

Adsorción de impurezas del jugo clarificado de la industria azucarera mediante biomasa pirolizada

Impurities adsorption from the clarified juice of the sugarcane industry by pyrolyzed biomass

Ing. Javier Díaz-Pineda ^I, MSc. Ariel García-Cruz ^{II}, Dra.C. Lourdes Yamén González-Sáez ^I
Dr.C. Jesús Luis-Orozco ^I, Dra.C. María Lourdes Virginia Díaz Jiménez ^{III}

ariel.garcia174@gmail.com

^IDepartamento de Química, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Matanzas, Cuba;

^{II}Grupo de Nanobiociencia, Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo, Coah, México; ^{III}

SRNyE, CINVESTAV-Saltillo, Ramos Arizpe, Coah, México

Recibido: 9 de enero de 2019

Aprobado: 7 de mayo de 2019

Resumen

En este trabajo se prepararon dos adsorbentes a partir de la cáscara del fruto de *Jatropha curcas*, para evaluar su efectividad en la remoción de impurezas coloreadas presentes en el jugo clarificado obtenido del proceso de fabricación de azúcar de caña. Partiendo de la cáscara molida y tamizada (diámetro < 2 mm) del fruto de *Jatropha curcas* se fabricaron dos pirolizados mediante deshidratación inicial con ácidos concentrados (ácido sulfúrico y ácido fosfórico), y posterior pirólisis a 500 °C. Se verificó, mediante análisis estadístico, que el PAF (elaborado por deshidratación con ácido fosfórico) eliminó el 47,4±1,8 % de las impurezas coloreadas, con respecto al 36,8±1,6 % eliminado por el PAS (elaborado por deshidratación con ácido sulfúrico). Los parámetros de calidad del PAF se encuentran dentro de los intervalos establecidos para este tipo de material adsorbente. Ninguno de los pirolizados contaminó el jugo clarificado. Teniendo en cuenta los resultados, se sugiere la introducción de estos materiales en el proceso productivo de la industria azucarera.

Palabras clave: *Jatropha curcas*, pirolizado, remoción de color, jugo clarificado.

Abstract

In this work, two adsorbents were prepared from the *Jatropha curcas* fruit shell to evaluate its effectiveness in the colored impurities removal present in the clarified juice, which is obtained from the sugarcane industry. Using milled and sieved *Jatropha curcas* fruit shell (diameter < 2 mm), two pyrolyzed were produced, by initial dehydration with concentrated acids (sulfuric and phosphoric acid), and subsequent pyrolysis at 500 °C in nitrogen atmosphere. It was verified, by statistical analysis, that PAF (elaborated by phosphoric acid dehydration) eliminated 47,4±1,8 % of the colored impurities compared to 36,8±1,6 % eliminated by PAS (elaborated by sulfuric acid dehydration). The quality parameters of the PAF are within the ranges established for this type of adsorbent material. None of the pyrolyzed materials contaminated the clarified juice. Considering these results, can be suggested the introduction of these adsorbent materials into the productive process of the sugarcane industry.

Keywords: *Jatropha curcas*, pyrolysis, color removal, clarified juice.

Introducción

La biomasa está compuesta principalmente por los polímeros hemicelulosa, celulosa y lignina y algunas cantidades de otras sustancias orgánicas que pueden pirolizar o degradarse por mecanismos y velocidades diferentes [1]. Actualmente, se utiliza directamente para producir energía o para la obtención de productos de valor agregado como el etanol [2], hidrógeno [3], entre otros. La incompleta degradación térmica de materiales carbonáceos se conoce como pirólisis, la cual da como resultado productos gaseosos, líquidos condensables o alquitranes y sólidos carbonizados (char, del inglés) [3]. Estos carbones poseen una estructura porosa poco desarrollada, sin embargo, mediante procesos químicos y químicos-físicos pueden ser convertidos en carbones activados [4], con una gran área específica y mayor capacidad de adsorción. Estos materiales poseen la capacidad de adsorber compuestos químicos tanto en fase gaseosa, como líquida [5].

En la actualidad, el consumo mundial de carbones activados ha aumentado considerablemente, debido a la creciente preocupación existente sobre la protección y conservación del medio ambiente. La versatilidad de los carbones activados debido a su gran superficie específica, estructura porosa polimodal, composición superficial química variable, alta capacidad de adsorción, y variedad de materias primas para su fabricación, hacen que estos puedan ser usados en múltiples aplicaciones [6,7].

Para la producción de carbones activados se puede utilizar diferentes tipos de biomasa con alto contenido de carbono, tales como los subproductos agrícolas, cáscaras, huesos de frutos, fibra de coco, corteza de plátano, cáscara de arroz, así como también el bambú y aserrín de maderas, bagazode caña de azúcar, entre otros muchos materiales biológicos [7,8].

En la industria azucarera se emplea el carbón activado para eliminar impurezas coloreadas, pigmentos y cenizas de las soluciones azucaradas durante el proceso de refinación de azúcar [9,10]. Es precisamente en esta industria donde existe una imperiosa necesidad de obtener un jugo clarificado con la menor cantidad de impurezas posible, por lo que se requiere un proceso de filtración del jugo posterior a esta etapa. La etapa de clarificación del jugo de caña resulta una de las operaciones más importantes en la industria azucarera, pues en la misma ocurre la separación de una gran parte importante de las impurezas presentes en el jugo.

Por otra parte, *Jatropha curcas* (*J. curcas*) es un arbusto perteneciente a la familia *Euphorbiaceae*, la cual crece de forma silvestre en distintos tipos de suelos de diversas partes del mundo [11,12].

En Cuba, en la zona de Guantánamo, se ha promovido el cultivo de la planta para la producción de biodiesel a partir del aceite contenido en la semilla, a través del proyecto BIOMAS-Cuba y la agencia suiza para el desarrollo, COSUDE [14]. El aceite contenido en la almendra del fruto es destinado a la producción de biodiesel[12], generándose considerables cantidades de cáscara como residuo. El uso de la cáscara del fruto de esta planta representa una materia prima barata para la fabricación de materiales adsorbentes como el carbón activado. En la actualidad, la implementación de estrategias tecnológicas basadas en adsorbentes de bajo costo es un aspecto que está cobrando gran importancia, debido al ahorro económico que reporta el uso de estos materiales y su funcionalidad.

El objetivo del presente trabajo es evaluar la efectividad como adsorbentes, de dos materiales obtenidos a partir de la cáscara del fruto de *J. curcas*. Se analiza la eficacia de ambos en la remoción de impurezas coloreadas presentes en el jugo clarificado, generado en el proceso de producción de azúcar crudo.

Materiales y métodos

Materiales

El fruto de *Jatropha curcas* fue donado por la Estación Experimental de Pastos y Forrajes “Indio Hatuey”, Perico, Matanzas, Cuba. La preparación de la materia prima incluyó la separación de la cáscara del fruto, secado al aire, trituración en molino de cuchilla y tamizado ($\varnothing < 2$ mm). Los ácidos, sulfúrico y fosfórico grado reactivo, así como el carbón activado, de grado analítico, fueron comprados a Sigma-Aldrich, Merck. El jugo clarificado se obtuvo directamente del proceso de fabricación de azúcar del Ingenio Azucarero “Jesús Rabí” de la provincia de Matanzas, Cuba.

Obtención de los materiales adsorbentes

La elaboración de los pirolizados se realizó de acuerdo con el procedimiento propuesto por Ramakrishnan y Namasivayam con algunas modificaciones [14]. Los pirolizados se obtuvieron mediante un proceso de deshidratación con ácidos concentrados seguido de una etapa de pirólisis. En este trabajo, el material deshidratado con ácido sulfúrico concentrado se identifica como PASy el deshidratado con ácido fosfórico a 85 % como PAF.

Para obtener el PAS, se pesaron 400 g de cáscara del fruto de *J. curcas*, molida y tamizada ($\varnothing < 2$ mm), y se embebieron completamente en 625 mL de ácido de sulfúrico concentrado ($d = 1,84$ g/mL), lo cual se corresponde con una relación másica cáscara:ácido igual a 1:3. La mezcla se sometió a agitación constante durante 4 h bajo campana de extracción, hasta obtener un material con aspecto de carbonizado. A continuación, el material se sometió a tratamiento térmico a 180°C en estufa (AISET® YLD-6000 P\G2007ba, R.P. China) por 24 h. Luego, el producto obtenido (PAS) se colocó en horno de activación, el cual consta de un reactor rotatorio, un horno-mufla ($15^{\circ}\text{C}/\text{min}$) (YUP XIN® SX2, R.P. China), y un sistema de inyección de nitrógeno (150 mL/min) donde recibe un segundo tratamiento térmico a $500 \pm 3^{\circ}\text{C}$ por 90 min. El material tratado, se extrajo de la mufla, se enfrió a temperatura ambiente, se lavó con 4000 mL de agua destilada y se neutralizó con 400 mL de una disolución de hidróxido de sodio 1% . Finalmente, se lavó nuevamente con agua destilada, se filtró a vacío y se secó al aire.

Para obtener el pirolizado con ácido fosfórico se procedió de la misma forma, con la diferencia de que, en este caso, se emplearon 500 g de cáscara, las cuales se embebieron en 1461 g (854 mL) de ácido fosfórico (85%) y se utilizó menor cantidad de hidróxido de sodio en la neutralización. Las cantidades utilizadas mantuvieron la misma relación cáscara:ácido que en el caso del PAS. El rendimiento del pirolizado obtenido se calculó mediante la ecuación 1:

$$Rp = \frac{mf}{mi} * 100 \quad (1)$$

donde

Rp: rendimiento en peso del pirolizado obtenido, mf: masa seca final del pirolizado, mi: masa seca de la cáscara de *J. curcas* inicial. Ambas masas secas se calculan restandole la humedad al material pesado.

Evaluación de la eficacia como adsorbentes de los pirolizados

Los ensayos de adsorción se realizaron simulando las condiciones del proceso de clarificación, para ello el jugo se calentó a $90 \pm 5^{\circ}\text{C}$ antes de la adición de los adsorbentes (pirolizados). La adsorción de impurezas coloreadas se evaluó mediante la adición de cantidades definidas de los pirolizados a 50 mL de jugo, en matraces Erlenmeyers de 250 mL. Estos fueron debidamente tapados y se mantuvieron bajo agitación por 15 min en agitador orbital horizontal (Orbital shaker, gs-30, Taiwan, China). Pasados los 15

min, los matraces se enfriaron hasta temperatura ambiente y el contenido se filtró a través de papel de filtro No.1 (Z274844). Se mide la absorbancia que posee el líquido obtenido en espectrofotómetro (UV-2601, RAYLEIGN, China) a 420 nm contra blanco de agua.

En los experimentos se cuantifica el porcentaje de adsorción de impurezas coloreadas haciendo uso del protocolo de determinación de color ICUMSA [15], y mediante la comparación de la absorbancia del jugo clarificado con y sin tratamiento. El porcentaje de reducción del color ICUMSA se indicará con las siglas: PRCI. Con fines comparativos se utilizó como referencia carbón activado grado analítico (CAA), aplicando el mismo procedimiento utilizado para los experimentos de adsorción de los pirolizados.

Selección del pirolizado con las mejores propiedades adsorbentes

La selección del pirolizado con mejores propiedades adsorbente se realizó mediante un análisis de varianza, ANOVA simple y una prueba de Duncan de múltiple rango ($p < 0,05$). Se compararon las medias de los resultados correspondientes a los PRCI de los bloques experimentales para los ensayos con el PAS, PAF y CAA. Adicionalmente, se analizó la influencia de los factores: tiempo de adsorción (10, 20 y 30 min) y dosis de material (0,1, 0,25 y 0,4 g) sobre la adsorción de las impurezas presentes en el jugo clarificado por parte de los pirolizados. Estos experimentos se realizaron haciendo uso de un diseño experimental de superficie respuesta de tipo factorial a tres niveles (3^2) con tres réplicas en el centro del experimento y dos bloques (tabla 1). Como variable de respuesta del diseño estadístico se consideró el PRCI. Las condiciones del experimento se seleccionaron según la experiencia de especialistas del Grupo Empresarial Provincial AzCuba, Matanzas, Cuba.

TABLA 1. MATRIZ DE LOS EXPERIMENTOS DE ADSORCIÓN

Experimento	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tiempo (min)	20	20	10	30	20	20	10	30	20	20	10	30
Dosis (g/50 mL)	0,2 5	0,1 0	0,1 0	0,4 0	0,2 5	0,4 0	0,2 5	0,2 5	0,2 5	0,2 5	0,4 0	0,1 0

Para el análisis de los resultados se aplicó un modelo de segundo orden para la variable respuesta del tipo $Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_{11} + b_{22}X_{22}$, a un 95 % de

confiabilidad. Todo el procesamiento estadístico se desarrolló mediante el software *StatgraphicsCenturion XV*, versión 15.2.05 [16].

Caracterización del material pirolizado con mejores propiedades como adsorbente

El material adsorbente seleccionado se caracterizó según las normas establecidas por la *European Council of ChemicalManufacturers' Federations*(CEFIC) en 1986 [17] cuantificándose su humedad, cenizas, materia volátil, contenido de carbono fijo y densidad aparente. La determinación de humedad se cuantificó por gravimetría colocando 1 g de biomasa pirolizada en un crisol previamente tratado hasta peso constante el cual se sometió a calentamiento en estufa a 150 ± 3 °C durante 4 h. Posterior al secado, el crisol se colocó en desecador durante 30 min y se pesó. El procedimiento se repitió hasta lograr peso constante (± 0.1 %). El porcentaje de humedad se calculó mediante la ecuación 2:

$$H = \frac{(MH-MS)}{MH} * 100 \quad (2)$$

donde

H: porcentaje de humedad (%), MH: masa de la muestra húmeda (g), MS: masa de la muestra seca (g).

El contenido de cenizas se determinó mediante el pesado de 1 g de biomasa pirolizada en un crisol previamente llevado a peso constante. El crisol y la muestra se colocaron en mufla a 650 ± 25 °C por 1 h. Pasado ese tiempo el crisol se pasó a un desecador en la cual se mantuvo por 1 h y se pesó. El procedimiento se repitió hasta lograr peso constante ($\pm 0,3$ mg). El contenido de cenizas se calculó mediante la ecuación 3:

$$C = \frac{(F-G)}{(B-G)} * 100 \quad (3)$$

donde

C: porcentaje de cenizas en la muestra (%), F: masa del crisol más las cenizas de la muestra (g), masa del crisol vacío (g), masa del crisol más la muestra seca (g).

La materia volátil se cuantificó pesando 1 g de biomasa pirolizada en un crisol con tapa y colocándolo a 900 °C en mufla durante 7 min. El porcentaje de materia volátil se calculó a partir de la pérdida de masa de la muestra, con la corrección del contenido de humedad. La ecuación utilizada en el cálculo fue:

$$MV = \frac{100 * (P - N) - MC * (P - R)}{(P - R) * (100 - MC)} * 100 \quad (4)$$

donde

MV: materia volátil, P: masa de la muestra más el crisol con tapa antes del calentamiento (g), N: masa de la muestra más el crisol después del calentamiento (g), R: masa del crisol vacío y la tapa (g), H: porcentaje de humedad de la muestra.

El contenido de carbono fijo (CF) se determinó restándole a 100 el contenido de porcentaje de cenizas y materia volátil:

$$CF = 100 - C - MV. \quad (5)$$

La densidad aparente se determinó mediante el cociente entre la masa de 5 g de biomasa pirolizada depositada en una probeta, dividido por el volumen que ocupa ese material.

Análisis de calidad del jugo clarificado

Con el objetivo de conocer si la presencia del material pirolizado afectó la calidad del jugo clarificado en el proceso de adsorción, se realizaron mediciones de pH y cantidad de sólidos disueltos (°Bx) al inicio y final de cada corrida experimental. El pH del jugo clarificado /18/se midió mediante un potenciómetro (Philips PW 9418, Países Bajos), mientras que la medición del contenido de sólidos disueltos se realizó por método refractométrico al depositar una alícuota del jugo clarificado en el refractómetro (ZUZI, Alemania) y realizar la medición de grados Brix (°Bx) en la escala del equipo [19].

Resultados y discusión

En el proceso de producción de azúcar crudo la clarificación del jugo tiene un significado importante. En esta etapa es fundamental remover la mayor cantidad de impurezas coloreadas, para garantizar la calidad del producto final. La selección de materiales adsorbentes efectivos para la remoción de las impurezas es de vital importancia para la rentabilidad del proceso azucarero.

*Obtención de los materiales pirolizados a partir de la cáscara del fruto de *Jatropha curcas* utilizando ácido sulfúrico (PAS) y ácido fosfórico (PAF)*

Los pirolizados con ácido sulfúrico y ácido fosfórico se obtuvieron con rendimientos en peso de 48 y 50 %, respectivamente. Los resultados se corresponden con los de Ramakrishnan y Namasivayam (2009), los cuales obtienen rendimientos entre 44 y 54 % para los carbones activados de cáscara de *J. curcas* utilizando como agentes

activantes los ácidos sulfúrico y fosfórico [14]. En el presente artículo las cáscaras del fruto de la *J. curcas* se someten a un tratamiento térmico adicional al presentado por Ramakrishnan y Namasivayam (2009), en el cual, el material se colocó en la mufla a 500 °C, por 90 min, en atmósfera de nitrógeno. Este tratamiento adicional le confiere un mejor desarrollo de la meso- y microporosidad al material, lo que conlleva, un proceso de adsorción más eficiente [4].

Caracterización de los pirolizados PAS y PAF

La tabla 2 presenta los resultados de la caracterización realizada a los pirolizados elaborados en esta investigación. El porcentaje de humedad de estos materiales es semejante al 15 % reportado por Ramakrishnan y Namasivayam [14] para los carbones elaborados con los mismos agentes deshidratantes. Con respecto al contenido de materia volátil, los pirolizados PAS y PAF, muestra valores menores que los reportados por los referidos autores, en cuyo trabajo obtienen valores de 36 y 48 %.

TABLA 2. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DEL PAS Y PAF

Pirolizado	PAS	PAF
Humedad (%)	14,1 ± 1,6	16,0 ± 1,2
Cenizas (%)	10,3 ± 1,5	12,0 ± 1,4
Materia volátil (%)	30,2 ± 1,8	38,0 ± 1,0
Carbono fijo (%)	59,5 ± 0,2	50,0 ± 0,3
Densidad aparente (g/mL)	0,48 ± 0,09	0,45 ± 0,04

Se desea que el contenido de cenizas de los carbones sea el mínimo posible, aunque esto depende del tipo de materia prima utilizada y del tratamiento principalmente [4]. En esta investigación, los adsorbentes PAS y PAF poseen contenidos de cenizas ligeramente altos, si se compara con Duan y col. [20], y Arteaga y col. [21], quienes trabajaron con materiales con un contenido de cenizas de 3,8 % y 0,97 % respectivamente; y similar a lo reportado por Ramakrishnan y Namasivayam [14]. Por otra parte, los porcentajes de carbono fijo determinado para los adsorbentes utilizados en la presente investigación son semejantes a lo reportado por los mismos autores. El contenido de carbono fijo del material es un parámetro muy importante, puesto que sobre el carbono incide el proceso de activación que le confiere la estructura porosa al adsorbente.

Las especies no carbonadas se eliminan durante el tratamiento térmico provocando el enriquecimiento en carbón. Se conoce, además, que un elevado grado de activación

conduce a un descenso de la densidad y la resistencia mecánica del material adsorbente. Debido a lo mencionado, se espera que, a menor densidad, se logre mejor desarrollo de la estructura porosa, llevando a mejorar su capacidad de adsorción [4]. El valor obtenido (0,45 y 0,48 g/mL) para los adsorbente utilizados en esta investigación, concuerda con los resultados de Ramakrishnan y Namasivayam [14], con cáscara de *J. curcas* y utilizando ácido sulfúrico y ácido fosfórico como agentes deshidratantes. También, se encuentra dentro del rango (0,17-0,60 g/mL) determinado para los materiales obtenidos para tres residuos agroindustriales reportados por Solís-Fuente y col. [10].

Evaluación de la adsorción de colorantes en presencia de los materiales pirolizados

La figura 1 muestra una comparación de las medias de los porcentajes de reducción de color ICUMSA del jugo clarificado (PRCI), después del tratamiento con PAS, PAF y el carbón activado utilizado como referencia (CAA). En este caso, los números 1 y 2, corresponden a los bloques experimentales del tratamiento con PAS; 3 y 4, -tratamiento con PAF; así como, el 5 y 6, con el tratamiento con el CAA. Se observa como las medias del porcentaje de reducción de color fueron superiores en los casos del carbón activado analítico y en el pirolizado fabricado con ácido fosfórico, por ese orden.

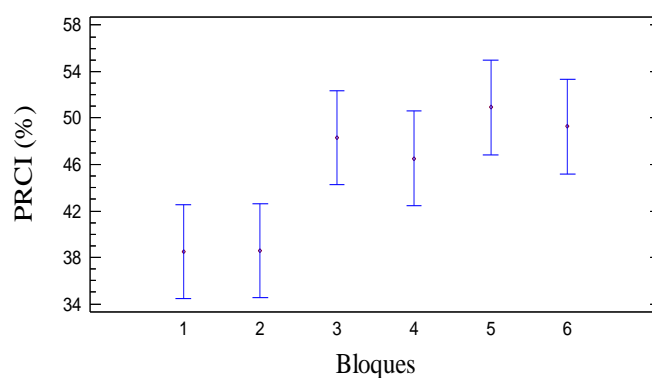


Fig. 1. Comparación entre los valores medios de los porcentajes de reducción de color ICUMSA (PRCI) en los bloques experimentales (muestra y réplica)

Los resultados de la prueba de múltiples rangos de Duncan para un 95 % de confianza (tabla 3) corroboran los resultados mostrados en la figura 1. Además, se observa como el PAS adsorbió 5,4 % menos impurezas en el jugo clarificado que el CAA. De acuerdo con estos resultados, no existen diferencias estadísticamente significativas entre el efecto adsorptivo del PAF y el CAA; lo cual sugiere que el PAF pudiera poseer propiedades semejantes a un material adsorbente de grado analítico.

TABLA 3. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE MÚLTIPLES RANGOS DE DUNCAN PARA LOS BLOQUES EXPERIMENTALES ANALIZADOS

Bloque	Adsorbente	PRCI, %	Grupos Homogéneos
1	PAS	38,5	X
2	PAS	38,6	X
4	PAF	46,5	X
3	PAF	48,3	X
6	CAA	49,3	X
5	CAA	50,9	X

La tabla 4, muestra los resultados del experimento realizado bajo las condiciones del diseño experimental de superficie respuesta factorial a tres niveles (3^2), utilizando como variable respuesta el PRCI. Este se realiza para el estudio de adsorción de impurezas presentes en el jugo clarificado respecto al tratamiento con el PAF. Se observa que el mayor porcentaje de reducción de color (71,1 %), se logra para las condiciones del experimento 4 (30 min, 0,4 g/50 mL). Por otra parte, los menores porcentajes de reducción de color (26,4 %) se obtienen para las condiciones del experimento 3 (10 min, 0,10 g/50 mL). Los resultados anteriores concuerdan con lo mostrado por el gráfico de Pareto. En el mismo se muestra como los factores tiempo y dosis son influyentes estadísticamente en la respuesta, y su influencia es positiva. Al aumentar tiempo y dosis, aumenta el porcentaje de reducción de color (figura 2).

TABLA 4. PORCENTAJES DE REDUCCIÓN DE COLOR ICUMSA (PRCI) OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS REALIZADOS BAJO EL DISEÑO ESTADÍSTICO EXPERIMENTAL A DOS BLOQUES CON EL PAF

Bloques experimentales	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Bloque 1	50,6	35,8	30,1	66,2	49,3	69,8	35,6	41,6	55,3	53,0	62,8	35,3
Bloque 2	39,5	28,0	22,7	71,1	35,5	66,2	41,2	51,6	50,2	53,7	61,0	43,2

La figura 2 muestra el gráfico de Pareto obtenido del análisis de los resultados del diseño experimental realizado con el PAS sobre el jugo clarificado. Se observa en el gráfico de Pareto, que los factores Dosis y Tiempo son estadísticamente significativos, siendo Dosis, un factor más influyente sobre el PRCI, que el factor Tiempo (figura 2 y 3). Al aumentar ambos, se incrementan los valores de PRCI. La interacción de la dosis con ella misma (AA) se pudiera considerar, para fines prácticos, como una

variable estadísticamente significativa. La interacción de un factor consigo mismo sugiere que posiblemente se alcance la curvatura de la superficie respuesta por este factor. Sin embargo, el análisis de la figura 4 no confirma esta hipótesis, lo cual nos lleva a no considerar AA en el modelo obtenido.

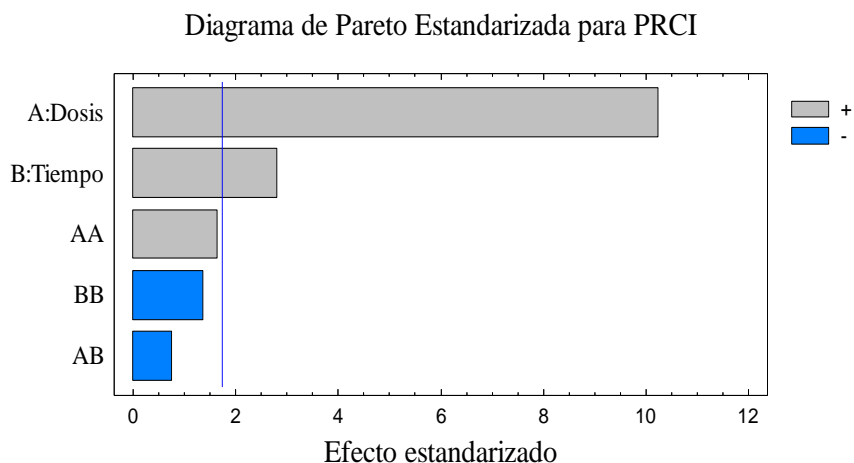


Fig. 2. Gráfico de Pareto para el estudio de reducción del color ICUMSA, obtenido con el tratamiento con el PAF en el jugo clarificado

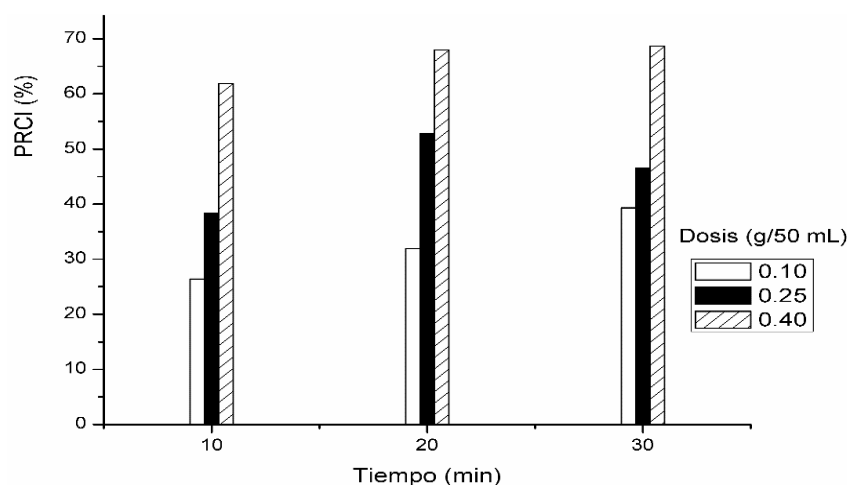


Fig. 3. Influencia del Tiempo y la Dosis en el PRCI, obtenido con el tratamiento con el PAF en el jugo clarificado

Por otro parte, el modelo matemático (Ecuación 6) obtenido para la influencia de los factores Dosis (D) y Tiempo (t) sobre el PRCI, explica el 87,4 % de su variabilidad. En la figura 4 se muestra como la curvatura de la superficie de respuesta se logra por el factor Tiempo, lográndose el óptimo de PRCI (69,2 %) a los 24,6 min para una dosis de 0,4 g/50 mL.

$$PRCI = 2.84306 + 42.4167 * D + 2.075 * t + 180.278 * D^2 - 1.01667 * D * t - 0.0339375 * t^2$$

(6)

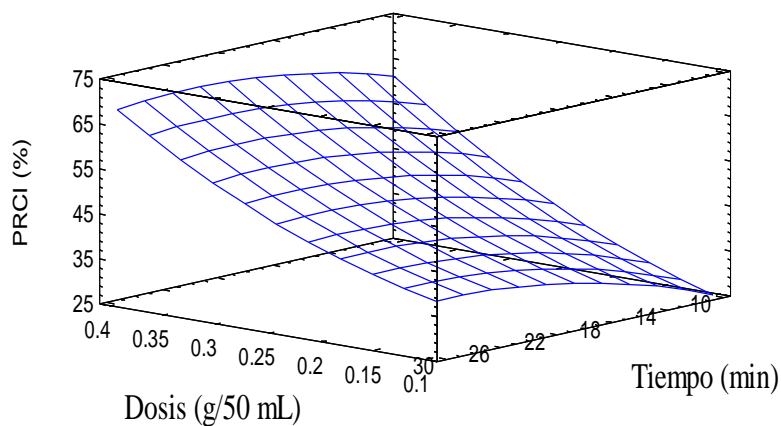


Fig. 4. Gráfica de la superficie de la respuesta estimada para el PRCI en el tratamiento de jugo clarificado con el PAF

Análisis de calidad del jugo clarificado

Con el objetivo de verificar si hubo afectación en la calidad del jugo clarificado, al ser tratado con el pirolizado PAF, se determinan el pH y el contenido de sólidos totales, antes y después del proceso de adsorción. Se consideró que el pH del jugo debe ser neutro, para evitar la inversión de la sacarosa [18] y que el contenido de sólidos disueltos debe fluctuar entre 14 y 16 °Bx, para garantizar de esta forma la calidad requerida del producto final [19]. En estos análisis, el pH del jugo clarificado no varió significativamente después del proceso de adsorción, fluctuando entre 6-7 para todos los experimentos. Valores de pH cercanos a la neutralidad evitan pérdidas de sacarosa por inversión. En todos los jugos analizados se detectó un leve aumento del contenido de sólidos disueltos, lo cual pudiera deberse a que el calentamiento del jugo durante los ensayos provoca una ligera evaporación de este. Todas las mediciones obtenidas se encuentran en el intervalo establecido (14-16 °Bx) para este parámetro según la norma ICUMSA.

Los resultados muestran, desde el punto de vista técnico, la factibilidad del uso de los adsorbentes obtenidos a partir de la cáscara de *J. curcasen* en el proceso de producción de azúcar crudo, especialmente en el tratamiento realizado para la purificación de los jugos clarificados. Es probable, que el uso de estos materiales adsorbentes pudiera contribuir positivamente a la obtención de azúcares blancos directos equivalentes en calidad a los obtenidos actualmente en los procesos de refinación de azúcar.

Conclusiones

El uso de una biomasa como la cáscara del fruto de la J. curcas, primeramente, deshidratada y posteriormente pirolizada, permitió obtener materiales adecuados para adsorber las impurezas coloreadas presentes en el jugo clarificado de la industria azucarera. La elaboración de los materiales resultó en un significativo 50 % de rendimiento en masa. El PAF adsorbió mejor las impurezas presentes en el jugo clarificado (71 %), que el pirolizado elaborado con ácido sulfúrico, utilizando 0,4 g del PAF en 50 mL de jugo durante 30 min. El proceso de adsorción es sensible al cambio de la dosis y el tiempo de tratamiento. Las propiedades química-físicas del PAF cumplen con las normas establecidas para estos tipos de materiales, no observándose cambios de pH y grados Brixen el jugo clarificado al ponerse en contacto con este adsorbente. Debido a las buenas propiedades que poseen, estos materiales pudieran ser empleados en la etapa de purificación del proceso de obtención de azúcar.

Referencias bibliográficas

1. BRIDGWATER, A.V.; MEIER D.; RADLEIN, D. "An overview of fast pyrolysis of biomass". *Organic Geochemistry*. 1999, **30**, 1479-1493. ISSN: 0146-6380
2. MARTÍN, C.; FERNÁNDEZ, T.; GARCÍA, A.; CARRILLO, E.; THOMSEN, A.B. "Wet oxidation pretreatment of tobacco stalks and orange waste for bioethanol production. Preliminary results. *Cellulose chemistry and technology*. 2008, **42** (7-8), 429-434. ISSN: 2457-9459
3. Demirbas, A. "Gaseous products from biomass by pyrolysis and gasification: effects of catalyst on hydrogen yield". *Energy Conversion and Management*. 2002, **43**, 897-909. ISSN: 0196-8904
4. MARSH, H.; RODRÍGUEZ-REINOSO, F. *Activated Carbon, Activation Processes (Thermal or Physical)*, Chapter 5. Elsevier. 2006, 243-259. ISBN-13:9780080444635
5. MAHAPATRAA, K.; RAMTEKEB, D.S.; PALIWALA, L.J. "Production of activated carbon from sludge of food processing industry under controlled pyrolysis and its application for methylene blue removal". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2012, **95** (1), 79-86. ISSN: 0165-2370

6. MEZOHEGYI, G.; VAN DER ZEEB, F.P.; FONT, J.; FORTUNY, A.; FABREGAT, A. "Towards advanced aqueous dye removal processes: A short review on the versatile role of activated carbon". *Journal of Environmental Management*. 2012, **102** (1), 148-164. ISSN: 0301-4797
7. ZABANIOTOU, A.; STAVROPOULOS, G.; SKOULOU, V. "Activated carbon from olive kernels in a two-stage process: Industrial improvement". *Bioresource Technology*. 2008, **99** (1), 320–326. ISSN: 0960-8524
8. LIU, WU-JUN; ZENG, FAN-XIN; JIANG, H.; ZHANG, XUE-SONG. "Preparation of high adsorption capacity bio-chars from waste biomass". *Bioresource Technology*. 2011, **102** (6), 8247–8252. ISSN: 0960-8524
9. BERNARDO, E. C.; EGASHIRA, R.; KAWASAKI, J. "Decolorization of molasses wastewater using activated carbon prepared from cane bagasse". *Carbon*. 1997, **35** (9), 1217-1221. ISSN: 0008-6223
10. SOLÍS, J. A.; MORALES, M.; AYALA, R. C.; DURÁN, M. C. "Obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña". *Revista Tecnología, Ciencia y Educación*. 2012, **27** (1), 36 – 48. ISSN: 0186-6036
11. KURNIAWAN, A.; ISMADJI, S. "Potential utilization of *Jatropha curcas* L. press-cake residue as new precursor for activated carbon preparation: application in methylene blue removal from aqueous solution". *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2011, **42** (5), 826–836. ISSN: 1876-1070
12. OKULLO, A.; NOAH, T. "Process Simulation of Biodiesel Production from *Jatropha curcas* Seed Oil". *American Journal of Chemical Engineering*. 2017, **5** (4), 56-63. ISSN: 2330-8613.
13. SUÁREZ, J.; MARTÍN, G.; SOTOLONGO, J.A.; RODRÍGUEZ, E.; SAVRAN, V.; CEPERO, L.; FUNES-MONZOTE, F.; RIVERO, J.L.; BLANCO, D.; MACHADO, R.; MARTÍN, C.; GARCÍA, A. "Experiences of the BIOMAS-CUBA Project. Energy alternatives from biomass in Cuban rural areas". *Pastos y Forrajes*. 2011, **34** (4), 473-496. ISSN: 0864-0394.
14. RAMAKRISHNAN, K.; NAMASIVAYAM, C. "Development and Characteristics of activated Carbons from *Jatropha* Husk, an Agro Industrial

- Solid Waste, by Chemical Activation Methods”.*Journal of the Environmental Engineering and Management*. 2009, **19** (3), 173-178. ISSN: 2530-2614.
15. INTERNATIONAL COMMISSION FOR UNIFORM METHODS OF SUGAR ANALYSIS (ICUMSA). Determination of the Solution Colour of Raw Sugars, Brown Sugars and Coloured Syrups at pH 7.0. GS1/3-7. United Kingdom, 2011.
16. STATPOINT, INC. Statgraphics Centurium XV, versión 15.2.05. No. Serie C4U7E1M1P644D3124791. 1982-2007.
17. EUROPEAN COUNCIL OF CHEMICAL MANUFACTURERS' FEDERATIONS (CEFIC). Test Methods for Activated Carbon. Brussels, 1986.
18. INTERNATIONAL COMMISSION FOR UNIFORM METHODS OF SUGAR ANALYSIS (ICUMSA). The Determination of pH by a Direct Method – in Raw Sugar, Molasses, Juices and Syrups – Official – in White Sugar, Specialty Sugars and Plantation White Sugar – Tentative. GS1/2/3/4/7/8/9-23. United Kingdom, 2007.
19. INTERNATIONAL COMMISSION FOR UNIFORM METHODS OF SUGAR ANALYSIS (ICUMSA). The Determination of Refractometric Dry Substance (RDS %) of Molasses – Accepted and Very Pure Syrups (Liquid Sugars), Thick Juice and Run-off Syrups – ICUMSA Method GS 4/3/8-13 (2009) Official. United Kingdom, 2007.
20. DUAN XIN-HUI, J. “Preparation of activated carbon from *Jatropha* hull with microwave heating: Optimization using response surface methodology”.*Fuel Processing Technology*. 2011, **92** (3), 394-400. DOI: 10.1016/j.fuproc.2010.09.033.
21. ARTEAGA, Y.; CARBALLO, L. R.; GARCÍA, Y.; ALONSO, M.; GEADA, G. Caracterización del aserrín de *Acacia magium Willd* para la obtención de biocarbón. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*. 2012, **8** (2), 90-95. ISSN 2594-0384