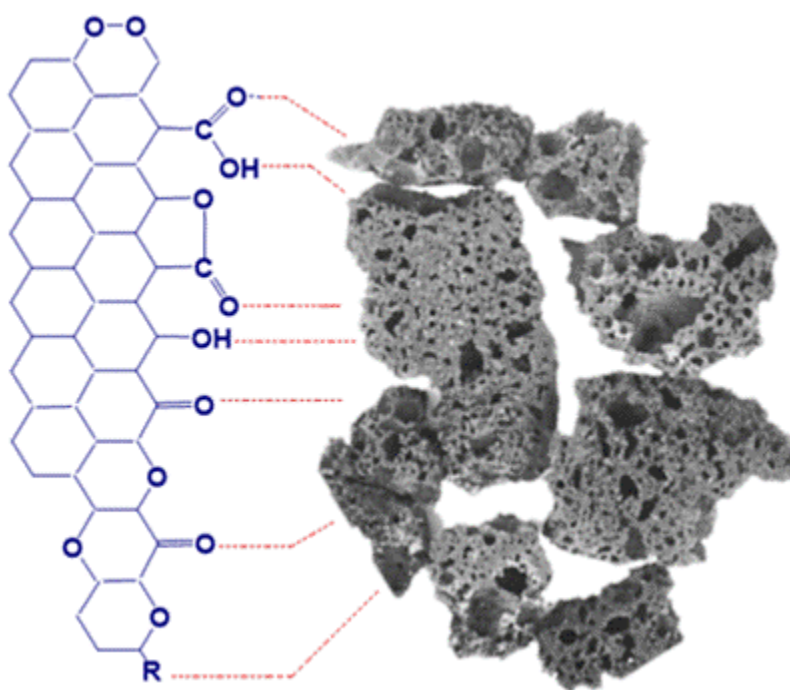


Carbón activado modificado con plasma frío a partir de carbón mineral de la región carbonífera de Coahuila

Activated carbon modified with cold plasma from mineral coal from the carboniferous region in Coahuila



Paola del Rosario Aldaba-Lucio, Rosa Idalia Narro-Céspedes, Marco Antonio García-Lobato, Nancy Verónica Pérez-Aguilar*

Universidad Autónoma de Coahuila, Facultad de Ciencias Químicas, Boulevard Venustiano Carranza y José Cárdenas Valdés, C.P.25280, Saltillo, Coahuila, México.

*Correspondencia para autor: Nancy Verónica Pérez Aguilar
Universidad Autónoma de Coahuila
Correo electrónico: nancyperez@uadec.edu.mx

Resumen

Se llevó a cabo la activación y modificación de un carbón mineral, empleando un agente químico activante y un tratamiento térmico a altas temperaturas, posteriormente se modificó la superficie del material con plasma frío usando un reactivo con el propósito de añadir grupos amino en la superficie del carbón activado (CA). Se logró obtener un material mesoporoso, comprobado por la técnica del índice de azul de metileno (IAM), donde en solución de 330 mg/L: CA-2 removi6 88%, CA-1 el 54% y CA-3 el 52%. Por espectroscopía de infrarrojo se observ6 que despu6s de la modificaci6n se hizo presente una banda en 1565 cm^{-1} atribuida a un grupo amino por la naturaleza del reactivo utilizado durante la modificaci6n.

Palabras clave: Carb6n mineral, carb6n activado, plasma, adsorci6n.

Abstract

The activation and modification of a mineral coal was carried out, using potassium hydroxide (KOH) as activating agent and subjecting it in a tube furnace with an inert atmosphere to a temperature of $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, subsequently the surface of the material was modified with cold plasma at $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 200 W, using ethylenediamine with the purpose of add amino groups on the surface of activated carbon (CA). It was possible to obtain a mesoporous material, verified by the methylene blue index technique where CA-2 removed the 88%, CA-1 the 54% and CA-3 the 52%. By infrared spectroscopy it was observed that after the modification a band was present at 1565 cm^{-1} attributed to an amino group by the nature of the reagent used during the modification.

Key words: Mineral coal, activated carbon, plasma, adsorption.

Introducción

El carbón es uno de los recursos energéticos no renovables más apreciados por la humanidad. En México se consumen entre 15 y 16 millones de toneladas de carbón anualmente, de éstas, alrededor de 7 millones de toneladas son de producción nacional (Servicio Geológico Mexicano, 2020). La explotación continua de fuentes de energía fósil no renovable enfrenta enormes desafíos ante la demanda energética (Wang y col., 2019). Hoy en día, se observa una transición tecnológica hacia el uso de fuente alternas, con la reducción del consumo del carbón y el petróleo, mismos que seguirán utilizándose en la industria química. En este contexto destaca la producción de carbón activado a partir de carbón mineral, un producto con valor agregado que además tiene gran aceptación en la remediación de la contaminación ambiental.

Los carbones activados (CA) son productos derivados de materiales como carbón activado, alúmina activada, arcillas y zeolitas (Valladares y col., 2017), e incluyen una amplia gama de materiales carbonosos y amorfos (Çeçen y Aktas, 2011), están constituidos por microcristales elementales, que exhiben un alto grado de porosidad y un área superficial específica. Estas propiedades se adquieren mediante la activación, que consiste en la eliminación de carbono de los espacios situados entre las formaciones cristalográficas, haciendo que se formen una gran cantidad de huecos o poros (Martínez, 2012). De acuerdo con la clasificación de la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) existen tres grupos principales en función del tamaño de su diámetro, microporos (menor que 2 nm), mesoporos (entre 2 y 50 nm) y macroporos (mayor que 50 nm).

El tamaño y la distribución de los poros pueden controlarse desde la selección del precursor, las condiciones de preparación y el método de activación, que puede ser físico, químico o una combinación de ambos. Se han reportado diferentes procedimientos para la activación, una de las más frecuentes consiste en la inmersión del precursor en un material reactivo. Para la activación química es común usar agentes como, HNO_3 , H_2SO_4 , NaClO , KMnO_4 , $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, H_2O_2 , H_3PO_4 , y KOH (Rodríguez y col., 2014), o bien, realizando un tratamiento térmico con amoníaco gaseoso (300 °C) (Kharrazi y col., 2020). Este tipo de agentes crean la porosidad de la estructura, aunque también se puede activar con métodos físicos utilizando agentes oxidantes como CO_2 , N_2 , H_2O , aire, entre otros, consiste básicamente en una gasificación controlada del carbonizado. En este proceso se calienta el material a temperaturas elevadas (800 -1000 °C) en una atmósfera reactiva donde se elimina el carbono originando la porosidad, de esta forma la superficie porosa del carbón activado adsorbe y retiene solutos y gases con un área de superficie de adsorción alta (500–1500 m^2/g), mientras que el volumen de poro oscila entre 0.7 y 1.8 cm^3/g (Giraldo y col., 2020).

El tipo de activación que se debe dar a los carbones para obtener las características de área superficial y volumen de poro antes mencionadas, depende del tipo y origen del precursor, afinidad del mismo con el agente y atmósfera activante, así como la relación de concentración (volumen de agente activante/ masa de material) (Caicedo y col., 2019). De esta forma un carbón activado puede ser activado para llevar a cabo la adsorción de contaminantes ambientales.

Para modificar la superficie de un material carbonáceo se ha aplicado la tecnología del plasma, con el objetivo de cambiar sus propiedades, con la ventaja de que los tiempos de reacción son considerablemente más cortos comparados con otros métodos químicos (Wangsheng y col., 2021). El plasma es un gas ionizado, con igual número de cargas eléctricas positivas y negativas, el estado de plasma se alcanza cuando la mayor parte de las partículas que lo componen adquieren suficiente energía para lograr su ionización y liberar electrones. El plasma frío inducido por irradiación de microondas permite la preparación de polvos porosos y la modificación de su superficie en corto tiempo (Norikazu y col., 2007).

El objetivo del presente estudio es valorar el efecto del plasma frío sobre la química de la superficie de un carbón activado preparado con un agente químico alcalino y un método térmico, para evaluar si este material tiene las características de porosidad y química superficial adecuados para utilizarlo como adsorbente.

Materiales y Métodos

Preparación de la muestra de carbón

Se adquirió una muestra de carbón mineral con origen en la cuenca “Las Esperanzas”, tajo “La Conquista” del municipio de Sabinas, Coahuila. El procedimiento de preparación del material que se siguió en el laboratorio consistió en su homogenización, molienda y clasificación por tamizado con las cribas US std 20, 30, 40, 50, 70, 100, 200, 270 y base, las cuales se agitaron con un rotap W.S. TYLER, RX-812 durante 15 minutos. La masa de carbón retenida en cada tamiz se recuperó y se seleccionó la fracción retenida en las mallas 30-50, con tamaños entre 300-600 μm . Este material se identificó como CM y se utilizó como precursor para procesarlo utilizando un agente activante y un método térmico, y posteriormente modificarlo con plasma. Durante el procesamiento, se obtuvieron varias muestras de materiales carbonáceos, que se caracterizaron por diferentes técnicas y además fueron comparados con un carbón activado grado reactivo analítico de la marca Sigma Aldrich (CAS 7440-44-0) que se identificó como CA-1.

Activación del carbón mineral

Primero se utilizó un método de activación química, con 20 g de CM en un vaso de precipitado impregnado con una solución al 60% de KOH, la mezcla obtenida se colocó en una parrilla de agitación a 85°C y 150 rpm durante 3h. Después de este lapso se dejó reposar durante 24h. Posteriormente, el carbón impregnado se calentó en un horno FELISA a 200 °C durante una hora. Finalmente se completó el tratamiento en un horno CARBOLITE IGERO 30-300° a 700 °C a razón de 10°C/min, en atmósfera de N₂ con flujo de 5 L/min, durante 1h.

El material obtenido se lavó con una solución 0.01 mol/L de HCl y agua desionizada hasta alcanzar un pH~7 medido con un potenciómetro Thermo ORION STAR A211, finalmente se secó en un horno FELISA a 100 °C durante 2h para eliminar la humedad, esta muestra se nombró CA-2.

Modificación del carbón activado con plasma

Para la modificación del CA se puso en contacto 2 g de CA-2 con 5 ml de etilendiamina en un horno de plasma de radiofrecuencia operando a temperatura ambiente, con potencia de 200W durante 15min. La muestra obtenida se identificó como CA-3.

Caracterización de muestras

Las propiedades físicas, fisicoquímicas y químicas de los carbones obtenidos durante el procedimiento se midieron con las siguientes pruebas.

a) Ángulo de contacto

La medición del ángulo de contacto es una técnica para determinar la energía de la superficie, la adherencia de la superficie y la humectabilidad. Si la superficie del sustrato tiene una alta afinidad de humectación con las moléculas de líquido, la gota de líquido se esparcirá completamente sobre la superficie sólida, lo que dará como resultado un ángulo de contacto de 0° (Yuqiang y col., 2020). En el caso del agua, la superficie sólida se considera hidrófila si el ángulo de contacto con el agua es inferior a 90° y como hidrófoba si el ángulo de contacto con el agua es superior a 90° . La química y la textura de la superficie son características cruciales para la repelencia al agua (Barhoum y col., 2018).

La prueba del ángulo de contacto se determinó con una gota de agua como disolvente inorgánico y una de metanol como disolvente orgánico, que se depositaron sobre la superficie de cada muestra de carbón soportadas sobre un portaobjetos, como se ilustra en el esquema de la Figura 1. La imagen proyectada de la gota sobre cada muestra se capturó con una cámara fotográfica de 16 megapíxeles f/2.2. Las imágenes se procesaron con las aplicaciones de uso libre Adobe Photoshop Express y Angle Meter.

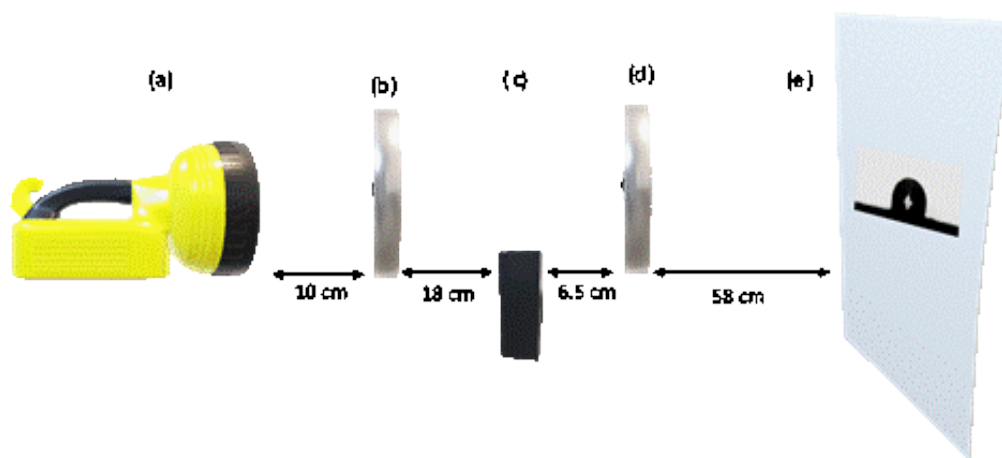


Figura 1. Esquema del sistema para medir el ángulo de contacto: (a) fuente de luz; (b, d) lentes; (c) portamuestra; (e) pantalla de proyección.

b) Slurry point

Esta técnica se realizó de acuerdo con el procedimiento señalado en la norma ASTM D-3838-80, para determinar el pH de un extracto de agua en contacto con carbón activado (Rojas y col., 2016).

El ensayo consistió en colocar 50 mg de cada una de las muestras de los carbones en viales de vidrio, añadiendo 10 ml, relación 5:1 mg/ml de agua desionizada con pH~5.5 y se registró su pH inicial. Las muestras permanecieron en una Incubadora PRENDO-INO650V-7 a 25 °C durante 48 h. Después de este lapso, se midió y se registró el pH final de cada muestra con un potenciómetro Thermo ORION STAR A211.

c) Índice de azul de metileno

El índice de azul de metileno (IAM) es un ensayo de decoloración que indica la capacidad de un sólido poroso de adsorber esta molécula que, por su tamaño (aproximadamente de 0.84 nm), no puede acceder a los microporos. El valor del IAM se define como el número de mililitros de una disolución estándar de este colorante, que es decolorada por 0.1g de carbón activado (Giraldo y col., 2008).

En este trabajo se determinó el IAM de manera indirecta, por medio de las isothermas de adsorción del colorante, para lo cual se prepararon soluciones estándar de concentración inicial entre 100 y 700 mg/L. En tubos falcon se depositaron 10 mL de cada una de las solución en contacto con 10 mg de carbón de cada una de las muestras, los tubos permanecieron en una Incubadora PRENDO-INO650V-7 a 25 °C y 150 rpm durante 48h. Después de este tiempo, los tubos se colocaron en una centrifugadora Sigma 2-16KL a 25 °C y 150 rpm durante 5min. Finalmente, las muestras se filtraron y la concentración del colorante se determinó con un espectrofotómetro UV-Vis UNICO con la longitud de onda de 560 nm. La masa adsorbida de AM sobre cada muestra se calculó con un balance de masa, de acuerdo con la ecuación 1:

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{m} \quad (1)$$

donde:

q_e es la masa de colorante adsorbida sobre la superficie de cada muestra, expresada en mg de colorante/g de muestra; C_0 y C_e son la concentración inicial y en el equilibrio del colorante expresados en mg/L; V es el volumen de la solución en L; y m es la masa de muestra del adsorbente en g, en contacto con la solución.

Los datos del equilibrio de adsorción, q_e y C_e , se analizaron con el modelo de isoterma de Freundlich y de Langmuir, con un método de mínimos cuadrados, para calcular los parámetros de la adsorción.

d) Espectroscopía de infrarrojo (FTIR-ATR):

FTIR es una técnica utilizada para determinar las señales originadas por diferentes modos de vibración de los enlaces moleculares activos en IR o enlaces en muestras orgánicas o inorgánicas en forma cristalina, microcristalina o amorfa (Barhoum y col., 2018). Los análisis mediante espectroscopía de infrarrojo, se realizaron en un Espectrofotómetro FTIR-ATR Perkin Elmer-Frontier en la región de infrarrojo medio ($600\text{-}400\text{ cm}^{-1}$) con 16 escaneos por minuto.

Resultados y Discusión

La química de la superficie de una muestra así como su textura son características que explican su comportamiento cuando está en contacto con un disolvente como el agua. La Figura 3 muestra las imágenes obtenidas para el ensayo de ángulo de contacto de las diferentes muestras de carbón. En la Figura 2c, se observó el perfil de la gota de agua depositada sobre la superficie del CM, como prueba de una superficie hidrofóbica, porque no presenta una total afinidad entre la superficie del carbón mineral y las moléculas del agua (Barhoum y col., 2018). En contraste, la Figura 3d mostró que el metanol se dispersó completamente sobre la superficie de CM, debido a la afinidad entre el disolvente orgánico y la muestra, que es de naturaleza orgánica. Comparando con las muestras de carbón activado preparado CA-2, el carbón modificado con plasma, CA-3, así como el de grado reactivo analítico, CA-1, todos mostraron afinidad con agua, debido a que la superficie de estos materiales mostró un grado relativo de oxidación, lo que favorece la interacción con el agua por puentes de hidrógeno. Todas las muestras presentaron afinidad con el disolvente orgánico. Entonces, se comprobó que la activación y modificación del carbón cambiaron la polaridad de la superficie de estos materiales por una de carácter hidrofílico, favoreciendo su humectación cuando está en contacto con el agua.

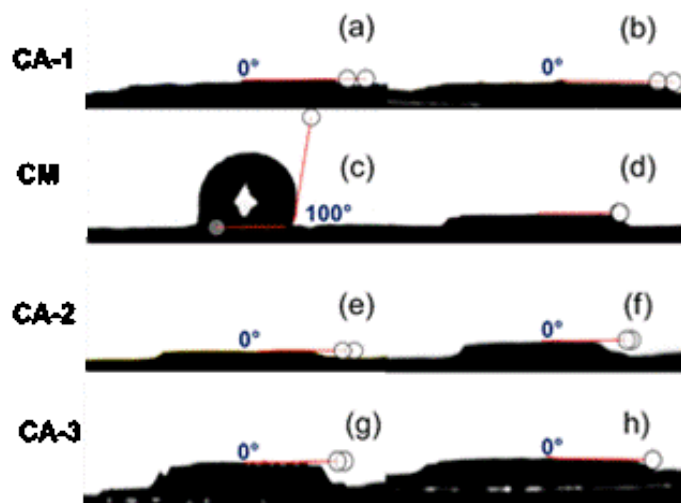


Figura 2. Muestra de carbón grado reactivo analítico CA-1 con (a) agua, (b) metanol; muestra del precursor CM con (c) agua, (d) metanol; muestra de carbón activado CA-2 con (e) agua, (f) metanol; muestra de carbón activado modificado con plasma, CA-3 con (g) agua, (h) metanol.

Con el ensayo del slurry point se determinó el pH del agua en el equilibrio con cada muestra, este pH de equilibrio es similar al pH del punto de carga cero, que indica el valor del pH en el que la carga neta de la muestra es neutra, debido a que la concentración de grupos funcionales con carga positiva y con carga negativa es igual. La Tabla 1 presenta los datos del pH del slurry point o punto de lodo, se observó que el de CM fue ligeramente ácido, probablemente por la presencia de algún contaminante como sulfuro de hierro, cloruros, o diferentes sales. Después de los tratamientos de activación y de modificación el pH fue alcalino, 9.8 para CA-2 y 10.6 para CA-3, en el primer caso, porque se utilizó hidróxido de potasio como agente de activación, y en el segundo caso, por utilizar etilendiamina que añadiría grupos básicos nitrogenados (aminas) sobre la superficie del material. El CA-1 fue el más ácido de todas las muestras, debido a que de acuerdo con el fabricante, este material se activó con un reactivo ácido.

Tabla 1. pH del Slurry Point (punto de lodo).

Muestra	CA-1	CM	CA-2	CA-3
pH _{SP}	5.4	6.0	9.8	10.6

La técnica de FTIR_ATR permitió obtener los espectros de las muestras en estudio. El del precursor CM (Figura 3), en el que se asignaron los picos característicos en 3391 cm^{-1} al enlace del grupo hidroxilo (OH). Los picos a 2919 cm^{-1} y 2861 cm^{-1} correspondieron al estiramiento de tensión de compuestos alifáticos C-H; las señales en 1599 cm^{-1} y 1493 cm^{-1} se asignaron a enlaces C=C presentes en carbonos aromáticos o a enlaces insaturados, el pico de 1375 cm^{-1} correspondió a un enlace CH₃, las bandas entre 1031 cm^{-1} y 1010 cm^{-1} fueron debido a la flexión C-O, y finalmente las señales de 866 cm^{-1} , 800 cm^{-1} y 746 cm^{-1} dan lugar a hidrocarburos aromáticos como el benceno.

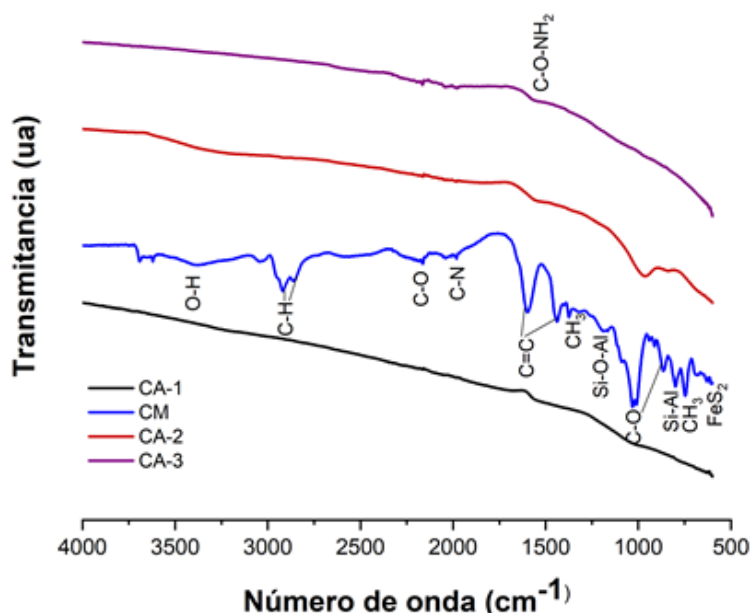


Figura 3. Espectro FTIR-ATR de CM, CA-1, CA-2 y CA-3.

Para determinar si los carbones activados preparados desarrollaron una textura mesoporosa, se hizo la prueba del ensayo de adsorción del colorante azul de metileno, que se recomienda como una forma sencilla, rápida y económica para cuantificar la presencia de mesoporos en un adsorbente. En este caso, los datos se obtuvieron como se describió en la sección experimental inciso (c), y se analizaron con dos modelos de isoterma de adsorción, el modelo de Langmuir y el modelo de Freundlich. Sólo se reportan los resultados registrados con el modelo de Freundlich, ya que mostró un mejor ajuste de los datos experimentales. El modelo de Freundlich es un ecuación que describe el comportamiento de adsorción sobre una superficie heterogénea, o con grupos funcionales diferentes, de acuerdo con la ecuación (2):

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (2)$$

donde:

q_e es la concentración de colorante en el sólido (mg/g); K_F es la constante de Freundlich relacionada con la capacidad de adsorción (mg/g); C_e es la concentración en equilibrio en fase líquida (mg/L); $1/n$ es la intensidad de la adsorción.

Los datos experimentales de las isotermas de adsorción del azul de metileno sobre CA-1, CA-2 y CA-3 (Figura 4) mostraron que la adsorción podría estar ocurriendo por un mecanismo de acumulación de varias capas de las moléculas del adsorbato sobre la superficie del adsorbente. Esto se observó porque la masa adsorbida aumentó de forma exponencial conforme se incrementó la concentración del colorante en la solución. Por esa razón, el modelo de isoterma de Freundlich representó mejor la tendencia de los experimentos, lo que se reflejó en los valores de R^2 . Esto no se observó para CA-1, en el que el último dato podría sugerir que después de cierta concentración, el colorante podría desorberse hacia la solución. Los parámetros de la isoterma se presentan en la Tabla 2, la constante n representa el factor de heterogeneidad y su valor indica el tipo de proceso de adsorción del que se trata. Cuando $n < 1$ se trata de un proceso de tipo químico, si $n > 1$ se favorece una adsorción de tipo físico (Valenzuela, A. y Torres, J., 2020). Considerando los valores del parámetro n , es probable que la adsorción del colorante sobre los carbones activados preparados sea de tipo químico.

Comparando las constantes de Freundlich, K_F , la de CA-2 fue 2.2 y 1.16 veces mayor que CA-3 y CA-1, respectivamente. También se comparó la cantidad removida del colorante por cada muestra de carbón activado, para la concentración inicial de AM en solución de 330 mg/L: CA-2 removió 88%, CA-1 el 54% y CA-3 el 52%. La reducción de la capacidad de remoción entre CA-2 y CA-3 podría explicarse por la adición de grupos nitrogenados en el tratamiento con plasma, es probable que existió una obstrucción de algunos poros, reduciendo la superficie interna disponible para la adsorción.

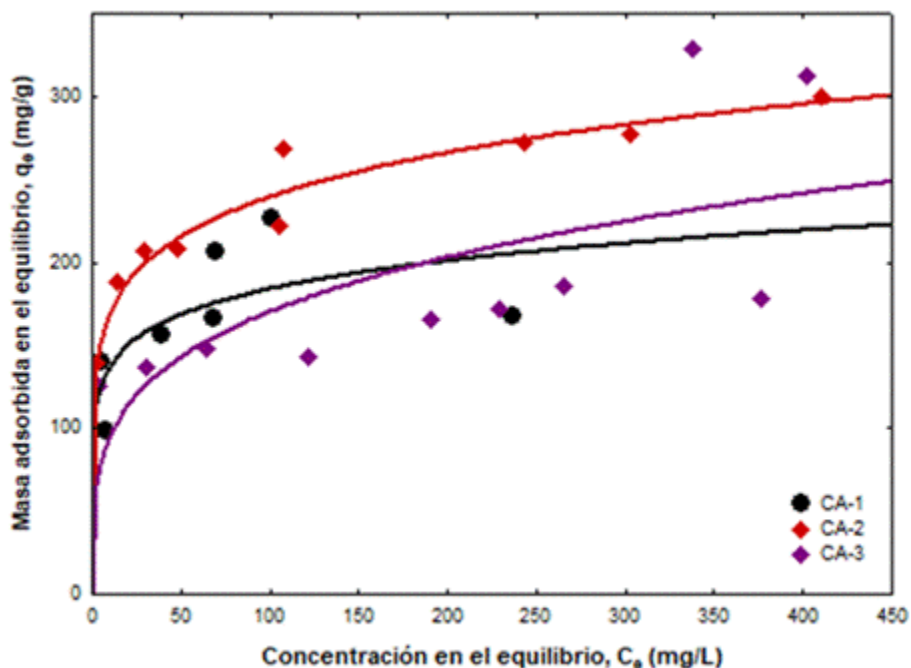


Figura 4. Isotermas de adsorción de azul de metileno sobre carbones activados: CA-1 (círculos en color negro), CA-2 (rombos en color rojo) y CA-3 (rombos en color violeta), a pH 5.5 y 25°C, analizados con el modelo de isoterma de adsorción de Freundlich (líneas continuas).

Tabla 2. Parámetros de la Isoterma de adsorción de Freundlich.

Muestra	K_F (mg/g)	n	R^2
CA-1	103	0.12	0.68
CA-2	120	0.15	0.97
CA-3	54	0.25	0.67

Al comparar los resultados de esta investigación con los reportados por Acevedo y col., (2016) en el que utilizaron el mismo agente de activación y un precursor de composición semejante al de esta investigación, se obtuvo un comportamiento similar en la remoción del colorante. Estos investigadores registraron 99% de remoción de AM/g de carbón activado para una concentración inicial de 150 mg/L de AM. Los carbones activados que se prepararon, CA-2 y CA-3, removieron 100% y 73%, respectivamente, mientras que el de referencia, CA-1, removió 86%.

Entonces, los resultados anteriores han demostrado que el carbón activado preparado a partir de carbón mineral sub-bituminoso de Coahuila es adecuado para obtener un adsorbente mesoporoso, que puede utilizarse en la remediación de la contaminación del agua.

Conclusiones

Con la adecuada elección del agente de activación y las condiciones del tratamiento térmico utilizado, se puede preparar carbón activado, a partir de carbón mineral sub-bituminoso de Coahuila. Los ensayos utilizados demuestran que estos carbones activados tienen textura mesoporosa, que los hacen adsorbentes adecuados para utilizarse en la remediación de la contaminación del agua.

Agradecimientos

Se agradece al CONACYT por la beca otorgada no. 1038621 y a la MC Cynthia Luévano Martínez del Departamento de Análisis Instrumental de la Facultad de Ciencias Químicas de la UadeC, al al Dr. Luis Fernando Mora por el apoyo en los análisis realizados.

Referencias

Barhoum, A., García, M., Rahier, H., Van, G. (2018). Physicochemical characterization of nanomaterials: polymorph, composition, wettability, and thermal stability. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-51254-1.00009-9>

Caicedo-Salcedo, O.; Vargas-Delgadillo, D.; Giraldo, L.; Moreno-Piraján, J. (2019). Data of preparation and characterization of activated carbon using two activant agents and mango seed as precursor material. *Data in Brief*. 27:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2019.104769>

Çeçen, F., Aktaş, Ö. (2011). *Fundamentals of Adsorption onto Activated Carbon in Water and Wastewater Treatment*. Alemania: Ed. Wiley-VCH

Giraldo, L., García, V., Moreno, J. (2008). Caracterización superficial en fase gas y líquida de carbones activados. *Rev. Ing.* 27:7-16.

Giraldo, L., Bernal Fernandez, V., & Moreno-Piraján, J. C. (2020). Thermodynamic data of phenol adsorption on chemically modified activated carbons. *Data in Brief*. 29:1-6. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105240>.

Kharrazi, S., Mirghaffari, N., Dastgerdi, M., Soleimani, M. (2020). A novel post-modification of powdered activated carbon prepared from lignocellulosic waste through thermal tension treatment to enhance the porosity and heavy metals adsorption. In *Powder Technology*. (Vol. 366). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.065>

Martínez, A. (2012). *Desarrollo de carbones activados a partir de residuos lignocelulósicos para la adsorción y recuperación de tolueno y n-hexano*. Tesis de Doctorado. Universidad San Jorge. Villanueva de Gállego.España.

Norikazu, K, Yamada, H., Yajima, T., Sugiyama, K. (2007). Surface properties of activated carbon treated by cold plasma heating. *Thin Solid Films.* 515:4192–4196. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2006.02.057>

Rodríguez, P., Giraldo, L., Moreno-Piraján, J.C. (2014). Modificación de la química superficial de carbones activados. Efecto de la oxidación con soluciones de HNO₃ y H₂O₂ sobre la remoción de Cadmio (II) en solución acuosa. *Revistes Catalanes Amb. Accés Obert.* 71:49-56.

Servicio Geológico Mexicano (2020). PROGRAMA Institucional del Servicio Geológico. Diario Oficial de la Federación.

Rojas, J., Gutiérrez, L., Cristóbal, E., Colina, G. (2016). Obtención y caracterización de carbón activado obtenido de lodos de plantas de tratamiento de agua residual de una industria avícola. 17: 453–462 <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.11.005>

Valenzuela, A., Torres, J. (2020). Remoción de colorantes azoicos (A5 y R40) con carbón activado de cáscara de nuez. *Ingeniería, investigación y tecnología.* 21(3). <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21.3.027>

Valladares, M., Valerio, C.; de la Cruz, P.; Melgoza, R. (2017). Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín,* 16(31), 55–73. <https://doi.org/10.22395/riium.v16n31a3>

Wang, J.; Wang, Z., Vieira, C, Wolfson, J., Pingtian, G., Huang, S. (2019). Review on the treatment of organic pollutants in water by ultrasonic technology. *Ultrasonics Sonochemistry.* 55, 273–278. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.01.017>

Wangsheng, Y., Lei, Z., He, X., Hui, W., Xu, P., Shengji, W., Wei, Y., Jie, Z. (2021). Highly dispersed transition metal oxide-supported activated carbon prepared by plasma for removal of elemental mercury. *Fuel.* (286), 119-427. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119427>

Yuqiang, M., Qiang, L., Wencheng, X., Yijiang, L., Guangyuan, Xie., Yaoli, Peng. (2020). Pore wetting regulation of porous active carbon by sodium oleate and its influence on particles-bubble attachment: A guidance for improving porous mineral floatability. 375, 445-452. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.001>