

SÍNTESIS DE CARBONES ACTIVADOS CON SEMILLAS DE CHIRIMOYA Y SU APLICACIÓN EN LA ADSORCIÓN DE COLORANTES TEXTILES

Synthesis of activated carbons using custard apple seeds and their application in the adsorption of textile dyes

Alejandra Alicia PELÁEZ CID^{1*}, Diana Laura LÓPEZ HERNÁNDEZ¹,
Esmeralda GÓMEZ MERINO² y Ana María HERRERA GONZÁLEZ²

¹ Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Edificio ING1, Ciudad Universitaria, Colonia San Manuel, C.P. 72570, Puebla, Puebla, México.

² Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Ciudad del Conocimiento, Colonia Carboneras, C.P. 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

*Autor para correspondencia: alalpeci@me.com

(Recibido: enero 2023; aceptado: septiembre 2023).

Palabras clave: residuos de chirimoya, adsorbentes carbonáceos, remoción de colorantes, tratamiento de agua residual.

RESUMEN

En este trabajo se describe la preparación de cinco carbones activados a partir de un residuo vegetal, la semilla de chirimoya (*Annona cherimola*). Todos los carbones fueron activados químicamente con H_3PO_4 , tres de ellos se calcinaron a 673 K (CarChiQ, CarChiQC y CarChiQE) y los otros dos a 873 K (CarChiQC600 y CarChiQE600) por tres horas. Los carbones fueron caracterizados por adsorción de nitrógeno, número de azul de metileno, densidad aparente, microscopía electrónica de barrido y espectroscopía infrarroja. Además, se determinó el punto de carga cero que indicó el carácter ácido de todos los carbones. Se siguió la cinética de adsorción con el colorante azul de metileno, lo que permitió establecer el tiempo de contacto entre las soluciones de colorante y los carbones. La cinética de adsorción para los carbones se ajustó al modelo de pseudo segundo orden. Se estudió la adsorción de soluciones acuosas de colorantes textiles de tipo ácido y básico con una concentración inicial de 300 mg/dm^3 . Los colorantes básicos se adsorbieron en CarChiQ entre 82 y 99.9 %, en CarChiQE entre 65 y 92 % y en CarChiQC, CarChiQC600 y CarChiQE600 prácticamente se adsorbieron 100 %. El colorante ácido se adsorbió en menor proporción sobre los carbones, con excepción de CarChiQC600 y CarChiQE600 con adsorción total. Se trató un agua residual conteniendo colorantes textiles, la calidad de ésta mejoró después del tratamiento de adsorción, reduciéndose la demanda química de oxígeno hasta 76 % y el color hasta 98 %.

Key words: Custard apple residue, carbonaceous adsorbents, dyes removal, wastewater treatment.

ABSTRACT

This work describes the preparation of five activated carbons from a vegetable waste: custard apple seeds (*Annona cherimola*). All carbons were chemically activated with phosphoric acid. Three of them were calcinated at 673 K (CarChiQ, CarChiQE, and CarChiQC) and the other two (CarChiQE600 and CarChiQC600) at 873 K for three

hours. The carbons were characterized by nitrogen adsorption, methylene blue number, bulk density, scanning electron microscopy, and infrared spectroscopy. In addition, the point of zero charge indicated the acid character of the carbons. To establish the contact time between the solutions of dye and the carbons, the adsorption kinetics of methylene blue dye was followed. The adsorption kinetics for all the carbons fit the pseudo second order model. The adsorption of aqueous solutions containing anionic and cationic dyes with an initial concentration of 300 mg/dm³ was studied. It was found that, using CarChiQ, basic dyes were adsorbed in percentages ranging between 82 and 99.9 %; with CarChiQE, between 65 and 92 %; and using CarChiQC, CarChiQE600, and CarChiQC600, the adsorption almost reached 100 %. The acid dye was adsorbed in a smaller proportion, but in CarChiQE600 and CarChiQC600, its adsorption was total. A wastewater containing textile dyes was treated, and its quality was improved after the adsorption treatment. The chemical oxygen demand was reduced up to 76 % and its color until 98 %.

INTRODUCCIÓN

La escasez del agua es un tema que preocupa a nivel mundial, las causas de tal problemática son muy diversas. Entre algunas de esas se tienen la sobreexplotación de los mantos acuíferos por el alto consumo del agua durante las actividades agropecuarias (70 %), industriales (22 %) y el uso desmedido que se hace de este recurso en las grandes ciudades (8 %). Aunado al consumo excesivo del agua, se presenta simultáneamente el problema de su contaminación (Gupta y Suhas 2009).

Diversas industrias, como la textil, alimentaria, automotriz, cosmética, papelería, farmacéutica y de plásticos, entre otras, hacen uso de colorantes durante sus procesos productivos (Peláez-Cid et al. 2008, Yagub et al. 2014, Aboua et al. 2015, Güzel et al. 2015). Aunque se ha reportado que la industria textil es la mayor consumidora de materiales colorantes, con un 50 % de la producción mundial (Peláez-Cid et al. 2008). La creciente demanda mundial de nuevas telas aumenta el consumo de colorantes, que se estima en 8×10^8 kg anuales (Riera-Torres y Gutiérrez 2010, Güzel et al. 2015) y, durante los procesos de teñido en las fábricas de acabados textiles, se utilizan 0.2 m³ de agua por kilogramo de tela teñida (Peláez-Cid et al. 2020). Adicionalmente, estos procesos no son 100 % eficientes, conteniendo las aguas residuales concentraciones de colorantes entre 10 y 250 mg/dm³ (Riera-Torres y Gutiérrez 2010, Peláez-Cid et al. 2020). Particularmente los colorantes reactivos, utilizados principalmente en el teñido del algodón, representan aproximadamente el 12 % de la producción mundial de los colorantes sintéticos comercializados. El principal problema ambiental asociado con los colorantes reactivos es su bajo agotamiento. La fijación de estos colorantes en las telas oscila entre el 60 % y el 90 %,

por lo que se liberan en las aguas residuales cantidades sustanciales de colorantes hidrolizados que no se fijaron (Riera-Torres y Gutiérrez 2010, Güzel et al. 2015). Por lo tanto, es necesario utilizar métodos de tratamiento adecuados para poder mejorar la calidad de las aguas residuales o incluso reutilizar el agua consumida. Aunque existen diversos métodos de tratamiento de los efluentes textiles, como adsorción, coagulación-floculación, oxidación avanzada, filtración con membranas (Yagub et al. 2014, Aboua et al. 2015) o los electroquímicos (Riera-Torres y Gutiérrez 2010), la adsorción con carbón activado preparado a partir de residuos vegetales ha probado ser un método efectivo y barato para la eliminación del color (Yagub et al. 2014, Aboua et al. 2015, Peláez-Cid et al. 2016, Peláez-Cid et al. 2020). El carbón activado tradicionalmente se fabrica utilizando como materia prima la madera, carbón mineral, cáscara de coco o huesos de animales (Gupta y Suhas 2009, Peláez-Cid et al. 2016), aunque con el fin de abaratar su producción y disminuir la generación de residuos sólidos, actualmente se propone la utilización de residuos vegetales generados en grandes cantidades como resultado de actividades agrícolas y de procesamiento de alimentos (Hernández-Montoya y Bonilla-Petriciolet 2012, Aboua et al. 2015, Peláez Cid et al. 2016, Peláez Cid et al. 2020). Regularmente los residuos se seleccionan en función de su abundancia y disposición regional (Hernández-Montoya y Bonilla-Petriciolet 2012, Aboua et al. 2015). En la mayoría de los casos las propiedades de los carbones, como su superficie específica, porosidad, densidad, punto de carga cero o grupos funcionales presentes dependen en gran medida de la materia prima utilizada. Aunque es posible modificar estas propiedades cambiando las condiciones de activación y carbonización de los materiales precursores. Los parámetros más importantes

por considerar durante la preparación del carbón activado son el agente activante, siendo el H_3PO_4 uno de los más utilizados, así como la relación de masa de precursor/agente activante, ya que este favorece el desarrollo de la porosidad. También la temperatura juega un papel significativo en el desarrollo de la porosidad y asegura la completa transformación de los compuestos orgánicos, presentes en los precursores celulósicos, en estructuras de grafeno. Un tiempo de carbonización corto y una velocidad de calentamiento lenta, permiten obtener el máximo desarrollo de porosidad, minimizando la pérdida del material debido a una combustión excesiva (Hernández-Montoya y Bonilla-Petriciolet 2012).

La chirimoya (*Annona cherimola*) se considera una fruta tropical exótica originaria de Perú, que también se cultiva ampliamente en México. La chirimoya es una fruta perteneciente a la familia de las anonáceas. Su pulpa suave, cremosa y de sabor dulce, contiene numerosas semillas brillantes de color café oscuro, ovaladas y aplanadas, repartidas en el interior de la pulpa. El estado de Michoacán es el principal productor de chirimoya en México seguido por los estados de Morelos e Hidalgo. Sólo Michoacán produjo 367 500 kg de fruta en 2010 (Portal frutícola 2011).

El objetivo del trabajo fue sintetizar carbones activados a partir de semillas de chirimoya para evaluar su capacidad de adsorción de colorantes textiles presentes en soluciones acuosas y en agua residual.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las semillas de chirimoya se colectaron en el estado de Puebla, México, después del consumo de la fruta fresca, se lavaron con agua y se secaron al sol. Las semillas están constituidas de dos partes que son el embrión y la cascarilla que lo cubre. Del peso

total de la semilla, el embrión representa aproximadamente el 64 % y la cascarilla el 36 %. En la **figura 1** se pueden apreciar las imágenes de las semillas de chirimoya (**Fig. 1A**), de los embriones (**Fig. 1B**) y de las cascarillas (**Fig. 1C**); los tres materiales fueron utilizados como precursores para la preparación de los carbones activados. Las semillas son compactas y rígidas con un aspecto leñoso debido a las cascarillas y los embriones son suaves y oleosos.

Preparación de los carbones activados (CarChiQ, CarChiQC, CarChiQE, CarChiQC600 y CarChiQE600)

Para CarChiQ se usó la semilla de chirimoya completa, con el embrión y la cascarilla (**Fig. 1A**). Se separaron los embriones (**Fig. 1B**) de las cascarillas (**Fig. 1C**) y se trataron por separado para sintetizar CarChiQC y CarChiQC600 con las cascarillas y CarChiQE y CarChiQE600 con los embriones. Las semillas, las cascarillas y los embriones se cortaron en cuatro partes y se tamizaron para obtener partículas con un tamaño superior a 0.84 mm. Se seleccionó el hidrácido H_3PO_4 como agente de activación ya que es el reactivo químico más utilizado para la síntesis de carbón activado, debido a que favorece un alto desarrollo de la porosidad de manera ordenada. El ácido de Lewis $ZnCl_2$ es otro agente de activación utilizado en la síntesis del carbón que también produce alta superficie específica, sin embargo, su uso ha disminuido debido a los problemas de contaminación ambiental derivados de la eliminación del zinc (Hernández-Montoya y Bonilla-Petriciolet 2012). A los tres materiales por separado se les agregó solución de H_3PO_4 (J.T. Baker) al 50 % y se dejaron inmersos en esta durante 24 horas a temperatura ambiente. Posteriormente se filtraron otras 24 horas para eliminar el exceso de ácido. Las semillas, las cascarillas y los embriones se carbonizaron en una mufla



Fig. 1. Imágenes de (A) semillas extraídas del fruto, (B) embriones de las semillas y (C) cascarillas de las semillas de chirimoya.

(Thermolyne Mod. 48000) durante 3 horas después de alcanzar la temperatura de 673 K, con una rampa de calentamiento de 5 K/min. Para CarChiQC600 y CarChiQE600 la temperatura de carbonización fue de 873 K, también durante un período de 3 horas. Se lavaron los cinco carbones en repetidas ocasiones con agua destilada a 363 ± 3 K y se sometieron a ultrasonido (Branson Mod. 1510) durante 10 min. El pH de la solución al finalizar el proceso de lavado fue aproximadamente 3.5. Se secaron los carbones de las semillas de chirimoya activados químicamente en la estufa a 373 K durante 24 h, se enfriaron, se pesaron, se molieron en un mortero y se tamizaron para obtener partículas con un tamaño entre 0.25 y 0.42 mm. Se secaron nuevamente a 373 K durante 24 h y se almacenaron en un desecador. El rendimiento (**Cuadro I**) fue diferente para cada carbón, ya que el precursor o la temperatura de carbonización variaron para cada uno de los cinco carbones sintetizados. El rendimiento fue menor para los carbones preparados con el embrión y a mayor temperatura.

Adsorción de colorantes

Para determinar la capacidad de adsorción de los carbones preparados se seleccionaron colorantes textiles de tipo ácido y básico, con estructuras químicas variadas y diferentes cromóforos. Las estructuras químicas, nombres comunes y del Colour Index, nombres clave, longitudes de onda de máxima absorbancia ($\lambda_{\text{máx}}$), grupos cromóforos y pesos moleculares se muestran en la **figura 2**.

Todos los colorantes básicos seleccionados poseen grupos amina en su estructura que les confieren carácter catiónico y el colorante ácido AB74 grupos sulfonato que le dan un carácter aniónico.

Se prepararon soluciones acuosas de colorantes con una concentración inicial de 300 mg/dm^3 , se seleccionó esta concentración ya que se ha reportado en la literatura (Peláez-Cid et al. 2020) que es común

encontrar concentraciones semejantes de colorantes en aguas residuales. Se pusieron en contacto con los carbones preparados utilizando diferentes relaciones de masa de adsorbente por volumen de solución de colorante (m/V) ya que los carbones presentaron diferente capacidad de adsorción, utilizando menor cantidad de carbón cuando su capacidad de adsorción era alta. Las relaciones m/V para cada carbón preparado se muestran en el **cuadro I**. La concentración de los colorantes después del proceso de adsorción se cuantificó mediante espectrofotometría UV-Vis (espectrofotómetro Hach modelo DR5000) a la longitud de onda de máxima absorbancia de cada colorante (**Fig. 2**).

La cantidad adsorbida de colorante sobre los carbones y su porcentaje de adsorción se calcularon con las ecuaciones 1 y 2, respectivamente. El porcentaje de remoción de color presente en el agua residual se calculó con la ecuación 3.

$$a = \frac{(C_i - C_f) \cdot V}{m} \quad (1)$$

$$\% \text{ Adsorción} = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \cdot 100 \quad (2)$$

$$\% \text{ Remoción} = \left(1 - \frac{\text{Color}_{\text{WWT}}}{\text{Color}_{\text{WW}}}\right) \cdot 100 \quad (3)$$

Donde: a es la cantidad adsorbida en mg/g, C_i y C_f son las concentraciones inicial y final, respectivamente, en mg/dm^3 , V es el volumen de solución en dm^3 , m es la masa de carbón en g, $\text{Color}_{\text{WWT}}$ y Color_{WW} son el color del agua residual tratada y sin tratar en Unidades Platino-Cobalto (U. Pt-Co), respectivamente.

Cinética de adsorción

Se siguió la cinética de adsorción del colorante azul de metileno (BB9) para establecer el tiempo

CUADRO I. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS CARBONES ACTIVADOS.

Carbón activado	Precursor	Porcentaje de rendimiento	Relación m/V (g/dm^3)	pH _{PZC}	Densidad aparente (g/cm^3)
CarChiQ	Semilla	31	10	2.2	0.358
CarChiQC	Cascarilla	47	5	2.4	0.485
CarChiQE	Embrión	30	10	2.3	0.253
CarChiQC600	Cascarilla	26	3	2.0	0.445
CarChiQE600	Embrión	11	3	2.4	0.207

Donde: m/V es la relación de masa de carbón en g por volumen de solución de colorante en dm^3 y pH_{PZC} es el punto de carga cero.

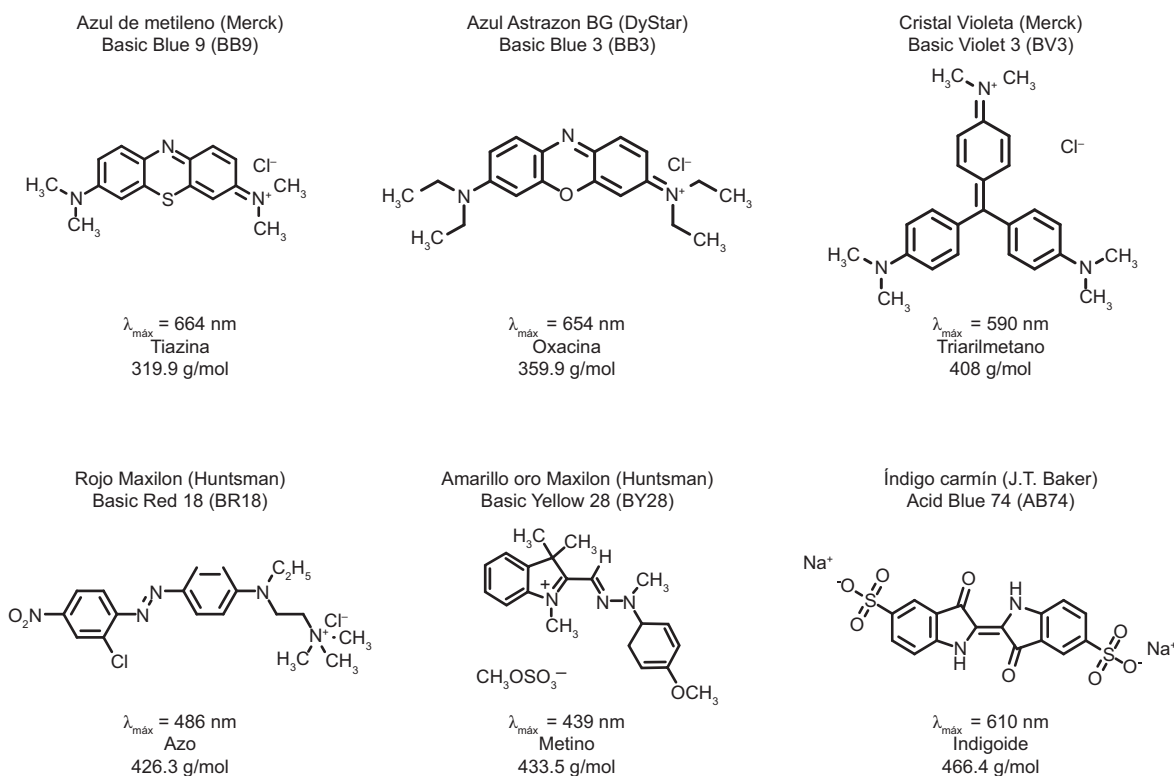


Fig. 2. Colorantes seleccionados para el estudio del proceso de adsorción sobre los carbones activados y sus propiedades.

de contacto necesario para alcanzar el equilibrio de adsorción entre las soluciones de colorante y los carbones preparados. Se pusieron en contacto soluciones acuosas del colorante con una concentración inicial de 500 mg/dm^3 . Las muestras se agitaron durante 10 horas y permanecieron estáticas a 303 K hasta por 72 h. Se tomaron alícuotas de las soluciones a diferentes tiempos durante el proceso de adsorción.

Los datos obtenidos se trataron con las expresiones lineales de las ecuaciones cinéticas de pseudo primer orden, modelo de Lagergren (ecuación 4) y pseudo segundo orden, modelo de Ho (ecuación 5). Además, la constante de velocidad de adsorción inicial se calculó mediante la ecuación 6.

$$\ln(a_{\text{eq}} - a_t) = \ln a_{\text{eq}} - k_1 \cdot t \quad (4)$$

$$\frac{t}{a_t} = \frac{1}{k_2 \cdot a_{\text{eq}}^2} + \frac{t}{a_{\text{eq}}} \quad (5)$$

$$H = k_2 \cdot a_{\text{eq}}^2 \quad (6)$$

Donde: a_{eq} y a_t son las cantidades adsorbidas en mg/g en el equilibrio y al tiempo t en h , respectivamente,

k_1 en h^{-1} y k_2 en $\text{g/mg} \times h$ son las constantes cinéticas de pseudo primer y pseudo segundo orden, respectivamente y H es la constante de velocidad de adsorción inicial en $\text{mg/g} \times h$.

Isotermas de adsorción de los colorantes

Las isotermas de adsorción se construyeron a 303 K para los colorantes catiónicos (BB9, BB3, BY28, BR18 y BV3) en los carbones sintetizados. Las concentraciones de las soluciones de colorantes se encontraron en el rango de 200 a 1200 mg/dm^3 . Permanecieron en contacto durante 24 h con CarChiQC600 y CarChiQE600, durante 48 h con CarChiQC y hasta 72 h con CarChiQ, de acuerdo con lo observado en la cinética de adsorción. Se utilizó un espectrofotómetro Hach DR5000 para medir la concentración de los colorantes en el equilibrio.

Langmuir estableció tres postulados para describir la adsorción de las moléculas de adsorbato sobre la superficie de los adsorbentes: Todos los sitios de la superficie tienen la misma probabilidad de ser ocupados, no hay interacción entre las moléculas adsorbidas y la adsorción termina con la formación de una monocapa de moléculas adsorbidas. Los datos de adsorción fueron tratados con la ecuación

de Langmuir en su forma lineal (ecuación 7). Se consideró que las isotermas se ajustaron al modelo de Langmuir cuando sus coeficientes de determinación fueron superiores a 0.97.

$$\frac{C_{eq}}{a} = \frac{C_{eq}}{a_m} + \frac{1}{K_L \cdot a_m} \quad (7)$$

Donde: C_{eq} es la concentración de equilibrio en mg/dm^3 , a y a_m son la cantidad adsorbida y la capacidad de la monocapa en mg/g , respectivamente, K_L es la constante de Langmuir en dm^3/mg .

Tratamiento de agua residual conteniendo colorantes

El agua residual tratada se obtuvo después del teñido de telas de algodón. Las aguas residuales contienen, además de los colorantes, fibras, compuestos químicos ácidos o básicos y surfactantes (Yagub et al. 2014, Peláez-Cid et al. 2016, Peláez-Cid et al. 2020), que también pueden ser adsorbidos en la superficie de los carbones activados. Las dosis de carbón (relación m/V) para tratar el agua residual se reportan en la **cuadro I**. La identidad de los colorantes presentes en los efluentes textiles es desconocida, por lo tanto, para poder cuantificar la disminución de color después del tratamiento, se midió este espectrofotométricamente en U. Pt-Co y se utilizó la ecuación 3 para calcular el porcentaje de color eliminado.

Caracterización de los carbones activados

Punto de carga cero

Una medida global de la acidez o basicidad de un adsorbente es el punto de carga cero (pH_{PZC}). Generalmente se determina en relación con el pH de una disolución. Se pusieron en contacto 0.15 g de los carbones activados con 50 cm^3 de solución de cloruro de sodio 0.01 M (J.T. Baker), previamente el pH se ajustó entre 2 y 6 utilizando solución de ácido clorhídrico 0.1 N (J.T. Baker) y entre 7 y 12 con solución de hidróxido de sodio 0.1 N (J.T. Baker). El pH final se midió después de 48 horas de contacto de los carbones, con agitación continua a temperatura ambiente, con las soluciones de NaCl con pH iniciales entre 2 y 12. Se graficaron los valores de pH obtenidos y el pH_{PZC} es el punto donde la curva pH_{final} vs. $\text{pH}_{\text{inicial}}$ cruza la línea $\text{pH}_{\text{inicial}} = \text{pH}_{\text{final}}$ (Peláez-Cid et al. 2016).

Densidad aparente

Existen diferentes tipos de densidades relacionadas con los carbones activados, como la aparente, la de mercurio o la verdadera. Para los carbones preparados se determinó la densidad aparente, que se define como el volumen de un recipiente que contiene una

masa determinada de carbón activado. Este volumen incluye las partículas de carbón activado, sus poros y el espacio entre las partículas. La metodología de determinación de la densidad aparente consistió en el pesado de matraces aforados de 1 cm^3 y su llenado con las partículas de los carbones. Los matraces se golpeaban suavemente contra la mesa para acomodar las partículas; cuando era necesario, se agregaba un poco más de carbón hasta alcanzar nuevamente la marca del aforo y se volvía a acomodar nuevamente el carbón hasta tener exactamente 1 cm^3 de muestra. Se pesaron nuevamente los matraces, la diferencia entre los pesos de los matraces con muestra y vacíos fue la masa de los carbones contenidos en un volumen de 1 cm^3 .

Espectroscopía infrarroja

La espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FT-IR) es una técnica de caracterización de compuestos orgánicos e inorgánicos, donde la radiación infrarroja es absorbida selectivamente por los grupos funcionales en un compuesto. Dado que la espectroscopía FT-IR puede detectar grupos específicos en un material, es posible saber qué funcionalidades existen en la superficie de los carbones (Hernández-Montoya y Bonilla-Petriciolet 2012). Los grupos funcionales presentes en los carbones se determinaron por espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (espectrofotómetro Perkin-Elmer Frontier) utilizando el accesorio de muestras de reflectancia totalmente atenuada (ATR, por su sigla en inglés).

Microscopía electrónica de barrido

Se observó la morfología de la superficie de los carbones activados utilizando un microscopio electrónico de barrido JEOL modelo JSM-6010PLUS/LA, operado a 30 kV. Las partículas de carbón se dispersaron en cinta de grafito y posteriormente se recubrieron con oro.

Determinación del número de azul de metileno

El número de azul de metileno (MB_N , por su sigla en inglés) (Raposo et al. 2009, Peláez-Cid et al. 2016) se define como la máxima cantidad del colorante azul de metileno (BB9) adsorbido en un gramo de carbón activado en condiciones específicas. Este parámetro es un indicativo de la estructura mesoporosa (2-50 nm) del carbón activado y es un buen indicador de la capacidad de adsorción de moléculas de tamaño semejante a la molécula de BB9. Se pesaron 0.1 g de todos los carbones y se pusieron en contacto con 10 cm^3 de solución de azul de metileno con una

concentración inicial de 1000 mg/dm³, cuando la coloración de la solución desaparecía se agregaban nuevos volúmenes de solución, permaneciendo las muestras en agitación a 100 rpm. Cuando después de 24 h de contacto la coloración ya no desapareció se midió la concentración de equilibrio. El MB_N se determinó utilizando la ecuación (1).

Isotermas de adsorción de nitrógeno

Las isotermas de adsorción de nitrógeno a 77 K proporcionan información importante acerca de las características superficiales de los carbones activados, su forma indica el tipo de porosidad de los carbones. Además, el tratamiento de los datos de adsorción con la ecuación de Brunauer-Emmett-Teller (BET) permitió determinar la superficie específica de éstos. Las isotermas de adsorción de los cinco carbones de chirimoya se construyeron utilizando un analizador de superficies Micrometrics ASAP 2020 y los datos de adsorción se calcularon con el software del equipo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de los carbones activados

Punto de carga cero

El **cuadro I** muestra los valores del punto de carga cero de los carbones activados. Los valores del punto de carga cero de los cinco carbones sintetizados indicaron el carácter ácido de su superficie debido a que los valores oscilan en el rango de 2.0 a 2.4. Este comportamiento se debe a la activación química que se realizó con ácido fosfórico durante su obtención. Se ha reportado que el carácter ácido o básico de la superficie de los carbones activados depende del compuesto químico que se utiliza como activador. Es común el uso de ácidos como el fosfórico, cloruro de zinc y tricloruro férrico, o bases como el hidróxido de sodio o el hidróxido de potasio (Ahsaine et al. 2018, Guo et al. 2018, Archin et al. 2019, Rosson et al. 2020).

Densidad aparente

Los valores de densidad aparente de los carbones activados se presentan en el **cuadro I**. Los carbones preparados con la cascarilla, CarChiQC y CarChiQC600, presentaron una mayor densidad con respecto a los carbones preparados con el embrión de las semillas, CarChiQE y CarChiQE600, lo cual se puede atribuir a que la cascarilla tiene una consistencia compacta y el embrión una consistencia suave y oleosa. También se observó que la densidad disminuye ligeramente para CarChiQC600 y CarChiQE600

que fueron carbonizados a 873 K, lo cual se puede atribuir a su mayor porosidad. La densidad de CarChiQ se encuentra entre las densidades de los otros dos carbones sintetizados a la misma temperatura (CarChiQC y CarChiQE), ya que la materia prima para CarChiQ fue tanto el embrión como la cascarilla.

Microscopía electrónica de barrido

Las micrografías de los cinco carbones, obtenidas por microscopía electrónica de barrido (SEM, por su sigla en inglés) con aumentos 200X y 1000X, se presentan en la **figura 3**. Las imágenes A y B corresponden al carbón preparado con la semilla de chirimoya completa, CarChiQ, en las que pueden apreciarse partículas de forma irregular. En la **figura 3A** se observan partículas que corresponden tanto a la parte del embrión (estructura de panal) como a la cascarilla (estructura de corteza). La imagen correspondiente al embrión (**Fig. 3B**) presenta una gran cantidad de cavidades y dentro de estas cavidades numerosas protuberancias de forma globular. En las **figuras 3C** y **3D** se observan las partículas de CarChiQC, el carbón preparado utilizando solamente las cascarillas de las semillas. Este carbón está constituido también de partículas de forma irregular con bordes angulosos, en la parte superior se observa una lámina erosionada que cubre una capa interna con cavidades superficiales no tan profundas como las que se observan en el carbón de embrión. Las partículas de CarChiQC600 (**Figs. 3E** y **3F**) también presentan bordes rectos con protuberancias angulosas y grietas que las atraviesan, no siendo observadas cavidades en este carbón. Las **figuras 3G** y **3H** corresponden a CarChiQE, el carbón preparado únicamente con el embrión de las semillas. Este carbón está constituido por partículas en forma de panal con cavidades de profundidad variable y se observan partículas adheridas a su superficie. Las partículas de CarChiQE600 (**Figs. 3I** y **3J**) son semejantes a las de CarChiQE, pero con los bordes desgastados. Se ha reportado que las cavidades que se observan en la superficie forman túneles que conducen a una red de microporos que no se observan por esta técnica, pero son medibles con las isotermas de BET. En las micrografías a mayores aumentos como las incluidas en la **figura 3 (B, D, F, H y J)** se observa la formación de los túneles (Hameed et al. 2008, Ahsaine et al. 2018).

Espectroscopía FT-IR

Los espectros FT-IR de los cinco carbones activados, obtenidos mediante la técnica de ATR, se presentan en la **figura 4**. Los carbones activados presentaron pocas bandas de absorción y algunas de

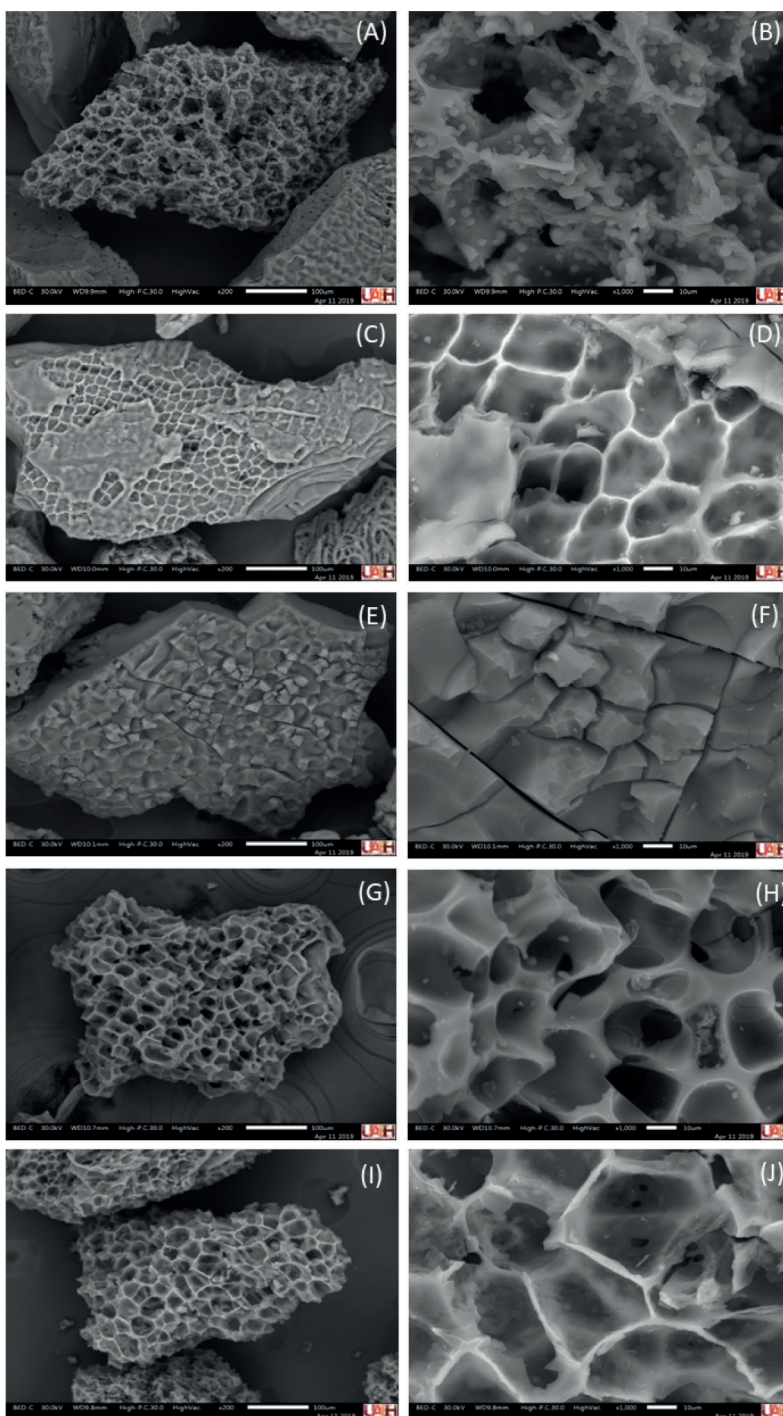


Fig. 3. Imágenes de microscopía electrónica de barrido a 200X y 1000X de los carbones activados, (A, B) CarChiQ, (C, D) CarChiQC, (E, F) CarChiQC600, (G, H) CarChiQE e (I, J) CarChiQE600.

ellas de baja intensidad, debido al proceso de combustión al que fueron sometidos. Prácticamente en todos los carbones se observan las mismas bandas,

aunque con diferente intensidad, lo que indica la presencia de algunos grupos funcionales remanentes en su superficie. La banda de absorción en 1744 cm^{-1}

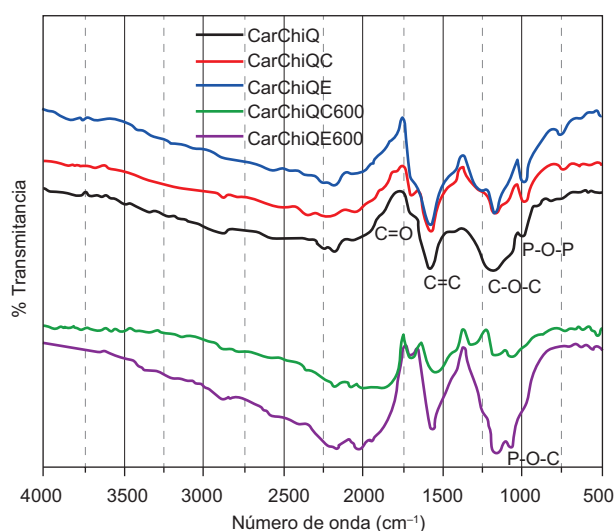


Fig. 4. Espectros infrarrojos con transformada de Fourier de los carbones activados.

indica la presencia del grupo carbonilo $\nu\text{C}=\text{O}$, la banda en 1573 cm^{-1} el doble enlace $\nu\text{C}=\text{C}$ de compuestos aromáticos y la banda en 1210 cm^{-1} indica los enlaces $\nu\text{C}-\text{O}-\text{C}$. Además en todos los carbones se observaron las bandas de 982 cm^{-1} y 1050 cm^{-1} correspondientes a grupos fosfóricos adquiridos durante la activación con ácido fosfórico. Estas bandas de absorción de grupos orgánicos, así como las del grupo fosfórico son características de los carbones activados obtenidos de residuos agroindustriales (Kiliç y Orhan 2019).

Adsorción de los colorantes en las soluciones acuosas

En la figura 5 se muestra la cantidad adsorbida de los colorantes en los cinco carbones sintetizados. Se utilizaron diferentes relaciones m/V (g/dm^3) para maximizar su capacidad de adsorción, las cuales fueron: $10\text{ g}/\text{dm}^3$ para CarChiQ y CarChiQE, $5\text{ g}/\text{dm}^3$ para CarChiQC y $3\text{ g}/\text{dm}^3$ para CarChiQE600 y CarChiQC600. Se observa claramente que los carbones con la mayor capacidad de adsorción fueron los carbonizados a 873 K , CarChiQE600 y CarChiQC600. La cantidad adsorbida para todos los colorantes básicos y el colorante aniónico AB74 se encuentra entre 97 y $100\text{ mg}/\text{g}$, debido a que su relación $m/V = 3\text{ g}/\text{dm}^3$ fue la menor. La alta capacidad de adsorción para colorantes básicos de CarChiQE600 y CarChiQC600 se debe al carácter ácido de su superficie, ya que su pH_{PZC} es cercano a 2. Su capacidad de adsorber casi completamente el colorante aniónico se debe a su alta superficie específica ($S_{\text{BET}} > 1000\text{ m}^2/\text{g}$). El carbón

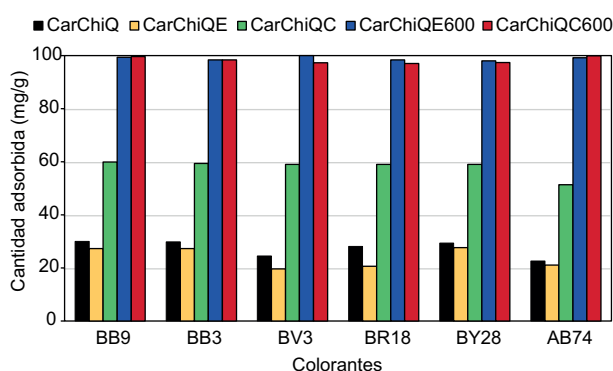


Fig. 5. Adsorción de colorantes textiles con una concentración inicial de $300\text{ mg}/\text{dm}^3$ sobre los carbones activados sintetizados. BB9 – Azul básico 9, BB3 – Azul básico 3, BV3 – Violeta básico 3, BR18 – Rojo básico 18, BY28 – Amarillo básico 28 y AB74 – Azul ácido 74.

de cascarilla CarChiQC, carbonizado a 673 K , requirió una mayor cantidad ($m/V = 5\text{ g}/\text{dm}^3$) de carbón para alcanzar adsorciones de casi $60\text{ mg}/\text{g}$ para los colorantes básicos y $51\text{ mg}/\text{g}$ para AB74. La menor capacidad de adsorción de este carbón con respecto a los carbonizados a 873 K , no obstante que los tres presentan superficies específicas semejantes, se puede deber a que presenta una microporosidad superior ($\approx 50\%$) que la de CarChiQC600 y CarChiQE600 ($\approx 40\%$), lo que dificulta la adsorción de las moléculas con tamaños relativamente grandes como los de los colorantes. Los carbones CarChiQ y CarChiQE presentaron menor capacidad de adsorción requiriendo la mayor cantidad de carbón ($m/V = 10\text{ g}/\text{dm}^3$), con ellos se utilizó el doble de la masa de CarChiQC y más del triple de la masa de los carbones sintetizados a 873 K . Para CarChiQ la cantidad adsorbida fue casi de $30\text{ mg}/\text{g}$ para los colorantes básicos y de $22.6\text{ mg}/\text{g}$ para el colorante ácido. CarChiQE sólo fue capaz de adsorber entre 20 y $27\text{ mg}/\text{g}$ de colorantes básicos y $21\text{ mg}/\text{g}$ del colorante AB74. Estos resultados permitieron concluir que el embrión de la semilla de chirimoya es el responsable de la baja capacidad de adsorción de CarChiQ, porque cuando se carbonizan por separado, el carbón de la cascarilla mejora su capacidad de adsorción en comparación con el carbón preparado con toda la semilla o el carbón en que se utilizó como materia prima sólo el embrión. Considerando que CarChiQE es el carbón con la menor capacidad de adsorción, un bajo porcentaje de rendimiento y la menor superficie específica ($S_{\text{BET}} = 325\text{ m}^2/\text{g}$) en comparación con los otros carbones, se decidió eliminarlo del estudio, ya que su aplicación en el tratamiento de efluentes textiles es deficiente.

Cinética de adsorción del azul de metileno (BB9)

La cinética de adsorción permite determinar la velocidad de adsorción de los colorantes sobre los carbones, así como el tiempo necesario para alcanzar el equilibrio de adsorción. En la **figura 6A**, se muestran las curvas de la cinética de adsorción del colorante azul de metileno o azul básico 9 (BB9) con una concentración inicial de 500 mg/dm^3 . En el caso de CarChiQ ($m/V = 10 \text{ g/dm}^3$), a las 24 h se empieza a observar la formación de una meseta y hasta las 72 h se alcanza el equilibrio de adsorción; para CarChiQC ($m/V = 5 \text{ g/dm}^3$), la formación de la meseta inicia a las 24 h, alcanzándose el equilibrio de adsorción a las 40 h. En la **figura 6B** se puede apreciar que CarChiQC600 ($m/V = 3 \text{ g/dm}^3$) y CarChiQE600 ($m/V = 3 \text{ g/dm}^3$), presentaron un comportamiento semejante, alcanzándose el equilibrio de adsorción prácticamente a las 3 h de contacto. El tratamiento de los datos con la ecuación de la cinética de pseudo segundo orden, indicó un buen ajuste al modelo de Ho. La velocidad de adsorción (H) fue mucho mayor para CarChiQC600 con un valor de $5000 \text{ mg/g}\cdot\text{h}$ en comparación con CarChiQ de sólo $35.6 \text{ mg/g}\cdot\text{h}$. En el **cuadro II** se presentan los resultados de la cinética

de adsorción de BB9 en los cuatro carbones seleccionados. Estos resultados permitieron establecer 72 h como el tiempo de contacto necesario para alcanzar el equilibrio de adsorción para CarChiQ, 40 h para CarChiQC y 3 h para CarChiQC600 y CarChiQE600 para soluciones con $C_i = 500 \text{ mg/dm}^3$.

Isotermas de adsorción

Las isotermas de adsorción de los cinco colorantes catiónicos sobre los cuatro carbones activados estudiados se presentan en la **figura 7**. En todas las isotermas se observa la formación de la monocapa, lo que indica un comportamiento de acuerdo con los postulados de Langmuir, por lo tanto, los datos de adsorción fueron tratados con la ecuación 7. Los valores de capacidad de la monocapa (a_m), la constante de Langmuir (K_L) y el coeficiente de determinación (R^2) se presentan en el **cuadro III**. Los coeficientes de determinación para todas las isotermas se encuentran entre 0.9715 y 0.9999; su aproximación a uno confirma el ajuste al modelo lineal de la isoterma de Langmuir.

Los colorantes básicos se adsorben en cantidades que van desde 71 hasta 500 mg/g debido al

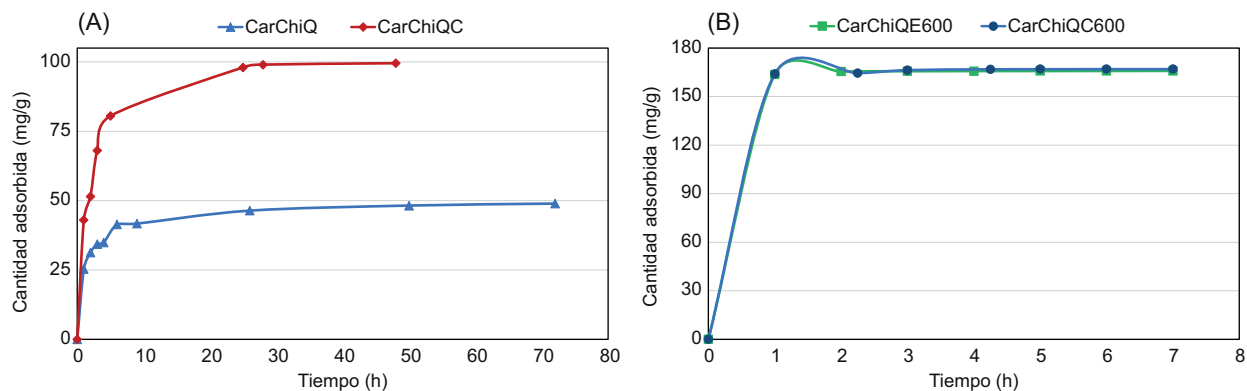


Fig. 6. Curvas de cinética de adsorción de Azul básico 9 (500 mg/dm^3) en los carbones activados. (A) CarChiQ y CarChiQC, (B) CarChiQC600 y CarChiQE600.

CUADRO II. CINÉTICA DE ADSORCIÓN DE AZUL BÁSICO 9 CON UNA CONCENTRACIÓN DE 500 mg/dm^3 SOBRE LOS CARBONES.

Carbón activado	a_{eq} (mg/g)	k_2 (g/h \times mg)	H (mg/g \times h)	R^2
CarChiQ	49.8	0.014	35.6	0.9998
CarChiQC	103.1	0.006	67.1	0.9998
CarChiQC600	166.7	0.180	5000	1
CarChiQE600	166.7	0.051	1429	1

Donde: a_{eq} es la cantidad adsorbida en el equilibrio, k_2 es la constante de pseudo segundo orden, H es la constante de velocidad de adsorción y R^2 es el coeficiente de determinación.

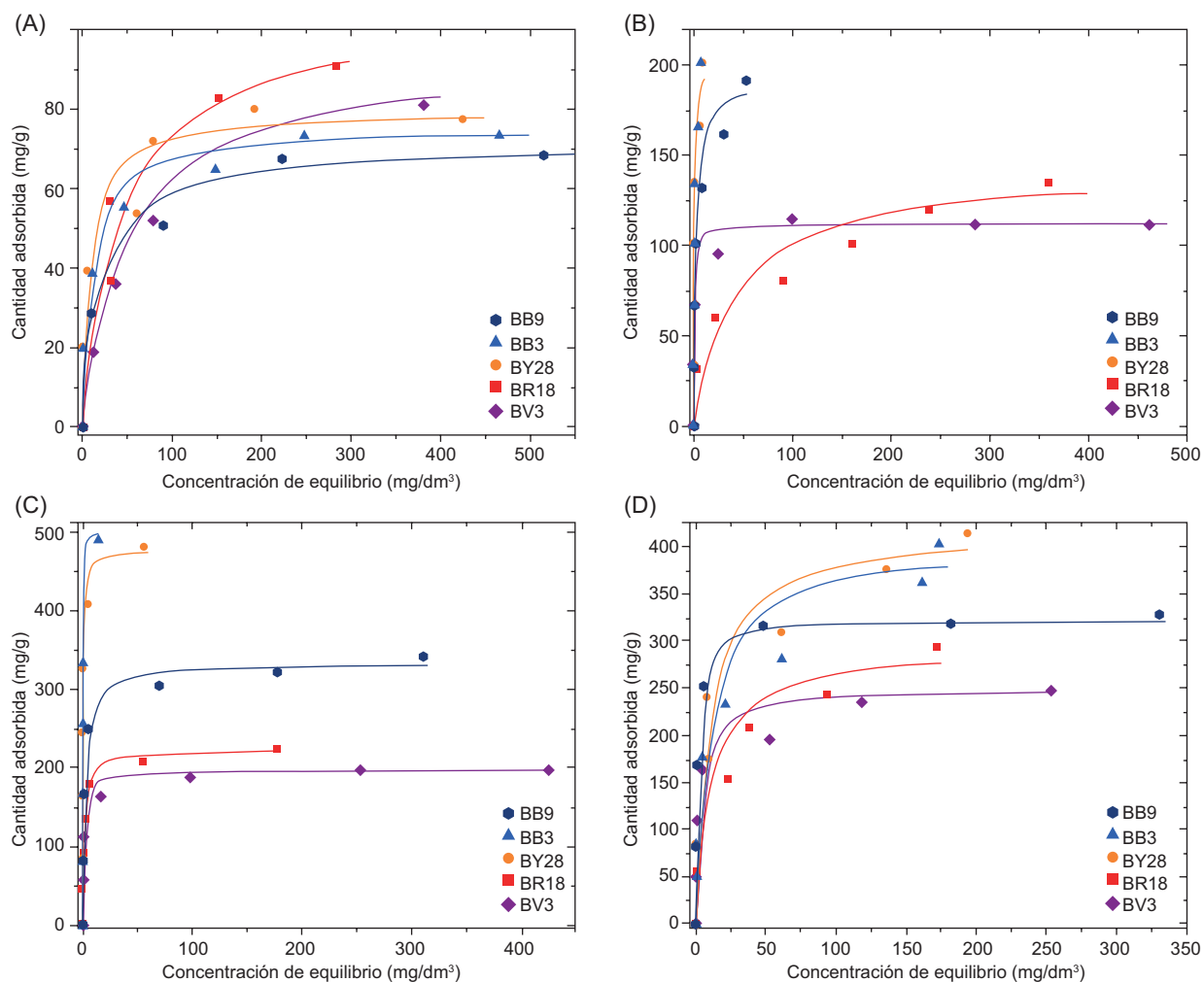


Fig. 7. Isothermas de adsorción de colorantes catiónicos (A) CarChiQ, (B) CarChiQC, (C) CarChiQC600 y (D) CarChiQE600. BB9 - Azul de metileno (Azul Básico 9), BB3 - Azul Astrazon (Azul Básico 3), BY28 - Amarillo oro Maxilon (Amarillo Básico 28), BR18 - Rojo Maxilon (Rojo Básico18) y BV3 - Cristal violeta (Violeta Básico 3).

CUADRO III. PARÁMETROS DE LANGMUIR: CAPACIDAD DE LA MONOCAPA Y CONSTANTE DE LANGMUIR PARA LOS CARBONES ACTIVADOS.

Colorante	CarChiQ			CarChiQC			CarChiQC600			CarChiQE600		
	a_m	K_L	R^2	a_m	K_L	R^2	a_m	K_L	R^2	a_m	K_L	R^2
BB9	71.43	0.046	0.9976	192.31	0.413	0.9914	333.0	0.366	0.9994	323.6	0.66	0.9990
BB3	75.19	0.088	0.9981	208.33	1.455	0.9715	500.1	10.0	0.9993	384.9	0.10	0.9733
BV3	93.46	0.020	0.9859	112.36	1.561	0.9999	196.4	0.895	0.9994	250.2	0.25	0.9970
BR18	105.26	0.023	0.9865	142.86	0.024	0.9792	222.3	0.662	0.9992	294.4	0.09	0.9799
BY28	79.37	0.109	0.9955	204.08	1.531	0.9881	476.0	3.0	0.9992	416.7	0.10	0.9902

Donde: a_m es la capacidad de la monocapa en mg/g, K_L es la constante de Langmuir en dm^3/mg y R^2 es el coeficiente de determinación. BB9 - Azul de metileno (Azul Básico 9), BB3 - Azul Astrazon (Azul Básico 3), BV3 - Cristal violeta (Violeta Básico 3), BR18 - Rojo Maxilon (Rojo Básico 18) y BY28 - Amarillo oro Maxilon (Amarillo Básico 28).

carácter aniónico de la superficie de los carbones indicado por su punto de carga cero cercano a 2. También esta interacción iónica se debe a la presencia de grupos superficiales de carácter polar como el grupo carbonilo y por la presencia grupos fosfóricos generados durante la activación, que se observan en los espectros FT-IR de los carbones. CarChiQ, el carbón preparado con la semilla, completa, cascarilla y embrión y carbonizado a 673 K es el que menos adsorbe debido a su baja superficie específica de sólo 582 m²/g. En comparación con CarChiQC, el carbón en el que sólo se carbonizó la cascarilla a 673 K, este incrementa considerablemente su capacidad de adsorción, casi al triple para BB9, BB3 y BY28, lo que sugiere que es la cascarilla el mejor precursor para la preparación del carbón a esta temperatura, alcanzando una superficie de 1192 m²/g. También las isotermas y los parámetros de Langmuir muestran que, al incrementar la temperatura de carbonización de 673 K a 873 K, la capacidad de adsorción se incrementa para ambos carbones, tanto el preparado con el embrión, CarChiQE600, como el preparado con la cascarilla, CarChiQC600, presentando un comportamiento de adsorción semejante, duplicando ambos la capacidad de adsorción de CarChiQC. Aunque la superficie específica de estos carbones es semejante a la de CarChiQC, el porcentaje de mesoporos es mayor y esto favorece la capacidad de adsorción de moléculas de altos pesos moleculares (**Fig. 2**) como las de los colorantes adsorbidos.

Cuantitativamente, los valores de la capacidad de la monocapa confirman lo observado en las isotermas de adsorción. El colorante BB3 es el que más se adsorbe en los carbones preparados con la cascarilla, alcanzando un valor de 500 mg/g en CarChiQC600 y son BV3 y BR18 los que menos se adsorben, lo cual se puede deber a que la molécula de BV3 es la más voluminosa (**Fig. 2**), debido a la presencia del

cromóforo triarilmetano, y BR18 la molécula con mayor peso molecular como catión, en comparación con las de los otros colorantes.

A manera de ejemplo y para demostrar la alta capacidad de adsorción de los carbones sintetizados a 873 K, en el **cuadro IV** se presenta la comparación de los valores de capacidad de la monocapa de dos de los carbones activados, la cual es mayor o semejante para el colorante BB3, con respecto al trabajo de otros autores.

Determinación del número de azul de metileno

En el **cuadro V** se presentan los resultados de la determinación del MB_N con valores de 277 y 292.5 mg de azul de metileno por gramo de carbón para CarChiQC600 y CarChiQE600, respectivamente, con porcentajes de remoción cercanos al 100 % lo que indica una adsorción favorable de moléculas con tamaño cercano al de BB9 sobre la superficie de los carbones activados, la excepción es CarChiQE.

CUADRO V. VALORES DEL NÚMERO DE AZUL DE METILENO.

Carbón	Número de azul de metileno (mg/g)	% Remoción de azul de metileno
CarChiQ	98.6	99
CarChiQC	159.6	100
CarChiQE	78.9	79
CarChiQC600	277.0	100
CarChiQE600	292.5	100

Determinación de la superficie específica por adsorción de nitrógeno

La superficie específica de los carbones activados se determinó por adsorción de nitrógeno a 77 K. En

CUADRO IV. COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE CAPACIDAD DE LA MONOCAPA DEL COLORANTE AZUL BÁSICO 3 (BB3) SOBRE CarChiQC600 Y CarChiQE600.

Adsorbente	Capacidad de la monocapa (mg/g)	Referencia
CarChiQC600	500.1	Este trabajo
CarChiQE600	384.9	Este trabajo
Carbón activado a base de cubierta de semilla de caucho	227.27	Hameed et al. 2008
Carbón activado	406	Karakus et al. 2017
Carbón de semillas de zapote negro	370	Peláez-Cid et al. 2020
Carbón activado de la cubierta de la semilla de <i>Hevea brasiliensis</i>	230	Kiliç y Orhan 2019
Nanocompósito de polímero ternario	200	Karakus et al. 2017
Quitosano de caparzones de cangrejo	166.50	Crini et al. 2008

la **figura 8** se observan las isotermas de adsorción de nitrógeno y en el **cuadro VI** los parámetros texturales de los cinco carbones preparados.

Las isotermas de CarChiQC y CarChiQC600 son isotermas del tipo I según la clasificación de la IUPAC. En estas isotermas la adsorción y la desadsorción siguen el mismo camino, siendo característica esta forma de sólidos microporosos. Las isotermas de CarChiQE y CarChiQE600 son del tipo IV, características de sólidos mesoporosos, con lazo de histéresis H_4 . El lazo de histéresis indica que la desadsorción no coincide con la adsorción, lo cual se debe a la condensación capilar en los mesoporos. El tipo H_4 es debido también a poros en forma de rendija, pero en este caso hay, además, una importante contribución de microporos. La forma de las isotermas concuerda con los valores de los parámetros texturales de las mismas (**Cuadro VI**). La isoterma de CarChiQ puede considerarse del tipo I, no obstante, la pequeña diferencia entre la adsorción y la desadsorción; debido a la presencia del embrión en este

carbón, su porcentaje de microporos es del 67%. Aunque el diámetro promedio de los poros es ligeramente mayor al límite superior de los microporos, esto se debe a la presencia de los mesoporos. En el **cuadro VI** se observa que el volumen de mesoporos es mayor que el de microporos para CarChiQE y CarChiQE600 y que sus diámetros promedio de poro son los mayores de los cinco carbones.

Tanto en la **figura 8** como en el **cuadro VI** se puede observar que CarChiQE es el carbón con la menor superficie específica ($325 \text{ m}^2/\text{g}$) y por lo tanto es el embrión de la semilla de chirimoya el responsable de la baja capacidad de adsorción tanto de CarChiQ ($582 \text{ m}^2/\text{g}$) como de él mismo, siendo la cascarilla la parte de la semilla de la chirimoya la materia prima que permite sintetizar carbones activados con alta superficie específica ($1198 \text{ m}^2/\text{g}$). Estos resultados nos indican que la capacidad de adsorción de los carbones activados depende fuertemente del material precursor utilizado en su preparación. También puede

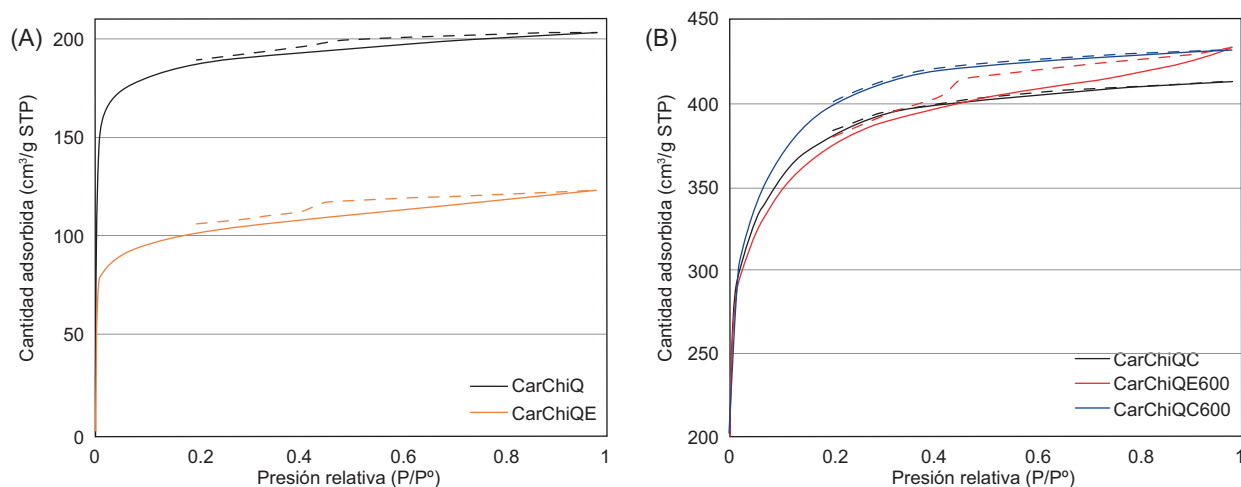


Fig. 8. Isotermas de adsorción de nitrógeno para los carbones activados (A) CarChiQ y CarChiQE y (B) CarChiQC, CarChiQC600 y CarChiQE600. STP = temperatura y presión estándar.

CUADRO VI. PARÁMETROS TEXTURALES DE LOS CARBONES ACTIVADOS DETERMINADOS POR ADSORCIÓN DE N_2 A 77 K.

Adsorbente	S_{BET}	$V_{\text{T-poro}}$	$V_{\text{m-poro}}$	$V_{\text{m-poro}}$	% microporos	$D_{\text{prom.}}$
CarChiQ	582	0.314	0.210	0.104	67	2.16
CarChiQC	1198	0.639	0.318	0.321	50	2.13
CarChiQE	325	0.191	0.089	0.102	47	2.35
CarChiQC600	1253	0.668	0.287	0.381	43	2.13
CarChiQE600	1197	0.670	0.269	0.401	40	2.24

Donde: S_{BET} es la superficie específica en m^2/g , $V_{\text{T-poro}}$ es el volumen total de poro en cm^3/g , $V_{\text{m-poro}}$ es el volumen de microporo en cm^3/g , $V_{\text{m-poro}}$ es el volumen de mesoporo en cm^3/g y $D_{\text{prom.}}$ es el diámetro promedio de poro en nm.

CUADRO VII. COMPARACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL AGUA RESIDUAL ANTES Y DESPUÉS DEL TRATAMIENTO CON LOS CARBONES.

Parámetro	Agua residual	CarChiQ	CarChiQC	CarChiQC600	CarChiQE600
pH	9.1	3.7	3.3	3.8	3.8
Conductividad eléctrica (mS/cm)	53.6	48.1	46.8	45.5	45.6
Sólidos totales (mg/dm ³)	50 675	50 000	49 950	49 500	49 600
Color (U. Pt-Co)	2010	42	43	60	45
% Remoción color	-	97.9	97.9	97.0	97.8
DQO (mg/dm ³)	523	148	142	137	126
% Remoción DQO	-	71.7	72.8	73.8	75.9

Donde: DQO es la demanda química de oxígeno y U. Pt-Co son las unidades Platino Cobalto.

observarse que la temperatura influye fuertemente en el desarrollo de la porosidad; para el embrión, el volumen de poro se incrementó 3.5 veces cuando la temperatura de carbonización aumentó 200 K, incrementándose considerablemente la superficie específica de CarChiQE600 (1197 m²/g), alcanzando valores semejantes a los de CarChiQC (1198 m²/g) y CarChiQC600 (1253 m²/g).

Tratamiento del agua residual con los carbones activados

En el **cuadro VII** se presentan las características del agua residual (WW, por su sigla en inglés) antes y después del tratamiento de adsorción utilizando los carbones activados. El pH del agua residual es básico debido a la presencia de sales alcalinas utilizadas durante el teñido de algodón y este parámetro disminuyó significativamente debido al carácter aniónico de los carbones. La conductividad eléctrica mide la cantidad de compuestos iónicos presentes en el agua, aunque este parámetro fue elevado, después del tratamiento con los carbones disminuyó. Esto indica que los carbones son capaces de remover además de los colorantes, cierta cantidad de sales presentes en el efluente textil, lo cual se confirma con la disminución en el contenido de sólidos totales después del tratamiento de adsorción. El color, que es uno de los parámetros más significativos de los efluentes textiles, logró reducirse desde 2010 U. Pt-Co para el agua residual hasta valores entre 42 y 60 U. Pt-Co después de la adsorción de los colorantes sobre los carbones activados sintetizados, lo que indica prácticamente la eliminación total del color (» 98 %) después del tratamiento. La DQO, que indica la presencia de materia orgánica, se redujo después del proceso de adsorción a valores inferiores a 200 mg/L (**Cuadro VII**) que es el límite máximo permitido por la Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-014-ECOL/1993

(SEDESOL 1993), que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria textil.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de caracterización y pruebas de adsorción mostraron que las semillas de chirimoya son apropiadas para la síntesis de carbones, ya que se lograron remociones de prácticamente el 100 % para colorantes básicos y el colorante ácido AB74 en los dos carbones calcinados a 873 K. También se redujeron los contaminantes presentes en el agua residual tratada proveniente del teñido de telas de algodón, reduciéndose la coloración desde 2010 hasta 42 unidades Pt-Co (98 %), la DQO a valores inferiores de 200 mg/L y el contenido de sólidos totales después del tratamiento del efluente textil. Se demostró que la separación de los componentes de la semilla, en cáscara y embrión, permitió preparar carbones micro y mesoporosos, con superficies específicas superiores a 1000 m²/g y que el incremento en la temperatura de carbonización fue un parámetro que favoreció el desarrollo de la porosidad en el embrión, haciéndolo útil para la síntesis de los carbones cuando este se carbonizó a 873 K.

AGRADECIMIENTOS

Alejandra Alicia Peláez Cid y Diana Laura López Hernández agradecen a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla el apoyo económico recibido durante la realización del proyecto 100117000-VIEP2021.

REFERENCIAS

- Aboua K.N., Yobouet Y.A., Yao K.B., Goné D.L. y Trokourey A. (2015). Investigation of dye adsorption onto activated carbon from the shells of Macoré fruit. *Journal of Environmental Management* 156, 10-14. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.03.006>
- Ahsaine H.A., Zbair M., Anfar Z., Naciri Y., El Haouti R., El Alem N. y Ezahri M. (2018). Cationic dyes adsorption onto high surface area almond shell activated carbon: Kinetics, equilibrium isotherms and surface statistical modelling. *Materials Today Chemistry* 8, 121-132. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2018.03.004>
- Archin S., Sharifi S.H. y Asadpour G. (2019). Optimization and modeling of simultaneous ultrasound-assisted adsorption of binary dyes using activated carbon from tobacco residues: Response surface methodology. *Journal of Cleaner Production* 239, 118136. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118136>
- Crini G., Gimbert F., Robert C., Martel B., Adam O., Morin-Crini N., de Giorgi F. y Badot P.M. (2008). The removal of Basic Blue 3 from aqueous solutions by chitosan-based adsorbent: Batch studies. *Journal of Hazardous Materials* 153 (1-2), 96-106. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.08.025>
- Guo F., Li X., Jiang X., Zhao X., Guo C. y Rao Z. (2018). Characteristics and toxic dye adsorption of magnetic activated carbon prepared from biomass waste by modified one-step synthesis. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 555, 43-54. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2018.06.061>
- Gupta V.K. y Suhas (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review. *Journal of Environmental Management* 90 (8), 2313-2342. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017>
- Güzel F., Saygılı H., Saygılı G.A y Koyuncu F. (2015). New low-cost nanoporous carbonaceous adsorbent developed from carob (*Ceratonia siliqua*) processing industry waste for the adsorption of anionic textile dye: Characterization, equilibrium and kinetic modeling. *Journal of Molecular Liquids* 206, 244-255. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2015.02.037>
- Hameed B.H. y Daud F.B.M. (2008). Adsorption studies of basic dye on activated carbon derived from agricultural waste: *Hevea brasiliensis* seed coat. *Chemical Engineering Journal* 139 (1), 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.07.089>
- Hernández Montoya V. y Bonilla Petriciolet A. (2012). Lignocellulosic precursors used in the synthesis of activated carbon - characterization techniques and applications in the wastewater treatment. InTech, Rijeka, Croacia, 92 pp.
- Karakuş S., Şişmanoğlu S., Akdüt G., Ür Ö., Tan E., Sismanoğlu T. y Kilislioglu A. (2017). Removal of Basic Blue 3 from the aqueous solution with ternary polymer nanocomposite: Swelling, kinetics, isotherms and error function. *Journal of the Chemical Society of Pakistan* 39 (1), 17-25.
- Kiliç A. y Orhan R. (2019). Removal of cationic dyes by adsorption in a single and binary system using activated carbon prepared from the binary mixture. *Separation Science and Technology* 54 (14), 2147-2163. <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1636068>
- Peláez-Cid A.A., Blasco-Sancho S. y Matysik F.M. (2008). Determination of textile dyes by means of non-aqueous capillary electrophoresis with electrochemical detection. *Talanta* 75 (5), 1362-1368. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.01.049>
- Peláez-Cid A.A., Herrera-González A.M., Bautista-Hernández A. y Salazar-Villanueva M. (2016). Preparation and characterization of activated carbon from *Agave tequilana* Weber for the removal of textile dyes and heavy metals. *Desalination and Water Treatment* 57 (44), 21105-21117. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1111815>
- Peláez-Cid A.A., Herrera-González A.M., Bautista-Hernández A. y Salazar-Villanueva M. (2016). Elimination of textile dyes using activated carbons prepared from vegetable residues and their characterization. *Journal of Environmental Management* 181, 269-278. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.026>
- Peláez-Cid A.A., Romero-Hernández V., Herrera-González A.M., Bautista-Hernández A. y Coreño Alonso O. (2020). Synthesis of activated carbons from black sapote seeds, characterization, and application in the elimination of heavy metals and textile dyes. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 28 (2), 613-623. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.04.021>
- Raposo F., De la Rubia M.A. y Borja R. (2009). Methylene blue number as useful indicator to evaluate the adsorptive capacity of granular activated carbon in batch mode: Influence of adsorbate/adsorbent mass ratio and particle size. *Journal of Hazardous Materials* 165 (1-3), 291-299. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.106>
- Riera-Torres M. y Gutiérrez M.C. (2010). Colour removal of three reactive dyes by UV light exposure after electrochemical treatment. *Chemical Engineering Journal* 156 (1), 114-120. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.10.006>
- Rosson E., Garbo F., Marangoni G., Bertani R., Lavagnolo M.C., Moretti E., Talon A., Mozzon M. y Sgarbossa P. (2020). Activated carbon from spent coffee grounds: a good competitor of commercial carbons for water decontamination. *Applied Sciences* 10 (16), 5598. <https://doi.org/10.3390/app10165598>

SEDESOL (1993). Norma Oficial Mexicana NOM-CCA-014-ECOL/1993, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a cuerpos receptores provenientes de la industria textil. Secretaría de Desarrollo Social, Gaceta Ecológica, México. Enero 1994.

Yagub M.T., Sen T.K., Afroze S. y Ang H.M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science* 209, 172-184. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>