

Adsorption for the removal of phenolic compounds from the effluent of a biologic reactor

V. Vacca J., G. Colina*, N. Rincón, A. Díaz, E. Behling, J. Marín, E. Chacín, N. Fernández

Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (DISA), Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. Apartado Postal 526. Maracaibo 4001-A, Venezuela. *gjcolina@gmail.com; vaccavictor@gmail.com; nancycomotorincon@hotmail.com; Fax. (+58) 2614128743.

Abstract

The efficiency of an adsorption column packed with granular activated carbon, prepared from sugarcane bagasse, for the removal of phenol, 2-chlorophenol, 2-nitrophenol and 2,4-dimethylphenol, from the effluent of an UASB reactor was evaluated. Tests were carried out applying hydraulic residence time (TRH) of 0,067 y 0,186 d, obtaining better results with a TRH of 0,186 d. The saturation of the adsorbent bed was reached after 12 h and 20 h of continuous operation respectively, for each applied TRH, after which the presence of toxic compounds was detected in the effluent of the column. With the applied treatment, removal percentages in DQO of 67,09% and 73,93% respectively was reached, represented this DQO for compound organic different from the toxics of interest, not retained when going the residual water through the column. The investigation allowed demonstrating the applicability of the process of adsorption for the elimination of toxic organic compounds from a wastewater.

Keywords: adsorption, activated carbon, phenolic compounds, saturated hydrocarbons.

Adsorción para la remoción de compuestos fenólicos presentes en el efluente de un reactor biológico

Resumen

Se evaluó la eficiencia de una columna de adsorción empacada con carbón activado granular, preparada a partir de bagazo de caña, para la remoción de fenol, 2-clorofenol, 2-nitrofenol y 2,4-dimetilfenol, del efluente de un reactor UASB. Se realizaron pruebas aplicando tiempos de retención hidráulicos (TRH) de 0,067 y 0,186 d, obteniéndose mejores resultados con un TRH de 0,186 d. La saturación del lecho adsorbente se alcanzó después de 12 h y 20 h de operación continua respectivamente, para cada TRH aplicado, luego de las cuales se detectó la presencia de compuestos tóxicos en el efluente de la columna. Con el tratamiento aplicado se logró una remoción promedio en la DQO de 67,09% y 73,93% respectivamente; representada esta DQO por compuestos orgánicos diferentes de los tóxicos de interés, no retenidos al pasar el agua residual por la columna. La investigación permitió demostrar la aplicabilidad del proceso de adsorción para la eliminación de compuestos orgánicos tóxicos presentes en un agua residual.

Palabras clave: adsorción, carbón activado, compuestos fenólicos, hidrocarburos saturados.

Introducción

Las aguas residuales producidas en procesos industriales, dependiendo de su proceden-

cia, pueden contener gran cantidad de sustancias orgánicas y/o inorgánicas, en concentraciones que ofrecen peligro para el ambiente. Entre éstas se encuentran fenoles, comunes en la in-

dustria fotográfica, fabricación de pinturas, explosivos, caucho, productos farmacéuticos y agrícolas, textiles, curtidoras, papeleras, procesos petroquímicos, etc. [1].

En un estudio precedente, Vacca y col. [2], evaluaron la remoción de compuestos orgánicos fenólicos y saturados en un agua sintética preparada con glucosa, fenol, 2-clorofenol, 2-nitrofenol, 2,4-dimetilfenol, hexano y heptano, utilizando un reactor anaerobio de lecho de lodo y flujo ascendente con sus siglas en inglés UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket). Para la carga orgánica máxima evaluada (5,6 Kg DQO/m³ d), el sistema de tratamiento biológico obtuvo un porcentaje de remoción de fenol de 33,65%, encontrándose en el efluente una concentración remanente de 13,31 mg/L. Este valor de fenol se encuentra por encima de 0,5 mg/L, el cual es exigido por la norma venezolana Decreto 883 [3], por lo cual, un tratamiento adicional es requerido.

La remoción de estos compuestos de un agua residual, requiere muchas veces de la aplicación de tratamientos específicos, entre los cuales la adsorción ha demostrado ser de gran utilidad en la consecución de tal fin, aplicada ya sea independientemente o asociada a otros procesos de tratamiento, fisicoquímicos y/o biológicos [4-7].

Numerosos estudios destacan la utilización de materiales adsorbentes para la remoción de compuestos orgánicos tóxicos presentes en aguas residuales, actuando el proceso de adsorción sólo o acompañado de procesos biológicos. Ramírez y col., en estudios realizados en 1998 y 2000 [8, 9], compararon el aporte de los procesos de adsorción, volatilización y biodegradación en la remoción de sustancias orgánicas tóxicas, utilizando un reactor de lodos activados adicionado con carbón activado en polvo. El estudio permitió concluir que la combinación del sistema biológico y la adsorción en carbón activado produce mecanismos de interacción entre la biomasa y el carbón activado que contribuyen a incrementar la eficiencia en la remoción de las sustancias orgánicas tóxicas estudiadas, a valores superiores al 99%. En 1998, Daifullah y Girgis [10] estudiaron la remoción de fenoles con carbón activado obtenido de cáscara de albaricoque, utilizando ácido fosfórico como agente activante. La investigación muestra que los factores que más influyen en el proceso de adsorción son aquellos relacio-

nados con las propiedades físicas y químicas de los fenoles en estudio, y no sólo las características del adsorbente utilizado, las cuales también intervienen en el desarrollo del proceso. Estas características propias del material adsorbente, dependen de la naturaleza del precursor utilizado, así como de la metodología utilizada para su obtención. Jung y col., en 2001 [11], estudiaron las características de la adsorción de fenol y clorofenoles en carbón activado granular de diferentes características. Los datos obtenidos en pruebas "batch" se ajustaron satisfactoriamente al modelo de Freundlich, el cual ha probado ser el más adecuado para describir el proceso de adsorción de fenoles sobre carbón activado.

El uso de la adsorción como tratamiento permite la posibilidad de recuperación de los compuestos orgánicos tóxicos como los fenoles, mediante el proceso de desorción con un solvente específico, esto constituye una ventaja adicional con respecto a otros procesos de tratamiento. La desorción de los compuestos retenidos en el lecho también hace posible su reutilización por varios ciclos, luego de su saturación, en el proceso denominado regeneración del adsorbente, lo cual hace a la adsorción un tratamiento atractivo desde el punto de vista económico.

El uso de materiales adsorbentes como el bagazo de la caña de azúcar, el cual constituye un pasivo ambiental, podría ser usado como una alternativa económica y eficaz para el tratamiento de aguas residuales conteniendo sustancias de difícil eliminación.

El desarrollo de este estudio pretende comprobar la efectividad del proceso de adsorción en la remoción de compuestos fenólicos presentes en el efluente de un reactor de manto de lodos con flujo ascendente (UASB) utilizando carbón activado preparado a partir de bagazo de caña.

Parte experimental

Etapas de la investigación

Preparación y caracterización del carbón activado granular. Para la preparación del carbón activado, se siguió la metodología citada por Contreras [12]. El precursor utilizado para la obtención del carbón activado utilizado en el estudio, fue el bagazo de la caña de azúcar (*Saccha-*

rum officinarum), desecho proveniente de un establecimiento comercial ubicado en la localidad de Santa Cruz de Mara, Estado Zulia; la caña fue cultivada en una central azucarera del Estado Trujillo, Venezuela. El bagazo fue secado, molido y tamizado, seleccionando las partículas retenidas entre los tamices No. 40 y 50 ASTM. El precursor seleccionado se dejó en contacto con ácido fosfórico al 40% v/v por un período mínimo de 12 h, guardando una relación precursor:ácido de 1:3 p:v. Luego, la pasta obtenida fue pirolizada en una mufla a 500°C, por espacio de 1 h, bajo una campana de extracción. Este proceso arrojó un rendimiento del 37%, valor cercano al 40% obtenido por Basso y col. [13], en la preparación de carbones activados con características similares. El carbón obtenido fue lavado con agua caliente y una solución de hidróxido de sodio 0,02 N, hasta alcanzar un pH entre 6,5 y 7 [14], después de lo cual se secó en una estufa calibrada a una temperatura de 110°C, por un tiempo superior a 12 h y por último se tamizó el carbón, seleccionando para el empaque de las columnas las partículas retenidas entre los tamices Nros. 10 y 18 ASTM.

Se procedió a caracterizar el carbón activado preparado en el laboratorio, determinando los parámetros listados en la Tabla 1.

Montaje de la columna de adsorción. La columna utilizada fue un cilindro de vidrio con tubos de entrada y salida, abierto en su parte superior, fabricado en el taller de soplado de vidrio de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia. La columna cuenta con una longitud total de 38 cm y un diámetro de 3 cm, para un volumen total aproximado de 268 cm³ (0,268 l). Fue empacada con 30 g de carbón activado seleccionado, utilizando fibra de vidrio como soporte, por encima y por debajo del empaque.

Operación de la columna: La preparación de la columna, previa a su posterior operación, se inició alimentándola por una semana con agua desionizada, para realizar el lavado y estabilización del pH del lecho, utilizando una bomba peristáltica con control de caudal, lo cual garantizó el flujo continuo hacia las columnas. Una vez preparada la columna de adsorción, se procedió a iniciar el proceso de alimentación con agua residual tratada previamente por el reactor UASB, utilizando un tanque de igualación entre el reactor y la columna, necesario debido a que durante el es-

Tabla 1
Características fisicoquímicas
determinadas al carbón activado

Parámetro	Metodología utilizada
Densidad aparente	ASTM D2854-96 [15]
% Humedad	ASTM D2867-99 [16]
% Cenizas	ASTM D2866-94 [17]
Área superficial específica	Modelo de BET [18, 19]
Volumen total de poros	Modelo de BET
Volumen mesoporos	Modelo de BET
Volumen microporos	Modelo de BET
Diámetro promedio del poro	Modelo de BET

tudio se utilizaron dos caudales de trabajo. Inicialmente, se manejó un caudal de 2,78 mL/min, igual al del reactor, resultando un TRH = 1,6 h (0,067 d), esta se denominará en adelante la columna 1. Posteriormente y cuando el empaque estuvo saturado se utilizó la columna 2, con un caudal de alimentación de 1 mL/min para un TRH = 4,5 h (0,186 d). Las columnas de adsorción operaron 6 y 11 días respectivamente.

El caudal de la columna fue periódicamente verificado, de manera que se pudieran mantener las condiciones experimentales.

Parámetros fisicoquímicos evaluados durante el estudio

Potencial de Hidrógeno (pH). Su determinación se llevó a cabo siguiendo la metodología del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SM) [19] número 4500-H⁺ B Método Electrométrico.

Alcalinidad total. Se determinó aplicando el método SM 2320 B Método Titulométrico [19].

Demanda Química de Oxígeno (DQO). Para su determinación se siguió la metodología SM número 5220 C Método Titulométrico, Reflujo Cerrado [19].

Compuestos fenólicos. Los compuestos fenólicos estudiados fueron fenol, 2 clorofenol, 2 nitrofenol y 2,4-dimetilfenol. Su determinación se llevó a cabo aplicando la técnica High Perfo-

mance Liquid Chromatography (HPLC), utilizando un cromatógrafo líquido Hewlett Packard HP 1050, equipado con detector UV de arreglo de diodos DAD modelo 1100, una columna C₁₈ Hewlett Packard Spherisorb con dimensiones de 125 × 10 mm y 5 µm de diámetro interno. El manejo de los datos se realizó con el software HP ChemStation para LC Rev. A. 06. 01. 403. Como fase móvil se usó una mezcla de Acetonitrilo -Isopropanol-Agua en proporción 28,5%:66,5%:5%. Las longitudes de onda óptimas para la lectura de cada fenol fueron: 270,8 nm para fenol y 279,8 nm para 2-clorofenol, 2-nitrofenol y 2,4-dimetilfenol. Se aplicó un flujo isocrático de 0,8 mL/min [20], resultando un tiempo total de corrida de 5,0 min.

La cuantificación de cada fenol se llevó a cabo a través de la calibración haciendo uso de estándares externos, trazando curvas de calibración para cada uno, ajustándolas posteriormente a rectas con ecuaciones de la forma $a=mC+b$ (siendo a el área bajo el pico en el cromatograma y C la concentración del analito). El límite de detección (L_{DD}) se calculó mediante el método de regre-

sión lineal [21]. La Tabla 2 muestra los valores de m , b , R^2 , L_{DD} y la ecuación utilizada para cuantificar cada fenol.

Composición del agua residual (Efluente del reactor UASB) que alimentará la columna de adsorción

El agua residual utilizada proviene del efluente de un reactor anaerobio del tipo UASB cuya caracterización se presenta en la Tabla 3. El origen del agua residual fue sintética preparada a base de glucosa, compuestos fenólicos y saturados, cuya caracterización se presenta en una investigación previa [2]. Tanto la DQO como el fenol poseen concentraciones superiores a los 350 mg/L y 0,5 mg/L respectivamente, exigido por el Decreto 883 de las normas venezolanas para la descarga a cuerpos de aguas naturales [3], lo cual hace necesaria la incorporación de un tratamiento adicional que disminuya estos parámetros y en este trabajo se escogió el proceso de adsorción.

Tabla 2
Valores de m , b y R^2 y límites de detección de las ecuaciones ajustadas a la recta del tipo $a=mC+b$, para cada fenol

Compuesto	m	b	R^2	LDD, mg/L	Ecuación
Fenol	28,138	-0,9389	0,9997	0,0871	$a = 28,138C - 0,9389$
2-clorofenol	23,491	-0,5959	0,9998	0,0646	$a = 23,491C - 0,5959$
2-nitrofenol	26,307	-1,6689	0,9996	0,1084	$a = 26,307C - 1,6689$
2,4-dimetilfenol	24,068	0,1860	0,9998	0,0592	$a = 24,068C + 0,1860$

Tabla 3
Características del agua residual afluyente a la columna de adsorción

Parámetro	Unidad	Valor promedio
pH	Unidades de pH	6,51±0,19
Alcalinidad total	mg/L	782±119
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L	1.033 ±185
Fenol	mg/L	13,31±4,22
2-clorofenol	mg/L	4,69±3,14
2-nitrofenol	mg/L	9,15±3,96
2,4-dimetilfenol	mg/L	4,61±2,62

Resultados y discusión

Caracterización del carbón activado

La caracterización fisicoquímica del carbón activado granular, preparado en el laboratorio para ser utilizado como lecho adsorbente de la columna, arrojó los resultados resumidos a continuación. Así mismo, como punto de comparación de la calidad del carbón activado preparado, se realizó una caracterización de un carbón activado comercial. Los resultados se muestran en la Tabla 4.

El valor obtenido del diámetro promedio del poro clasifica al carbón activado preparado dentro de los carbones con alta proporción de mesoporos, según el rango establecido por la IUPAC ($20 \text{ \AA} < d_p < 500 \text{ \AA}$). El valor del área superficial específica fue mayor ($1.293 \text{ m}^2/\text{g}$) en el carbón activado preparado lo que favorece en cierta medida, el proceso de adsorción de los diferentes compuestos estudiados. De igual manera, se observa un menor contenido de humedad, pero un mayor contenido de cenizas comparado con el carbón activado comercial, mientras que la densidad aparente estuvo alrededor de los $0,30 \text{ g/cc}$, lo que indica una buena resistencia mecánica para su aplicación en forma granular.

Desempeño de las columnas de adsorción en la remoción de los compuestos fenólicos

Los resultados aquí presentes corresponden a la aplicación de adsorción al agua residual

previamente tratada por un reactor biológico anaerobio tipo UASB. La adsorción se llevó a cabo en una columna empacada con carbón activado granular preparado a partir de bagazo de caña.

Los valores de pH a la salida de las columnas se mantuvieron entre 6 y 7 unidades para la mayoría de las muestras analizadas, por lo cual este parámetro cumple con la exigencia impuesta en la norma de descarga venezolana [2].

La Figura 1 muestra el comportamiento de la DQO durante el funcionamiento de las columnas de adsorción. Los valores de la DQO del agua residual luego de su paso por la columna fueron: $340 \pm 78 \text{ mg/L}$ en el efluente de la columna 1 y $269 \pm 45 \text{ mg/L}$ en el efluente de la columna 2, lográndose una remoción promedio en este parámetro de 67% y 74% respectivamente. Estos resultados justifican la utilización de la adsorción para el tratamiento de aguas con alto contenido de compuestos orgánicos solubles, como los tóxicos utilizados en el estudio.

Las variaciones de la concentración de fenol a través del proceso de adsorción, pueden observarse en la Figura 2. El efluente de la columna 1 presentó valores comprendidos desde $0,28 \text{ mg/L}$ a 23 mg/L , la columna 2 valores entre $0,28 \text{ mg/L}$ a $4,13 \text{ mg/L}$, en las muestras en las cuales estuvo presente este compuesto. Durante los dos primeros días de operación, no se detectó fenol en el efluente; luego comienza a observarse la presencia del compuesto y su concentración se incrementa con rapidez. En la columna 1, al tercer día de operación, la concentración fue superior a los

Tabla 4
Características fisicoquímicas del carbón activado granular utilizado en la investigación

Parámetro	Valor carbón activado preparado	Valor carbón activado comercial
Densidad aparente, g/mL	0,3072	0,3870
% Humedad	2,7	4,2
% Cenizas	17,5	8,3
Área superficial específica, m^2/g	1.293	794
Volumen total de poros, cm^3/g	1,440	1,016
Volumen mesoporos, cm^3/g	1,386	0,942
Volumen microporos, cm^3/g	0,054	0,074
Diámetro promedio del poro, \AA	44,4	51,2

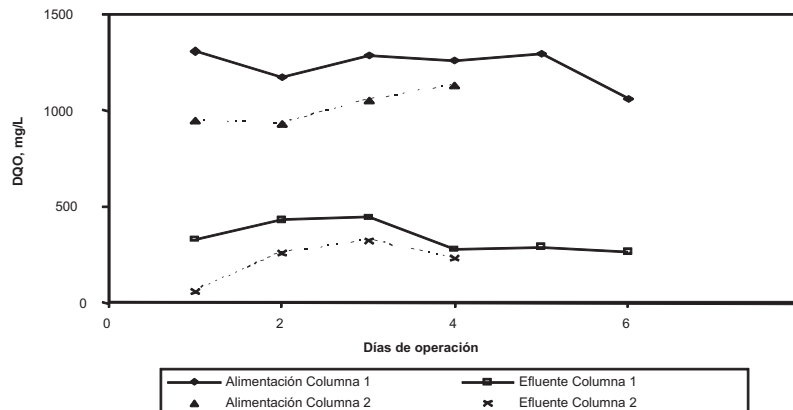


Figura 1. Comportamiento de la Demanda Química de Oxígeno durante la operación de la Columna de Adsorción.

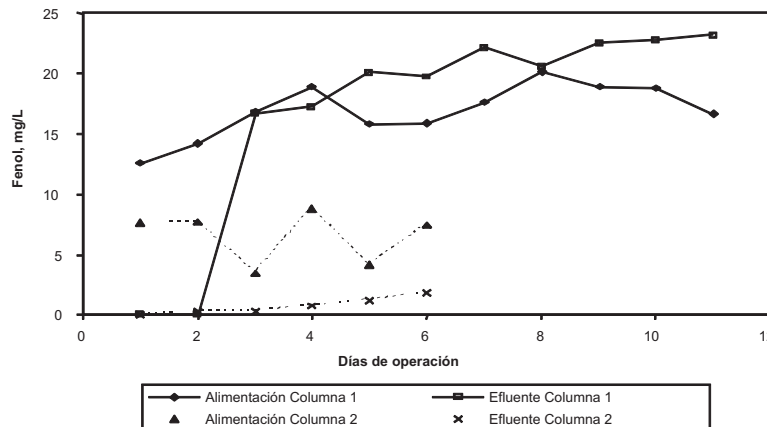


Figura 2. Comportamiento del Fenol durante la operación de la Columna de Adsorción.

valores de entrada, esto pudo deberse a un TRH de 1,6 h bajo, en comparación con la columna 2 que fue de 4,47 h, lo cual favoreció la saturación más rápida de la columna 1. La razón por la cual la concentración de fenol en el efluente de la columna 1 sea superior a los valores del afluente, puede explicarse por el proceso de desorción, este se lleva a cabo una vez se satura el lecho adsorbente, de tal manera que después de cierto tiempo de funcionamiento, la columna no logra retener el compuesto y podría salir de la misma una concentración mayor a la de la entrada. En esta investigación el proceso de adsorción se evaluó para distintos compuestos específicos, de tal manera que la saturación dependerá del compuesto estudiado.

Las variaciones en las concentraciones de 2-clorofenol, el 2-nitrofenol, 2,4-dimetilfenol du-

rante el tratamiento se ilustran en las Figuras 3, 4 y 5. Los valores de entrada pueden variar de una columna a otra, ya que los compuestos provienen de un proceso biológico previo, cuya eficiencia podía variar con el tiempo. Las concentraciones a la salida dependen únicamente del proceso de absorción de las columnas. Las eficiencias de remoción variaron significativamente dependiendo de la columna empleada. En relación a la columna 1, las concentraciones de 2-clorofenol durante el tratamiento estuvieron entre 0,10 mg/L a 6,75 mg/L. El 2-nitrofenol entre 0,14 mg/L a 20,59 mg/L y el 2,4-dimetilfenol entre 0,20 mg/L a 4,46 mg/L, en las muestras donde se observaban los compuestos. En la columna 2, los valores estuvieron entre 2,79 mg/L a 4,61 mg/L para el 2-clorofenol, de 1,51 mg/L a 5,42 mg/L para el 2-nitrofenol y de 1,38 mg/L a 1,86 mg/L para el 2,4-dimetilfenol. La columna 2 pre-

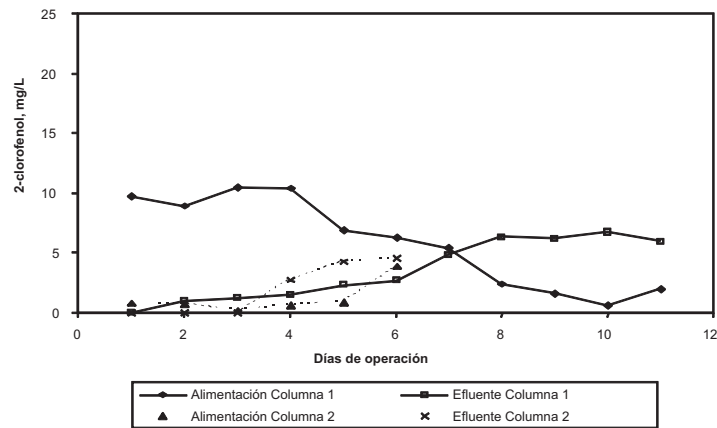


Figura 3. Comportamiento del 2-clorofenol durante la operación de la Columna de Adsorción.

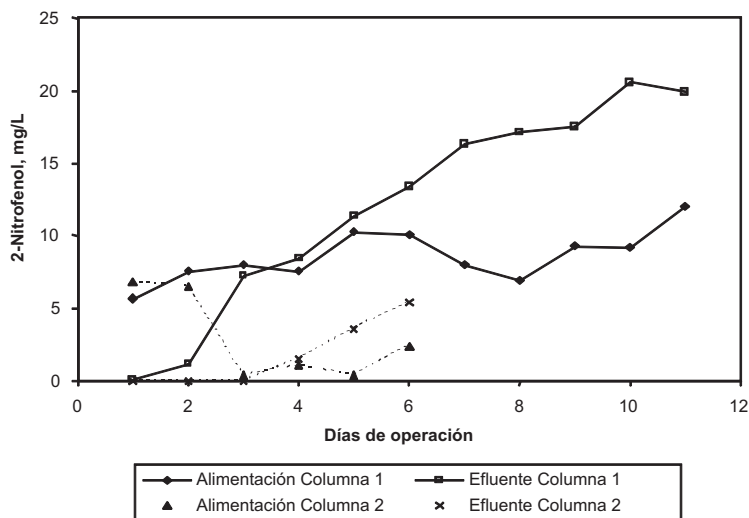


Figura 4. Comportamiento del 2-nitrofenol durante la operación de la Columna de Adsorción.

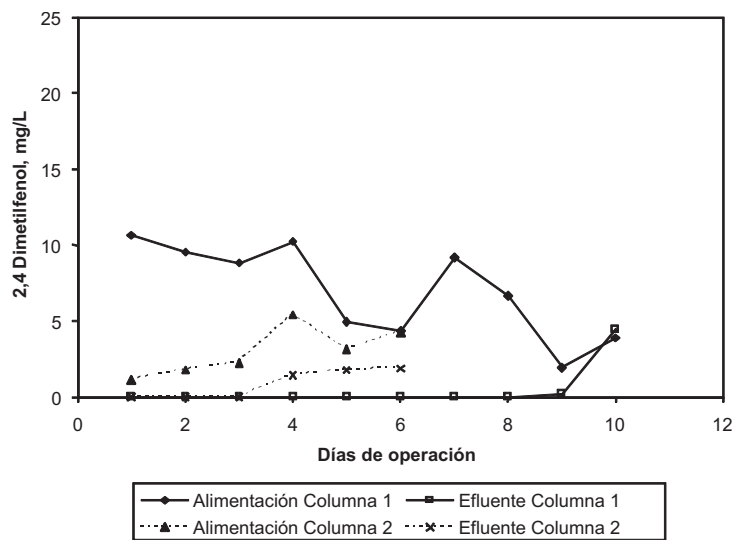


Figura 5. Comportamiento del 2,4-dimetilfenol durante la operación de la Columna de Adsorción.

sentó mejor eficiencia de remoción y más tiempo sin observarse el compuesto a la salida de la columna, es decir, durante los tres primeros días de funcionamiento de la columna 2, los compuestos fenólicos no fueron detectados, en las condiciones impuestas en este estudio.

Se demuestra, de esta manera, la aplicabilidad del proceso de adsorción como postratamiento para la eliminación de compuestos fenólicos del efluente del reactor UASB, tomando en cuenta los parámetros operacionales como caudal de operación y tiempo de saturación del lecho, los cuales limitan su efectividad.

Conclusiones

El desarrollo de esta investigación, permitió llegar a las siguientes conclusiones:

- El uso de una columna de adsorción empacada con carbón activado granular preparado en el laboratorio, usando bagazo de caña de azúcar como precursor, logró la remoción de los compuestos fenólicos presentes en el efluente de un reactor biológico de manto de lodo de flujo ascendente, reportándose concentraciones no detectables mediante la técnica aplicada, hasta la saturación del lecho.
- La saturación del lecho adsorbente, momento en el cual se comenzó a detectar la presencia de compuestos fenólicos en el efluente de la columna, ocurrió después de tres días de operación para la columna 2, aplicando un TRH de 4,47 horas.
- El sistema de tratamiento demostró ser efectivo para la remoción de compuestos fenólicos presentes en el agua residual objeto de estudio, bajo las condiciones de operación aplicadas.

Referencias bibliográficas

1. Organización Internacional del Trabajo - OIT.: "Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales". Subdirección General de Publicaciones, (1998).
2. Vacca J, Rincón N, Marín J, Díaz A, Behling E, Chacín E, Fernández N.: "Tratamiento anaerobio para la remoción de compuestos fenólicos e hidrocarburos saturados". *Revista Técnica de Ingeniería*. Vol. 31, N° 3 (2008), 225-233.
3. Decreto N° 883.: "Norma para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos". *Gaceta Oficial de la República Bolivariana de Venezuela, Caracas (Venezuela)*, 18 de diciembre de 1995, 5021 extraordinaria, sección III, 89-90.
4. Papadimitriou C.A., Samaras P. and Sakellariopoulos G.P.: "Comparative study of phenol and cyanide containing wastewater in CSTR and SBR activated sludge reactors". *Bioresource Technology* Vol. 100, No. 1 (2009), 31-37.
5. Damjanovic L., Rakic V., Rac V., Stosic D. and Auroux A.: "The investigation of phenol removal from aqueous solutions by zeolites as solid adsorbents". *Journal of Hazardous Materials* Vol. 184, No. 1-3 (2010), 477-484.
6. Tseng R. L., Wu P.H., Wu F.C.: "Half-life and half-capacity concentration approach for the adsorption of 2,4-dichlorophenol and methyl blue from water on activated carbons". *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. Vol. 42, No. 2 (2011), 312-319.
7. Charinpanitkul T., Limsuwan P., Chalotorn C., Sano N., Yamamoto T., Tongpram P., Wongsarivej P., Sootitawat A. and Tanthapanichakoon W.: "Synergetic removal of aqueous by ozone and activated carbon within three-phase fluidized-bed reactor". *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. Vol. 16, No. 1 (2010), 91-95.
8. Ramírez, E., Zurita, F., Nacheva, P., Cruz, S., Cardoso, L., López, S.: "Comparación de los procesos de: desorción, adsorción y biodegradación en la remoción de sustancias orgánicas tóxicas". Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México (1998). Disponible en: <http://www.cepis.ops-oms.org/eswww/fulltext>.
9. Ramírez, E.; Nacheva, P., Cruz, J., Evangelista, P. y Rodríguez, M.: "Aporte de diferentes mecanismos en la remoción de sustancias orgánicas tóxicas presentes en aguas residuales industriales". Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México (2000). Disponi-

- ble en: <http://www.cepis.ops-oms.org/es/www/fulltext>.
10. Daifullah, A. and Girgis, B.: "Removal of some substituted phenols by activated carbon obtained from agricultural waste". *Water Research* Vol. 32 No. 4 (1998), 1169-1177.
 11. Jung, W., Ahn, K., Lee, Y., Kim, K., Rhee, J., Park, J., Paeng, K.: "Adsorption characteristics of phenol and chlorophenols on granular activated carbons (GAC)". *Microchemical Journal* 70 (2001), 123-131.
 12. Contreras, J.: "Estudio de la capacidad adsorptiva del carbón activado obtenido a partir del bagazo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), para la adsorción de compuestos fenólicos en aguas". Trabajo Especial de Grado. Facultad Experimental de Ciencias. La Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela (2006).
 13. Basso, M.; Cerilla, E.; Cukierman, A.: "Tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados mediante carbones activados obtenidos de un precursor renovable". *Revista Argentina de Avance en Energía Renovable y Medio Ambiente* 5 (2001), 1-6.
 14. ASTM D2854-96: "Standard Test Method for Apparent Density of Activated Carbon", (2000).
 15. ASTM D2867-99: "Standard Test Method for Moisture of Activated Carbon", (1999).
 16. ASTM D2866-94: "Standard Test Method for Total Ash Content of Activated Carbon", (1999).
 17. Castellan, G.: "Fisicoquímica". Segunda Edición. Ed. Addison-Wesley Iberoamericana. México D. F., México, (1998).
 18. Maron, S.; Prutton, C.: "Fundamentos de fisicoquímica". Primera Edición. Editorial Limusa. México D. F., México, (1968).
 19. APHA. AWWA. WPCF.: "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th Edition, (1998).
 20. Zhao, L.; Lee, H. J.: "Determination of phenols in water using liquid phase microextraction with back extraction combined with high-performance liquid chromatography". *Journal of Chromatography A*. 931 (2001), 95-105.
 21. Miller, J.; Miller, J.: "Estadística para Química Analítica". Segunda Edición. México D.F., México. Ed. Addison-Wesley Iberoamericana, (2001).

Recibido el 9 de Abril de 2011

En forma revisada el 9 de Julio de 2012