodio 0,05 mol/L, teniendo en cuenta la solución utilizada inicialmente.

El número de grupos ácidos, se calcula asumiendo que el carbonato de sodio neutraliza grupos lactónicos y carboxílicos y el hidrógeno-carbonato neutraliza solamente grupos carboxílicos. El número de sitios básicos presentes en la superficie del carbón es determinado por la cantidad de ácido clorhídrico que reacciona con la muestra (Kurniawan e Ismadji, 2011).

### ***Estructura del poro***

El análisis se realiza mediante adsorción de nitrógeno a 77 K usando un analizador de sorción volumétrico. Con los resultados obtenidos y la posterior aplicación de la isoterma de BET, se obtienen los valores de superficie específica del catalizador, volumen de la monocapa y volumen del catalizador.

### ***pH<sub>pzc</sub>***

Se usa la técnica de pH-drift, dado por Faria *et al.* (2004). 50 mL de disolución 0,01 N de cloruro de sodio se sitúan en erlenmeyers de 250 mL y se ajusta el pH de las disoluciones entre 2 y 11 con ácido clorhídrico e hidróxido de sodio 0,1 mol/L. A continuación, se pesa una cantidad determinada de carbón (0,15 g), y se adiciona a los frascos, manteniéndolos en agitación durante 48 h a temperatura ambiente. Pasado este tiempo, se mide de nuevo el pH.

### ***Grupos funcionales mediante FTIR***

Se determinan los grupos funcionales presentes en la superficie del carbón utilizando un equipo Infra-rojo con transformada de Fourier (Kurniawan e Ismadji, 2011).

### ***Cinética de adsorción***

Los estudios cinéticos de adsorción permiten determinar el tiempo donde se alcanza el equilibrio de adsorción, o sea cuando la cantidad de soluto adsorbida está entre 90-99 % de la máxima cantidad de adsorbato retenida por el adsorbente en ensayos replicados (Otero, 1999; citado por González, 2005). Este valor de tiempo es usado en la elaboración de las isotermas de adsorción.

De forma experimental, la cinética es posible estudiarla tomando un volumen fijo (100 mL) de una disolución, con concentración conocida, la cual se coloca en un erlenmeyer de 250 mL. Se adicionan 0,6 g de carbón y se sitúa en baño de agua a temperatura fija (30 °C). La mezcla es agitada a 500 rpm hasta alcanzar el equilibrio de adsorción. Durante el experimento se extrae 1 mL de la disolución, se centrifuga y calcula su concentración mediante la medición de su absorbancia.

Para el cálculo son usadas las fórmulas:  $q_e = \frac{(C_o - C_e)V}{m}$  y  $q_t = \frac{(C_o - C_t)V}{m}$ ,

donde  $q_e$  y  $q_t$ , son las cantidades de colorantes adsorbidas en el equilibrio a un cierto tiempo  $t$  (mg/g). (Kurniawan y Ismadji, 2011).

$C_o$  y  $C_e$ , son las concentraciones del colorante al inicio y en fase líquida (mg/L),

$m$ , es la masa del colorante usado.  $V$ , es el volumen de la solución colorante (L).

Los valores se ajustan a las ecuaciones cinéticas correspondientes a los órdenes uno y dos según:

Orden 1:  $q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t})$

Orden 2:  $q_t = q_e \left( \frac{k_2 C_o t}{1 + k_2 C_o t} \right)$  (Ho y McKay 1999),

donde  $k_1$  y  $k_2$ : son las constantes de velocidad de pseudo-primer orden ( $\text{min}^{-1}$ ) y pseudo-segundo orden ( $\text{g mg}^{-1} \text{min}^{-1}$ ), respectivamente.

### ***Experimentos de adsorción***

Con el objetivo de conocer a que isoterma se ajustan los valores experimentales, se realizan estudios con un adsorbato seleccionado, entre los que se tienen: azul de metileno (AM), iodo, melaza y otros (González, 2005). En el caso de que se utilice una disolución de concentración conocida de AM como adsorbato, se mide su absorbancia a una longitud de onda de 664 nm, la cual se prepara adicionando una cantidad fija del adsorbato a 1 L de agua desionizada. Se guarda en frasco ámbar y se mantiene en la oscuridad.

Para llevar a cabo los experimentos, se pesan porciones (de 0,1 a 1,1 g), de CA dentro de erlenmeyers de 250 mL conteniendo 100 mL de disolución de AM. Los frascos son cubiertos con papel de aluminio y colocados en un agitador termostataado, a velocidad y temperatura constante, el tiempo determinado en los estudios cinéticos. A continuación, se centrifuga la solución a una velocidad constante de 4000 rpm durante 5 min. Se extrae el sobrenadante con precaución y se mide el color residual. Se recomienda medir el pH antes y después para detectar algún cambio (normalmente no se observa).

Con los valores de absorbancia medidos en el equilibrio, se calculan las concentraciones en el equilibrio ( $C_e$ , mg/L). La diferencia entre la masa inicial y la calculada en el equilibrio, es igual a la cantidad de adsorbato retenido en el carbón. Los gramos de adsorbato adsorbidos por gramos de carbón ( $q_e$ ), son calculados al dividir la masa retenida de adsorbato en el adsorbente entre la cantidad de carbón. Con los resultados obtenidos, se ensayan las isotermas de adsorción.

Los modelos de Freundlich, Langmuir, son los más comúnmente empleados en los ajustes de las isotermas para el estudio de adsorción de gases, los cuales pueden ser utilizados en los estudios de adsorción en fase líquida (NORIT).

Kurniawan, A. e Ismadji, S. (2011), realizaron los experimentos de las isothermas ensayando a varios pH (3, 7, 11) y diferentes temperaturas (30, 45 y 60 °C).

*Ajuste de la Isotherma de Langmuir.*

La ecuación de la isoterma queda definida de la manera siguiente:

$$q_e = q_{\text{máx}} \left( \frac{kL C_e}{1 + kL C_e} \right), \text{ donde } kL \text{ y } q_{\text{máx}} \text{ son constantes.}$$

Ajustando matemáticamente se llega a:  $\frac{1}{q_e} = \frac{1}{q_{\text{máx}} kL} \left( \frac{1}{C_e} \right) + \frac{1}{q_{\text{máx}}}$

Con el objetivo de hallar las constantes  $q_{\text{máx}}$  y  $kL$ , se plotea  $\frac{1}{q_e}$  vs  $\frac{1}{C_e}$

La naturaleza de la isoterma a ser irreversible, se halla mediante el cálculo del parámetro  $RL$ , para ello se utiliza la ecuación siguiente:

$$RL = \frac{1}{1 + kL C_0},$$

Para lo cual se considera la isoterma irreversible sí  $RL=0$ , favorable sí  $0 < RL < 1$ , lineal sí  $RL=1$  y no favorable ( $RL > 1$ ).

*Ajuste de la Isotherma de Freundlich.*

La ecuación que responde a la isoterma de Freundlich queda definida como:

$$q_e = k_f C_e^{\frac{1}{n}}, \text{ donde } k_f \text{ y } n \text{ son los parámetros de Freundlich representados por la afinidad a la adsorción } \left( \frac{mg}{g} \right) \left( \frac{L}{mg} \right)^{\frac{1}{n}} \text{ y la heterogeneidad del sistema.}$$

## Termodinámica

Conociendo que  $\Delta G^0 = -RT \ln K_d$  y  $\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0$ , se llega a:

$$\ln K_d = \frac{\Delta H^0}{R} * \left( \frac{1}{T} \right) + \frac{\Delta S^0}{R}, \text{ siendo } \Delta H^0 \text{ y } \Delta S^0, \text{ las variaciones de entalpía y entropía, respectivamente. } R: \text{ constante de los gases.}$$

al plotear  $\ln K_d$  vs  $1/T$ , y sabiendo que  $K_d = \frac{q_e}{C_e}$ , se determina el  $\Delta H^0$ , mediante el cálculo de la pendiente de la recta.

## Densidad aparente

Se pesa una cantidad en un volumen dado de una probeta aforada. El procedimiento se repite varias veces (mínimo tres veces), se halla el promedio y se calcula la densidad por el cociente de la masa entre el volumen (Rosabal *et al.*, 2006).

### Índice de Iodo

El número de iodo de los carbones activados se calcula según los métodos estándares ASTM, D 4607-86), mediante la valoración con tiosulfato de sodio. Este índice puede ser usado para estimar el área superficial relativa y la medición de la porosidad (Tongpoothorn *et al.*, 2011).

### Índice de azul de metileno (AM)

El AM es una de las más ampliamente reconocidas moléculas de prueba para valorar la capacidad de remoción de los carbones para tamaños moderados de las moléculas a ser adsorbidas (tamaño de la molécula  $\geq 1,5$  nm)

La disolución de AM, es mezclada con el carbón activado y agitado 200 rpm a temperatura ambiente. Después que el equilibrio es alcanzado, la disolución se filtra y la concentración de azul de metileno se determina mediante espectrofotometría, midiendo la absorbancia a 664 nm. La masa adsorbida en el carbón es calculada según:

$qe = \frac{(Co - Ce)V}{m}$  donde Co y Ce, son las concentraciones del colorante (mg/L) al inicio y en el equilibrio respectivamente, V: volumen de la solución acuosa (L), m: masa del carbón activado usado (Tongpoothorn *et al.*, 2011).

El **área superficial interna de los carbones** puede ser determinada por la adsorción de nitrógeno, pero no existe garantía que toda la superficie esté disponible para la adsorción de compuestos orgánicos, ya que estas moléculas son mucho mayores que la molécula de nitrógeno. Como los poros son de dimensiones moleculares, es posible que ocurra una acción de tamiz, y las moléculas mayores sean rechazadas. Debido a esto, es importante para un material adsorbente tener un área superficial accesiblemente grande y que esté directamente relacionada con la distribución del tamaño del poro.

La **distribución de tamaño del poro** de un carbón y la **estructura macroscópica** puede ser determinada usando un porosímetro de mercurio a alta presión y microscopía electrónica de barrido, respectivamente.

### Conclusiones

Los carbones activados constituyen uno de los productos más utilizados en la industria, debido su gran poder adsorbente, provocado por el área superficial extremadamente grande que poseen. Su uso abarca una inmensidad de aplicaciones que van desde la fabricación de filtros para la purificación de gases y agua, hasta la fabricación de pastillas de carbón para el tratamiento de envenenamiento y sobredosis por ingestión oral. Los análisis químicos relacionados con los CA, tienen la característica fundamental de ser fáciles y atractivos, a opinión de los autores, aunque algunos de los cuales requieran de equipos de última generación. Un aspecto a tener en cuenta es el vínculo que ofrecen los análisis experimentales con la asignatura Química Física II,

impartida en la carrera de Ingeniería Química, pues el tema fundamental; el proceso de adsorción, así como un tema colateral, la cinética; son de vital importancia dentro de la asignatura. El presente material sirve de consulta a estudiantes y profesores que trabajen esta atractiva temática.

## **Bibliografía**

1. AHMADPOUR, A.; DO, D. D. The preparation of active carbons from coal by chemical and physical activation, *Carbon*, 1996, 34, p. 471-474.
2. ATKINS, P.; DE PAULA, J. Atkins' Physical Chemistry (8<sup>th</sup> edition). Univ. de Oxford, 2006.
3. BOEHM, H. P. Surface oxides on carbon and their analysis: A critical assessment. *Carbon*, 2002, 40, p. 145.
4. CHUN, Y.Y.; MOHD KHEIREDDINE, A.; WAN MOHD ASHRI WAN DAUD Review of modifications of activated carbon for enhancing contaminant uptakes from aqueous solutions. *Separation and Purification Technology*. 2007, 52, p 403-415.
5. FARIA, P. C.; ORFAO, J. J.; PEREIRA, M. F. Adsoption od anionic and cationic dyes on activated carbons with different surface chemistries. *Water Res*, 2004, 38, p. 2043.
6. GLASSTONE, S. Tratado de Química Física. (7th edition), Univ. Oklahoma, 1968.
7. GROSO, G.; BROSA, J. El carbón activado, materias primas y aplicaciones. *Química e Industria*. 1999, p 177-179.
8. GUO, Y.; ROCKSTRAW, D. A. Physicochemical properties of carbons from pecan shell by phosphoric acid activation. *Bioresource Technol*. 2007, 98, p 1513-1521.
9. GONZÁLEZ, L. Y. *Elaboración de adsorbentes a partir de lodos de EDARs urbanas para la remoción de contaminantes orgánicos*, 201 h. Tesis en opción del título de Doctor en Ciencias. Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos", Matanzas (Cuba). 2005.
10. HENNING, K. D.; SCHÄFER, S. Impregnated activated carbon for environmental protection. *Gas Separation and Purification*, 1993, 74, p 235-240.
11. HO, Y. S.; MCKAY, G. Pseudo-second order model for sorption processes. *Process Biochem*, 1999, 34, p. 451.

12. IOANNIDOU, O.; ZABANIOTOU, A. Agricultural residues as precursors for activated carbon production—A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2007, 11, p 1966-2005.
13. KURNIAWAN, A.; ISMADJI, S. Potential utilization of *Jatropha curcas* L. press-cake residue as new precursor for activated carbon preparation: Application in methylene blue removal from aqueous solution. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2011, 42, p 826-836.
14. LI, C.G.; DONG, L.Y.; JI, Y.Y.; ZHU, Y.F.; FANG, S.S. Study on extraction of cellulose and removal of hemicelluloses and lignin from peanut hull. *Chin. Agric. Sci. Bull*, 2010, 26, p 350–354.
15. MACIA-AGULLO, J.A.; MOORE, B.C.; CAZORLA-AMOROS, D.; LINARES-SOLANO, A. Activation of coal tar pitch carbon fibres: physical activation vs. Chemical activation. *Carbon*, 2004, 42, p 1367-1370.
16. NORIT (trade mark) Introduction to activated carbon. *Technical Bulletin*. p 2-17.
17. OTERO, M. Gestión de los biosólidos. Aplicación agrícola a pequeña escala. Programa de Doctorado Ecología y Medio Ambiente. España, 1999, p 13-18.
18. PERRIN, A.; CELZARD, A.; ALBINIAK, A.; KACZMARCZYK, J.; MARECHE, J.F.; FURDIN, G. NaOH activation of anthracites: effect of temperature on pore textures and methane storage ability. *Carbon*, 2004, 42, p 2855-2866.
19. RINAUDO, M. Chitin and chitosan: properties and applications. *Prog Polym Sci*, 2006, 31, p 603-32.
20. RODRÍGUEZ, F.; MOLINA, M. Carbones activados a partir de materiales lignocelulósicos. *Química e Industria*, 1998, p 563-571.
21. ROSABAL, J.; VALLES, M.; MATOS, M. Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas. Editorial Félix Varela. La Habana. 2006.
22. SCHRODTER, K.; BETTERMANN, G.; STAFFEL, T.; HOFMAN, T. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, vol A19, VCH Weinheim, p 466.
23. TONGPOOTHORN, W.; SRIUTTHA, M.; HOMCHAN, P.; CHANTHAI, S.; RUANGVIRIYACHAI, C. Preparation of activated carbon derived from *Jatropha curcas* fruit shell by simple thermo-chemical activation and characterization of their physico-chemical properties. *Chemical Engineering Research and Design*, 2011, 89, p. 335-340.
24. TSENG, R. L. Mesopore control of high surface area NaOH-activated carbon. *J. Coll. Sci. Imp. U. Tok*. 2006, 303, p 494-502.

**Anexo.** Diagrama (parcialmente transformado) del flujo tecnológico de la planta de carbón activado de Baracoa, Cuba. Tomado de: González, 2005.

