

Proceso de biosorción de azul de metilo en solución acuosa usando fibra kapok

Francisco Javier Ramírez García
javier_ramirez96@outlook.com

Zaritma Yamilet Montejo García
zaritma.montejo@gmail.com

Sarai Alejandro Hernández
sarai.alejandro@ujat.mx

David Guerrero Zárate
david.guerrero@ujat.mx
Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
Jalpa de Méndez, Tabasco, México

RESUMEN

En los procesos químicos de la industria textil y del papel se generan importantes cantidades de aguas residuales contaminadas con colorantes, mismas que requieren ser tratadas antes de ser desechadas. La ingeniería de procesos ha desarrollado diversos tratamientos para la remoción de estos contaminantes, como la coagulación y la aireación anaeróbica, destacando en los últimos años la adsorción con materiales de origen biológico, mejor conocida como biosorción. En este trabajo se propone un proceso de biosorción para la remoción de azul de metilo en agua, usando fibra kapok obtenida del árbol de Ceiba (*Ceiba pentandra*), que fue sometida a un tratamiento con sulfito de sodio para reducir su hidrofobicidad y se caracterizó mediante técnicas espectroscópicas y termogravimétricas. El diseño del proceso requirió de obtener la isoterma de adsorción para el sistema fibra kapok + agua + azul de metilo, encontrando un comportamiento del tipo III y que pueden ser representados por el modelo matemático empírico de Freundlich ($k = 0.1131$ y $n = 2.38$). El proceso propuesto considera biosorbentes por lotes, encontrando que con dos etapas es posible remover el 99% de los colorantes, reduciendo hasta un 60% la masa de biosorbente utilizada, comparada si se usa una sola etapa.

Palabras clave: *Adsorción; Ceiba pentandra; Isoterma de Freundlich*

Biosorption process of methyl blue in aqueous solution using kapok fiber

ABSTRACT

The textile and paper industries produce high amounts of residual water polluted with dyes, and it is necessary to treat it before discarding it. Chemical and environmental engineers have developed processes to remove these pollutants, like coagulation and anaerobic aeration, highlighting the adsorption using biological materials, known as biosorption. In this work, we propose a biosorption process to remove methyl blue in an aqueous solution using kapok fiber (*Ceiba pentandra*). The fiber was treated with sodium sulfite to reduce its hydrophobicity, and it was characterized using spectroscopic and thermogravimetric studies. The processes design need the adsorption isotherm for system kapok fiber + water + methyl blue. The experimental results show a type III behavior, and they fit Freundlich's empirical model ($k = 0.1131$ y $n = 2.38$). The process proposed considers well-mixed batch tanks, finding that it is possible to remove 99% of dyes with two tanks, reducing up to 60 % the mass of biosorbent compared to a one-step design.

Keywords: *Adsorption; Ceiba pentandra; Freundlich isotherm*

Artículo recibido: 05 de Abril 2021

Aceptado para publicación: 28 de Mayo 2021

Correspondencia: david.guerrero@ujat.mx

Conflictos de Interés: Ninguna que declarar

1. INTRODUCCIÓN

El mundo enfrenta distintos problemas ambientales, como el de la contaminación de los ríos debido a la descarga de aguas residuales con colorantes azoicos, que se emplean en la industria textil y de papel. Este tipo de colorantes representan aproximadamente del 60 al 70% de todos los colorantes que se producen y son altamente tóxicos para la vida humana y animal, bastando concentraciones de 10 a 15 mg/L para que este tipo de colorantes sean intensamente visibles en los cuerpos de agua (Bernal, Luis A.; Hernández, Mayra K.; Berber, María S.; Martínez & Raúl D.; Espinosa, 2017). Los tintes de triamino-trifenilmetano son una familia conformada por tres sustancias: el azul de metilo, el azul de anilina y el azul de agua. Estos tipos de tintes son ampliamente utilizados en diferentes áreas, tales como: colorantes antisépticos, métodos de tinción policromada, soluciones de tinción histológica y microbiológica, tinción de textiles, así como en las industrias cosméticas, papeleras, del cuero, farmacéutica, de alimentos, entre otros (Hassan, AlAhmadi, & Mosaid, 2015). En todo el mundo, anualmente se descargan cerca de 280,000 toneladas de aguas residuales contaminadas con dichos colorantes por parte de la industria textil, las cuales requieren de tratamientos debido a la alta Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) que presentan (Khan, Arunarani, & Chandran, 2015).

En los últimos años, se han investigado tecnologías fisicoquímicas y biológicas para eliminar los colorantes y demás efluentes de aguas residuales, siendo algunos de ellos la coagulación, el tratamiento anaeróbico, la filtración, la flotación, la adsorción, la separación por membranas, el intercambio iónico y la oxidación avanzada. Una de las tecnologías que ha ganado interés en el mundo académico e industrial es la adsorción, siendo reconocida como una de las más eficientes, económicas y efectivas, no solamente para limpiar derrames de petróleo y otros efluentes, sino también como un método para el tratamiento de aguas contaminadas (Abd Rahman, Azahari, Yhaya, & Ismail, 2016).

Los materiales adsorbentes se caracterizan por retener las moléculas de colorantes en su superficie, permitiendo así reducir la concentración de estas sustancias en la fase acuosa. Existen diversos tipos de materiales adsorbentes, entre los que se encuentran los materiales de origen sintético, animal y vegetal, contando estos últimos con ventajas como un alto contenido lignocelulósico y su biodegradabilidad. En este sentido, los materiales adsorbentes de origen agroindustrial más utilizados son: el carbón activado, el

algodón, el aserrín y la paja, todos ellos aptos para remover diferentes sustancias de efluentes contaminados (Wahi, Chuah, Choong, Ngaini, & Nourouzi, 2013).

En la actualidad, se investiga el uso de materiales económicos y comercialmente disponibles para el proceso de adsorción. Un material atractivo y prometedor, que ha logrado ganar la atención de los investigadores como material adsorbente eficaz es la fibra kapok, la cual ha demostrado ser efectiva para la remoción y limpieza de derrames de hidrocarburos y demás efluentes, debido a su bajo costo y su capacidad de adsorber contaminantes, entre ellos los colorantes (Abd Rahman et al., 2016; Cárdenas, 2017; et al., 2017). La fibra kapok es un material de origen vegetal y se caracteriza por tener hebras de consistencia sedosa, amarillenta y esponjosa, proviene del árbol *Ceiba pentandra*, perteneciente al género Bombacaceae, llegan a tener una altura cercana a los 50 metros con diámetros de 2 metros y una copa extensa, como se muestra en la **Figura 1**. En México, es conocido como pochote y se encuentra ampliamente distribuido en los estados de Oaxaca, Chiapas, Tabasco y Veracruz (Honorato, Apolinar, & Aburto, 2015; Weaver, 2000).



Figura 1. Árbol juvenil de *Ceiba pentandra*, en un futuro será productor de fibra kapok.

Algunas de las características principales de la fibra kapok son: no es tóxica, es hipoalergénica, resistente a la podredumbre e inodora, lo que la hace un material adecuado para ser aplicado como materia prima para el tratamiento de aguas por adsorción (Abd Rahman et al., 2016). Además, su composición es de un 64% de celulosa natural, un 13% de lignina, 8.6% de agua, 1.4-3.5% de ceniza, 4.7-9.7% de sustancias solubles en agua, 2.3-2.5% de xilano y 0.8% ceras (Liu, Wang, Zheng, & Wang, 2012). En la Tabla 1 se presentan diversos trabajos reportados en la literatura para la fibra kapok, incluyendo los tratamientos aplicados y los resultados obtenidos para los diferentes adsorbatos.

Tabla 1. Trabajos reportados en la literatura, donde se describe el pretratamiento, uso de la fibra kapok en procesos de adsorción, así como los principales resultados obtenidos.

Tratamiento	Adsorbato	Observaciones	Referencias
Solución de clorito de sodio de 0.3-1.2 g, agitación a 700 RPM durante un tiempo de 60 minutos, con temperaturas de 333.15 – 363.15 K.	Azul de metilo	Las condiciones adecuadas para la remoción de la lignina fueron de 0.93 g de NaClO ₂ y una temperatura de 363.15 K.	(Liu et al., 2012)
Soluciones de H ₂ O, HCl, NaOH, NaClO ₂ y CHCl ₃ de concentraciones de 0.25 – 3%, con agitación durante un tiempo de 1 hora con temperaturas de 293.15 – 373.15 K.	Aceite	En concentraciones de 0.25 – 3%, una temperatura de 353.15 K y un tiempo de 10 – 240 minutos se determinó una buena adsorción.	(Wang, Zheng, & Wang, 2012)
Solución de NaN ₃ , NaOH en una concentración de 5.78 g en 60 ml de N-dimetilformamida con agitación, temperatura de 348.15 K durante 48 horas.	Azul de metilo	Una solución al 2 M de NaOH a 443.15 K durante 120 minutos demostró que la fibra kapok posee una mayor capacidad de adsorción.	(Abd Rahman, Azahari, Yhaya, & Ismail, 2016)
Se trató la fibra kapok con una solución de 50 ml de tolueno que contiene 0.5 g de octadeciltriclorosilano durante 30 minutos, posteriormente se lavó la fibra con 50 ml de etanol durante 1 minuto, después se secó la fibra a 333.15 K en un horno.	Aceite	El tratamiento da como resultado una fibra con mejor capacidad de adsorción de aceite.	(Zheng, Cao, Tu, Wang, & Hu, 2017)
Se trató 1.5 g de fibra kapok con una solución de NaOH en 200 ml de agua destilada a temperatura ambiente (298.15 K) con agitación durante un tiempo de 24 horas.	Metales pesados como el Pb, Cd, Cu	La fibra kapok tiene una mayor capacidad de adsorción que la de muchos otros adsorbentes basados en materiales de origen vegetal	(Duan, Zhao, Yu, Zhang, & Xu, 2013)

El diseño de nuevos procesos industriales de adsorción requiere de conocer las condiciones de equilibrio entre el adsorbato y el material adsorbente, normalmente determinado a condiciones de temperatura constante, por ello se denominan isotermas de adsorción. En el presente trabajo, se realizó un tratamiento termoquímico a la fibra kapok para remover la lignina y la cera superficial que la recubre, utilizando una solución de sulfito de sodio (Na_2SO_3) para modificar la hidrofobicidad de la fibra, favoreciendo el contacto de la solución acuosa de azul de metilo con la fibra, permitiendo así la determinación del equilibrio de adsorción para el sistema fibra kapok tratada + azul de metilo, a condiciones isotérmicas de 303.15 K. Finalmente, se llevó a cabo una propuesta de diseño para un proceso de adsorción de múltiples etapas, que permita tratar efluentes a escala industrial.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Recolección de la fibra kapok

La muestra de fibra kapok se recolectó en el parque Tomas Garrido Canabal, que se encuentra ubicado en la ciudad de Villahermosa, Tabasco ($17^\circ 59' 50.2''\text{N}$, $92^\circ 56' 19.8''\text{W}$), eligiendo frutos maduros y abiertos. Se llevó a cabo una limpieza para remover las semillas, debido a que la fibra kapok se encuentra junto con estas en el interior de las vainas que produce la *Ceiba pentandra*.

2.2 Tratamiento termoquímico

La fibra kapok se sometió a un tratamiento a reflujo, con una solución acuosa 0.1 M de sulfito de sodio (Na_2SO_3), para eliminar la cera que posee en su superficie. La solución de Na_2SO_3 se preparó utilizando una balanza analítica marca VELAB modelo VE-204B, con una precisión de 0.0001 g y para el sistema de reflujo se empleó un matraz de tres bocas de 250 ml, un condensador Liebig de 30 cm, una parrilla de calentamiento marca LabTech modelo LMS-1003, acoplado con un baño recirculador marca Ningbo Scientz Biotechnology modelo DC-2006, para suministrar el agua de enfriamiento a 283.15 K. La temperatura en la solución se monitoreó mediante un termómetro digital modelo HI98509 de la marca HANNA, con una precisión de 0.01 K. Se colocaron 5 g de fibra kapok en 250 ml de la solución de Na_2SO_3 . El tratamiento termoquímico se llevó a cabo durante dos horas, posteriores al inicio de la ebullición. Una vez concluido el tratamiento, se dejó enfriar la fibra durante 30 minutos, se separó de la fase líquida mediante filtrado y se lavó dos veces con agua destilada. Posterior a esto, la fibra se secó a temperatura

ambiente durante 48 horas, para después colocarla en una estufa a 313.15 K por 24 horas y almacenarla en un desecador con gel sílice.

2.3 Espectroscopia de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FT-IR)

Para conocer el efecto del tratamiento en las características de la fibra kapok, se realizaron estudios de espectroscopia infrarrojo en un equipo FT-IR modelo iS5 de la marca Nicolet, Thermo Scientific. La fibra kapok se colocó en una pastilla de NaCl con una relación 80:0.004; las mediciones se llevaron a cabo utilizando 64 barridos por cada muestra, con un intervalo espectral de 4000 – 400 cm^{-1} y una resolución de 4 cm^{-1} .

2.4 Difracción de Rayos X (DRX)

La morfología de la fibra y los cambios que sufrió al ser expuesta a los tratamientos fueron analizados en un difractómetro de rayos-X de la marca Bruker, modelo D2 Phaser de segunda generación. Las mediciones se llevaron a cabo en un intervalo angular de 10° a 60° 2 θ a una velocidad de paso de 0.02°·min⁻¹.

2.5 Análisis Termogravimétrico (TGA)

Para determinar la temperatura de inicio de descomposición de la fibra kapok con y sin tratamiento, se utilizó un analizador termogravimétrico de alta resolución modelo TGA 2950 de la marca TA Instruments. Las mediciones fueron hechas en un intervalo de temperatura de 303.15 K a 873.15 K bajo atmósfera de nitrógeno, con un caudal de 20 mL·min⁻¹, a una velocidad de calentamiento de 10 K·min⁻¹, con una cantidad aproximada de 1 mg de la muestra.

2.6 Adsorción del azul de metilo en la fibra kapok

La determinación del equilibrio de adsorción entre la fibra kapok y azul de metilo ($\text{C}_{37}\text{H}_{27}\text{N}_3\text{Na}_2\text{O}_9\text{S}_3$) se llevó a cabo en dos etapas: la primera fue la construcción de la curva de calibración y la segunda consistió en poner en contacto la fibra kapok con soluciones de azul de metilo a diferentes relaciones masa de fibra – volumen de solución, para finalmente llevar a cabo el análisis de los resultados obtenidos.

2.6.1 Construcción de la curva de calibración

Se preparó una solución madre de azul de metilo ($\text{C}_{37}\text{H}_{27}\text{N}_3\text{Na}_2\text{O}_9\text{S}_3$) a 30 mg·L⁻¹, usando un matraz volumétrico aforado de 1000 ml. Para medir la masa del azul de metilo se utilizó una balanza analítica marca VELAB modelo VE-204B, con una precisión de 0.0001 g. Posteriormente, se procedió a realizar un análisis espectrofotométrico, usando un equipo UV-VIS marca PG Instruments modelo T80+, con una precisión en la longitud

de onda de 0.001nm. Se utilizó agua desionizada como blanco y la solución madre de azul de metilo para determinar la longitud de onda a la cual se presenta la máxima absorbancia. Una vez determinada la longitud de onda, se prepararon eluciones a partir de la solución madre, para obtener concentraciones de 0 a 30 mg·L⁻¹, con incrementos de 5 mg·L⁻¹.

2.6.2 Determinación del equilibrio de adsorción.

Se llevó a cabo en un baño María con temperatura y agitación controlada de la marca Thermo-Scientific modelo SWB-15, con una precisión en temperatura de 0.1 K. El experimento se realizó en matraces Erlenmeyer de 50 ml a una temperatura de 303.15 K y con una velocidad de agitación de 100 RPM. La masa de la fibra kapok colocada en la solución de azul de metilo varió de 0 a 0.25 g, con incrementos de 0.05 g; se colocaron 15 ml de una solución de azul de metilo, con una concentración inicial de 30.2 mg·L⁻¹. El experimento se mantuvo a temperatura y agitación constante durante 24 h. La muestra de azul de metilo sin fibra se utilizó como blanco, para verificar si las variaciones en la concentración pudiesen ser por el efecto de la descomposición de las moléculas del colorante. Una vez concluido el tiempo de adsorción se midieron las absorbancias de cada una de las muestras en el espectrofotómetro UV-VIS marca PG Instruments modelo T80+. Además, se midió el pH para cada muestra al inicio y al final del experimento, usando tiras reactivas de la marca CIVEQ. Todos los experimentos se llevaron a cabo por triplicado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de la fibra kapok

La fibra presenta las bandas características del espectro FT-IR para materiales lignocelulósicos, como puede observarse en la Figura 2. Es posible apreciar el estiramiento del grupo funcional hidroxilo de la celulosa ($\lambda = 3349 \text{ cm}^{-1}$), el cual viene acompañado de la deformación del hidroxilo ($\lambda = 1645 \text{ cm}^{-1}$); la banda en 2919 cm^{-1} , se asigna al estiramiento C – H de los grupos funcionales alifáticos asimétricos y simétricos de la parte cerosa; el estiramiento del enlace C–O se puede observar en 1246 cm^{-1} , esta vibración corresponde a la hemicelulosa, la lignina y la cera presente en la superficie de la fibra. Además, en 1744 cm^{-1} se observa el estiramiento del C=O que es un enlace característico de la hemicelulosa. Los picos en 1113 cm^{-1} y 1057 cm^{-1} son también atribuidos al estiramiento del enlace C–O de la lignina y la hemicelulosa. La lignina

presente en la fibra es identificada por la vibración de estiramiento del enlace C=C–C en la banda 1596 cm^{-1} y 1428 cm^{-1} , que corresponde a la vibración esquelética de los compuestos aromáticos (Macedo et al., 2020).

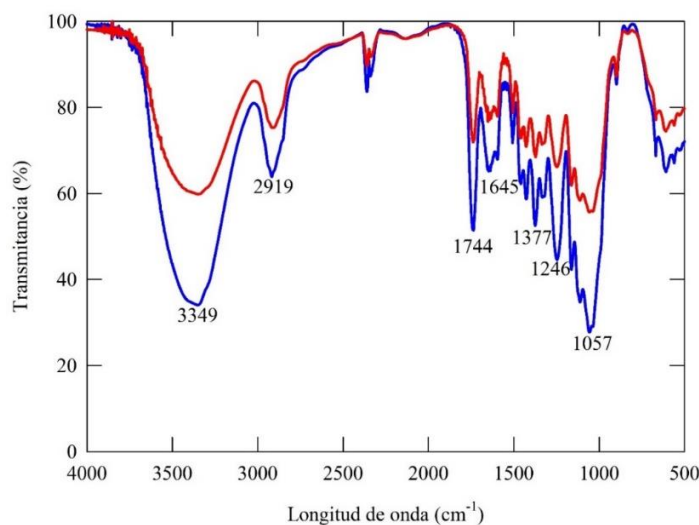


Figura 2. Espectro IR obtenido para la fibra kapok natural (—) y la fibra kapok sometida a un tratamiento termoquímico con Na_2SO_3 (—). Condiciones de medición: muestra en pastilla de NaCl , proporción 80:0.004; 64 barridos; resolución 4 cm^{-1} .

De esta forma, fueron identificados los principales componentes de la fibra kapok y las modificaciones debidas al tratamiento químico con sulfito de sodio, encontrando que la fibra kapok con tratamiento en una solución acuosa con sulfito de sodio por dos horas sufrió cambios que se pueden observar como una reducción en la intensidad de las señales del porcentaje de transmitancia, véase la Figura 2. Lo anterior indica que se ha removido parte de la lignina y la cera de la fibra, reduciendo así su hidrofobicidad (Gapusan & Balela, 2020).

En la Figura 3 se muestran los difractogramas para la fibra kapok natural y sometida al tratamiento termoquímico, observando a 15° y 22° la presencia de los picos característicos de la parte amorfa y cristalina de la celulosa, respectivamente. Se puede apreciar un incremento de entre el 75% y el 100% en las señales correspondientes a las fases amorfas y cristalinas de la celulosa, indicando que parte de la lignina fue removida por el sulfito de sodio, coincidiendo con lo observado en los espectros de FT-IR (O'Sullivan, 1997; Wang et al., 2012).

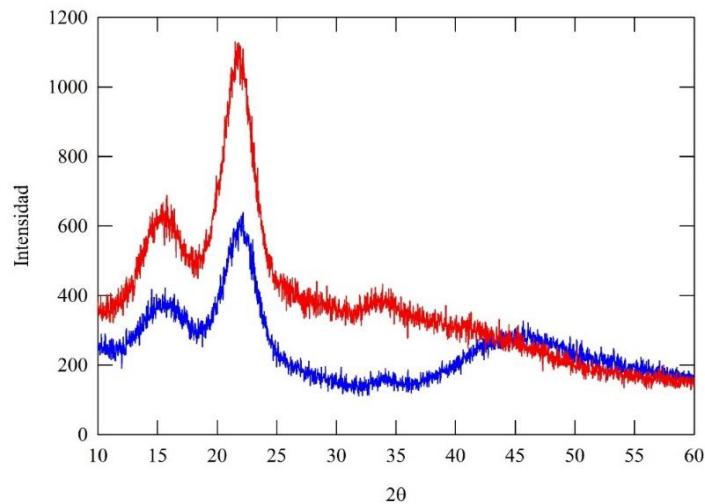


Figura 3. Patrón de Difracción de Rayos X (DRX) obtenido para la fibra kapok natural (—) y la fibra kapok sometida a un tratamiento termoquímico con Na₂SO₃ (—). Condiciones de medición: velocidad 0.02°·min⁻¹.

Por último, en los termogramas del TGA se pueden diferenciar 3 etapas: la primera aproximadamente a 483.15 K, donde hay pérdida de humedad; en la segunda, que observa entre 503.15 y 613.15 K, se tiene la mayor pérdida de masa por descomposición de la hemicelulosa; por último, la tercera etapa se tiene después de 723.15 K, donde ocurre la descomposición de la lignina (Draman, Daik, Latif, & El-Sheikh, 2014). En la Figura 4 se puede observar que el comportamiento para la fibra tratada y natural es el mismo por debajo de 573.15 K; posterior a esta temperatura, la muestra de la fibra tratada mantiene un residuo del 20%, entendiéndose que hay presencia de compuestos inorgánicos dentro del lumen de la fibra, que en este caso, corresponde al sulfito de sodio (Aguilar-Vega & Cruz-Ramos, 1995; Kissinger, 1957; Wongchareon & Panomsuwan, 2018).

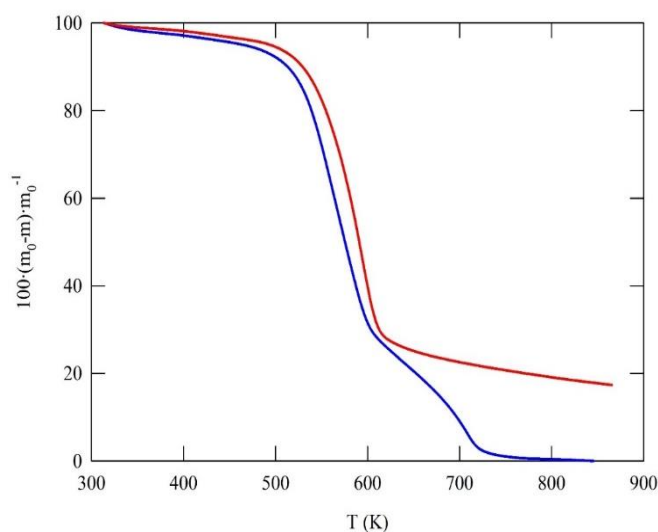


Figura 4. Análisis termogravimétrico (TGA) para la fibra kapok natural (—) y la fibra kapok sometida a un tratamiento termoquímico con Na_2SO_3 (—). Condiciones de medición: tamaño de muestra 1 mg; atmósfera de N_2 ; velocidad de calentamiento $10 \text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$.

3.2 Equilibrio de adsorción

La curva de calibración se elaboró a partir de una solución madre de azul de metilo con una concentración de 30.2 mg/L ; la máxima absorbancia UV-vis se alcanzó a una longitud de onda de 596 nm , misma que coincide con los valores reportados por Liu y colaboradores en 2012 (Liu et al., 2012). La curva de calibración obtenida se muestra en la Figura 5, misma que fue ajustada a una ecuación de segundo grado con ordenada en el origen (Ec. 1), para poder obtener los valores de la concentración en el experimento de adsorción

$$A = 5.3903 \times 10^{-4}C^2 + 2.371 \times 10^{-2}C \quad (1)$$

donde A es la absorbancia y C es la concentración, en mg/L .

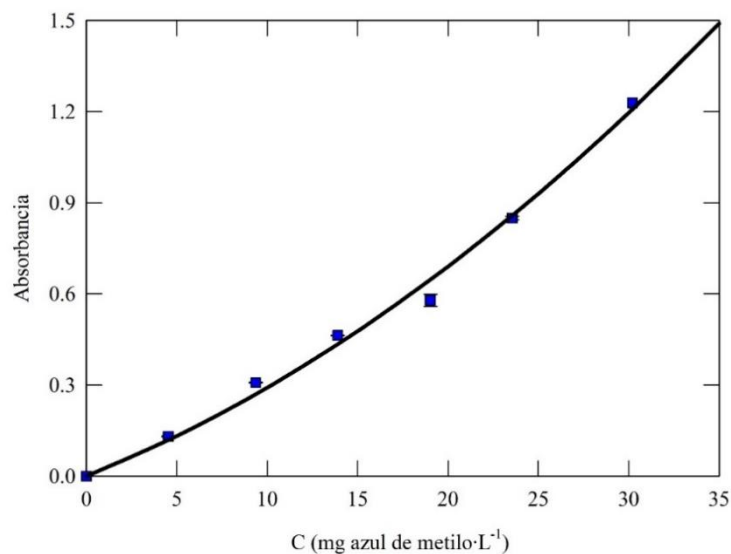


Figura 5. Curva de calibración para determinar la concentración de azul de metilo en agua. ■ Datos experimentales; — ajuste a una ecuación de segundo grado con ordenada en el origen.

Para obtener la concentración a partir de las mediciones de la absorbancia, la Ec. 1 se resolvió usando la fórmula general para ecuaciones de segundo grado, y considerando únicamente la raíz positiva de la misma, por ser la que cuenta con significado físico

$$C = \frac{-2.371 \times 10^{-2} + \sqrt{5.6216 \times 10^{-4} + 2.1561 \times 10^{-3}A}}{1.0781 \times 10^{-3}} \quad (2)$$

Los resultados para la isoterma de adsorción se muestran en la Figura 6. Se puede apreciar un comportamiento del tipo III, misma que puede ser representada por el modelo propuesto por Freundlich (Freundlich, 1906), que se utiliza ampliamente para describir la adsorción de soluciones acuosas; esta isoterma es una ecuación exponencial empírica, que puede demostrarse teóricamente considerando que la magnitud de la masa de adsorbato retenido en el material adsorbente varía exponencialmente con el recubrimiento de la superficie (Viades Trejo, 2013).

El modelo matemático para la isoterma de Freundlich se presenta a continuación

$$q_{eq} = kC_{eq}^{1/n} \quad (3)$$

donde q es la masa de adsorbato en mg por cada gramo de material adsorbente, C_{eq} es la concentración de equilibrio del adsorbato en la solución, en mg/L, k y n son las constantes empíricas del modelo, determinadas por ajuste de parámetros usando el método de mínimos cuadrados. Los parámetros de Freundlich obtenidos fueron $k = 0.1131$ y $n = 2.38$. En la Figura 6, se puede observar la isoterma de adsorción con los datos experimentales de la fibra kapok tratada con sulfito de sodio, en el proceso de adsorción del azul de metilo a 303.15 K.

La isoterma de Freundlich obtenida corresponde a una adsorción física en la que no hay un recubrimiento límite ni una adsorción monomolecular, sino multimolecular, sin embargo, en esta isoterma se considera que no existen interacciones laterales entre las moléculas adsorbidas. Además, los resultados obtenidos muestran una isoterma de Freundlich convexa respecto a la concentración de equilibrio, siendo esta una característica que indica interacciones débiles entre el adsorbato (el azul de metilo) y el adsorbente (fibra kapok), es decir, están representadas principalmente por fuerzas de van der Waals (Lazo, Navarro, Sun-Kou, & Llanos, 2008).

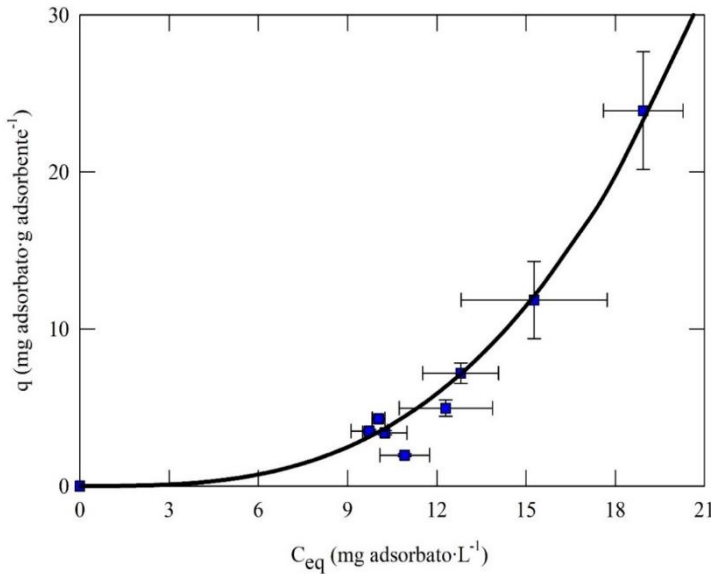


Figura 6. *Isoterma de adsorción a 303.15 K, para el azul de metilo en fibra kapok tratada con sulfito de sodio. ■ Datos experimentales medidos en este trabajo; — Isoterma de Freundlich (Freundlich, 1906), obtenida mediante ajuste por mínimos cuadrados.*

3.3 Diseño del proceso de adsorción

Para alcanzar el objetivo de remover los colorantes en un efluente contaminado con azul de metilo, se propone el diseño de un tren de adsorbedores por lotes, como se muestra en la Figura 7. La corriente de alimentación al tren de separadores V , con una concentración inicial C_0 ingresa a la Etapa 1 y se pone en contacto con una masa de material adsorbente W_1 , que se considera nuevo ($q_0 = 0 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$); una vez alcanzado el equilibrio, el flujo de salida de esa etapa se considera sin cambios, debido a que la variación en el volumen de este es prácticamente despreciable, sin embargo, su concentración habrá cambiado y ahora es igual a C_1 , este flujo se alimenta a la Etapa 2, en la cual nuevamente se alcanzará el equilibrio con una masa de material adsorbente fresco W_2 ; el proceso se repite sucesivamente, hasta alcanzar la concentración C_N ; el objetivo en el diseño es encontrar el número de etapas necesarias y la masa mínima de material adsorbente, que permita alcanzar la separación deseada.

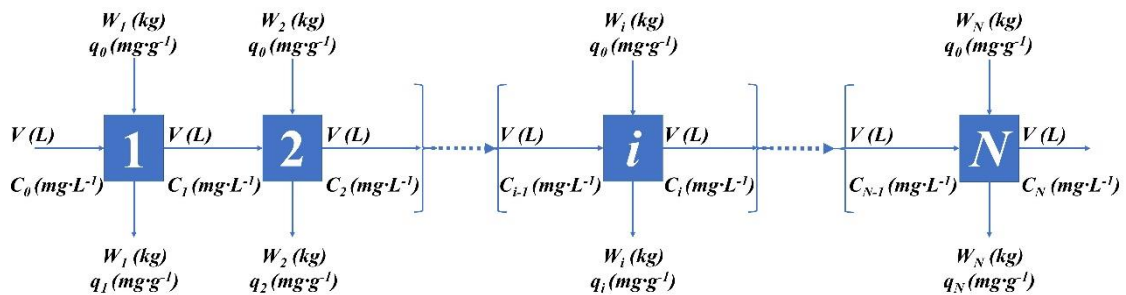


Figura 7. Diagrama de etapas múltiples para el diseño de un tren de adsorbedores por lotes en los que ingresa una corriente V con una concentración de contaminantes C_0 . El objetivo del diseño es encontrar el número de etapas N y las masas de material adsorbente para cada etapa (W_i), que permitan alcanzar la concentración C_N en el efluente de agua contaminada.

Partiendo de un balance de masa para la etapa i , se tiene

$$V(C_{i-1} - C_i) = W_i(q_i - q_0) = W_i q_i \quad (4)$$

Suponiendo que en cada etapa i se alcanza el equilibrio, entonces la concentración $C_i = C_{eq,i}$ y la cantidad de contaminante retenida por el material adsorbente es $q_i = q_{eq,i}$, que para el sistema azul de metilo + agua + fibra kapok puede ser obtenida a partir de la isoterma de Freundlich (Ec. 3) determinada en este trabajo, entonces

$$V(C_{i-1} - C_i) = W_i \cdot k \cdot C_i^{1/n} \quad (5)$$

De la Ec. 5 se puede obtener la expresión para estimar la masa de material adsorbente necesario para la etapa i

$$W_i = \frac{V(C_{i-1} - C_i)}{k \cdot C_i^{1/n}} \quad (6)$$

Además, se define el porcentaje de remoción global (R) como

$$R = 100 \times \frac{(C_0 - C_N)}{C_0} \quad (7)$$

Entonces se tiene un problema de minimización

$$\min FO = \sum_{i=1}^N W_i \quad (8)$$

Sujeto a $C_N = C_0 \left(1 - \frac{R}{100}\right)$

Para este caso de estudio, se supuso un efluente de 1 m^3 , una concentración inicial de $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, un porcentaje de remoción del 99 % y se varió el número de etapas de 1 a 10, para analizar el efecto de esta variable sobre la masa total de material adsorbente requerida para alcanzar la remoción propuesta. Los resultados se muestran en la Figura 8, observándose que el efecto de incrementar el número de etapas tiene un comportamiento de tipo asintótico horizontal; al hacer uso de dos etapas, se puede tener una reducción de casi el 60% en la masa de material adsorbente, encontrando que para un diseño con más

de cuatro etapas, la reducción en la cantidad de material adsorbente se mantiene cercana al 74%.

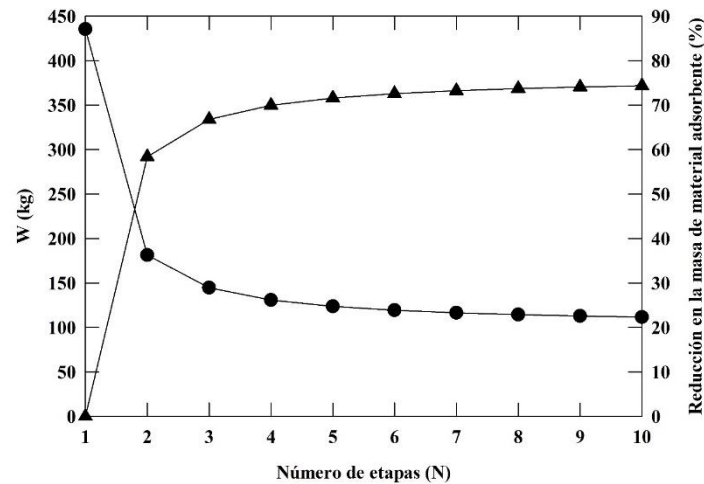


Figura 8. Efecto del número de etapas (N) en el diseño de adsorbedores por lotes de múltiples etapas. (●) Influencia en la masa total de material adsorbente requerido (W); (▲) Reducción porcentual en la masa total de material adsorbente, comparando un proceso de múltiples etapas contra uno de una sola etapa.

Es importante destacar que, al existir más etapas en el proceso es posible identificar un incremento en los costos de operación y mantenimiento; por lo anterior, una propuesta acertada es trabajar con un proceso de adsorción por lotes que conste de dos etapas de equilibrio; para la etapa uno es necesario alimentar 115 kg de material adsorbente, obteniendo una remoción del 84 %; en la etapa dos, se requieren 66 kg de adsorbente, removiendo el 15 % restante para alcanzar la recuperación global propuesta de 99%. En total, para el proceso propuesto se necesitan 181 kg de fibra kapok tratada térmicamente con sulfito de sodio.

4. CONCLUSIÓN

Se llevó a cabo un tratamiento termoquímico con sulfito de sodio para la fibra kapok obtenida del árbol de la ceiba. Los análisis de FT-IR, DRX y TGA demostraron que se modificó la superficie de la fibra al remover la cera y la lignina, reduciendo así la hidrofobicidad de esta, lo que permitió llevar a cabo un estudio de adsorción para la remoción del colorante azoico azul de metilo en soluciones acuosas de hasta $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Se obtuvo una isoterma de adsorción para el sistema fibra kapok + agua + azul de metilo a 303.15 K y se ajustó al modelo de Freundlich, encontrando que la principal contribución en el proceso de adsorción son las fuerzas de van der Waals. Además, se propuso el diseño de un proceso de adsorción por lotes para efluentes acuosos contaminados con azul de

metilo, encontrando que la mejor propuesta para tener un consumo mínimo de material adsorbente corresponde a un sistema con dos tanques agitados, que permita remover hasta el 99 % del colorante en el agua. Con los resultados obtenidos en este trabajo, es posible concluir que la fibra kapok es un material adsorbente con gran capacidad para tratar las aguas contaminadas de colorantes azoicos, siempre y cuando se le realice un tratamiento para remover la lignina y la cera que la vuelven hidrofóbica.

5. LISTA DE REFERENCIA

- Abd Rahman, N. S., Azahari, B., Yhaya, M. F., & Ismail, W. R. (2016). Crosslinking of kapok cellulose fiber via azide alkyne click chemistry as a new material for filtering system: A preliminary study. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 6(1), 16–19. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.6.1.616>
- Aguilar-Vega, M., & Cruz-Ramos, C. A. (1995). Properties of henequen cellulosic fibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 56(10), 1245–1252. <https://doi.org/10.1002/app.1995.070561007>
- Bernal, Luis A.; Hernández, Mayra K.; Berber, María S.; Martínez, M. E. . D., & Raúl D.; Espinosa, M. Á. (2017). Remoción Del Colorante Compuesto Naranja Remazol De Aguas Residuales Generadas En La Industria Textil. *Avances En Ciencias e Ingeniería*, 8(3), 51–57.
- Cárdenas, L. (2017). *Estudio de la capacidad de adsorción de materiales orgánicos para la remoción de aceites y combustibles presentes en aguas*. 27.
- Draman, S. F. S., Daik, R., Latif, F. A., & El-Sheikh, S. M. (2014). Characterization and thermal decomposition kinetics of kapok (*Ceiba pentandra* L.)-based cellulose. *BioResources*, 9(1), 8–23. <https://doi.org/10.15376/biores.9.1.8-23>
- Duan, C., Zhao, N., Yu, X., Zhang, X., & Xu, J. (2013). Chemically modified kapok fiber for fast adsorption of Pb²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺ from aqueous solution. *Cellulose*, 20(2), 849–860. <https://doi.org/10.1007/s10570-013-9875-9>
- Freundlich, H. M. F. (1906). Over the adsorption in solution. *J. Phys. Chem*, 57(385471), 1100–1107.
- Gapusan, R. B., & Balela, M. D. L. (2020). Adsorption of anionic methyl orange dye and lead(II) heavy metal ion by polyaniline-kapok fiber nanocomposite. *Materials Chemistry and Physics*, 243(September 2019), 122682.

- <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.122682>
- Hassan, M., AlAhmadi, M. D., & Mosaid, M. (2015). Micellar effect on the kinetics of oxidation of methyl blue by Ce(IV) in sulfuric acid medium. *Arabian Journal of Chemistry*, 8(1), 72–77. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2011.01.008>
- Honorato, A., Apolinar, F., & Aburto, J. (2015). Main wood chemical constituents of Ceiba pentandra, Hevea brasiliensis and Ochroma pyramidale. *Maderas y Bosques*, 21, 131–146.
- Khan, S. S., Arunarani, A., & Chandran, P. (2015). Biodegradation of Basic Violet 3 and Acid Blue 93 by Pseudomonas putida. *Clean - Soil, Air, Water*, 43(1), 67–72. <https://doi.org/10.1002/clen.201200676>
- Kissinger, H. E. (1957). Reaction Kinetics in Differential Thermal Analysis. *Analytical Chemistry*, 29(11), 1702–1706. <https://doi.org/10.1021/ac60131a045>
- Lazo, J. C., Navarro, A. E., Sun-Kou, M. R., & Llanos, B. P. (2008). *Synthesis and Characterization of Organophilic Clays and Their Use As Adsorbents for Phenol*. 1, 3–19.
- Liu, Y., Wang, J., Zheng, Y., & Wang, A. (2012). Adsorption of methylene blue by kapok fiber treated by sodium chlorite optimized with response surface methodology. *Chemical Engineering Journal*, 184, 248–255. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.01.049>
- Macedo, M. J. P., Silva, G. S., Feitor, M. C., Costa, T. H. C., Ito, E. N., & Melo, J. D. D. (2020). Surface modification of kapok fibers by cold plasma surface treatment. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 2467–2476. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.077>
- O’Sullivan, A. C. (1997). Cellulose: The structure slowly unravels. *Cellulose*, 4(3), 173–207. <https://doi.org/10.1023/A:1018431705579>
- Valladares-Cisneros, M. G., Valerio Cárdenas, C., ... Melgoza Alemán, R. M. (2017). Adsorbentes no-convencionales, alternativas sustentables para el tratamiento de aguas residuales. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 16(31), 55–73. <https://doi.org/10.22395/rium.v16n31a3>
- Viades Trejo, M. J. (2013). Fenómenos de superficie: Adsorción y Absorción. *Fenómenos de Superficie Adsorción*, (514), 1–17.
- Wahi, R., Chuah, L. A., Choong, T. S. Y., Ngaini, Z., & Nourouzi, M. M. (2013). Oil

- removal from aqueous state by natural fibrous sorbent: An overview. *Separation and Purification Technology*, 113(July), 51–63.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2013.04.015>
- Wang, J., Zheng, Y., & Wang, A. (2012). Effect of kapok fiber treated with various solvents on oil absorbency. *Industrial Crops and Products*, 40(1), 178–184.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.03.002>
- Weaver, P. L. (2000). *Tectona grandis* L.f. Teak. *General Technical Report IITF-15: Bioecología de Arboles Nativos y Exóticos de Puerto Rico y Las Indias Occidentales*, 524–540.
- Wongchareon, S., & Panomsuwan, G. (2018). Easy synthesis of TiO₂ hollow fibers using kapok as a biotemplate for photocatalytic degradation of the herbicide paraquat. *Materials Letters*, 228, 482–485. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.06.089>
- Zheng, Y., Cao, E., Tu, L., Wang, A., & Hu, H. (2017). A comparative study for oil-absorbing performance of octadecyltrichlorosilane treated *Calotropis gigantea* fiber and kapok fiber. *Cellulose*, 24(2), 989–1000.
<https://doi.org/10.1007/s10570-016-1155-z>