

CAPACIDAD ADSORTIVA DEL CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO DEL EPICARPIO DE *Citrus sinensis* EN LA REMOCIÓN DE INDIGOTINA

Sedolfo Carrasquero^{1*}, Altamira Díaz², Gilberto Colina²

¹Programa de Ingeniería Ambiental e Industrial. Facultad de Grado. Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil (UTEG). Guayaquil, Ecuador. E-mail: sedolfocarrasquero@gmail.com

²Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (DISA). Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. E-mail: adiaz@fing.luz.edu.ve

³Vicerrectorado de Investigación. Universidad Católica Santa María, Arequipa, Perú. E-mail: gjcolinaa@gmail.com

*Autor para la correspondencia: sedolfocarrasquero@gmail.com

Recibido: 04-06-2021 / Aceptado: 01-11-2021 / Publicación: 1-1-2022

Editor Académico: Michael Azael Ludeña Huaman

RESUMEN

La industria textil genera efluentes altamente coloreados y constituidos por compuestos difícilmente biodegradables. En esta investigación se evaluó la capacidad adsorptiva del carbón activado preparado a partir del epicarpio de *Citrus sinensis* en la remoción del colorante azul índigo (indigotina). El carbón se obtuvo mediante un proceso de activación química del precursor con H₃PO₄ al 40% durante 1 h. Posteriormente, se caracterizó por medio de los parámetros: densidad aparente, humedad, cenizas e índice de yodo. Se comparó la capacidad adsorptiva del carbón de *Citrus sinensis* (CACN) con un carbón comercial (CAC), mediante la realización de ensayos por carga. El carbón activado preparado a partir de las cáscaras de naranja presentó una densidad aparente de 0,459 g/mL, lo que indica que puede ser utilizado en procesos de adsorción por carga debido a su alta resistencia mecánica. Los resultados del proceso de adsorción se ajustaron mejor al modelo de Freundlich, ya que existió una mejor linealidad y una menor dispersión de los datos experimentales; así como bajos valores de la suma de los cuadrados de los errores relativos. Se obtuvieron porcentajes de remoción de indigotina para el carbón activado de cáscaras de naranja y el carbón activado comercial de 70,35% y 88,78%, con dosis óptimas de 8 y 2 g/L tratando aguas sintéticas con concentraciones iniciales de 67 y 37 mg indigotina/L, respectivamente, lo que indica que estos materiales adsorbentes pueden ser empleados en el tratamiento de efluentes textiles para la reducción del azul índigo.

Palabras clave: adsorción, carbón activado, cáscaras de naranja, indigotina.

ADSORPTIVE CAPACITY OF ACTIVATED CARBON OBTAINED FROM EPICARP OF *Citrus sinensis* IN THE INDIGOTINE REMOVAL

ABSTRACT

The textile industry generates highly colored effluents made up of hardly biodegradable compounds. The adsorptive capacity of activated carbon prepared from the epicarp of *Citrus sinensis* in the removal of indigo blue dye (indigotine)

was evaluated in this research. The carbon was obtained through a process of chemical activation of the precursor with H_3PO_4 (40%) during one hour. The activated carbon obtained was characterized by the parameters: density, humidity, ash and iodine index. The adsorptive capacity of Citrus sinensis carbon (CACN) with a commercial carbon (CAC) was compared by carrying out batch tests. Activated carbon prepared from orange peels presented an apparent density of 0.459 g/mL, which indicates that it can be used in charge adsorption processes due to its high mechanical resistance. The results of the adsorption process were better adjusted to the Freundlich model, given the better linearity and a smaller dispersion of the experimental data; as well as low values of the sum of the squares of the relative errors. Indigotine removal percentages were obtained for activated charcoal from orange peel and commercial activated carbon of 70.35 % and 88.78 %, with optimal doses of 8 and 2 g/L treating synthetic waters with initial concentrations of 67 and 37 mg indigotine/L, respectively, which indicates that these adsorbent materials can be used in the treatment of textile effluents for the reduction of indigo blue.

Keywords: physicochemical treatment, coagulation, industrial wastewater, effluent, bentonite, ferric chloride, aluminum sulfate.

CAPACIDADE ADSORTIVA DE CARBONO ATIVADO OBTIDO DA EPICARPIA DE *Citrus sinensis* NA REMOÇÃO DE INDIGOTINA

RESUMO

A indústria têxtil gera efluentes altamente coloridos formados por compostos dificilmente biodegradáveis. Nesta pesquisa, foi avaliada a capacidade adsortiva do carvão ativado preparado a partir do epicarpo de *Citrus sinensis* na remoção do corante azul índigo (indigotina). O carvão foi obtido por meio de um processo de ativação química do precursor com 40% de H_3PO_4 por 1 h. O carvão ativado obtido foi caracterizado por meio dos parâmetros: densidade aparente, umidade, cinzas e índice de iodo. A capacidade adsortiva do carbono *Citrus sinensis* (CACN) foi comparada com a do carbono comercial (CAC), por meio de testes de carga. O carvão ativado preparado a partir de cascas de laranja apresentou densidade aparente de 0,459 g/mL, o que indica que pode ser utilizado em processos de adsorção de carga devido à sua alta resistência mecânica. Os resultados do processo de adsorção foram mais bem ajustados ao modelo de Freundlich, devido ao fato de que houve melhor linearidade e menor dispersão dos dados experimentais; bem como baixos valores da soma dos quadrados dos erros relativos. As porcentagens de remoção de indigotina foram obtidas para carvão ativado de cascas de laranja e carvão ativado comercial de 70,35% e 88,78%, com doses ótimas de 8 e 2 g/L tratando águas sintéticas com concentrações iniciais de 67 e 37 mg de indigotina/L, respectivamente, que indica que esses materiais adsorventes podem ser usados no tratamento de efluentes têxteis para a redução do azul índigo.

Palavras-chave: adsorção, carvão ativado, cascas de laranja, indigotina

Citaci3n sugerida: Carrasquero, S., D3az, A., Colina, G. (2022). Capacidad adsortiva del carb3n activado obtenido del epicarpio de *citrus sinensis* en la remoci3n de indigotina. Revista Bases de la Ciencia, 7(1), 1-16. DOI: https://doi.org/10.33936/rev_bas_de_la_ciencia.v%vi%i.3511



1. INTRODUCCIÓN

La industria textil es considerada como uno de los principales generadores de desechos peligrosos debido a que producen grandes cantidades de efluentes altamente coloreados y constituidos por compuestos difícilmente biodegradables (Amjad y Qayyum, 2007). Este sector industrial utiliza una gran variedad de colorantes sintéticos, que suelen descargarse en concentraciones elevadas en los residuos líquidos, puesto que la fijación de estos colorantes por las telas es muy pobre (Bernal *et al.*, 2017; Cortazar Martínez *et al.*, 2003).

A pesar de que la estructura de los colorantes es de naturaleza orgánica, su degradación es lenta y difícil, puesto que los organismos presentes en la naturaleza no poseen mecanismos adecuados para realizar su rápida descomposición y esto genera que se acumulen en los ecosistemas (Holkar *et al.*, 2016).

Dentro de los colorantes sintéticos ampliamente usados en la actualidad se encuentra el azul índigo (indigotina), empleado en el teñido y confección de pantalones de mezclilla (de Keijzer *et al.*, 2012). En la literatura científica se reporta el uso de varias operaciones físicas y procesos químicos para la remoción de colorantes, entre los que se encuentran: la coagulación, oxidación química, procesos de separación de membrana, reactores electroquímicos, filtración y ósmosis reversa, entre otros (Bermeo y Tinoco, 2016; Gilpavas *et al.*, 2018). No obstante, estos métodos de tratamiento resultan costosos al momento de su aplicación, por lo que se requiere la búsqueda de otras alternativas que presenten una mayor relación costo-eficiencia.

En tal sentido, la adsorción con carbón activado elaborado a partir de precursores naturales, es un proceso altamente selectivo, de elevada eficiencia y bajo costo debido a que los materiales adsorbentes obtenidos presentan grandes áreas superficiales y estructuras porosas (Singh *et al.*, 2003).

Diversas investigaciones revelan el potencial de utilizar materiales lignocelulósicos de bajo costo y abundante disponibilidad como precursores naturales para la producción de carbones activados. Estos materiales son las fibras de coco (Kadaverlu y Namasivayam, 2003), cáscaras de plátano (Arrocha *et al.*, 2019), cáscara de limón (*Citrus limonum*) (Carrasquero *et al.*, 2016), cáscara de naranja (*Citrus sinensis*) (Pandiarajan *et al.*, 2018), entre otros. Por esta razón, el objetivo de la investigación fue evaluar el potencial que tiene el carbón activo preparado a partir de las cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*) para remover el colorante azul índigo (indigotina) de aguas sintéticas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Activación y carbonización del precursor

Para obtención del carbón activado se utilizó el método desarrollado por Carrasquero *et al.* (2016). Las cáscaras de naranja utilizadas provenían de diferentes puntos de venta de jugos ubicados en la Circunvalación No. 1, Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela. Para la obtención del carbón activado se procedió a limpiar las cáscaras con suficiente agua desionizada eliminando las impurezas. Posteriormente, las cáscaras fueron secadas a temperatura ambiente (25 ± 2 °C) y cortadas en trozos de 0,5 x 0,5 cm. Como agente activante se utilizó ácido fosfórico al 40% v/v durante 1 hora, y se empleó una alta relación precursor: ácido de 1:1 p:v (1 g de cáscara por 1 mL de ácido).

La pasta obtenida se incineró en una mufla (Shimaden, modelo SR-500) a 500 ± 10 °C, por espacio de 1 hora. El carbón fue lavado primero con agua caliente (95 ± 1 °C) y después con una solución de hidróxido de sodio (0,02 N) hasta alcanzar un pH entre 6,5 y 7,0. Luego se secó durante 12 horas en una estufa (Fisher Isotemp, modelo Senior) calibrada a una temperatura de 105 ± 1 °C. El carbón activado obtenido se tamizó para obtener una distribución de partículas uniformes. Para ello, se tomó el polvo compuesto por las partículas retenidas entre los tamices No. 6 y 4 ASTM ($0,85 \text{ mm} < \Phi < 1,00$ mm.). Una vez preparado el carbón activo de la cáscara de naranja, se codificó como CACN.

2.2. Caracterización del carbón activado

La determinación de algunas propiedades fisicoquímicas, tales como densidad aparente, cenizas, humedad e índice de yodo se realizaron bajo los procedimientos descritos en las normas ASTM D2854-96 (2000), ASTM D2866-94 (1999), ASTM D2867-99 (1999), ASTM D4607- 94 (2011), respectivamente.

2.3. Determinación del espectro de adsorción del colorante

Se realizó un barrido espectral a una solución de indigotina de 36 mg/L, y se registró la absorción a diferentes longitudes de onda (λ) desde 250 hasta 850 nm. El equipo utilizado fue un espectrofotómetro UV-visible (ThermoScientific, modelo Genesis 20).

2.4. Procesos de adsorción por carga e isothermas de adsorción

Los estudios de adsorción en fase líquida se ejecutaron a una temperatura de 25 °C con agitación constante de 100 rpm, para lo cual se utilizó un agitador eléctrico tipo Bach (Burrel Scientific, modelo 75) durante 60 minutos. Primero, se preparó soluciones de indigotina de 10; 20; 40; 60; 80 y 100 mg/L, luego se colocó 0,8 g de carbón activado preparado (CACN) y carbón activado comercial (Norit-A, Brian Chemical), codificado como CAC, en fiolas con 100 mL de la solución de indigotina para cada concentración. El ensayo se realizó por triplicado.

La cantidad de indigotina que fue adsorbida por el carbón activado preparado y el comercial se calculó de acuerdo a la Ecuación 1.

$$q = \frac{C_0 - C_e}{m} \times v \quad (1)$$

Donde q es la cantidad de indigotina adsorbida (mg/g), C_0 es la concentración inicial de la solución (mg/L), C_e es la concentración en el equilibrio de la fase líquida (mg/L), m es el peso del adsorbente (g) y v es el volumen de la solución.

Los resultados obtenidos fueron ajustados a los modelos de Langmuir y Freundlich. Para ambos modelos, se calculó la suma de los cuadrados de los errores relativos según la ecuación de Myers, por medio de la Ecuación 2.

$$E_r = \sum \left(\frac{q_{\text{ajustado}} - q_{\text{experimental}}}{q_{\text{experimental}}} \right)^2 \quad (2)$$

2.5. Efecto de la masa de carbón activado sobre la remoción de indigotina

Después de haber determinado las isotermas de adsorción para el carbón activo CACN y el CAC, se procedió a evaluar el efecto de la variación de la masa de carbón activado sobre la remoción de indigotina. La masa de carbón activado que se utilizó fue 0,1; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 y 1,0 g, para una solución con una concentración inicial de indigotina de 37 y 67 mg/L, para CAC y CACN, respectivamente.

2.6. Análisis estadístico de los datos

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos medidos en la caracterización de CACN y CAC fueron expresados mediante estadística descriptiva, valores de tendencia central (media) y su dispersión (desviación estándar). De igual manera, los valores medios de los parámetros fisicoquímicos se compararon mediante un análisis de varianza de una sola vía utilizando el programa estadístico SPSS, versión 20.0.

Las pruebas de adsorción de la sección 2.4. se realizaron mediante un diseño completamente al azar de dos factores (AxB). Los factores fueron: el tipo de carbón, que presentó dos niveles CACN y CAC, y la concentración inicial de indigotina que varió en seis niveles, 10; 20; 40; 60; 80 y 100 mg/L. Se realizaron un total de 12 tratamientos, con tres replicas cada una, para un total de 36 pruebas de adsorción. Los resultados obtenidos para la capacidad adsortiva del CACN y el CAC se compararon mediante un análisis de varianza y separación de medias a través de la prueba de Tukey. Asimismo, los resultados del efecto de la masa de carbón activado sobre la remoción de indigotina fueron comparados mediante un análisis de varianza y separación de medias a través de la prueba de Tukey, para lo cual se utilizó el programa estadístico SPSS, versión 20.0

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización de los adsorbentes

Las características fisicoquímicas del carbón activado preparado a partir de las cáscaras de naranja y del carbón activado comercial se muestran en la **Tabla 1**. El porcentaje de cenizas del carbón preparado y el comercial son cercanos al porcentaje de cenizas del carbón activado preparado a partir de residuos de *Zea mays* (Torres-Pérez *et al.* 2020).

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica de los carbones activados CACN y CAC.

Adsorbente	Densidad aparente (g/mL) Media ± DE	Cenizas (%) Media ± DE	Humedad (%) Media ± DE	Índice de yodo (mg I ₂ adsorbido/g carbón) ± DE	Fuente
CACN	0,46 ± 0,00 ^a	6,56±1,43 ^a	22,08 ± 0,71 ^a	527,80 ^b ± 6,20	Esta investigación
CAC	0,43 ± 0,01 ^b	6,15±1,27 ^a	12,15 ± 1,11 ^b	609,80 ^a ± 3,20	Esta investigación
CACN	0,94	33,10	25,20	542,94 ± 8,40	Carrasquero et al. (2016)
CABC	0,3072	17,50	2,70	NR	Contreras et al. (2008)
CAB (25:75)	0,23	11,65	4,95	NR	Cambar et al. (2008)
CAA	0,42	5,65	6,65	562,64	Sánchez et al. (2013)

Nota: Media con letras distintas en la misma columna y fila que existen diferencias significativas a través de la prueba de Tukey. CACN: carbón activado de cáscaras de naranja. CAC: carbón comercial. CABC: carbón activado de bagazo de caña de azúcar. CAB: Carbón activado obtenido a partir de 25% de cáscara de algarrobo y 75% de bagazo de caña de azúcar. CAA: carbón activado de cáscara de algarrobo. DE: desviación estándar. NR: No reporta.

Fuente: Elaboración propia.

Se obtuvo que el CACN presento una densidad aparente de 0,459 g/mL, por lo que dicho carbón puede utilizarse para procesos de adsorción a flujo continuo y procesos por carga por su alta resistencia mecánica. Según el criterio de Ahmedna *et al.* (1997) y Basso *et al.* (2002), quienes establecen como valor de referencia una densidad mínima de 0,3 g/mL.

El índice de yodo (I₂ adsorbido/g carbón) es una expresión para medir indirectamente el área superficial de carbones activados, a partir de la medición de los miligramos de yodo absorbido por un gramo de carbón activado (Feijoo *et al.*, 2019). Los valores de índice de yodo fueron de 527,8 y

609,8 mg para el CACN y CAN, respectivamente. Un mayor índice de yodo implica una mayor área superficial y por ende una mayor capacidad adsortiva de indigotina durante los ensayos por carga. El CACN presentó un valor de índice de yodo mayor al mínimo considerado para su comercialización (500 mg I₂/g de carbón) (Carrasquero *et al.* 2016).

3.2. Espectro de adsorción del colorante

En la **Figura 1** se presenta el espectro de absorción de la solución de indigotina. Las lecturas de absorbancia del espectro permitieron establecer la longitud de onda óptima para la medición de este colorante. La mayor absorptividad, es decir, la máxima absorción molecular se obtuvo a 570 nm.

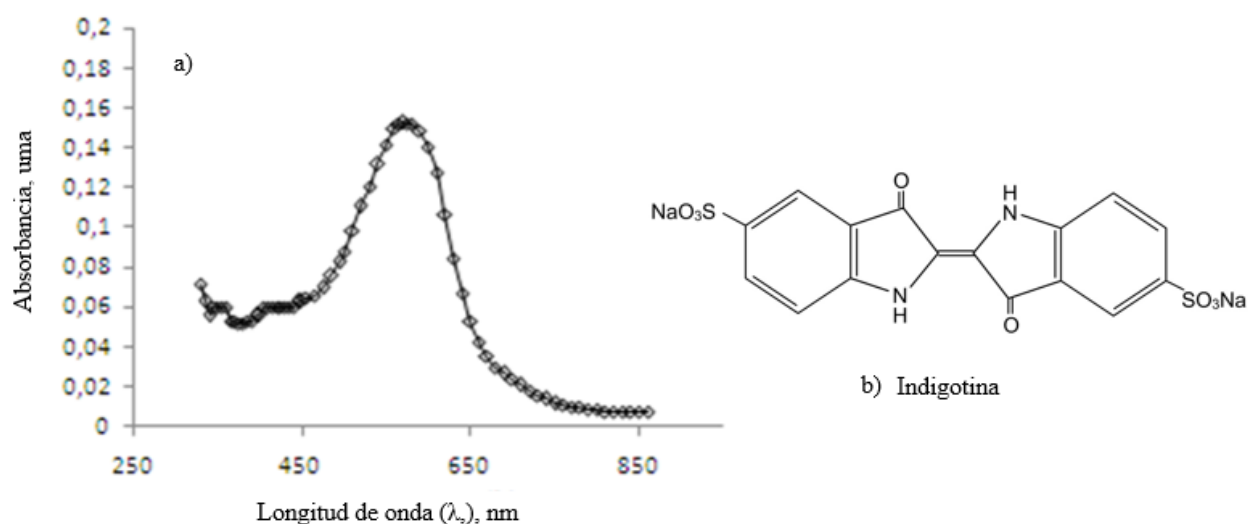


Figura 1. a) Espectro de absorción del colorante indigotina b) Estructura química.

Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados se corresponden con la literatura, ya que una solución de indigotina debe presentar la máxima absorbancia en la región naranja (575-600 nm) del espectro visible, debido a que absorbe el color naranja de la radiación blanca que llega y transmite el componente azul que no ha sido alterado (Skoog *et al.*, 1995). Según Balan y Monteiro (2001) y Lakshami *et al.* (2009), el colorante índigo presenta la máxima absorción entre 570 y 680 nm.

3.3. Ensayos de adsorción por carga

En la **Tabla 2** se muestran las concentraciones iniciales y residuales de indigotina en las aguas sintéticas tratadas con el carbón activado y comercial. La aplicación de CACN permitió reducir las concentraciones de indigotina en todos los ensayos realizados. Sin embargo, los menores valores residuales de indigotina se registraron cuando se utilizó el CAC.

Tabla 2. Comparación de la capacidad adsorptiva de CACN y CAC

Co (mg/L)	CR CACN (mg/L)	CR CAC (mg/L)	q CACN (mg/g)	q CAC (mg/g)	Remoción CACN (%)	Remoción CAC (%)
	Media ± DE	Media ± DE	Media ± DE	Media ± DE	Media ± DE	Media ± DE
10	6,45±0,86	1,61±0,08	0,49±0,11 ^k	0,98±0,03 ^j	37,90±8,24 ^h	83,07±0,15 ^d
20	9,33±1,50	1,91±0,43	1,33±0,19 ⁱ	2,24±0,06 ^h	53,54±7,46 ^g	90,38±2,16 ^c
40	14,03±0,43	2,97±0,64	3,32±0,05 ^g	4,78±0,08 ^f	65,52±1,05 ^f	92,68±1,58 ^{b,c}
60	18,27±0,43	2,97±1,07	5,19±0,06 ^e	6,99±0,14 ^d	69,74±0,70 ^e	94,96±1,82 ^b
80	23,12±0,86	0,85±0,21	7,18±0,04 ^d	9,68±0,06 ^c	71,45±1,06 ^e	98,92±0,27 ^a
100	28,72±0,21	2,21±0,86	8,99±0,18 ^b	12,01±0,082 ^a	71,73±0,21 ^e	97,77±0,86 ^a

Nota: Media con letras distintas en la misma columna y fila que existen diferencias significativas a través de la prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). CR = Concentración residual. CACN=carbón de naranja. CAC=carbón comercial. DE=desviación estándar. Co: Concentración inicial de indigotina. número de repeticiones =3.

Fuente: Elaboración propia.

Para los dos carbones evaluados, CACN y CAC, la capacidad total de adsorción (q) tuvo una marcada tendencia a incrementar con el aumento de la Co, lo cual se atribuye a la tendencia de q a conseguir el equilibrio interfásico (sólido-líquido) a medida que el carbón se expone a mayor cantidad de adsorbato (Jung *et al.*, 2001). De igual manera, se obtuvieron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre los valores de capacidad adsorptiva para todas las concentraciones iniciales, registrando valores superiores a 5 mg/g (Indigotina/carbón activado) para las concentraciones iniciales superiores a 60 mg/L.

Al respecto, Ahmad y Hamed (2010) reportaron que la fuerza motriz de la adsorción es la diferencia de concentración entre el soluto, en el adsorbente y en la disolución. Un gradiente de concentración bajo causa un transporte lento debido a una disminución del coeficiente de difusión o coeficiente de transferencia de masa; éste mejora Balan al aumentar la concentración inicial, debido a que ocurre un transporte más rápido y, en consecuencia, aumenta la capacidad de adsorción (Castellar *et al.*, 2013; Chatterje *et al.*, 2005; Chiou y Li, 2003).

Asimismo, este comportamiento también fue obtenido por Carrasquero *et al.* (2016) y Sánchez *et al.* (2013) durante la adsorción de Ca y Cr utilizando carbones activados preparados a partir de cáscaras de naranja y bagazo de caña de azúcar.

Se observa que el CAC permitió obtener valores residuales de indigotina luego de las pruebas de adsorción menores a 3 mg/L para todo el rango de concentraciones iniciales (10 – 100 mg/L). Por su

parte, el tratamiento con CACN generó efluentes con valores residuales superiores a 6,00 mg/L. Los porcentajes de remoción para el CACN oscilaron entre 37,90 y 71,73%, siendo mayores a 60% cuando la concentración inicial de indigotina fue mayor o igual a 40 mg/L. Esto significa que estos adsorbentes pueden de ser empleados en tratamientos de efluentes textiles para la remoción de colorantes y brindar un buen desempeño en los sistemas de adsorción. No se encontraron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los porcentajes de remoción obtenidos para las concentraciones iniciales mayores o iguales a 60 mg/L para el CACN.

Se obtuvo que la mayor capacidad adsorción y el mayor porcentaje de remoción fue para el CAC en cada concentración inicial evaluada, obteniendo diferencias significativas ($p \leq 0,05$) al compararlo con el CACN. El uso del carbón activo en la adsorción de indigotina es favorecido, en primer lugar, por las fuerzas de dispersión y a las interacciones entre los electrones π de los sitios ácidos de Lewis en el plano basal del carbón activado y los electrones libres de las moléculas de indigotina presentes en los anillos aromáticos y enlaces múltiples y, en segundo lugar, a los enlaces de hidrógeno (Orfão *et al.*, 2006).

El carbón activado preparado a partir del precursor natural presentó porcentajes de remoción de indigotina que se encuentran entre los rangos reportados para otros adsorbentes y adsorbatos. Ensuncho *et al.* (2015) con tres tipos de precursores: carbón de cáscara de coco, cascarilla de arroz y tusa de maíz, reportaron porcentajes de remoción de rojo allura que oscilaron entre 55% y 90%, 32 y 60% y entre 70 y 92%, respectivamente.

A partir de los valores de la **Tabla 2**, se graficó q vs C_e para así determinar las isotermas de adsorción de indigotina. En la **Figura 2** se muestra las isotermas de adsorción por los carbones activados utilizados. La isoterma de la indigotina sobre el CACN mostró una forma del tipo S. La forma inicial de la isoterma fue cóncava respecto al eje de ordenadas, por lo que la adsorción se vio favorecida a medida que aumenta la concentración de la fase líquida (Cabal Álvarez, 2009). Este tipo de isotermas es indicativo de que a bajas concentraciones del soluto en la solución acuosa existe poca afinidad entre el soluto y el adsorbente. Esta afinidad se incrementa en la medida que aumenta la concentración de soluto en la solución, hasta un cierto valor de concentración donde se produce una saturación de los sitios de adsorción. Esta saturación no fue observada en esta investigación para el CACN, por lo que el carbón activado no perdió capacidad adsortiva.

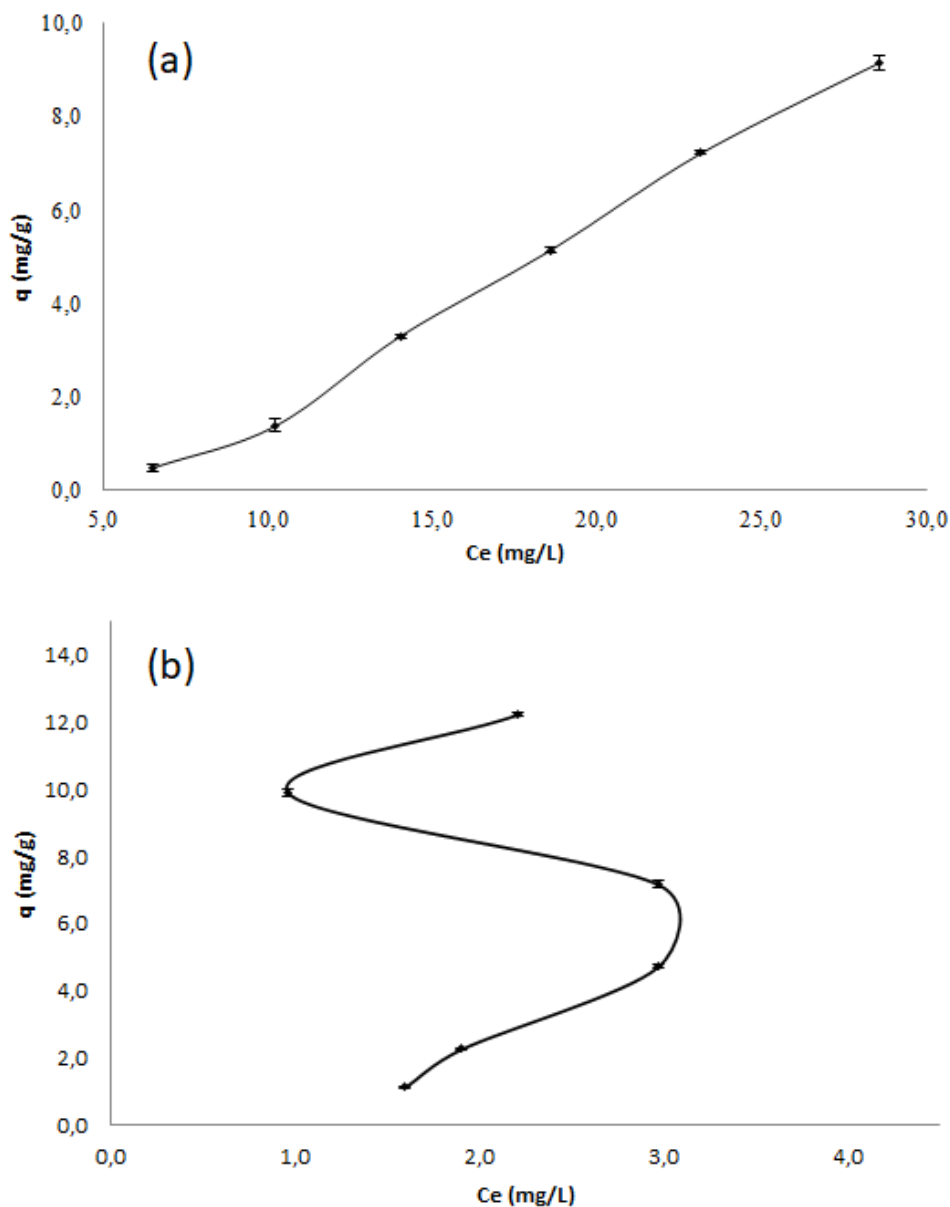


Figura 2. Isotherma de adsorción de la indigotina sobre el CACN (a) y CAC (b).

Fuente: Elaboración propia.

El subgrupo de la clasificación de Giles de las isothermas hace referencia a los mecanismos de adsorción. La isoterma de la indigotina sobre el CACN corresponde a un subgrupo 1, que indica que la adsorción ocurre a través de monocapas de adsorbatos que se van completando y que la monocapa no ha sido completada

Con respecto a la isoterma de la indigotina sobre el CAC mostró una forma del tipo S subgrupo 2 según la clasificación de Giles (**Figura 2b**). A diferencia de la isoterma sobre el CACN, en el CAC se puede identificar una meseta de adsorción, que se corresponde con el llenado de la monocapa sobre

la superficie del adsorbente, con un aumento posterior que representa el desarrollo de una segunda capa sobre los adsorbatos adsorbidos (Cabal Álvarez, 2009). La forma de la isoterma indica que el carbón se saturó a concentraciones iniciales de indigotina de 80 mg/L.

3.4. Modelamiento matemático del proceso de adsorción para los carbones aplicados

El modelo de Freundlich arrojó los valores de coeficientes de correlación (r) más altos (**Tabla 3**). Este hecho puede ser interpretado como una mayor aplicabilidad del modelo de Freundlich en relación al modelo de Langmuir; por lo que se infiere que la superficie del adsorbente es heterógena, como lo supone este modelo, y además al aumentar la energía libre de adsorción el número de centros de adsorción disminuye exponencialmente.

De igual manera, el modelo de Freundlich presentó los valores de SSRE más bajos. Estos resultados demuestran que dicho modelo, se ajustó mejor al comportamiento de la adsorción de la indigotina sobre los carbones activados. Resultados similares obtuvo Domga *et al.* (2016) en la adsorción de anaranjado de metilo sobre carbón activado.

Tabla 3. Constantes de las isotermas de Langmuir y Freundlich

Carbón	Langmuir			Freundlich				
	b (mg/g)	K (L/mg)	r	SSRE	K _F (L/mg)	N	r	SSRE
CACN	-1,590	-0,040	0,953	3,669	1,543.10 ⁻²	0,510	0,988	0,148
CAC	-1,381	-0,279	0,940	0,293	0,330	0,378	0,966	0,151

CACN=carbón de naranja. CAC=carbón comercial. n=3. n=número de repeticiones. r = coeficiente de correlación. SSRE= Suma de los cuadrados de los r errores relativos según la ecuación de Myers (Lu y Sorial, 2004)

Fuente: Elaboración propia.

De igual manera, estos resultados son semejantes a los reportados por Mafra *et al.* (2013) y Khaled, *et al.* (2009) y quienes obtuvieron que el modelo de Freundlich se ajusta mejor que el modelo de Langmuir en la adsorción de colorantes artificiales sobre carbón activado preparado a partir de cáscaras de naranja. De igual manera, Bernal *et al.* (2017) encontraron que la adsorción del naranja remazol se ajusta mejor al modelo de Freundlich que al de modelo de Langmuir, durante el tratamiento de aguas residuales textiles.

3.5 . Adsorción de indigotina a diferentes masas de carbón activado

La **Tabla 4** muestra los valores promedio y desviación estándar de la concentración residual de la indigotina (mg/L) y el porcentaje remoción (%) para las diferentes masas de carbón activado CACN y CAC, con la finalidad de evaluar el efecto de la dosis de carbón sobre la remoción del colorante, para una concentración inicial de 67 y 37 mg/L.

Se obtuvo que la concentración residual de indigotina disminuyó progresivamente a medida que se incrementó la masa de CACN, obteniendo los menores valores de 19,80 y 17,73 mg/L para las masas de 0,8 y 0,1 g, respectivamente, sin diferencia significativa ($p>0,05$) entre estas concentraciones. Con respecto a los porcentajes de remoción, estos se incrementaron con la masa de carbón, registrándose valores entre 31,73 y 73,46%. Se observa que la dosis óptima de carbón que maximiza la remoción de indigotina con el menor gasto del adsorbente es 0,8 g CACN/100 mL, es decir, 8 g de CACN/L.

Tabla 4. Adsorción de indigotina utilizando diferentes dosis de CAC y CACN.

Masa de						
Carbón	Cr CACN	Remoción	q CACN	Remoción CAC		
(g)	(mg/L)	CACN (%)	(mg/g)	Cr CAC (mg/L)	(%)	q CAC (mg/g)
0,1	45,60 ^e ±0,74	31,73 ^e ±1,11	20,03 ^a ±0,44	6,45 ^c ±0,78	82,38 ^c ±2,13	28,99 ^a ±1,32
0,2	40,56 ^d ±0,78	39,28 ^d ±1,17	12,98 ^b ±0,40	4,14 ^{a,b} ± 1,03	88,68 ^{a,b} ± 2,83	15,72 ^b ±0,47
0,4	33,80 ^c ±0,30	49,39 ^c ±0,44	8,20 ^c ±0,06	3,88 ^{a,b} ±0,39	89,38 ^{a,b} ± 1,07	8,07 ^c ± 0,12
0,6	26,62 ^b ±0,82	60,14 ^b ±1,23	6,63 ^d ±0,15	3,03 ^a ± 0,64	91,72 ^a ± 1,76	5,57 ^d ± 0,10
0,8	19,80 ^a ±1,49	70,35 ^a ±2,23	5,85 ^e ±0,18	4,21 ^{a,b} ± 0,01	88,49 ^{a,b} ± 0,02	4,03 ^{d,e} ±0,12
1	17,73 ^a ±0,81	73,46 ^a ±1,21	4,87 ^f ±0,06	5,02 ^{b,c} ± 0,27	86,27 ^{b,c} ± 0,74	3,14 ^e ± 0,04

Nota: Media con letras distintas en la misma columna y fila que existen diferencias significativas a través de la prueba de Tukey ($p\leq 0,05$). CAC = Carbón comercial–Cr: Concentración residual de indigotina. La concentración inicial fue de 67 y 37 mg/L, cuando se utilizó CACN y CAC, respectivamente.

Fuente: Elaboración propia.

Se observó un aumento gradual del porcentaje de remoción del colorante con el incremento de la cantidad de carbón, debido a que se proporciona mayor área de superficie del adsorbente y disponibilidad de más sitios de adsorción. Sin embargo, existió una cantidad límite de carbón, donde el porcentaje de remoción permaneció constante.

Con respecto al CAC, se decidió trabajar con una concentración inicial menor que la utilizada con los ensayos con CACN para evitar que el carbón se saturara, y trabajar en la zona lineal de transferencia de masa de la isoterma de adsorción. La concentración residual de indigotina disminuyó de 37,0 a 6,45 mg/L, cuando se aplicó una masa de 0,1 g de CAC. Se obtuvieron los menores valores residuales cuando se utilizaron masas entre 0,2 a 0,8 g (sin diferencia significativa $p>0,05$) entre las

concentraciones que estuvieron entre 2,02 y 4,21 mg/L. En función de los resultados obtenidos la dosis óptima de CAC es de 0,2 g de carbón/100 mL, es decir, 2 g CAC/L.

4. CONCLUSIONES

El proceso de adsorción de la indigotina se ajustó mejor al modelo de Freundlich que al de Langmuir, debido a que existió una mayor linealidad y una menor dispersión de los datos experimentales; así como bajos valores de la suma de los cuadrados de los errores relativos: 0,145 para el carbón activado de cáscaras de naranja y 0,161 para el carbón activado comercial. Se obtuvo un porcentaje de remoción de indigotina para el carbón activado de cáscaras de naranja de 70,35% con una dosis óptima de 2 g/L tratando aguas sintéticas con concentraciones iniciales de 67 mg/L. Estos resultados indican que el carbón activo preparado a partir de las cáscaras de naranja pueden ser empleados en el tratamiento de efluentes textiles para la reducción del colorante azul índigo.

5. DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS DE LOS AUTORES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses

6. REFERENCIAS

- Ahmad, A., & Hammed, B. (2010). Fixed-bed adsorption of reactive azo dye onto granular activated carbon prepared from waste. *Journal of Hazardous Materials*, 175(1-3), 298-303. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.10.003>
- Ahmedna, M., Clarke, S., Rao, R., Marshall, W., & Johns, M. (1997). Use of Filtration and Buffers in Raw Sugar Colors Measurements *Journal of the Science of the Food and Agriculture*, 75, 109-116. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199709\)75:1<109::AID-JSFA849>3.0.CO;2-Y](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199709)75:1<109::AID-JSFA849>3.0.CO;2-Y)
- Amjad, A., & Qayyum, H. (2007). Decolorization and removal of textile and non-textile dyes from polluted wastewater and dyeing effluent by using potato (*Solanum tuberosum*) soluble and immobilized polyphenol oxidase. *Bioresource Technology*, 98(5), 1012-1019. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.04.008>
- Arrocha, F., Guevara, C., González, M., Rivas, F., & Delgado R. (2019). Evaluación de filtros de carbón activado basado en cáscaras de frutas (piña, plátano, coco, naranja). *Revista de Iniciación Científica*, 5(1), 79-83. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v5.0.2390>
- ASTM D2854-96. (2000). Standard test method for apparent density of activated carbon. ASTM International. <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D2854-96R00.htm>
- ASTM D2866-11. (1999). Standard Test Method for Total Ash Content of Activated carbon. ASTM International. <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D2866-11.htm>
- ASTM D2867-99. (1999). Standard Test Method for Moisture of Activated Carbon. ASTM International. <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D2867-99.htm>
- ASTM D4607-94. (2011). Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon. ASTM International. <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D4607-94R11.htm>

- Balan, D., & Monteiro, R. (2001). Decolorization of textile indigo dye by ligninolytic fungi. *Journal of Biotechnology*, 89(2-3),141-145. [https://doi.org/10.1016/S0168-1656\(01\)00304-2](https://doi.org/10.1016/S0168-1656(01)00304-2)
- Basso, M., Cerrella, E., & Cukierman, A. (2002). Activated Carbons Developed from a Rapidly Renewable Biosource for Removal of Cadmium (II) and Nickel(II) Ions from Dilute Aqueous Solutions. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 41, 180-189. <https://doi.org/10.1021/ie010664x>
- Bermeo M., & Tinoco O. (2016). Remoción de colorantes de efluente sintético de industria textil aplicando tecnología avanzada *Industrial Data*, 19(2), 91-95. <http://dx.doi.org/10.15381/idata.v19i2.12844>
- Bernal, L., Hernández, M., Berber, M., Martínez, M., Delgado, J., & Espinosa, M. (2017). Remoción del colorante naranja remazol de aguas residuales generadas en la industria textil. *Avances en Ciencia e Ingeniería*, 8(3), 51-57. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323652916006>
- Cabal Álvarez, M. (2009). *Depuración de efluentes contaminados por hidrocarburos aromáticos policíclicos mediante carbones activados: evaluación del proceso de adsorción* [Tesis doctoral, Universidad de Oviedo].
- Cambar Galindo, D., Colina Andrade, G., Colina, M., Carrasquero Ferrer, S., Cordova, A., & Marín J. (2013). Capacidad adsortiva del carbón activado proveniente de *Hymenaea courbaril* L. y *Saccharum officinarum* (CAB) en la remoción de CO₂. *Ciencia*, 21(3), 143 – 152. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/ciencia/article/view/18740>
- Carrasquero, S., Gutiérrez, V., Ocando, L., Ramírez, Y., Marín, J., & Colina, G. (2016). Adsorción de calcio utilizando carbón activado obtenido de *Cassia fistula* y cáscaras de naranja (*Citrus sinensis*). *Ciencia*, 24(4), 197-206. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/ciencia/article/view/22315>
- Castellar, G., Angulo, E., Zambrano, A., & Charris, D. (2013). Equilibrio de adsorción del colorante azul de metileno sobre carbón activado. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 16(1), 263-271. <https://revistas.udca.edu.co/index.php/ruadc/article/view/882>
- Chatterjee, S., Chatterjee, S., Chatterjee, B., Das, A., & Guha, A. (2005). Adsorption of a model anionic dye, eosin Y, from aqueous solution by chitosan hydrobeads. *Journal of Colloid and Interface Science*, 288(1), 30-35. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.02.055>
- Chiou, M., & Li, H. (2003). Adsorption behavior of reactive dye in aqueous solution on chemical crosslinked chitosan beads. *Chemosphere*, 50(8), 1095-1105. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(02\)00636-7](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(02)00636-7)
- Contreras, J., Fuenmayor, H., Colina M., Díaz, A., Fernández, N., Pérez, M., & Colina, G. (2008). Capacidad adsortiva del carbón activado preparado a partir del bagazo de la caña de azúcar para la adsorción de fenol, 2-clorofenol, 2-nitrofenol, y 2,4-dimetilfenol. *Ciencia*, 16(1),111-121. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/ciencia/article/view/9835>
- Cortazar Martínez, A., Coronel Olivares, C., Escalante Lozada, A., & González Ramírez, C. (2014). Contaminación generada por colorantes de la industria textil. *Vida Científica Boletín Científico De La Escuela Preparatoria No. 4*, 2(3),1-6. <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa4/article/view/1862>
- De Keijzer, M., van Bommel, M., Hoffman-de Keijzer, R., Knaller, R., & Oberhumer, E. (2012). Indigo carmine: Understanding a problematic blue dye. *Studies in Conservation*, 57(1), S87-S95. <https://doi.org/10.1179/2047058412Y.0000000058>
- Domga, R., Tcheka, C., Mouthe, G., Kobbe, N., Tchatchueng, J., & Tchigo, A. (2016). Batch equilibrium adsorption of methyl orange from aqueous solution using animal activated carbon from gudali bones. *International Journal of Innovation Sciences and Research*, 5(7), 798-805. <http://www.ijisr.com/sites/default/files/issues-pdf/297.pdf>
- Ensuncho, A., Milanés, N., & Robes, J. (2015). Remoción del colorante Rojo Allura en una solución acuosa utilizando carbones activados obtenidos de desechos agrícolas. *Información Tecnológica*, 26(2), 69-78. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642015000200009>
- Feijoo, C., de la Torre, E., y Uribe, R. (2019). Determinación de la capacidad de adsorción del complejo oro-cianuro en compósitos de carbón activado-vidrio. *Afinidad*, 76(4), 299-306. <https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/download/361881/456483/>

- Gilpavas, E., Arbeláez-Castaño, P., Medina-Arroyave, J., & Gómez-Atehortua, C. (2018). Tratamiento de aguas residuales de la industria textil mediante coagulación química acoplada a procesos Fenton intensificados con ultrasonido de baja frecuencia. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(1), 157-167. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.01.14>
- Holkar, C., Jadhav, A., Pinjari, D., Mahamuni, N., & Pandit, A. (2016). A critical review on textile wastewater treatments: Possible approaches. *Journal of Environmental Management*, 182(1), 351-366. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.07.090>
- Jung, W., Ahn, K., Lee, Y., Kim, K., Rhee, J., Park, J., & Paeng, K. (2001). Adsorption characteristics of phenol and chlorophenols on granular activated carbons (GAC). *Microchemistry Journal*, 70(2), 123-131. [https://doi.org/10.1016/S0026-265X\(01\)00109-6](https://doi.org/10.1016/S0026-265X(01)00109-6)
- Kadaverlu, K., & Namasivayam, C. (2003). Activated carbon from coconut coirpith as metal adsorbent: adsorption of Cd (II) from aqueous solution. *Advances in Environmental Research*, 7(2), 471-478. [https://doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00018-7](https://doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00018-7)
- Khaled, A., El Nemr, A., El-Sikaily, A., & Abdelwahab, O. (2009). Removal of Direct N Blue-106 from artificial textile dye effluent using activated carbon from orange peel: Adsorption isotherm and kinetic studies. *Journal of Hazardous Materials*, 165(1-3), 100-110. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.09.122>
- Lakshami, U., Chandra, V., Deo, I., & Lataye, D. (2009). Rice husk ash as an effective adsorbent: Evaluation of adsorptive characteristics for indigo carmine dye. *Journal of Environmental Management*, 90(2), 710-720. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.01.002>
- Lu, Q., & Sorial, G. (2004). The role of adsorbent pore size distribution in multicomponent adsorption on activated carbon. *Carbon*, 42(15), 3133-3142. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.07.025>
- Mafra, M., Igarashi-Mafra, L., Zuim, D., Vasquez, E., & Ferreira, M. (2013). Adsorption of remazol brilliant blue on an Orange peel adsorbent. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 30(3), 657-665.
- Órfão, J., Silva, I., Pereira, C., Barata, A., Fonseca, M., Faria, C., & Pereira, R. (2006). Adsorption of a reactive dye on chemically modified activated carbons-influence of pH. *Colloid and Interface Science*, 296(2), 480-489. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.09.063>
- Pandiarajan, A., Kamaraj, R., Vasudevan, S., & Vasudevan, S. (2018). OPAC (orange peel activated carbon) derived from waste orange peel for the adsorption of chlorophenoxyacetic acid herbicides from water: Adsorption isotherm, kinetic modelling and thermodynamic studies. *Bioresource Technology*, 261, 329-341. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.005>
- Sánchez, K., Colina, G., Pire, M., Díaz, A., & Carrasquero, S. (2013). Capacidad de adsorción del carbón activado sobre cromo total proveniente de los desechos de tenerías. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia*, 36(1), 45-52. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/tecnica/article/view/6883>
- Singh, K., Mohan, D., Sinha, S., Tondon, G., & Gosh, D. (2003). Color Removal from Wastewater Using Low-Cost Activated Carbon Derived from Agricultural Waste Material. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(9), 1965-1976. <https://doi.org/10.1021/ie020800d>
- Skoog, D., West, D., & Holler, J. (1995). *Fundamentos de Química Analítica*. (4ta. Edición). Editorial Reverte.
- Torres-Pérez, J., López-Téllez-Girón, P., Corral-Avitia, A., Carrasco-Urrutia, K., & Delgado-Ríos, M. (2020). Preparación de carbón activado a partir de residuos de *Zea mays* para eliminar tartrazín. *Cultura Científica y Tecnológica*, 17(1), 1-10. <http://dx.doi.org/10.20983/culcyt.2020.1.2.1>

Contribución de Autores

Autor	Contribución
Sedolfo Carrasquero	Montaje del sistema experimental, puesta en marcha y evaluación de las pruebas de adsorción. Análisis estadístico de los datos.
Altamira Díaz	Diseño metodológico de la investigación
Gilberto Colina	Elaboración de las isothermas de adsorción

Citación sugerida: Carrasquero, S., Díaz, A., Colina, G. (2022). Capacidad adsorptiva del carbón activado obtenido del epicarpio de *citrus sinensis* en la remoción de indigotina. Revista Bases de la Ciencia, 7(1), 1-16. DOI: https://doi.org/10.33936/rev_bas_de_la_ciencia.v%vi%i.3511 Recuperado de: <https://revistas.utm.edu.ec/index.php/Basedelaciencia/article/view/3511>
