

ADSORCIÓN DE DIÉSEL EN SOLUCIÓN ACUOSA SOBRE ASERRÍN CEDRO (*CEDRELA ODORATA L.*) EN COLUMNA DE LECHO FIJO

Ángel Villabona¹, Candelaria Tejada², Lesly Tejada³

Resumen

Se evaluó el uso de aserrín de Cedro (*Cedrela odorata L.*) en la adsorción de diésel en solución acuosa. El potencial del aserrín como adsorbente en sistema continuo fue investigado, variando la cantidad de biomasa y el caudal, usando columnas de plástico transparente de diámetro 3,5 cm y una altura de 18,5 cm, con tiempo de contacto de 180 min, tomando alícuotas de 50 mL en diferentes intervalos. La medición de la concentración residual fue realizada por cromatografía de gases, donde se estableció la saturación de la columna a las mejores condiciones; se determinó que a los 600 minutos se llega a un equilibrio, en el cual posiblemente se produce una alta saturación de la biomasa, que alcanza una capacidad de 62,93mg/g. Esta fue determinada con el modelo de Thomas a un flujo de 0,1 mL/s y 4 g de aserrín de cedro.

Palabras clave: adsorción, aserrín, biomasa residual, diésel, lecho fijo.

¹ Magíster en Ingeniería Ambiental y Especialista en Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad de Cartagena. Ingeniero Químico de la Universidad Industrial de Santander. Profesor titular de tiempo completo del Programa de Ingeniería Química y docente del grupo de investigación IDAB de la Universidad de Cartagena. avillabona@unicartagena.edu.co

² Magíster en Ingeniería Ambiental, Universidad de Cartagena (Colombia). Magíster en educación, Universidad del Norte (Colombia). Especialista en Química Analítica, Universidad de Cartagena. Ingeniera Química, Universidad Industrial de Santander (Colombia). Profesora de tiempo completo del Programa de Ingeniería Química y docente del grupo de investigación IDAB de Ingeniería Química de la Universidad de Cartagena. : ctejadat@unicartagena.edu.co

³ Magíster en Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional. Ingeniera Química de la Universidad Industrial de Santander. Profesor asociado de tiempo completo del Programa de Ingeniería Química y docente del grupo de investigación IDAB de la Universidad de Cartagena. lptbenitez@gmail.com

ADSORPTION OF DIESEL IN AQUEOUS SOLUTION ON CEDAR ASERRIN (*CEDRELA ODORATA* L.) IN FIXED BED COLUMN

Ángel Villabona¹, Candelaria Tejada², Lesly Tejada³

Abstract

The use of Cedar sawdust (*Cedrela odorata* L.) in the adsorption of diesel in aqueous solution was evaluated. Sawdust adsorbent potential in continuous system was analyzed, varying the amount of biomass and the flow rate, using transparent plastic columns of diameter 3.5 cm and 18.5 cm height, with a contact time of 180 min, taking aliquots of 50 mL in different intervals; the measurement of residual concentration was made through gas chromatography, finally, saturation of the column at the best conditions was established. Determining that at 600 minutes balance is reached, in which a high saturation of the biomass possibly occurs, reaching a capacity of 62.93mg / g determined with the Thomas model at a flow of 0.1 mL / s. 4 g of cedar sawdust.

Key words: Adsorption, sawdust, residual biomass, diesel, fixed bed.

ADSORÇÃO DE DIESEL EM SOLUÇÃO AQUOSA EM SERRAGEM DE CEDRO (*CEDRELA ODORATA L.*) EM COLUNA DE LEITO FIXO

Ángel Villabona¹, Candelaria Tejada², Lesly Tejada³

Resumo

Avaliou-se o uso de serragem de cedro (*Cedrela odorata L.*) na adsorção de diesel em solução aquosa. O potencial da serragem como adsorvente em um sistema contínuo foi investigado através da variação da quantidade de biomassa e a taxa de fluxo, utilizando colunas de plástico transparente de diâmetro de 3,5 cm e uma altura de 18,5 cm, com o tempo de contato de 180 minutos, tendo alíquotas de 50 mL em diferentes intervalos; a medição da concentração residual foi feita por cromatografia gasosa; finalmente, a saturação da coluna foi estabelecida nas melhores condições. Determinou-se que aos 600 minutos é alcançado um equilíbrio, no qual possivelmente ocorre uma alta saturação da biomassa, atingindo uma capacidade de 62,93mg / g, determinada com o modelo de Thomas a um fluxo de 0,1 mL / s. 4 g de serradura de cedro.

Palavras-chave: adsorção, serragem, biomassa residual, diesel, leito fixo.

Introducción

Recientemente ha surgido interés en el desarrollo de un método fácil para eliminar rápidamente los aceites de la superficie del agua, impulsado por el problema de los contaminantes del petróleo causantes de contaminación ambiental grave y de problemas de salud en los seres humanos. La reducción de estos contaminantes ha llamado especial atención desde hace mucho tiempo, teniendo en cuenta que los métodos utilizados para este proceso no deben dar como resultado productos secundarios tóxicos, no deben ser costosos, deben ser fáciles de manejar y no provocar alteraciones ecológicas (1,2).

El riesgo de la contaminación por residuos de petróleo ha aumentado con el crecimiento del desarrollo industrial y los procesos de exploración, producción y refinación del petróleo. El aumento en el volumen de aguas residuales oleosas y su efecto una vez vertidas en el ambiente son actualmente una preocupación ambiental, razón por la cual el tratamiento de este tipo de contaminantes es fundamental para la protección del medio ambiente (3). El agua aceitosa se ha tratado de forma convencional a través de diferentes métodos físicos, químicos y biológicos. Sin embargo, la mayoría de las tecnologías convencionales no logran eliminar completamente el aceite suspendido y los elementos disueltos; además, muchos tratamientos químicos implican altos costos iniciales y/o de funcionamiento, y conducen a la producción de lodos peligrosos que se liberan en plataformas marinas debido a restricciones de espacio (4).

En el caso especial de contaminantes de productos derivados del petróleo se estima que se han arrojado al mar cerca de 224 000 toneladas. A pesar de que estos materiales pueden ser eficientemente removidos por tecnologías avanzadas, estas son usualmente costosas y difíciles de mantener. Además, muchas veces estos contaminantes forman emulsiones que son más difíciles de tratar debido a su alta estabilidad en fase acuosa. En este sentido, tecnologías como la adsorción se convierten en un proceso prometedor por su simplicidad, efectividad, y viabilidad si se usa un sorbente adecuado (5).

La bioadsorción brinda la posibilidad de reducir la concentración de contaminantes mediante el uso de biomásas como material adsorbente. En este sentido, los subproductos agrícolas y de procesos industriales, en su mayoría, tienen poco o ningún valor económico por lo que representan una gran alternativa de uso en este proceso. Además, alivian problemas ambientales puesto que algunos de ellos, tales como el aserrín, están disponibles en grandes cantidades en los aserraderos y presentan con frecuencia un problema de eliminación (6). El aserrín es un subproducto fácilmente disponible en la industria de la madera y el papel, que exhibe buenas características de sorbente para el tratamiento de aguas con presencia de diferentes contaminantes, entre ellos productos relacionados con el posconsumo del petróleo (7-8).

Diversos autores demuestran la eficacia del aserrín para la remoción de contaminantes; el aserrín de Bambú se utilizó para eliminar metales pesados y colorantes en solución por su estructura

constituida por celulosa y lignina, componentes altamente relacionados con la adsorción de contaminantes (9-10). Del mismo modo, el aserrín de pino se usó en la remoción de Níquel divalente (11) y Cromo hexavalente (12), mostrando su bajo costo para el tratamiento de aguas; mientras que otro estudio plantea el uso de una mezcla de bentonita y aserrín para la coagulación de aceite en agua, que alcanza una eficiencia de coagulación del 92% (13).

Por tanto, el uso de aserrín como eliminador de contaminantes no es solo un beneficio para el medio ambiente, sino para un posible mercado emergente en el campo de la agricultura de madera, razón por la cual el desarrollo de adsorbentes a partir de este elemento puede llegar a ser una tecnología económica y eficaz que contribuya la reducción, control y prevención de la contaminación por aceites del recurso hídrico (14). En este sentido, el alcance de la

presente investigación se concentró en probar el aserrín de cedro como material bioadsorbente para la remoción de diésel en solución acuosa, en un sistema de lecho fijo y su caracterización mediante Espectroscopía Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR), para identificar los grupos funcionales intervinientes en dicho proceso.

Materiales y métodos

Se tamizó el aserrín con la finalidad de escoger el tamaño de partícula apropiado; posteriormente, se lavó varias veces con agua destilada hasta retirar las impurezas presentes. Luego, se secó a 80°C durante 24 h para su posterior caracterización por FTIR (14). Los experimentos de adsorción en columnas fueron llevados a cabo con el aserrín que mostró mejor desempeño en la remoción del diésel, usando el mejor tamaño de partícula estudiado previamente en sistema por lotes como se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1. Remoción de diésel sobre aserrín en sistema batch.

Tamaño de Partícula	% de remoción			
	Cedro		Ceiba	
	2 g	5 g	2 g	5 g
1 mm	49,14	58,49	50,44	58,13
2 mm	47,31	53,92	45,95	53,87

Fuente: (15)

El montaje para las pruebas en lecho fijo fue realizado en columnas de plástico transparente de diámetro 3,5 cm y una altura de 18,5 cm, como se muestra en la Figura 1. El tiempo

de contacto establecido fue de 180 min, tomando alícuotas de 50 mL en diferentes intervalos de tiempo con el fin de observar el comportamiento de la biomasa.

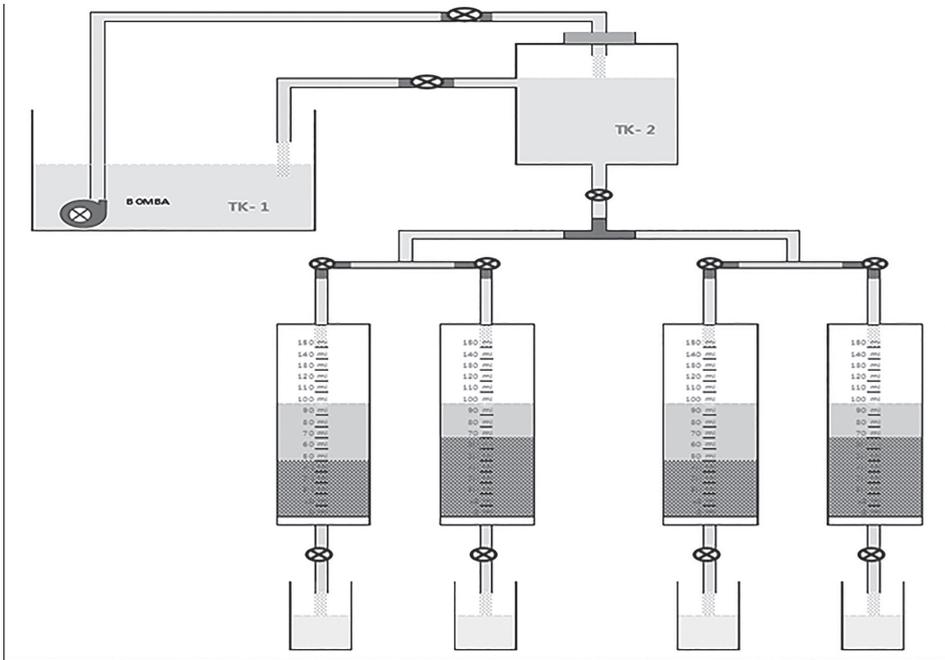


Figura 1. Esquema del equipo de adsorción en continuo.
Fuente: (16)

La medición de la concentración residual fue realizada por cromatografía de gases. Para ello, fue necesario romper la emulsión previamente agregando 10 mL de etanol, 2 g de NaCl, 10 mL de heptano sobre cada muestra de 50 mL, y calentándola a una temperatura de 80 °C

durante 4 minutos. Además, se usaron unas gotas de tetra-propylenbenzol-sulfonatlosung al 5%. Finalmente, a las mejores condiciones se estableció la saturación de la columna. Ajustándolo al modelo de Thomas que está dado por:

$$\frac{C_t}{C_0} = \frac{1}{1 + \exp \left[k_1 \left(\frac{q_0 M}{Q} - C_0 t \right) \right]} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde k_1 es la constante de velocidad de Thomas ($\text{mL min}^{-1} \text{mg}^{-1}$); q_0 es la cantidad máxima de metal adsorbido (mg g^{-1}), M es la masa del adsorbente (g); Q es el flujo (mL/min); C_0 es la concentración inicial

de metal (mg/mL) y C_t es la concentración del adsorbato en el tiempo (mg/mL). El ajuste al modelo se calculó con el método de suma de cuadrado de los errores usando la herramienta Solver de Excel.

Resultados y discusión

Caracterización por FTIR

En la Figura 2 se observa el espectro FTIR correspondiente al aserrín de cedro previo al proceso de adsorción de diésel en sistema continuo.

En el espectro del aserrín de *C. odorata* L se encuentra identificada en los puntos 1600, 1460, 1420, 1330, 1270 y 1030 cm^{-1} lignina; asimismo, alrededor de 3400 cm^{-1} la celulosa. El pico 3403,74 cm^{-1} se relaciona con la presencia de ácidos carboxílicos debido a las vibraciones del grupo OH, por lo que el grupo hidroxilo se pue-

de asociar a la remoción de diésel, además, se observa un cambio en la frecuencia de 2918,73 cm^{-1} , por lo que también asociamos el proceso a grupos alifáticos simétricos y asimétricos. La presencia de estos grupos funcionales en la estructura del aserrín de cedro, el cual se usará como lecho para remover diésel presente en solución acuosa, confirman la presencia de centros activos en la superficie del material y su capacidad como agente adsorbente de acuerdo con lo reportado por Zang et al. (17) y Gao et al. (18).

En la Figura 3 se muestra el espectro FTIR del aserrín de cedro luego del proceso de adsorción de diésel en solución acuosa:

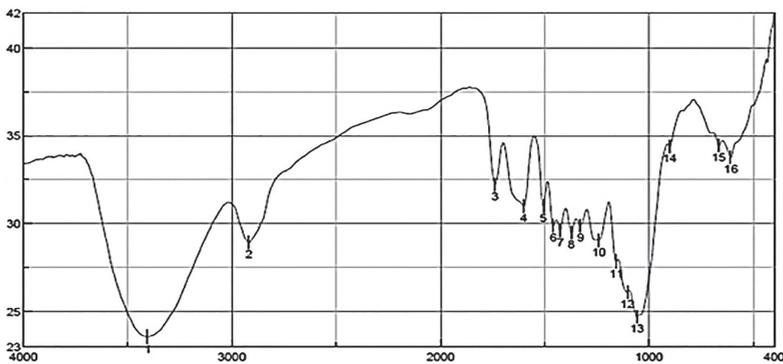


Figura 2. Análisis FTIR del aserrín de cedro antes del proceso de adsorción de diésel.

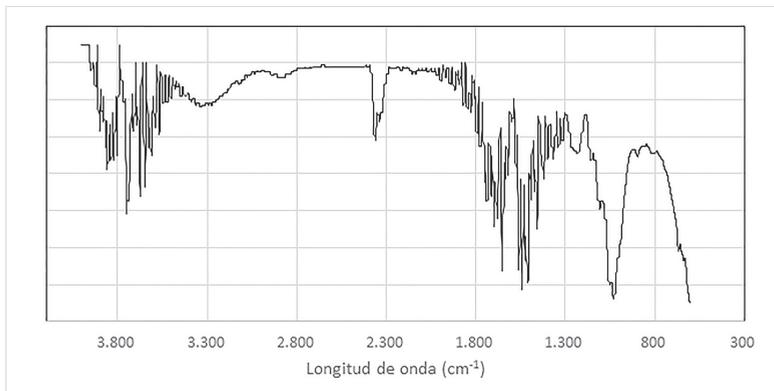


Figura 3. Espectro FTIR del aserrín de cedro después del proceso de adsorción de diésel.

Con respecto al espectro del aserrín se observa un cambio importante en la aparición de los picos de absorbancia 1157,08, 1105,01 y 1057,76 cm^{-1} correspondientes a la participación de alcoholes debido a la alta energía de adsorción del grupo OH. La aparición e intensificación de picos correspondientes al grupo hidroxilo en la estructura del material confirman que el material adsorbió el diésel presente en la solución acuosa con la que se colocó en contacto en las columnas de lecho empacado.

Isotermas de adsorción

Los datos de adsorción experimental de equilibrio de diésel se sometieron a

$$q_e = \frac{q_{\max} b C_e}{1 + b C_e} \quad (2)$$

Donde, q_{\max} (mg/g) es la capacidad de adsorción máxima y b (L/mg) es constante de Langmuir relacionada con el calor de adsorción. El modelo de isoterma de adsorción de Freundlich es una curva que relaciona la concentración de un soluto en la superficie de un adsorbente, con la concentración del soluto

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (3)$$

Donde, K_F y n son las constantes de velocidad de Freundlich designadas como capacidad de adsorción e intensidad de adsorción, respectivamente. El valor de n se ubica en el intervalo 1 a 10, y

los modelos de isoterma de Langmuir y Freundlich, ya que la optimización de un proceso de adsorción requiere la comprensión de las fuerzas propulsoras que gobiernan la interacción entre el adsorbato y el adsorbente. El modelo de Langmuir establece que la adsorción se produce en sitios homogéneos específicos dentro del adsorbente y las fuerzas intermoleculares disminuyen rápidamente con la distancia desde la superficie de adsorción, suponiendo que todos los sitios activos de adsorción son energéticamente idénticos y que la adsorción ocurre en un sitio de unión estructuralmente similar. La isoterma de adsorción de Langmuir está representada en la Ec. 2.

en el líquido con el que está en contacto. Este supone múltiples capas de adsorción con una distribución no uniforme de calor y afinidades de adsorción sobre la superficie heterogénea y puede aplicarse para concentraciones bajas e intermedias. La isoterma de Freundlich se expresa según la Ec. 3:

es un punto de referencia para evaluar la interacción adsorbente-adsorbato; la magnitud del exponente $1/n$ determina la favorabilidad de la adsorción ya que, cuando $n > 1$, representa una condición

de adsorción favorable y esta constante empírica indica la intensidad de adsorción ($L\ mg^{-1}$) que depende de la temperatura y las propiedades del adsorbato y del adsorbente. C_e es la concentración residual de soluto en solución ($mg\ L^{-1}$),

que es la cantidad de adsorbato adsorbido por una masa unitaria de adsorbente en equilibrio ($mg\ g^{-1}$). En la Figura 4, se muestra el ajuste de los datos experimentales a los modelos de isotermas presentado:

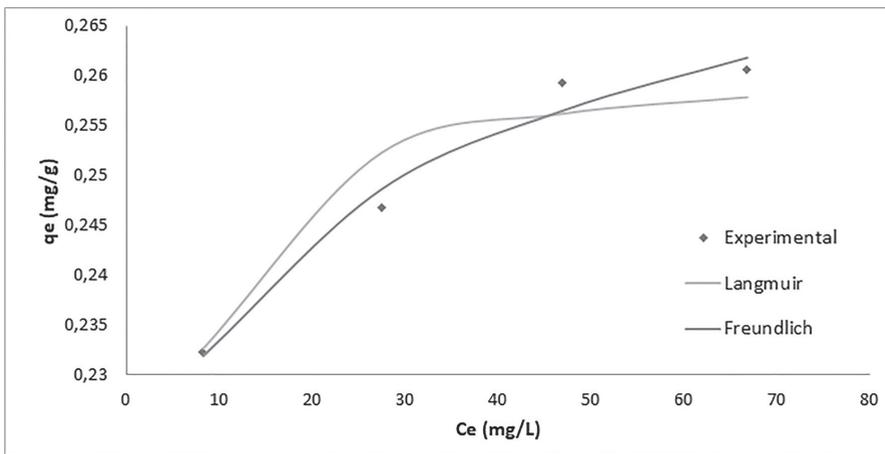


Figura 4. Isotermas de adsorción de diésel sobre el aserrín *C. odorata L.*

En la Tabla 2, los valores de cada parámetro y el error calculado, de la cuales establece la alta correlación de los datos experimentales con los modelos de Langmuir y Freundlich, por lo cual estos pueden explicar la adsorción por estos materiales satisfactoriamente. En cuanto a los parámetros calculados, b , de la isoterma de Langmuir, son

un indicativo de la energía de enlace entre el metal y el ion metálico, por lo tanto, al ser este un valor cercano a 1,0 se concluye que el material presenta una alta energía de enlace, mientras que el valor de $1/n$, que también es menor a 1, indica que la isoterma de Freundlich se puede aproximar a la de Langmuir.

Tabla 2. Parámetros de adsorción calculados

Modelo Isoterma	Parámetros	Magnitud
Langmuir	q_{max}	0,262
	b	0,958
	Suma	1,220
	K_f	0,205
Freundlich	$1/n$	0,058
	Suma	1,28E-05

Así se puede concluir que el enlace se da principalmente por fuerzas físicas, la adsorción está limitada a la formación de una monocapa, el número de especies adsorbidas no excede el total de sitios disponibles, inicialmente todos los sitios están disponibles, y no se considera ninguna reacción de desorción que pueda tener lugar durante el proceso de remoción.

Otros autores han trabajado con materiales orgánicos obteniendo resultados similares a los arrojados en la presente investigación. Dentro de los artículos revisados se encontró el estudio realizado al aserrín de *Ceiba Pentandra L.*, el cual mostró altas características hidrofóbicas y oleofílicas atribuibles a su superficie cerosa confirmadas por FTIR, que obtuvo una reducción del 30% de la capacidad de adsorción de aceite (19). A partir del uso de fibra de Kapoc se obtuvo una eficiencia del 74,5%; 66,8%; 64,4% y 47,8% en la separación de gasolina,

diésel, aceite de soja y aceite de parafina, indicando el estudio termodinámico que el proceso de adsorción es espontánea y exotérmica, con fisisorción complejo y quimisorción (20).

Adsorción en sistema de columna de lecho fijo

Para determinar las condiciones de trabajo se tomó como criterio la cantidad máxima de contaminante adsorbida según el modelo de Thomas, descrito por la ecuación 4. Este modelo fue uno de los más utilizados para describir el rendimiento de la columna y predecir la curva de ruptura de adsorción donde su principal limitante es la derivación, que se basa en una cinética de segundo orden y que considera que la biosorción no está limitada por la reacción química sino que por el contrario, esta es controlada por la transferencia de materia en la interfase (21).

$$\ln\left(\frac{C_i}{C_t} - 1\right) = \frac{K_T q_0 m}{F} - K_T C_i t \quad (4)$$

Donde K_T , q_0 y F son constante de velocidad ($L\ mg^{-1}\ h^{-1}$), la capacidad de absorción de metales ($mg\ g^{-1}$) y la

frecuencia ($L\ h^{-1}$), respectivamente. El ajuste al modelo de Thomas se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros calculados de acuerdo al Modelo de Thomas.

Flujo (mL/s)	Cantidad de biomasa (g)	K1	q0	Suma
0,1	4	0,078	48,641	0,071
	6	0,046	41,070	0,005
0,07	4	0,064	33,538	0,018
	6	0,052	32,948	0,011

Se puede observar que la adsorción de diésel en sistema continuo es bien descrita por el modelo de Thomas, pues la suma de los errores muestra un buen ajuste al modelo, lo que permite establecer que la adsorción del contaminante se vio ampliamente favorecida por cuanto se aumentó la cantidad adsorbida por biomasa al aumentar el flujo, y al disminuir la cantidad de biomasa en el lecho. A los 180 minutos del proceso se alcanzó una remoción máxima de 48,64 mg/g a un flujo de 0,1 mL/s y 4 g de biomasa.

Al analizar la influencia de los factores trabajados, se concluye que la rata de flujo es una de las características más importantes para evaluar el tratamiento de contaminantes a escala industrial. El efecto fue medido variando el flujo para dos cantidades de biomasa. Luego de analizar el comportamiento de adsorción los primeros 180 minutos, se procedió a continuar el proceso con las mejores condiciones hasta alcanzar la saturación de la biomasa. Los resultados se muestran en la Figura 5.

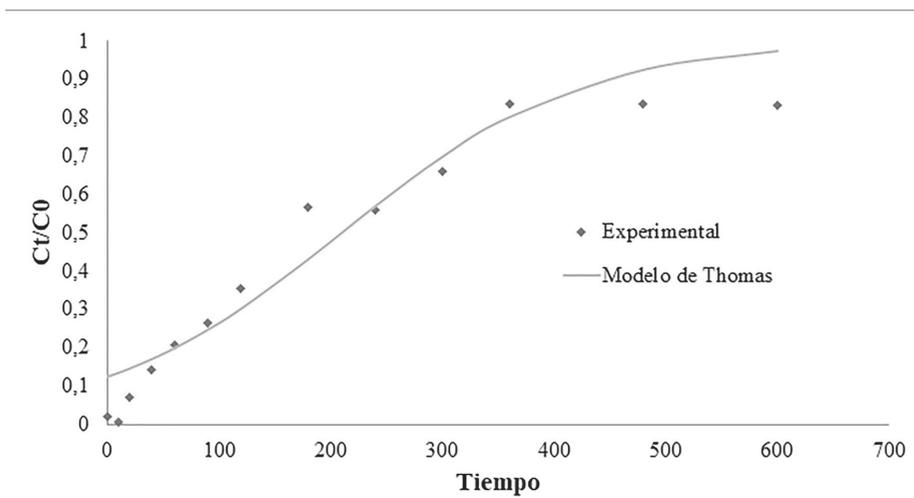


Figura 5. Ajuste al modelo de Thomas 0,1 mL/s; 4g.

Se encontró una saturación de la biomasa al remover el 15% del aceite contenido, y una capacidad máxima de 62,93mg/g, mostrando además, que es muy superior al determinado en sistema batch, aún después de trabajar a una concentración de contaminante mayor, por lo cual se establece que el aserrín de cedro tiene un gran potencial para ser usado en sistemas de lecho empacado. Ahora bien, si se compara la capacidad de adsorción de diésel obtenida con

aserrín con otros materiales reportados como: Bagazo de caña de azúcar 10,51 mg/g (22); fibra de cabello de semilla de álamo 182 a 211 g/g (23); cascarilla de arroz 2,6 (22); fibra de ceiba 10,4 mg/g (24); 19,35 mg/g (22), y algodón en rama 30,5 g/g (25), frente a los resultados obtenidos en el presente estudio (62,93), se establece que el aserrín de cedro es una biomasa prometedora para la remoción de diésel en sistema de lecho empacado.

Conclusiones

De la caracterización realizada a los biomateriales se encontró la presencia de grupos hidroxilo y carbonilo principalmente, los cuales favorecen la disposición de centros activos durante el proceso de adsorción del diésel. Se observa que los datos experimentales se ajustan a los modelos de Langmuir y Freundlich, así se puede concluir que el enlace se da

principalmente por fuerzas físicas, que la adsorción está limitada a la formación de una monocapa, que el número de especies adsorbidas no excede el total de sitios disponibles, y que no se considera ninguna reacción de desorción durante el proceso de remoción. El modelo de Thomas describe adecuadamente los datos de adsorción de diésel en sistema continuo, proceso favorecido al aumentar la velocidad de flujo y al disminuir la cantidad de biomasa en el lecho.

Referencias

1. Khan N., Hasan Z., Jhung S. Adsorptive removal of hazardous materials using metal-organic frameworks (MOFs): A review. *J. Hazard. Mater.* 2013 ene; 244-245: 444-56.
2. Shukla A., Zhang YH., Dubey P., et al. The role of sawdust in the removal of unwanted materials from water. *Journal of Hazardous Materials.* 95(1-2): 137-152.
3. Abdel Wahab O. Assessment of raw luffa as a natural hollow oleophilic fibrous sorbent for oil spill cleanup. *Alexandria Eng. J.* 2014; 53: 213-218.
4. Amir DZ., Bleiman N., Mishael YG. Sepiolite as an effective natural porous adsorbent for surface oil-spill. *Microporous Mesoporous Mater.* 2013; 169:153-159.
5. Wahi R, Abdullah L, Shean T, Ngaini Z, Nourouzi M. Oil removal from aqueous state by natural fibrous sorbent: An overview. *Sep. Purif. Technol.* 2013; 113: 51-63.
6. Pinzón V. Influencia del pH en la bioadsorción de Cr (III) sobre cáscara de naranja: Determinación de las condiciones de operación en proceso discontinuo. *Rev. de la Facultad de Ciencias Básicas.* 2010; 8(1): 21-30.
7. Rajakovic V., Aleksic G., Radetic M., Rajakovic Lj. Efficiency of oil removal from real wastewater with different sorbent materials. *Journal of Hazardous Materials.* 2007; 143(1-2): 494-499.
8. Rajaković V., Aleksic G., Rajakovic Lj. Governing factors for motor oil removal from water with different sorption materials. *Journal of Hazardous Materials.* 2008; 154(1-3): 558-563.
9. Zhao XT., Zeng T., Jun Z., et al. Modeling and mechanism of the adsorption of proton onto natural bamboo sawdust. *Carbohydr. Polym.* 2012; 87(2):1199-1205.
10. Denisova T., Shaikhiev I., Sippel I., et al. The influence of ash tree sawdust acid treatment on the removal of crude oil from water surfaces. *Research Journal of Pharmaceutical Biological and Chemical Sciences.* 2016; 7(5): 1742-1750.

11. Krishnie M., Ruella S., Evans T., et al. Removal of nickel from wastewater using an agricultural adsorbent. *Agriculture cleaning*. 2011; 37: 87-90.
12. Prado A., Moura E., Andrade R., et al. Application of Brazilian sawdust samples for chromium removal from tannery wastewater. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2010; 99(2):681-687.
13. Mehrdad A., Rolf G., Wolfgang K., Torbjo L. Laboratory-scale production of biofuel pellets from electron beam treated Scots pine (*Pinus silvestris* L.) sawdust. powder technology. *Radiat. Phys. Chem.* 2010; 78(4):281-287.
14. Xia L., Hu Y., Zhang B. Kinetics and equilibrium adsorption of copper (II) and nickel (II) ions from aqueous solution using sawdust xanthate modified with ethanediamine. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 2014; 24(3):868-875.
15. Jiménez M., Padilla., G. Evaluación del potencial de Adsorción del aserrín para remover aceites pesados en cuerpos de agua a escala laboratorio. [Tesis de pregrado]. Tesis de pregrado]. Cartagena de Indias (Colombia): Universidad de Cartagena, Facultad de Ingeniería. 2012; 109 p.
16. Lara J., Tejada-Tovar C., Villabona-Ortíz A., et al. Adsorción de plomo y cadmio en sistema continuo de lecho fijo sobre residuos de cacao. *Revista Ion.* 2016; 29(2):113-124.
17. Zang D., Liu F., Zhang M., et al. Novel superhydrophobic and superoleophilic sawdust as a selective oil sorbent for oil spill cleanup. *Chemical Engineering Research and Design.* 2015; 102:34-41.
18. Gan W., Gao L., Zhang W., et al. Removal of oils from water surface via useful recyclable CoFe₂O₄/sawdust composites under magnetic field. *Mater. Design.* 2016; 98:194-200.
19. Abdullah M., Rahmah A., Man Z. Physicochemical and sorption characteristics of Malaysian *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn. as a natural oil sorbent. *J. Hazard. Mater.* 2010; 177 (1-3):683-91.
20. Wang J., Zheng Y., Wang A. Coated kapok fiber for removal of spilled oil. *Marine Pollution Bulletin* 2013; 69:91-96.
21. Calero M., Blázquez G., Hernáinz F., et al. Biosorción de cobre con corteza de pino en columna de lecho de fijo: optimización de las variables del proceso. *Afinidad.* 2012; 69(559):175-84.
22. Ali N, El-Harbawi M, Jabal A, Yin C. Characteristics and oil sorption effectiveness of kapok fibre sugarcane bagasse and rice husks: oil removal suitability matrix. *Environ. Technol.* 2012; 33 (4): 481-86.
23. Likon M., Remškarb M., Ducmanc V., Švegl F. Populus seed fibers as a natural source for production of oil super absorbents. *Journal of Environmental Management.* 2013; 114: 158-67.
24. Rengasamy R., Das D., Karan C. Study of oil sorption behavior of filled and structured fiber assemblies made from polypropylene kapok and milkweed fibers. *J. Hazard. Mater.* 2011; 186(1): 526-32.
25. Singh V, Kendall R, Hake K, Ramkumar, S. Crude Oil Sorption by Raw Cotton. *Industrial and Engineering Chemical Research.* 2015;52(18):6277-81.

