

REMOCIÓN DE ÍNDIGO CARMÍN A PARTIR DE CARBÓN ACTIVADO OBTENIDO DE NEUMÁTICOS USADOS

Roxana Pedrozo^{*†}, Mariluz Betancur^{*}

**Grupo de Investigaciones Ambientales; Universidad Pontificia Bolivariana, Cir. 1
#70-01, B 11, Medellín, Colombia.*

Recibido 12 Marzo 2015; aceptado 15 Diciembre 2015
Disponible en línea: 19 Diciembre 2016

Resumen: En este estudio se evaluaron las características de adsorción del colorante índigo carmín en carbón activado obtenido a partir de neumáticos usados. Experimentos en discontinuo se llevaron a cabo para determinar la influencia de parámetros como dosis de adsorbente, tiempo de contacto y pH, para una solución de índigo carmín con concentración inicial de 100 mg/L. Se encontró que la remoción del colorante se ve favorecida para una dosis de adsorbente de 0.175 g en 25 mL y un tiempo de contacto de 720 minutos, logrando una adsorción del 96% del colorante presente en la solución. En cuanto al pH se determinó que a valores de pH ácidos se favorece el proceso de adsorción, obteniendo una remoción del 100%. La cinética de adsorción del colorante índigo carmín sobre el adsorbente fue representada mediante el modelo cinético de pseudo segundo orden, obteniéndose un coeficiente de regresión no-lineal de 0.95, indicando así la proximidad de los datos experimentales con el modelo.

Palabras clave: Carbón activado, neumáticos usados, adsorción, índigo carmín, cinética.

REMOVAL OF INDIGO CARMINE ON ACTIVATED CARBON OBTAINED FROM WASTE TIRES

Abstract: In this study has been evaluated the characteristics of adsorption of the colorant indigo carmine on active carbon obtained of waste tires. Batch experiments was carry out for determine the influence of parameters as dosage of adsorbent, contact time and pH, for a solution of indigo carmine with initial concentration of 100 mg/L. It was found that the remotion of colorant is favoured for a dosage of adsorbent of 0.175 g in 25 mL and contact time of 720 minutes, with those characteristics was remove of 96% of the colorant present in the solution. As to pH was determinate that values acidic pH can favour the adsorption process, removal of 100%. The kinetics of adsorption of indigo carmine on the adsorbent was represented by the kinetics model of pseudo second order to obtain a nonlinear coefficient of regression of 0.95, indicating the proximity of the experimental data with the model.

Keywords: Active carbon, waste tires, adsorption, indigo carmine, kinetics.

[†] Autor al que se le dirige la correspondencia:

Tel. 3003971622

E-mail: roxanagisela.pedrozo@upb.edu.co (Roxana Gisela Pedrozo Martínez).

1. INTRODUCCIÓN

En el mundo, la demanda de agua ha aumentado con los sectores agrícolas, industriales y domésticos, que consumen 70, 22 y 8% del agua dulce disponible, respectivamente, dando lugar a la generación de gran cantidad de agua residual ([V.K y Suhas, 2009](#)). En el sector industrial, las aguas provenientes de la industria textil se encuentran dentro de las más contaminadas, debido a sus características, tales como alta concentración de sustancias oxidables, color persistente, baja biodegradabilidad, alto pH y temperatura ([Secula et al., 2011](#)). Esto se debe a que las diferentes etapas de elaboración de un producto textil involucran un sin número de operaciones que generan diversos tipos de contaminantes de estructura variada, dentro de los cuales se encuentran los colorantes ([Palma Goyes et al., 2013](#)). El consumo promedio diario de colorantes en una empresa de producción de DENIM en Colombia es alrededor de 400 kg/día, con un caudal de salida de aproximadamente 400.000 litros/día. En Colombia, la industria textil supera en impacto ambiental a las aguas negras de origen doméstico ([Ruiz, 2011](#)).

Por ejemplo, en la ciudad de Medellín, los vertimientos de colorantes y otros químicos es uno de los problemas que afecta el principal afluente de la ciudad, el Río Medellín. Son varios los casos que se han detectado, de empresas que han vertido colorantes afectando la fuente hídrica. Sin embargo, como no existía una norma que reglamentara estos vertimientos, no se sancionaban. Debido a este tipo de eventos, el Área Metropolitana llevó a cabo el acuerdo 21 de 2012 en el que se previene, prohíbe y sanciona los vertimientos directos a cuerpos de agua que alteren el uso estético para la armonización y embellecimiento del paisaje ([Escobar, 2013](#)).

Uno de los colorantes más empleados en la industria textil es el índigo carmín, el tratamiento de agua residual con su contenido es uno de los más difíciles, debido a que el tinte es tóxico y de origen sintético, además posee una estructura molecular aromática compleja, la cual es muy estable y de difícil biodegradación ([Quintero y Cardona, 2011](#)). Se han desarrollado diferentes métodos para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con colorantes, dentro de ellos se encuentran los físicos, como la adsorción (carbón activado, sílice, materiales celulósicos obtenidos

de residuos industriales), filtración por membrana e intercambio iónico. También, están los de tipo químico que abarcan los procesos electroquímicos, oxidación, fotoquímicos y coagulación ([Cortazar et al., 2012](#)). Por último, están los métodos biológicos convencionales, los cuales aún se encuentran en etapa de investigación ([Lakshmi et al., 2009](#)).

El proceso de adsorción se está convirtiendo en una tecnología prometedora debido a su simplicidad, facilidad de uso, operación libre de lodos y la capacidad de regeneración. La eliminación casi completa de impurezas con efectos secundarios insignificantes explica su amplia aplicación para el tratamiento de las aguas residuales contaminadas con colorantes. El carbón activado es uno de los adsorbentes más utilizados con gran éxito, aunque en algunas ocasiones es un material caro y su regeneración y reutilización implica inversiones importantes ([Lakshmi et al., 2009](#)). Además, se han venido estudiando la utilización de materiales de bajo costo como alternativas al carbón activado para el tratamiento de aguas residuales a gran escala. Algunos materiales han sido ensayados por su capacidad para eliminar tintes en soluciones acuosas tales como la madera, el carbón, residuos agroindustriales, cenizas, escorias y el barro rojo ([Gupta et al., 2011](#)). Como también los carbones activados obtenidos a partir de residuos como es el caso de los neumáticos usados, donde una de las ventajas es el aprovechamiento del mencionado residuo.

Debido a la gran cantidad de vehículos usados en el mundo, aproximadamente se desechan 330 millones de neumáticos cada año ([Betancur et al., 2009](#)). La eliminación de este residuo representa un problema ambiental, pues las mismas propiedades que los hacen deseables como su durabilidad, también hace que su eliminación y reprocesamiento sean difíciles. Los neumáticos son casi inmunes a la degradación biológica, sus grandes reservas causan un peligro de incendio, que en consecuencia podría producir una combustión indeseable, además ocupan espacio en los rellenos sanitarios por ser voluminosos, el vertimiento ilegal de este tipo de residuos se ha venido incrementando, debido a los altos costos que su disposición genera ([Mui et al., 2010](#)).

Es así, como en el presente trabajo se evaluó la capacidad de adsorción de un carbón activado

obtenido a partir de la degradación termoquímica de neumáticos usados con CO₂, para la remoción del colorante índigo carmín en soluciones acuosas. Adicional, a estudiar su aplicación en la remoción de índigo carmín debido a la necesidad que se viene presentando en descargar las aguas residuales y de presentar alternativas que resuelvan la problemática mencionada anteriormente, se suma que en la revisión bibliográfica no se encontraron estudios que utilizarán este carbón activado para la remoción de índigo carmín, aunque si se han realizado investigaciones sobre la capacidad de adsorción de dicho material con otros colorantes como lo son: el azul ácido 25, amarillo ácido 117, azul de metileno, azul 113, rhodamine β y naranja de metileno.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Obtención del Carbón activado

Para la producción del carbón activado se siguió la metodología propuesta en el proyecto de investigación denominado “Valorización de neumáticos usados por medio de su activación física” (Betancur, 2010). Se pesaron 17 g de neumático triturado aproximadamente y se sometieron a una degradación termoquímica en un reactor de lecho fijo de acero inoxidable 316 de ¾”, provisto con un horno eléctrico y un controlador de temperatura PID. Para lograr una atmósfera inerte se alimentó nitrógeno a 100 mL/min, durante 15 minutos. Luego para la activación del carbón, se cerró el flujo de nitrógeno y se alimentó CO₂ durante 180 minutos a una temperatura de 900 °C.

El tamaño de partícula utilizado en los experimentos de adsorción fue de $0.6 \leq dp \leq 0.4$ mm, utilizando un *rotap test sieve shakers*. La caracterización del carbón activado obtenido de neumáticos usados fue realizada en estudios anteriores por el Grupo de Investigaciones Ambientales (Cardona Álvarez, 2014; Betancur Vélez, 2009).

Para determinar el contenido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre se realizó un análisis elemental a la muestra, el cual se basa en la combustión completa y rápida del carbón activado en corriente de oxígeno con la presencia

de un oxidante V₂O₅ a temperatura aproximada de 950°C (Betancur, 2010). El porcentaje de humedad, el contenido de cenizas y el material volátil se establecieron por medio de un análisis inmediato, la determinación de cada porcentaje se realiza según la norma ISO-589-1981, ISO-1171-1976 e ISO-5623-1974, respectivamente.

El área superficial BET se aplica a los datos obtenidos en la isoterma de adsorción de N₂ y permite una primera caracterización de sólidos porosos a partir del cálculo de la capacidad de adsorción en monocapa (Brunauer, Emmett, y Teller, 1938), se determinó la porosidad y la distribución del poro, la porosimetría de mercurio se realizó en un porosímetro de mercurio Poremaster de Quantachrome (IDRISS B, 2010).

Los grupos funcionales superficiales en la muestra se determinaron por la técnica de espectroscopia infrarroja FT-IR, los espectros de absorción se registraron por transmitancia en un rango de 4000 a 400 cm⁻¹, usando un equipo Spectrometer FT-IR NICOLET 6700 y por el método volumétrico de Boehm fueron cuantificados los contenidos de grupos ácidos y básicos totales (Boehm, 1994; Boehm, 2002).

2.2. Adsorbato

Como adsorbato se empleó colorante índigo carmín, que es un tinte ácido en polvo de color púrpura, soluble en agua, su fórmula molecular es C₁₆H₈O₈N₂S₂Na₂ y con un peso molecular de 466.46 g/mol (Mittal et al., 2006).

2.3. Preparación de solución con colorante

Para preparar la solución con colorante índigo carmín se siguió la metodología propuesta por Vasco y Betancur, 2014. Se preparó una solución madre de colorante de concentración de 500 mg/L, se pesaron 0.5 g de índigo carmín en una balanza analítica Precisa XB 220 A y se llevaron a una estufa de secado M 53-720 a una temperatura de 105°C hasta alcanzar un peso constante. Lo obtenido se transfirió a un beaker de un litro y se le adicionó 900 mL de agua desionizada aproximadamente, el beaker se cubrió completamente con papel aluminio para evitar la degradación del colorante, posteriormente se sometió a un proceso de agitación empleando un agitador industrial IKA

RW20 con una velocidad de 800 rpm durante 24 horas para su completa solubilización.

2.4. Pruebas de adsorción

Los experimentos de adsorción en discontinuo se realizaron en un shaker rotatorio Heidolph-Unimax 1010 con control de temperatura, las pruebas se hicieron a $298\pm 1\text{K}$, y se evaluó el efecto de la cantidad de adsorbente, el pH y el tiempo de contacto del carbón activado obtenido a partir de neumáticos usados con la solución de colorante. Cada una de las corridas experimentales se ejecutó en recipientes de plástico herméticamente cerrados con 25 mL de solución de índigo carmín con concentración conocida, estos recipientes fueron cubiertos con papel aluminio para evitar la reducción del color.

Todos los ensayos se desarrollaron con una velocidad de agitación de 150 rpm, después de este proceso las muestras fueron filtradas (filtro-Advante 5A-125 mm) y el líquido sobrenadante se analizaba para determinar la concentración residual de colorante en las muestras. Se llevaron a cabo triplicados de las experiencias, resultando la diferencia entre éstos, menor al 3%. Los resultados se informan empleando los valores promedio.

Las concentraciones del colorante índigo carmín residual en las soluciones, se determinaron utilizando un espectrofotómetro UV-VIS DR 2010 con una celda de vidrio con área de 29 m^2 , a las longitudes de onda de 436, 525 y 620 nm.

2.4.1. Curva de dosis.

Para determinar el efecto de la dosis de adsorbente que favoreció el proceso de adsorción, 25 mL de solución de índigo carmín con concentración inicial de 100 mg/L se colocaron en contacto con diferentes cantidades de carbón activado obtenido a partir de neumáticos usados dentro de un rango de 0.05 y 0,25 g. El carbón activado con un tamaño de partícula de $0.6 \leq dp \leq 0.4\text{ mm}$, manteniéndose fija la temperatura en $298\pm 1\text{K}$ y el pH 7.7 por un periodo de 21 horas. El pH se controló en cada prueba con un pHmetro ORION 9107 WP para verificar cualquier cambio. No se presentaron variaciones en el pH (7.7 ± 0.5). Luego se filtraba la mezcla y el filtrado se llevaba a análisis por UV-VIS.

2.4.2. Efecto del pH.

Se examinó la influencia del pH inicial sobre la adsorción del colorante para el carbón activado. Los ensayos se realizaron a $298\pm 1\text{K}$. El pH de las soluciones se ajustó entre 2 y 10 mediante la adición de gotas de NaOH 0.01 M o HCl 0.01 M. Los experimentos en discontinuo se realizaron para una concentración de índigo carmín de 100 mg/L y una dosis de adsorbente de 0.175 g/25 mL.

2.4.3. Cinética de adsorción.

La cinética de adsorción se determinó a una concentración de colorante de 100 mg/L, una dosis de adsorbente de 0.175 g/25 mL, $298\pm 1\text{K}$ y un pH de 7.7. Las pruebas se llevaron a cabo variando el tiempo de contacto entre el adsorbente y la solución con colorante para un intervalo de tiempo entre 30 y 1440 minutos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Caracterización del carbón activado obtenido a partir de neumáticos usados

En la [Tabla 1](#) se presentan los resultados del análisis elemental e inmediato, donde se muestra el alto contenido de carbono que contiene la muestra 83.87% y que favorece la calidad del carbón activado obtenido. En la [Tabla 2](#) se muestran los parámetros texturales, se puede observar que el material carbonoso contiene un volumen de mesoporos de $0.582\text{ cm}^3/\text{g}$ y un área BET de $418.2\text{ m}^2/\text{g}$, lo que indica que el material adsorbente posee gran cantidad de sitios de adsorción disponibles para la remoción del colorante índigo carmín, también al tener una estructura en su mayoría mesoporosa hace que las moléculas de colorante penetren con más facilidad sobre su superficie, influyendo positivamente en la capacidad de adsorción de contaminantes.

La presencia de grupos funcionales superficiales en la muestra se determinó mediante la técnica de espectroscopia FT-IR como se muestra en la [Fig 1](#), donde se presenta la absorbancia en función de la longitud de onda (cm^{-1}). Se observa una amplia absorción entre $3300\text{-}3600\text{ cm}^{-1}$ y entre $3100\text{-}3200\text{ cm}^{-1}$ para la muestra de carbón, la cual se

atribuye a la presencia de ácido carboxílico COOH. Por otra parte, entre 3400 y 3200 cm^{-1} aparece una banda ancha propia de los alcoholes y fenoles que absorben fuertemente en esta región.

Tabla 1. Análisis elemental e inmediato del carbón activado obtenido.

Análisis Elemental (% en peso, base seca)	
Carbono	83.87
Hidrógeno	0.12
Nitrógeno	0.19
Azufre	2.90
Oxígeno (determinado por diferencia)	0.0
Análisis Inmediato (% en peso, base húmeda)	
Humedad	1.78
Cenizas	12.69
Volátiles	1.71
Carbono Fijo	83.82

Tabla 2. Parámetros texturales.

Propiedad	Carbón Activado
Área BET (m^2/g)	418.2
V_T (cm^3/g)	0.976
V_{mesoporo} (cm^3/g)	0.582
$V_{\text{microporo}}$ (cm^3/g)	0.092

La cuantificación de los grupos funcionales superficiales oxigenados se realizó por el método volumétrico de Boehm, los resultados se exhiben en la [Tabla 3](#), ([Cardona Álvarez, 2014](#)). Mostrando mayor presencia sobre la superficie del material carbonoso de grupos carboxílicos 0.58 mmol/g y fenólicos 0.84 mmol/g, lo que permite explicar el comportamiento hidrofóbico de este material y promueve la interacción entre las moléculas de colorante y los grupos funcionales presentes en la superficie del material adsorbente, incrementando la capacidad de adsorción del carbón activado obtenido a partir de neumáticos usados.

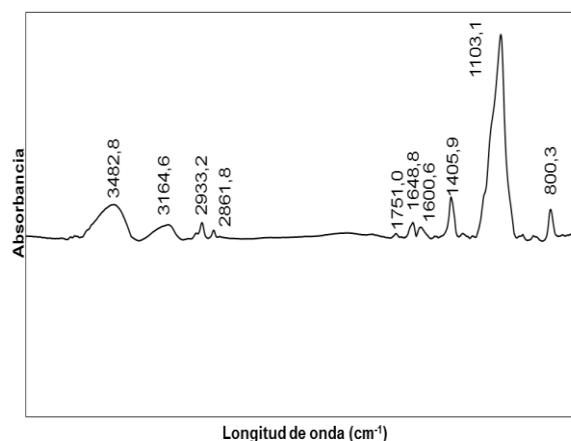


Fig. 1. Espectro IR para el carbón activado obtenido a partir de neumáticos usados.

Tabla 3. Contenido de grupos funcionales oxigenados superficiales para el carbón activado obtenido

Grupos Funcionales	Carbón Activado (mmol/g)
Básicos	1.01
Carboxílicos	0.58
Lactónicos	0.34
Fenólicos	0.84

3.2. Efecto de la dosis del adsorbente

En la [Fig. 2](#) se evidencia que la dosis de adsorbente influye significativamente en la adsorción del colorante, pues con el aumento de la dosis de carbón activado obtenido a partir de neumáticos usados se presentó una mejora en el porcentaje de remoción de índigo carmín. La adsorción de colorante fue de 30% con solo 0.05g/25mL de adsorbente e incrementa hasta 95% con la dosis de 0.175g/25mL, por encima de esta dosis la remoción fue similar para las otras muestras, fue así como se tomó como referencia este valor para las demás pruebas. Este incremento en la cantidad de colorante adsorbido se puede atribuir a la mayor cantidad de adsorbente y por ende una mayor área superficial incrementándose la disponibilidad de sitios de adsorción ([Lakshmi et al., 2009](#)), a bajas dosis de adsorbente la superficie del carbón activado se satura con más facilidad ([Albadarin et al., 2011](#)).

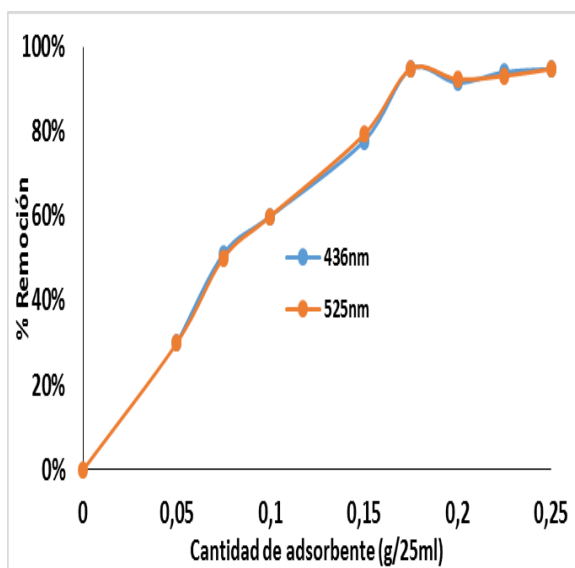


Fig. 2. Efecto de la dosis de adsorbente sobre la remoción de índigo carmín sobre carbón activado obtenido de neumáticos usados (C_0 : 100 mg/L, t: 21h, T: 298.15 K).

3.3. Efecto del pH

En la [Fig. 3](#) se puede observar la remoción del índigo carmín con una dosis de adsorbente de 0.175 g/25mL para diferentes valores de pH. La superficie del carbón activado obtenido a partir de neumáticos usados adsorbe favorablemente a pH ácidos lográndose una adsorción del 100% del colorante en la solución para un pH de 2, esto es debido a la presencia de iones H^+ en la superficie, además el índigo carmín al ser un colorante aniónico bajo estas condiciones tiene una carga negativa ([Sumanjit et al., 2012](#)), por lo que se atraen más fácilmente. A valores de pH altos la superficie estaría cargada negativamente, por lo que se encontraría activa para la adsorción de cationes, debido a la deposición de iones OH^- y se presentaría una repulsión electrostática entre los iones del colorante y la superficie del adsorbente, debido a que los iones hidroxilo competirían con los aniones del colorante para los sitios de adsorción ([El-Bindary et al., 2014](#)), es por ello que para pH 10 la remoción de índigo carmín de la solución fue insignificante. Los resultados encontrados son coherentes con los reportados en la literatura, Mittal y Kurup en el 2006 utilizaron cenizas y residuos de soya para la remoción de

índigo carmín de una solución de colorante con concentración inicial de 9×10^{-5} M, su estudio reveló que la adsorción del colorante para ambos adsorbentes disminuye con el aumento de pH por encima de valores de 7, obteniendo una remoción sustancial del colorante para un rango de pH entre 2 y 3 donde el porcentaje de remoción del índigo carmín fue de 68% para las cenizas y 73,1% para los residuos de soya ([Mittal et al., 2006](#))

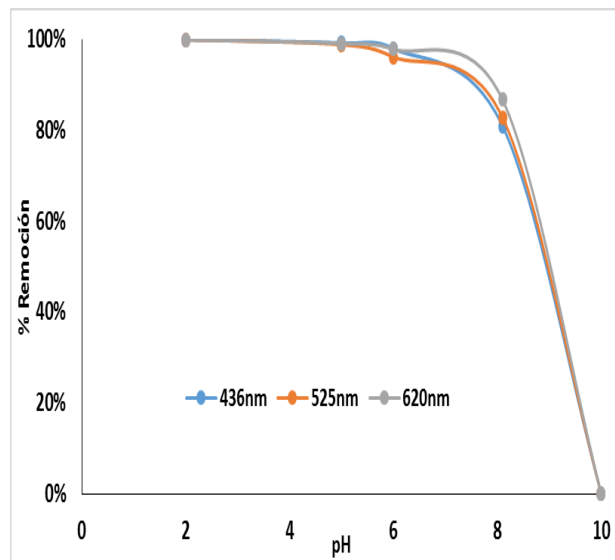


Fig. 3. Efecto del pH (C_0 : 100 mg/L, t: 21h, dosis de adsorbente: 0.175g/25mL, T: 298 K)

3.4. Efecto del tiempo de contacto

El efecto del tiempo de contacto en la eliminación del colorante índigo carmín se muestra en la [Fig.4](#) la curva de tiempo de contacto muestra una rápida adsorción del índigo carmín en los primeros 15 minutos, a partir de este instante la velocidad de eliminación del tinte disminuye gradualmente, alcanzando el equilibrio a los 720 minutos, donde el carbón activado obtenido de neumáticos usados logra una capacidad de adsorción del colorante de 0.039 mmol/g. Esto probablemente se deba a una difusión rápida y lenta de las moléculas de colorante en los macro y microporos del adsorbente. Los procesos de adsorción en las interfaces líquido-sólido son frecuentemente afectados por la difusión en la capa límite o la transferencia de masa externa ([Oliveira Brito et al., 2010](#)). Un gran número de sitios de adsorción

están disponibles inicialmente durante la etapa inicial y después de un lapso de tiempo, los sitios restantes en la superficie son difíciles de ser ocupados debido a las fuerzas de repulsión entre las moléculas de colorante sobre la fase sólida y las presentes en la fase líquida (Mane y Vijay, 2011). La agregación de moléculas de colorante con el aumento del tiempo de contacto hace casi imposible la difusión de estas dentro de la estructura del adsorbente a más sitios de adsorción disponibles (Lakshmi et al., 2009).

3.5. Cinética de adsorción

Con el fin de entender el mecanismo de adsorción del colorante índigo carmín sobre el carbón activado obtenido a partir de neumáticos usados, los datos experimentales se analizaron utilizando dos modelos cinéticos. Sin embargo, se encontró que la aplicación del modelo cinético de pseudo primer orden no presentó un buen ajuste lineal. Por lo tanto, este modelo no describe la cinética de adsorción del sistema, es por ello que los resultados no se presentan en este documento. A continuación, se muestra el modelo cinético de pseudo segundo orden empleado para entender el mecanismo del proceso de adsorción.

3.5.1. Modelo cinético de pseudo segundo orden.

Este modelo está basado en la adsorción de equilibrio y se expresa como:

$$\frac{dq}{dt} = k_2(q_e - q)^2 \quad (1)$$

Donde k_2 es la constante de velocidad de pseudo segundo orden en $g/mg \text{ min}$, q y q_e son las cantidades de colorante adsorbidas por el carbón activado obtenido de neumáticos usados en un tiempo t y en el equilibrio, respectivamente (Murillo et al., 2011). Separando variables de la ecuación (1) e integrando con respecto a las condiciones límites $q=0$ en $t=0$ y $q=q_e$ en $t=t$ se obtiene.

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2)$$

Los parámetros del modelo fueron hallados mediante una regresión no-lineal como se muestra en la Fig. 4, adicionalmente en la Tabla 4 se presentan los resultados obtenidos. El ajuste de los datos experimentales al modelo cinético de pseudo segundo orden y el coeficiente de correlación obtenido cercano a la unidad ($r^2=0.95$) ilustran que la eliminación del colorante índigo carmín puede ser descrita mediante este modelo. El equilibrio se alcanza en un tiempo de aproximadamente 12 horas.

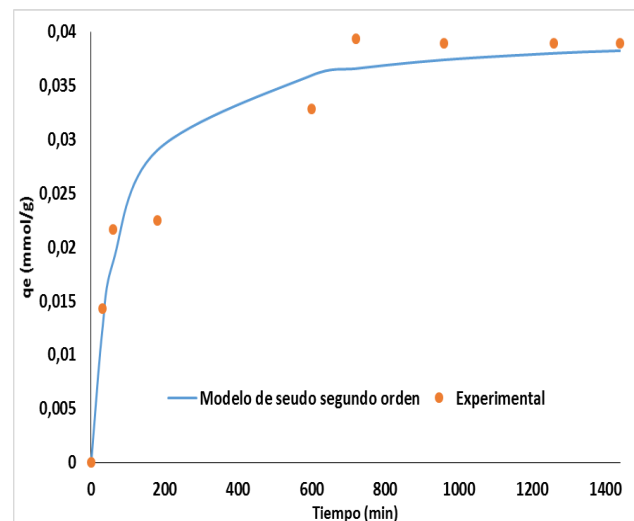


Fig. 4. Modelo cinético pseudo segundo orden (C_0 : 100 mg/L, t : 21 h, T : 298 K)

Tabla 4. Parámetros cinéticos

q_e^*H (mmol/g)	0,0401
k_H (g/mmol*min)	0,3634
r^2	0,9507

4. CONCLUSIONES

Se comprobó el potencial del carbón activado para la remoción de color en soluciones diluidas alcanzando una remoción del 96% para una dosis de 0.175 g/25 mL a las condiciones de pH: 7.7 y tiempo de contacto 21 horas. Con base a los porcentajes de remoción de color obtenidos, se puede considerar los neumáticos usados como un precursor para la producción de carbón activado y su aplicación para la eliminación del colorante índigo carmín.

La remoción del colorante índigo carmín sobre carbón activado obtenido de neumáticos usados se vio favorecida para valores de pH ácidos donde se logró una remoción del colorante de 100% a un pH de 2, para un tiempo de contacto de 21 horas y una dosis de adsorbente de 0.175 g/25 mL.

El modelo pseudo-segundo orden describió satisfactoriamente la cinética de la adsorción del colorante índigo carmín para el carbón activado evaluado en esta investigación a las siguientes condiciones: pH: 7.3 y una dosis de adsorbente de 0.175 g/25 mL, para un tiempo de contacto de 720 minutos.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen a la Universidad Pontificia Bolivariana y a la planta de tratamiento de aguas residuales Cimarrona de Marinilla por el soporte técnico prestado durante el desarrollo de este proyecto.

REFERENCIAS

- Albadarin, A. B. et al. (2011). Biosorption of toxic chromium from aqueous phase by lignin: mechanism, effect of other metal ions and salts. *Chemical Engineering Journal*, **169** (1-3): 20–30.
- Betancur, M. (2010). *Obtención de carbón activado a partir de neumáticos usados mediante la incorporación de calcio y su aplicación en procesos de adsorción (Tesis inédita de maestría)*. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.
- Betancur, M., Martínez, J. D. y Murillo, R. (2009). Production of activated carbon by waste tire thermochemical degradation with CO₂. *Journal of Hazardous Materials*, **168** (2-3): 882-887.
- Boehm, H. (1994). Some aspect of the surface chemistry of carbon blacks and other carbons. *Carbon*, **32** (5): 759-769.
- Boehm, HP. (1994). Some aspects of the surface chemistry of carbon blacks and other carbons. Alemania. *Carbon*, **32** (5): 759-69.
- Boehm, H. (2002). Surface oxides on carbon and their analysis: a critical assessment. *Carbon*, **40**: 145-149.
- Brunauer, S., Emmett, P. y Teller, E. (1938). Adsorption of gases in multimolecular layers. *J. ACS*, **60**: 309-319.
- Cardona Álvarez, L. F. (2014). *Transformación termoquímica de neumáticos usados en una sola etapa en atmósfera de CO₂, para la obtención de carbón activado (Trabajo de grado inédito)*. Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.
- Cortazar, A. et al. (2012). Biotecnología aplicada a la degradación de colorantes de la industria textil. *Universidad y ciencia*, **28** (2): 187-199.
- El-Bindary, A. A. et al., (2014). Adsorption and thermodynamic studies of hazardous azocoumarin dye from an aqueous solution onto low cost rice straw based carbons. *Journal of Molecular Liquids*, **199**: 71–78.
- Escobar, P. M. En línea, en *eltiempo.com*. [http://www.eltiempo.com/colombia/medellin/ARTICULO-WEB-EW_NOTA_INTERIOR-13003426.html], consultado en 2013-08-13.
- Gupta, V. y otros (2011). A comparative investigation on adsorption performances of mesoporous activated carbon prepared from waste rubber tire and activated carbon for a hazardous azo dye—Acid Blue 113. *Journal of Hazardous Materials*, **186** (1): 891-901.
- Idriss B, A. (2010). *Preparación y caracterización de carbón activado a partir de residuos de biomasa y su utilización en tratamientos de descontaminación del agua. Badajoz (Tesis doctoral)*. Universidad de Extremadura. Departamento de Química Orgánica e Inorgánica, Bogotá, Colombia.
- Lakshmi, U. R, Srivastava, V. C, Mall, I. D y Lataye, D. H. (2009). Rice husk ash as an effective adsorbent: Evaluation of adsorptive characteristics for Indigo Carmine dye. *Journal of Environmental Management*, **90** (2): 710-720.
- Mane, V. S. y Vijay Babu, P. (2011). Studies on the adsorption of Brilliant Green dye from aqueous solution onto low-cost NaOH treated saw dust. *Desalination*, **273** (2-3): 321–329.
- Mittal, A, Mittal, J. y Kurup, L. (2006). Batch and bulk removal of hazardous dye, indigo carmine from wastewater through adsorption. *Journal of Hazardous Materials*, **137** (1): 591-602.
- Mui, E. L, Cheung, W, Valix, M. y McKay, G. (2010). Dye adsorption onto activated carbons from tyre rubber waste using surface coverage analysis. *Journal of Colloid and Interface Science*, **347** (2): 290-300.
- Murillo, Y. S, Giraldo, L. y Moreno, J. C. (2011). Determinación de la cinética de adsorción de 2,4-dinitrofenol en carbonizado de hueso

- bovino por espectrofotometría uv-vis. *Revista Colombiana de Química*, **40** (1): 91-103.
- Oliveira Brito, S. M, Carvalho Andrade, H. M, Frota Soares, L. y Azevedo, R. P. (2010). Brazil nut shells as a new biosorbent to remove methylene blue and indigo carmine from aqueous solutions. *Journal of Hazardous Materials*, **174** (1-3): 84–92.
- Palma Goyes, R. E, Macías Uribe, J, González, I. y Torres Palma, R. A. (2013). Tratamiento de aguas residuales provenientes de la industria textil mediante oxidación electroquímica. *Revista Colombiana de materiales*, **140** (10): 93-108.
- Quintero, L. y Cardona, S. (2011). Evaluación del tratamiento biológico para remoción de color indigo de agua residual industrial textil por un consorcio microbiano en lecho fluidizado. *Gestión y ambiente*, **14** (2): 105-113.
- Ruiz, S. (2011). *Evaluación de la remoción del colorante indigo utilizado en empresas dedicadas a la producción de telas tipo DENIM empleando a Pleutorus ostreatus como modelo biológico (Tesis inédita de maestría)*. Universidad de la Sabana. Cundinamarca, Colombia.
- Secula, M, Crețescu, I. y Petrescu, S., (2011). An experimental study of indigo carmine removal from aqueous solution by electrocoagulation. *Desalination*, **277** (1-3): 227-235.
- Sumanjit, Rani, S. y Mahajan, R., (2012). Equilibrium, kinetics and thermodynamic parameters for adsorptive removal of dye Basic Blue 9 by ground nut shells and Eichhornia. *Arabian Journal of Chemistry*, **9**: S1464-S1477
- V.K, G. y Suhas. (2009). Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review. *Journal of Environmental Management*, **90** (8): 2313-2342.
- Vasco, A. y Betancur, M. (2014). Estudio de la cinética de adsorción de índigo carmín en piezas abrasivas. *Revista Investigaciones Aplicadas*, **8**: 131 - 139.

SOBRE LOS AUTORES

Roxana Gisela Pedrozo Martínez

Estudiante de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Pontificia Bolivariana. Línea de interés investigativo: Ambiental

Mariluz Betancur Vélez

Ingeniera Química (2000), Especialista en Ingeniería Ambiental, MSc. en Ing. y doctorado en Ingeniería. Líder Línea de Gestión y Valorización de Residuos – GIA-UPB, Profesora Titular de la Escuela de Ingenierías de la Universidad Pontificia Bolivariana.