

BONDADES DE LA ACTIVACIÓN ÁCIDA PARA OBTENER CARBONES ACTIVADOS A PARTIR DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR

BENEFITS OF ACID ACTIVATION TO OBTAIN ACTIVATED CARBONS FROM SUGARCANE BAGASSE

Dannis A. Cascaret-Carmenaty¹, <https://orcid.org/0000-0001-6515-7138>

Roilan A. Odio-González², <https://orcid.org/0009-0008-9810-6394>

Manuel Á. Cantos-Macías³, <https://orcid.org/0000-0001-7589-0210>

Maylen Caballero-Fuentes⁴, <https://orcid.org/0009-0007-6246-3544>

Omaida Quesada-González^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-8878-4628>

¹Departamento de Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

²Laboratorio Farmacéutico Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

³Departamento de Mecánica, Universidad Técnica de Manabí, Ecuador

⁴Universidad de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, Holguín, Cuba

*Autores para la correspondencia: oquesada@uo.edu.cu

Recibido: 15 de octubre de 2024

Aprobado: 18 de noviembre de 2024

RESUMEN

El objetivo de esta investigación es obtener carbones porosos, a partir del bagazo de caña de azúcar, usando activación ácida, así como su caracterización, lo que incluye la cinética de su pirólisis. Para ello, se utilizaron técnicas de análisis de sólidos como: análisis inmediato, elemental, análisis térmico (termogravimetría, termogravimetría derivada y calorimetría diferencial de barrido), microscopía óptica y espectroscopia infrarroja con transformada de fourier. A través del análisis inmediato y elemental, se evidencia que el bagazo de caña puede ser empleado como fuente de carbono. La termólisis demuestra la influencia del activante químico, y a través del estudio cinético, se identifican que los modelos cinéticos D3 y F1 determinan la velocidad de la reacción, para las etapas involucradas. Los espectros FTIR y la imagen de microscopía óptica demuestran la mayor extensión de la reacción y las bondades de la activación ácida.

Palabras clave: bagazo de caña, carbón; activación ácida; caracterización.

ABSTRACT

The objective of this research is to obtain porous coals from sugar cane bagasse, using acid activation, as well as its characterization, which includes the kinetics of its pyrolysis. For this purpose, solid analysis techniques were used, such as: immediate and elemental analysis, thermal analysis (thermogravimetry, derived thermogravimetry and differential scanning calorimetry), optical microscopy and infrared spectroscopy with fourier transform. Through immediate and elemental analysis, it is evident that sugarcane bagasse can be used as a carbon source. The thermolysis shows the influence of the chemical activator and through the kinetic study it is identified that the kinetic models D3 and F1 determine the reaction rate for the stages involved. The FTIR spectra and the optical microscopy image demonstrate the greater extent of the reaction and benefit of the acid activation.

Key words: sugarcane bagasse, coal; acid activation; characterization.

INTRODUCCIÓN

El uso de biomasa para la producción de energía cobra importancia, porque reduce su impacto ambiental. De esa forma se aprovechan desechos sólidos, y se contribuye a la recuperación de la energía presente en ella, para lo que se utilizan procesos termoquímicos.⁽¹⁾ La pirólisis ofrece una ruta rápida para descomponer la estructura polimérica de la biomasa.⁽²⁾ Este procedimiento, ampliamente usado, tiene como objeto la mejora de las propiedades del combustible, entre ellas, la densidad energética, debido a que la biomasa a diferencia del carbón, presenta un menor poder calorífico por unidad de kilogramo, lo que significa que se requiera de grandes volúmenes de almacenamiento. Por esta razón, la pirólisis es muy usada para la producción de biocombustibles líquidos y sólidos.^(2,3,4)

La conversión de bagazo de caña de azúcar en carbones activados, resulta una opción de interés, no solo por su versatilidad para la remoción de tintes, olores y contaminantes en fase líquida y gaseosa, sino también porque son utilizados en dicho proceso de refinación de azúcar, para eliminar impurezas coloreadas, pigmentos y constituyentes inorgánicos presentes en el jugo clarificado.⁽⁵⁾ Además, según las propiedades que presenten, pueden utilizarse en aplicaciones eléctricas, medioambientales, como soportes de fotocatalizadores, y como remediadores de suelos.^(6,7,8,9)

Para dicha conversión se puede utilizar el proceso de activación química de residuos biomásicos, empleando ácidos como agente activante para la obtención de carbones porosos.^(10,11,12) En este contexto Yakout y col. utilizaron como precursor el hueso de olivo, para ello pesaron aproximadamente 50 g del mismo y lo impregnaron en 200 mL de disoluciones de ácido fosfórico a 60, 70 y 80 % en peso, agitando a 85 °C por 4 h. Posteriormente, se carboniza en un horno cilíndrico vertical de acero inoxidable a una temperatura de 500 °C en flujo de nitrógeno (200 mL/min). La velocidad de calentamiento fue 3 °C/min y el tiempo 2 h. El sistema fue enfriado hasta temperatura ambiente en flujo de nitrógeno y el producto obtenido se lavó con agua destilada hasta pH igual a 6 y se secó a una temperatura de 120 °C. Los carbones activados preparados se identifican con OS6, OS7 y OS8. Los rendimientos de las reacciones de obtención de los carbones fueron 36.8, 33.8 y 31 % respectivamente.⁽¹⁰⁾

En la [Figura 1](#) se observan los espectros infrarrojos (FTIR) de los productos obtenidos. Todos los espectros muestran una banda de transmitancia ancha a 3 200-3 600 cm^{-1} , asignada al modo de estiramiento del OH y agua absorbida. La posición y asimetría de la banda indica la existencia de fuertes enlaces por puente de hidrógeno. La banda entre 1 600- 1 580 cm^{-1} se asigna a vibraciones carbono-carbono en anillos aromáticos.⁽¹⁰⁾

Tzong y col.⁽¹²⁾ reportaron para el bagazo de caña 77,80 % de materia volátil; 3,63 % de humedad; 14,75 % de carbón fijo, y 3,82 % de cenizas. A través del análisis elemental, se determinó también para esta biomasa: 45,03 % como carbono; 6,08 % de hidrógeno; 44,33 % de oxígeno, y 0,24 % de nitrógeno. La estrategia experimental para la obtención de los carbones activados se describe a continuación: El bagazo de caña fue impregnado con la disolución del agente activante (H_3PO_4) utilizando una razón 1g-4mL y posteriormente, fue secado por 24 h para eliminar el agua residual. La calcinación se realizó en un reactor de lecho fijo de cuarzo y se utilizó una atmósfera inerte de nitrógeno con pureza de 99,95 %. Este reactor fue insertado en un horno eléctrico que se calentó en un rango de temperatura entre 400-800 °C por 1 h. Los productos fueron enfriados a temperatura ambiente para luego ser lavados con agua y secados a 105 °C por 24 h. El análisis elemental del carbón activado obtenido mostró un 63.68 % de carbono, 4.67 % de hidrógeno, 27.72 % de oxígeno, 0.08 % de nitrógeno y 3.85 % de cenizas.⁽¹²⁾

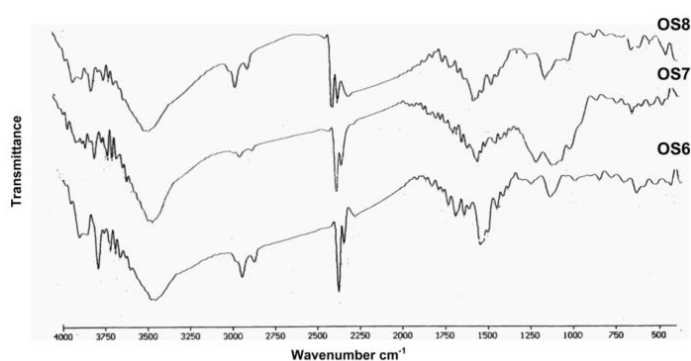


Fig. 1- Espectros FTIR de carbones activados obtenidos con diferentes concentraciones de H_3PO_4

Este carbón fue caracterizado por FTIR, identificándose una banda amplia cerca de 3 425 cm^{-1} correspondiente a vibraciones del grupo hidroxilo, mientras que la que aparece entre 900-1 200 cm^{-1} , puede ser atribuida a la presencia de especies de

fósforo en la muestra. El pico de $1\ 175\ \text{cm}^{-1}$ corresponde al estiramiento C-O en un enlace C-O-P y en $1\ 053\ \text{cm}^{-1}$ a vibraciones de una cadena P-O-P.⁽¹²⁾ A partir de estos antecedentes, esta investigación tuvo como objetivo obtener carbones porosos a partir del bagazo de caña de azúcar, aprovechando las potencialidades de la activación con ácido sulfúrico, así como su caracterización, lo que incluye la cinética de su pirólisis.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó el equipamiento disponible en los laboratorios de química de la Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, de la Universidad de Oriente. Los reactivos empleados todos son puros para análisis marca Panreac.

El bagazo de caña de azúcar objeto de investigación, proviene de Holguín, Cuba. El mismo fue secado en Estufa Venticell de procedencia española, según la norma UNE-EN-14774-1:2010,⁽¹³⁾ y posteriormente se aplicó el método de cuarteo, según procedimiento utilizado.⁽¹⁴⁾ La biomasa estudiada se activó químicamente empleando disolución de ácido sulfúrico de concentración $0,5\ \text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ y una relación sólido: disolución de 1 g:6 mL. El bagazo fue impregnado con esta disolución por 24 h, y después filtrado y secado en la estufa a $105\ ^\circ\text{C}$.

Los procedimientos experimentales aplicados y los equipos utilizados para la caracterización inmediata del bagazo de caña impregnado con ácido sulfúrico son descritos en Bahin-Deroncelé *et al.*⁽¹⁴⁾ A través de estos análisis, se determinaron los porcentajes de humedad, materia volátil⁽¹⁵⁾, cenizas⁽¹⁶⁾ y el carbón fijo por diferencia. La composición elemental (% C, % H y % O) se calculó preliminarmente, a partir de las expresiones matemáticas propuestas por Parikh y col.⁽¹⁷⁾ empleando los datos obtenidos experimentalmente en el análisis inmediato.

Los valores de pH de la muestra analizada se tomaron en un pH-metro marca FISHER de Estados Unidos, con electrodo combinado Hanna Instruments, previamente calibrado con una solución buffer a pH 7 y $T = 26\ ^\circ\text{C}$.

El registro térmico se obtuvo en equipo de análisis térmico simultáneo de NETZSCH STA 449 F3 Jupiter®, con velocidad de calentamiento de $10\ ^\circ\text{C}/\text{min}$, flujo de nitrógeno de $60\ \text{mL}/\text{min}$, que garantizó la atmósfera inerte y una muestra de 0,5 mg. Los datos de termogravimetría (ATG), termogravimetría derivada (TGD) y calorimetría

diferencial de barrido (CDB), se procesaron con el *software* Origin 8.1, 2019.

El estudio cinético se llevó a cabo a través del método de ajuste de las funciones, y se utilizaron ecuaciones integrales (Coats) y diferenciales (Achar). La determinación de los coeficientes de correlación lineal (r) se realizó utilizando el *software* Microsoft Excel 2007, con lo que se verificó el ajuste de los datos experimentales a los modelos teóricos y permitió identificar el o los modelos cinéticos que determinaron la velocidad de reacción. Se seleccionaron los modelos que alcanzaron mejores ajustes ($r \approx 1$) para ambas ecuaciones. Una vez seleccionado el modelo cinético, se calculó la energía de activación (pendiente de la recta) y el factor preexponencial (intercepto de la recta), con el *software* Origin 8.1. La metodología de cálculo aplicada se describió detalladamente en Bahin-Deroncelé *et al.*⁽¹⁴⁾

Para la obtención del carbón, el bagazo modificado con ácido sulfúrico se introdujo en una cámara de pirólisis, en presencia de helio, como gas inerte. Posteriormente, se calentó entre $700\text{-}950\ ^\circ\text{C}$, y se mantuvo la temperatura entre 30-90 min. La muestra se enfrió dentro del horno en atmósfera inerte, y posteriormente se colocó en desecadora. El sólido obtenido se lavó con agua hasta pH aproximadamente neutro. El equipamiento empleado fue presentado previamente en Bahin-Deroncelé *et al.*⁽¹⁴⁾

Los espectros infrarrojos se registraron entre $4000\ \text{cm}^{-1}$ y $400\ \text{cm}^{-1}$ en un FTIR modelo Perkim Elmer FTIR BX. Las datas fueron procesadas para la confección de los gráficos en el *software* Origin 8.1.

Para la caracterización óptica, se empleó un microscopio óptico marca OLYMPUS CX43 procedente de China con lámpara de sodio ($589,0\ \text{nm}$) y una apertura numérica (A_n) igual a 0,50 de $580\ \text{nm}$. Se utilizaron aumentos $\times 400$ y $\times 1000$. El microscopio permitió visualizar tamaños de partículas, menores que $0,58\ \mu\text{m}$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la biomasa utilizada

Propiedades organolépticas del bagazo de caña

El residual posee olor a jugo de caña de azúcar, un ligero sabor dulce y color blanco amarillento. Los valores de pH de la muestra tienen valor medio de 5,91 unidades, lo que se debe a los lavados con agua del carbón obtenido, para eliminar la disolución ácida remanente. Yakout y col. reportaron valores de pH similares en sus carbones.⁽¹⁰⁾

La caracterización inmediata y elemental de la biomasa estudiada se presentan en las [Tablas 1 y 2](#).

Tabla 1- Análisis inmediato del bagazo de caña impregnado con ácido sulfúrico

	Valores experimentales			Valor medio	S
Humedad (%)	7,25	7,49	7,04	7,26	0,22
Cenizas (%)	1,33	1,21	1,41	1,31	0,12
Materia volátil (%)	84,66	84,20	84,40	84,42	0,23
Carbón fijo (%)	7,05	6,75	7,35	7,05	0,28

Las cenizas son la materia inorgánica presente en la biomasa. El valor medio de 1,31 % es bajo, lo que resulta idóneo desde el punto de vista ambiental, y similar al reportado por Tzong ⁽¹²⁾. El valor experimental de la materia volátil fue mayor que el reportado por dicho autor. Se conoce, que en la biomasa entre el 60-80 % se volatiliza durante la pirólisis.⁽³⁾ El porcentaje de humedad en este material debe ser menor al 10 %, cuando se pretende utilizar en procesos termoquímicos,⁽³⁾ y el valor experimental medio es de 7,26 %. El carbón fijo se calculó utilizando los parámetros anteriores, y el valor precisado fue de 7,05 %, mucho menor que el reportado por Tzong de aproximadamente 15 %, por lo que se precisa aplicar métodos de activación química.

Tabla 2- Análisis elemental del bagazo modificado con ácido sulfúrico

Composición elemental	Valor calculado	Intervalos ⁽¹⁷⁾
% C	42,90	36,2 % ≤ C ≤ 53,1 %
% H	5,60	4,36 % ≤ H ≤ 8,3 %
% O	42,33	31,37 % ≤ O ≤ 49,5

Uno de los análisis más importantes relacionados con la caracterización de la biomasa es el análisis elemental, pues cuantifica la composición química que constituye la materia orgánica esencialmente. Los valores calculados son presentados en la [Tabla 2](#), y se encuentran entre los intervalos propuestos por Parikh y col.⁽¹⁷⁾ y similares a los propuestos por Tzong para un bagazo de caña obtenido en otras condiciones edafoclimáticas.⁽¹⁰⁾

Curvas térmicas de la pirólisis del bagazo de caña impregnado con ácido sulfúrico

En la [Figura 2](#) se muestran las curvas obtenidas en un equipo de análisis térmico simultáneo, el que registra análisis termogravimétrico (ATG), termogravimetría derivada (TGD) y calorimetría diferencial de barrido (CDB).

A partir de la información que ofrecen, fundamentalmente, las dos primeras técnicas, se distinguen cuatro efectos principales en la curva TGD. El primero ocurre a una temperatura menor que 50 °C, una variación de masa inferior a 2 %; y está asociado a la pérdida de humedad. El segundo efecto tiene un máximo a 80 °C, una variación de masa de 8 %, y corresponde a una deshidratación más profunda y pérdida de volátiles ligeros. Asociado a este efecto, aparece un pico exotérmico pequeño. El tercer efecto aparece en un intervalo de temperatura entre 128-287 °C, con una variación de masa de 21 %, y está relacionado con la degradación de la hemicelulosa y celulosa. A diferencia de otras biomazas modificadas o no, en esta no aparece el hombro en la curva TGD, lo que demuestra el predominio de uno de estos dos constituyentes. Este tercer efecto tiene un pequeño pico exotérmico asociado en la curva CDB.

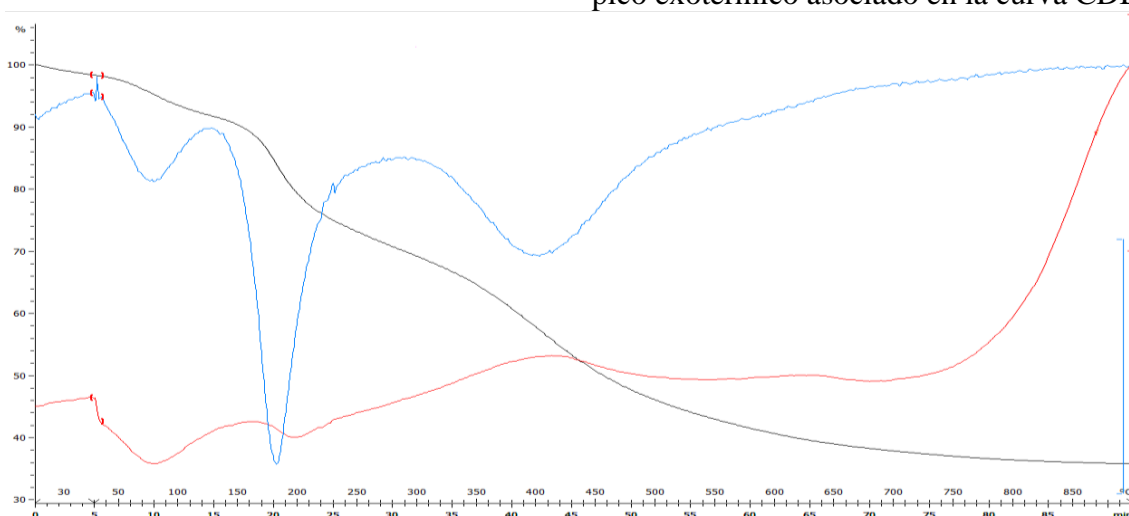


Fig. 2- Curvas térmicas de la pirólisis del bagazo de caña: ATG (trazo negro), TGD (trazo azul) y CDB (trazo rojo)

El cuarto efecto en la curva TGD, aparece en un intervalo de temperatura entre 287-753°C, y tiene una variación de masa de 33 %, que corresponde a la degradación de la lignina. El mismo tiene un pequeño, pero amplio, efecto endotérmico. La curva DSC presenta a 900 °C un intenso pico endotérmico que no tiene variación de masa asociada. Almansa reportó, que las temperaturas a las cuales se desarrolla, de manera óptima, la porosidad, están a partir de los 700 °C, valores superiores a las necesarias para la carbonización de la biomasa. Cuando las temperaturas están entre los 850 °C y 900 °C, se alcanza el mayor grado de activación, considerándose este rango como crítico para la activación. (18)

Todo lo anterior permite proponer en la [Tabla 3](#), los intervalos de temperatura precisados para la degradación térmica de los constituyentes principales del bagazo de caña objeto de estudio, que son la base para el estudio cinético. Existe consenso en que el orden de descomposición de los principales constituyentes de la biomasa, con el aumento de la temperatura, son hemicelulosa, celulosa y lignina, (19) debido a que cada uno de ellos posee una complejidad estructural diferente, que condiciona su estabilidad térmica y química.

Tabla 3- Intervalos precisados para las diferentes etapas de la pirólisis de las biomásas en estudio

Etapas	Intervalos de temperatura (°C)
Descomposición de la hemicelulosa	128-164
Descomposición de la celulosa	164-287
Descomposición de la lignina	287-753

Termolabilidad del bagazo de caña modificado con ácido sulfúrico

Las [Figuras 3 y 4](#) muestran las curvas ATG y TGD del bagazo de caña, modificado con ácido sulfúrico, y del bagazo sin modificar; las que se comparan para conocer la influencia del activante químico en la termolabilidad del bagazo de caña modificado.

En ambas figuras se distingue la mayor termolabilidad del bagazo modificado con ácido sulfúrico, especialmente durante las etapas de deshidratación y de degradación de los constituyentes más volátiles. En la [Figura 4](#) se demuestra, que la activación química provoca un aumento de la carbonización de la muestra y una disminución de la materia volátil. En la [Figura 5](#) se evidencia que la misma afecta más al perfil térmico, que al intervalo de temperatura en el que ocurren las diferentes etapas de la pirólisis de la

biomasa. Almansa (18) refirió, que el agente activante influye en la descomposición pirolítica, e inhibe la formación de alquitranes y materia volátil, incrementando el rendimiento del carbón. Los activantes químicos desplazan a temperaturas inferiores las etapas involucradas en la pirólisis. (1.18)

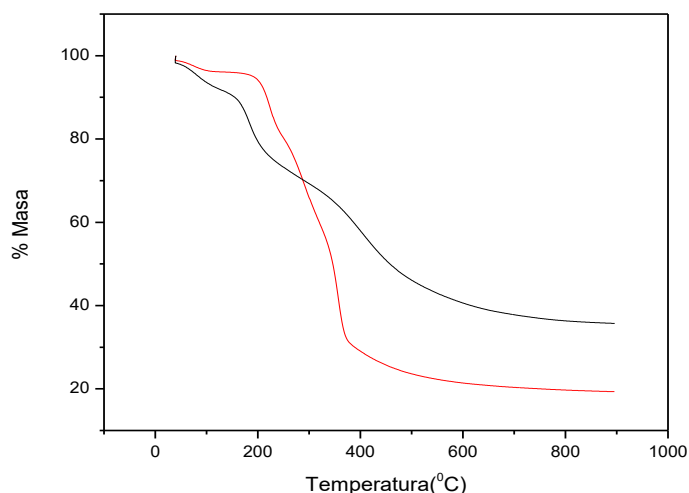


Fig. 3- Curvas ATG del bagazo de caña modificado con ácido sulfúrico (trazo negro) y del bagazo sin modificar (trazo rojo)

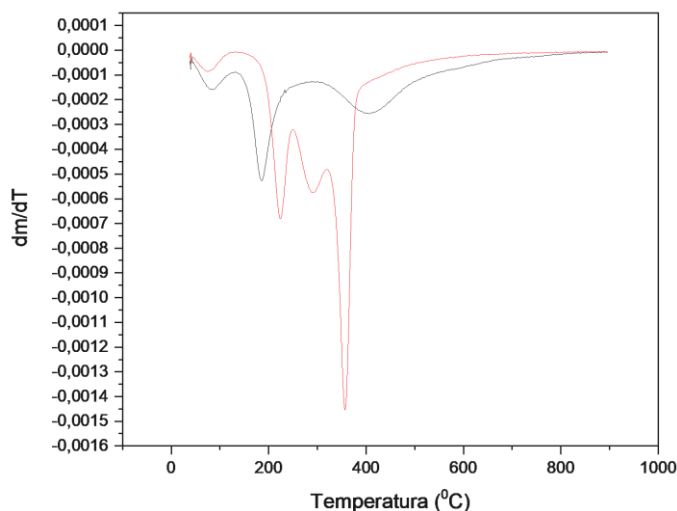


Fig. 4- Curvas TGD del bagazo de caña modificado con ácido sulfúrico (trazo negro) y del bagazo sin modificar (trazo rojo)

Análisis cinético de la pirólisis del bagazo de caña de azúcar modificado con ácido sulfúrico

A continuación, se discuten los resultados obtenidos al abordar la cinética de las tres etapas involucradas en la degradación de la biomasa, tomando como base la metodología de cálculo presentada en materiales y métodos, y los intervalos de temperatura presentados en la [Tabla 3](#), en los que prevalece la degradación de los constituyentes principales de la biomasa. En la [Tabla 4](#) se muestran los resultados del análisis

cinético de la degradación de la hemicelulosa, celulosa y lignina, presentes en el bagazo de caña impregnado con ácido sulfúrico que, por su analogía, se discutirá de manera conjunta.

En las dos primeras etapas se identifican los modelos difusivos tridimensionales con simetría esférica (D3), como los que determinan la velocidad de la reacción y valores de energía de activación entre 252-339 kJ.mol⁻¹, para la hemicelulosa, y 195-245 kJ.mol⁻¹, para la celulosa, característicos de estos procesos. Durante la degradación de la lignina, el modelo F1 es el que predomina, cuyo significado físico es crecimiento unimolecular de la capa de producto. Los valores de energía de activación calculados se encuentran en el intervalo entre 125-283 kJ.mol⁻¹, y son similares a los reportados por otros autores.

En investigaciones cinéticas de este tipo, frecuentemente se asume, que el proceso completo está determinado por modelos F1. Un ejemplo de ello es el trabajo de Cardoso y colaboradores, que aplican modelos para reacciones simples, y el de reacciones paralelas e independientes (IPR), e infieren que el modelo cinético es F1.⁽²⁰⁾ Con este trabajo se demuestra, que este modelo no es el que prevalece durante las primeras etapas del craqueo pirolítico.

Rendimiento de la reacción de obtención del carbón, a partir de bagazo de caña impregnado con ácido sulfúrico

Una vez obtenido el carbón, según procedimiento ya especificado en materiales y métodos, se calcula el rendimiento de dicho proceso (Tabla 5).

En general, ambos rendimientos obtenidos son altos, si se considera que cuando se trabaja en pirólisis de biomasa, los mayores valores a obtener están entre 20-

40 %, porque toda biomasa contiene entre 60-80 % de materia volátil. Además, se demuestra la influencia de la activación ácida en el rendimiento del producto final. Almansa refiere, que el activante químico provoca procesos de deshidratación, degradación y fragmentación de los biopolímeros que constituyen la biomasa. Plantean, además, que los productos de estas reacciones no escapan como materia volátil a bajas temperaturas, sino que se retienen e incorporan a la estructura del sólido, incrementando el rendimiento del carbón activado.⁽¹⁸⁾ Los rendimientos alcanzados cuando se utiliza la activación química, son similares a los reportados por Yakout.⁽¹⁰⁾

Tabla 5- Comparación de % de rendimientos durante la obtención del carbón a partir de la pirólisis del bagazo modificado con ácido sulfúrico y sin modificar

	Bagazo sin modificar	Bagazo modificado con ácido
Rendimiento 1 (%)	22,56	30,52
Rendimiento 2 (%)	20,32	30,24
Rendimiento 3 (%)	20,60	30,14
Valor promedio	21,16	30,30

Caracterización del carbón obtenido por espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR)

En la Figura 5 se presenta el espectro FTIR del carbón obtenido a partir del bagazo de caña modificado con ácido sulfúrico. Se identificaron esencialmente dos bandas pequeñas, lo que es un reflejo de la gran degradación que experimentó la biomasa durante el craqueo pirolítico, lo que coincide con el alto porcentaje de rendimiento alcanzado durante este proceso. La banda que aparece en el registro experimental en 3465 cm⁻¹ corresponde al modo

Tabla 4- Parámetros cinéticos determinados durante la pirólisis de los constituyentes del bagazo de caña (hemicelulosa, celulosa y lignina)

Hemicelulosa					Celulosa					Lignina				
M Coats		M Achar			M Coats		M Achar			M Coats		M Achar		
M	R	Ea	R	Ea	M	R	Ea	R	Ea	M	R	Ea	R	Ea
D1	0,81	255	0,77	103	D1	0,81	196	0,75	102	D1	0,79	394	0,74	172
D2	0,85	294	0,92	169	D2	0,85	217	0,89	143	D2	0,83	445	0,74	176
D3	0,90	339	0,95	252	D3	0,90	245	0,95	195	D3	0,88	509	0,75	179
D4	0,87	304	0,70	196	D4	0,87	225	0,05	76	D4	0,85	462	0,99	36
F1	0,92	189	0,75	128	F1	0,92	132	0,83	100	F1	0,91	283	0,98	125
R1	0,79	123	0,94	28	R1	0,79	92	0,06	0,62	R1	0,78	190	0,99	32
R2	0,87	152	0,61	49	R2	0,86	109	0,89	21	R2	0,85	230	0,09	28
R3	0,90	165	0,69	76	R3	0,89	117	0,86	67	R3	0,88	247	0,98	27
A0,5	0,71	226	0,95	330	A0,5	0,72	174	0,95	245	A0,5	0,69	346	0,76	183
A1	0,05	28	0,75	128	A1	0,13	30	0,83	100	A1	0,08	49	0,98	25
A2	0,42	70	0,10	33	A2	0,29	41	0,23	29	A2	0,36	99	0,08	129
A3	0,65	103	0,02	0,65	A3	0,54	65	0,02	5	A3	0,59	148	0,85	163
A4	0,72	120	0,03	15	A4	0,63	77	0,04	6	A4	0,68	173	0,84	181

estiramiento del OH (intervalo 3 400-3 600 cm^{-1}), que por ser una banda ancha indica, que están asociados. La segunda banda aparece en 1620 cm^{-1} se asocia a la flexión del enlace O-H.⁽²¹⁾

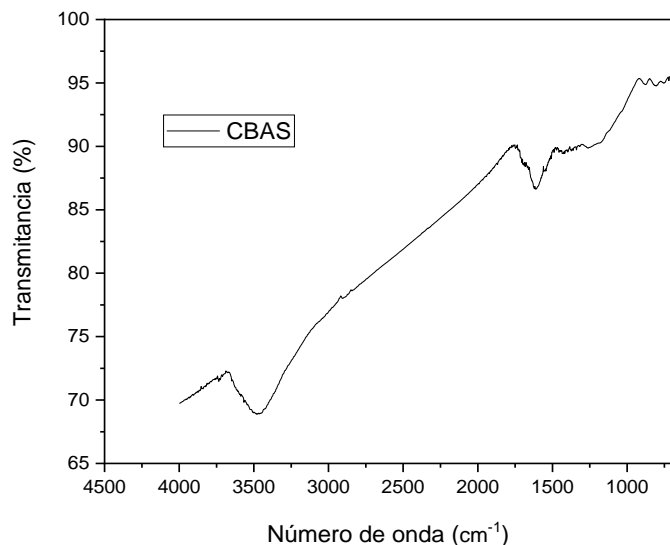


Fig. 5- Espectro FTIR del carbón obtenido cuando se utiliza ácido sulfúrico (CBAS) como activante químico

Caracterización del carbón obtenido por microscopía óptica

La Figura 6 muestra las imágenes visualizadas a través del microscopio óptico del bagazo sin modificar (A) y del bagazo impregnado con ácido sulfúrico y, posteriormente pirolizado (B).

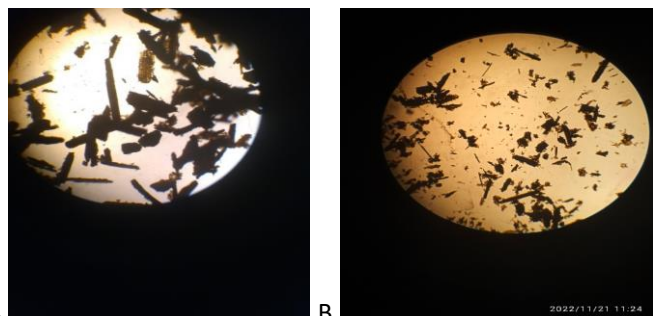


Fig. 6- Imágenes obtenidas a través de microscopía óptica. 7A) bagazo de caña sin modificar, 7B) bagazo impregnado con ácido sulfúrico y pirolizado

El bagazo de caña (Figura 6A) presenta partículas preferentemente alargadas en una dirección, lo que recuerda las microfibras de la biomasa. En la Figura 6B se distingue una disminución del tamaño de las partículas, que evidencia la ocurrencia del craqueo pirolítico de la biomasa durante la carbonización. Este resultado corrobora los altos rendimientos alcanzados, y se complementa con el espectro FTIR, donde también se demuestra la extensiva transformación del bagazo de caña.

CONCLUSIONES

El bagazo de la caña de azúcar impregnado con ácido sulfúrico, fue caracterizado por análisis inmediato y elemental evidenciando que, dado su baja humedad y contenido de cenizas, puede ser empleado como fuente de carbono. El estudio de termólisis demostró la influencia del activante químico en la obtención de mayor masa de carbón fijo y menor materia volátil, así como la mayor modificación del perfil térmico. A través del estudio realizado, se identificó que los modelos cinéticos que determinan la velocidad de la reacción durante las tres etapas, fueron: D3 y F1 y se calcularon los intervalos de energía de activación. Se demostró el error de presuponer *a priori* que el modelo F1 es el que determina la velocidad de reacción. Los porcentajes de rendimientos alcanzados en la reacción de obtención del carbón y los resultados de espectroscopia FTIR y microscopía óptica, demuestran la mayor extensión de la reacción cuando se utiliza una activación ácida.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- DEMIRBAS, A. "Combustion systems for biomass fuel". *Energy Sources, Part A*. 2007, **29** (4), 303-312. doi: <http://doi.org/10.1080/009083190948667>
- 2- ALBIS, A. y col. "Pirólisis de hemicelulosa catalizada por sulfato de zinc y sulfato férrico". *Rev. Ion.* 2018; **31**(2), 37-49. doi: <http://doi.org/10.18273/revion.v31n2-2018003>
- 3- SEBASTIÁN NOGUÉS, F.; GARCÍA GALINDO, D.; REZEAU, A. *Energía de la biomasa*. Volumen 1, Pressas Universitarias de Zaragoza, España, 2010. ISBN: 978-84-92774-91-3.
- 4- MCKENDRY, P. "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass". *Bioresour. technology*, 2002, **83** (1), 37-46. doi: [http://doi.org/10.1016/s0960-8524\(01\)00118-3](http://doi.org/10.1016/s0960-8524(01)00118-3)
- 5- PENEDO MEDINA, M; SÁNCHEZ DEL CAMPO LAFITA, A; FALCÓN HERNÁNDEZ, J. "Pirólisis de bagazo de caña a escala de laboratorio. Parte I: Influencia de condiciones de operación en el rendimiento de productos". *Tecnología Química*. 2008, **XXVIII** (2), pp. 61-70. ISSN: 0041-8420.
- 6- ADINAVEEN, T.; JUDITH VIJAYA, J.; JOHN KENNEDY, L. "Comparative study of electrical conductivity on activated carbons prepared from various cellulose materials". *Arab J Sci Eng*, 2014, **41**, 55-65. doi: <http://doi.org/10.1007/s13369-014-1516-6>

- 7- AMIN M., T.; ALAZBA A., A.; SHAFIQ, M. "Removal of Copper and Lead using Banana Biochar in Batch Adsorption Systems: Isotherms and Kinetic Studies". *Arab J Sci Eng*, 2017, **43**, 5711-5722. doi: <http://doi.org/10.1007/s13369-017-2934-z>
- 8- AO, Y.; XUA, J.; FUA, D.; YUANA, CH. "A simple route for the preparation of anatase titania-coated magnetic porous carbons with enhanced photocatalytic activity". *Carbon*, 2008, **46**, 596-603. doi: <http://doi.org/10.1016/j.carbon.2008.01.009>
- 9- HU, Y.; CHEN, X.; LIU, Z.; WANG, G.; LIAO, S. "Activated carbon doped with biogenic manganese oxides for the removal of indigo carmine". *Journal of Environmental Management*, 2016, **166**, 512e518. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.10.043>
- 10- YAKOUT, S. M., SHARAF EL DEEN, G. "Characterization of activated carbon prepared by phosphoric acid activation of olive stones". *Arabian Journal of Chemistry*, 2016, **9**, S1155-S1162. <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2011.12.002>
- 11- CASTRO, J. B.; BONELLI, P. R.; CERRELLA, E. G.; CUKIERMAN, A. L. "Phosphoric acid activation of agricultural residues and bagasse from sugar cane: influence of the experimental conditions on adsorption characteristics of activated carbons". *Ind. Eng Chem. Res.* 2000, **39**, 4166-4172. doi: <http://doi.org/10.1021/ie0002677>
- 12- TZONG HORNG, LIOU. "Development of mesoporous structure and high adsorption capacity of biomass-based activated carbon by phosphoric acid and zinc chloride activation". *Chemical Engineering Journal*, 2010, **158**, 129-142. doi: <http://doi.org/10.1016/j.cej.2009.12.016>
- 13- UNE-EN-14774-1. "Biocombustibles sólidos. Procedimiento para el secado de biomásas". *Norma española*, septiembre 2010.
- 14- BAHÍN DERONCELÉ, L. J.; QUESADA GONZÁLEZ, O.; CASCARET CARMENATY, D. A.; ODIO GONZÁLEZ, R. A.; CANTOS-MACÍAS, M. A. "Obtención de material carbonoso de bagazo de caña de azúcar con activación salina". *Rev. Cubana Quím*, 2020, **35** (2), 253-273. e-ISSN: 2224-5421.
- 15- UNE-EN- 15148. "Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de materia volátil". *Norma española*, septiembre 2010.
- 16- UNE-EN-14775. "Biocombustibles sólidos. Método para la determinación del contenido de cenizas". *Norma española*, septiembre 2010.
- 17- PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. "A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials". *Fuel*, 2007, **86**(12), 1710-1719. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.06.028>
- 18- ALMANSA CARRASCOSA, M. C. Preparación de discos de carbón activado químicamente para almacenamiento de metano, 2021. Tesis de doctorado. Universidad de Alicante. España. URL: <http://hdl.handle.net/10045/9102>
- 19- DAMARTZIS, Th. *et al.* "Thermal degradation studies and kinetic modeling of cardoon (*Cynaracardunculus*) pyrolysis using thermogravimetric analysis (TGA)". *Bioresource technology*, 2011, **102**(10), 6230-6238. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00009-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00009-2)
- 20- CARDOSO, C. R.; MIRANDA, M. R.; SANTOS, K. G.; ATAÍDE, C. H. "Determination of kinetic parameters and analytical pyrolysis of tobacco waste and sorghum bagasse". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2011, **92**, 392-400. doi: <http://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.07.013>
- 21- Feng Xu *et al.* "Qualitative and quantitative analysis of lignocellulosic biomass using infrared techniques: A mini-review". *Applied Energy*, 2013, **104**, 801-809. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.12.019>

DECLARACIÓN CONFLICTO DE INTERESES

No se declaran conflictos entre los autores

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Dannis Adrián Cascaret Carmenaty: concepción de la investigación y diseño metodológico de la misma, realización de la parte experimental, discusión de los resultados.

Roilan Alexis Odio González: realización de la parte experimental, discusión de los resultados.

Manuel Ángel Cantos Macías: preparación de las hojas de cálculo para la realización de los estudios cinéticos, diseño y confección de la cámara de pirolisis, y discusión de los resultados.

Maylen Caballero Fuentes: realización de la parte experimental, discusión de los resultados.

Omaida Quesada González: concepción de la investigación y diseño metodológico de la misma, discusión de los resultados y escritura del artículo. Revisión y aprobación de la versión final de la publicación.