

Caracterización química del bio-aceite de pirólisis rápida de biomasa

Chemical characterization of bio-oil of the fast pyrolysis from biomass

Roberto Alfonso Viltres-Rodríguez^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-3634-5284>

Alejandro Alarcón-Zayas¹ <https://orcid.org/0000-0002-3539-3938>

¹Departamento de Química, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad de Granma Granma, Cuba

*Autor para la correspondencia: rviltrer@udg.co.cu

RESUMEN

La biomasa de procesos agrícolas es un importante recurso para la pirólisis rápida y su transformación en bio-aceite y productos de alto valor agregado. Para la caracterización físico-química de la biomasa y el bio-aceite, se emplearon varias normas de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (SAPM). Se obtuvieron muestras representativas de bio-aceite 0,82 t; ácido piroleñoso 0,18 t; gases no condensables 0,25 t; carbón 0,42 t; por pirólisis rápida de la mezcla de Capín de Elefante (*Pennisetum purpureum*) con paja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). Se identificaron por cromatografía gaseosa con detector de masa en dos fracciones del bio-aceite, 93 compuestos orgánicos pertenecientes a los ácidos carboxílicos, fenoles, derivados del furano, éteres de la lignina, una serie homóloga de n-alcenos de alta masa molar y algunos compuestos aromáticos nitrogenados. El poder calórico del bio-aceite es de 20,20 MJ kg⁻¹, facilitando su posible uso como bio-combustible.

Palabras clave: Capín de Elefante; paja de caña de azúcar; pirólisis rápida; bio-aceite; cromatografía gaseosa.

ABSTRACT

Biomass from agricultural processes is an important resource for fast pyrolysis and its transformation into bio-oil and high added value products. Several Standards of American Society for Testing and Materials (ASTM) were used in order to the physical-chemical characterization of the biomass used and the bio-oil obtained. Representative samples of bio-oil 0,82; pyroligneous acid 0,18 t , non-condensable gases 0,25 t and carbon 0,42 t were obtained by the fast pyrolysis from a mixture of Elephant Capín (*Pennisetum purpureum*) with sugar cane (*Saccharum officinarum*) straw. Ninety three organic compounds belonging to carboxylic acids, phenols, derivatives of furan, ethers of lignin, a homologous series of n-alkanes from the bio-oil, and some aromatic nitrogenous compounds of high molar mass by gas chromatography with mass detector were identified. The caloric power of bio-oil is 20,20 MJ kg⁻¹, facilitating its possible use as a biofuel.

Keywords: Elephant Capin; sugar cane straw; fast pyrolysis; bio-oil; gas chromatography.

Recibido: 4/11/2021

Aprobado: 1/12/2021

Introducción

Entre los problemas actuales que enfrenta la humanidad están: el agotamiento no lejano de los combustibles fósiles, el cambio climático, la insuficiente producción de alimentos y la crisis energética mundial.⁽¹⁾

El aumento de la demanda de energía, la variabilidad de los precios de las fuentes de energía primarias y los problemas medioambientales que se derivan de su utilización, hacen que los gobiernos de muchos países comiencen a promocionar el uso de energías renovables. Su finalidad es reducir el impacto ambiental provocado por la utilización de los combustibles fósiles tradicionales, como son el petróleo, el carbón y el gas natural.⁽²⁾

El término “biomasa” es utilizado para describir toda la materia producida biológicamente. Se estima que cada año se generan a nivel mundial alrededor de $1 \cdot 10^{10}$ millones de toneladas de este preciado recurso.⁽³⁾

Una de las grandes ventajas del uso de la biomasa es la de ser considerada una fuente de energía limpia, debido al bajo contenido en nitrógeno, azufre y cenizas, lo que hace insignificantes las emisiones a la atmósfera de dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x) como gases causantes del calentamiento global del planeta.⁽⁴⁾

La producción azucarera ha demostrado ser capaz de satisfacer parte de la alimentación directa a la humanidad. Muchos de sus derivados constituyen fuentes de alimentación animal, los que a su vez complementan la dieta proteica de los seres humanos. Sin embargo, la biomasa resultante de la cosecha cañera (la paja de caña) y otras generadas en los procesos agrícolas como el Capín de Elefante, no son empleados en la cuantía que las circunstancias actuales lo exigen, a pesar de representar un formidable recurso como fuente de alimentación animal y generación de energía.⁽⁵⁾

Desde el punto de vista químico, la biomasa es compleja al estar constituida por tres grandes biopolímeros naturales: celulosa, hemicelulosa y lignina. La descomposición térmica rompe los enlaces de estas moléculas, liberando su energía, y se obtienen productos finales de alto valor añadido que pueden ser utilizados con fines energéticos y otras aplicaciones de interés industrial y en la agricultura. No obstante, el empleo de la biomasa como materia prima para la producción de biocombustibles, exige reducir la complejidad de los biopolímeros que la componen y transformarlos en moléculas más simples.⁽⁶⁾

Los procesos de conversión termoquímica permiten usar la energía contenida en la biomasa. Los mismos, van desde la combustión directa de la biomasa hasta la pirólisis. Esta tecnología se ha convertido en un proceso atractivo y prometedor para transformarla en productos como: gases no combustibles, aceites y char, biochar o biocarbón o residuo carbonoso.⁽⁷⁾

Las fracciones líquidas de la pirólisis, bio-aceite y ácido piroleñoso se obtienen por enfriamiento y condensación de los gases producidos durante este proceso. Dependiendo del tipo de biomasa tratada, el tipo de proceso empleado, las variables implicadas y la complejidad en las operaciones, se pueden obtener productos con usos muy específicos.⁽⁸⁾

Se han publicado innumerables trabajos sobre la obtención de aceites de pirólisis a partir de la biomasa.⁽⁹⁻¹¹⁾ Algunos autores han trabajado en la identificación de los compuestos presentes

en estos productos.⁽¹²⁻¹³⁾ Sin embargo, el trabajo es agotador y complejo por la heterogeneidad y variabilidad en la composición. Ello hace que el número de especies químicas que han sido reportadas en la pirólisis de la biomasa sea enorme, y se convierta en uno de los mayores problemas a la hora de caracterizar y diversificar los productos obtenidos.⁽¹⁴⁻¹⁵⁾ El desconocimiento de la composición del bio-aceite resultante de la pirólisis de mezclas de biomásas utilizadas en este estudio, es la principal problemática de esta investigación.

La composición de los bio-aceites de pirólisis tiene una influencia determinante en su utilización, y sus propiedades combustibles dependen de la viscosidad, el contenido de humedad, la presencia de compuestos oxigenados, y de material insoluble. Todo ello hace que el bio-aceite sea altamente oxigenado y químicamente inestable.⁽¹⁶⁾

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar químicamente el bio-aceite obtenido de la pirólisis rápida de mezclas de Capín de Elefante con paja de caña de azúcar, a través de la aplicación de varias normas de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales y el empleo del método de cromatografía gaseosa con detector de masa.

Materiales y métodos

Caracterización de la biomasa

La biomasa empleada en el proceso de pirólisis rápida con tecnología de lecho fluidizado (PPR-200) fue una mezcla de Capín de Elefante (*Pennisetum purpureum*) y paja de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). Los análisis físico-químicos realizados fueron: análisis elemental (ASTM D591-92)⁽¹⁷⁾ con instrumento MAC-400 y un equipamiento CHN-600 de LECO, análisis inmediato (ASTM D1762-84)⁽¹⁸⁾ y análisis del contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, usando la técnica termogravimétrica con equipamiento Universal V 2.3C TA Instruments, siguiendo la metodología propuesta por García-Pérez *et al.*⁽¹⁹⁾

Experimentos en la planta de pirólisis rápida (PPR-200)

Las pruebas fueron realizadas en la planta de pirólisis rápida (PPR-200), como se muestra en la figura 1, la cual está instalada en el Centro de Tecnología Copersucar en el Estado de São

Paulo, Brasil. Las principales partes que forman la planta son: sistema de alimentación de biomasa compuesto por estera transportadora (1), silo (2), dosificador de biomasa (3), rosca alimentadora (4), reactor de lecho fluidizado (5) con placa distribuidora de aire (6), dos ciclones en serie para separar los finos de carbón (7), válvula toma muestra de carbón (8) con tambores para almacenar carbón (9), sistema de recuperación de finos de carbón vía húmeda (10), sistema de recuperación de bio-aceite (11) y chimenea (12).

El reactor cilíndrico de acero al carbono con diámetro interno de 417 mm, revestido internamente con aislamiento térmico refractario, fue alimentado con 200 kg h^{-1} de biomasa polidispersa seca y caracterizada, utilizando un lecho de material inerte de SiO_2 con partículas de 0,164 mm de diámetro y 0,6 mm de esfericidad media del fabricante BRASILMINAS industria y comercio Ltda., de São Paulo de 99,66 % de pureza, durante su operación. El sistema de adquisición de datos registró y almacenó la temperatura y la presión estática a lo largo del reactor y en la salida del sistema de recuperación. El control de los datos incluyó la retirada de las muestras representativas de carbón en la sección de bajo de los ciclones y el bio-aceite en el sistema de recuperación.

Para la obtención de los productos de la pirólisis rápida, el reactor fue calentado utilizando carbón vegetal del proceso de carbonización de la leña de Eucalipto, proceso que continuó hasta que el lecho de la arena de sílice alcanzó una temperatura media entre 500-550 °C. En estas condiciones, el flujo másico de aire establecido fue de $86,5 \text{ kg h}^{-1}$. El proceso de alimentación de la biomasa seca y polidispersa se inició en un régimen constante de 200 kg h^{-1} . La toma final de las muestras de carbón, bio-aceite y ácido piroleñoso, se realizó cuando las temperaturas a lo largo de la altura del reactor correspondían con las condiciones de régimen estacionario. El tiempo de duración de la corrida experimental fue de 9 h.

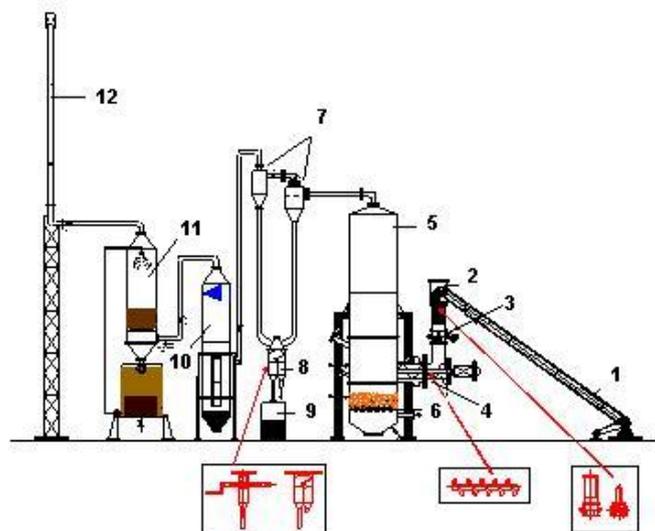


Fig. 1- Esquema de la planta de pirólisis rápida, Brasil (PPR-200)

Separación del bio-aceite en fracciones

En el procedimiento empleado para separar los compuestos orgánicos presentes en el bio-aceite, 10 g de este material fueron tratados con 50 mL de éter etílico (99,5 % de pureza, producido y comercializado por la Merck) y filtrado a presión reducida para separar los finos de carbón. A la capa etérea resultante se le añadieron porciones de solución de NaHCO_3 al 5 % (preparado del reactivo NaHCO_3 al 99,7 % de pureza, producido y comercializado por la Merck) hasta que la fase acuosa quedase ligeramente básica. A la fase acuosa se le añadió HCl al 5 % (preparado del reactivo HCl al 37 % de pureza, producido y comercializado por la Merck) y se extrajeron los compuestos orgánicos solubles en éter etílico (Fracción A). La fase orgánica resultante fue llamada (Fracción B).

Preparación de derivados para análisis por cromatografía gaseosa con detector de masa (CG-MS)

Se añadieron 3 mL de cada una de las fracciones obtenidas en frascos de vidrio y se secaron con MgSO_4 anhidro de 99,8 % de pureza, producido y comercializado por la Merck. Posteriormente se filtró y se coló 1,5 mL de cada una de las muestras en frascos de vidrio; se adicionaron 5 mL de imidazol (99,99 % de pureza, producido y comercializado por la Merck) y 30 μL del reactivo N,O-bis(trimetilsilil)acetamida (99,99 % de pureza, producido y

comercializado por la Merck). La mezcla fue sometida a ultrasonido por 15 min para generar los correspondientes derivados siloxanos.

Las muestras listas para el análisis fueron inyectadas (2 μL) en el cromatógrafo gaseoso modelo Saturn 2100D fabricado por la Varian, equipado con detector de masa. La columna capilar utilizada fue CP-Sil 8CB low bleed/MS, 5 % difenil, 95 % dimetilpolisiloxano de 30 m de largo, 0,25 mm de diámetro interno y 0,25 μm de espesura filme.

Las temperaturas del inyector fueron de 280 °C con modo Split (1:20). Después de un período isotérmico de 4 min a 40 °C, fue realizada la siguiente programación: 2 °C min^{-1} hasta 120 °C por 10 min, 6 °C min^{-1} hasta 240 °C por 10 min y 20 °C min^{-1} hasta 300 °C por 10 min. El tiempo total de registro fue de 40 min. Se utilizó como gas de arrastre el helio con una pureza de 99,999 9 % a una velocidad de 1 mL min^{-1} . Las condiciones de trabajo del detector EM-AI fueron: línea de transferencia 290 °C; Manifold 40 °C; Solvent Delay 4,0 min; Trap 150 °C; Energía de ionización 70 eV; modo de barradura de masa scan (1seg scan^{-1}) de 40-500 Dalton.

Identificación de los compuestos

Para la identificación de los compuestos encontrados en cada fracción se utilizó la base de datos de espectros de masas NIST98 (129.136 espectros de masas), y el programa AMDIS (Automatic Mass Spectral Deconvolution and Identification System). También fue inyectada como patrón una mezcla de hidrocarburos de la serie n-alcános entre C_{10} y C_{25} para la identificación de los hidrocarburos presentes en las muestras.

Caracterización físico-química del bio-aceite

Para la caracterización físico-química del bio-aceite, los materiales insolubles en CH_3OH y el contenido de lignina pirolítica, fueron determinados por los métodos descritos por Oasmaa *et al.*⁽²⁰⁾ El contenido de agua se determinó por el método Kart Fischer (ASTM D1744-88).⁽²¹⁾ La viscosidad cinemática fue medida con un viscosímetro Cannon-Fenske (ASTM D445-88).⁽²²⁾ La densidad fue determinada usando picnómetros de 25 mL (ASTM D4052-88).⁽²³⁾ El poder calórico se determinó usando una bomba calorimétrica (ASTM D4809-00).⁽²⁴⁾

Resultados y discusión

Resultados de la caracterización de la biomasa

El análisis de la composición química elemental (tabla 1) muestra que las biomásas son abundantes en carbono y oxígeno, presentan bajo contenido de azufre y nitrógeno respecto a la relación molar H/C y O/C. La composición química del material lignocelulósico está expresada en el contenido de celulosa (40,30-45,10 %), hemicelulosa y extractivos (32,10-32,40 %) y lignina (22,50-27,60 %). Ambos materiales presentan un alto porcentaje en celulosa, por tanto, tienden más fácilmente a volatizarse durante la pirólisis y a generar menor porcentaje de carbón.

El mayor contenido de carbono fijo y de volátiles de la paja de caña de azúcar, justifica su más alto poder calórico $17,35 \text{ MJ kg}^{-1}$ con respecto al Capín de Elefante de $16,8 \text{ MJ.kg}^{-1}$. No obstante, ambas biomásas representan una fuente atractiva para sus aplicaciones en el campo de la termoenergía.

El contenido de humedad de ambos materiales lignocelulósicos (11,98-14 %), forma parte de la fase acuosa obtenida de bio-aceite y del ácido piroleñoso después de proceso de pirólisis, el cual divide el bio-aceite en fracciones y dificulta su aplicación como bio-combustible.

El alto contenido de cenizas (7,10-11 %) tiene influencia marcada en los rendimientos y en las características del bio-aceite y el carbón obtenido en el proceso de pirólisis.

El tamaño de las partículas influye directamente en el desarrollo de los fenómenos de conducción térmica en el sólido. Un incremento del tamaño de las partículas provoca una disminución de la conducción térmica en el sólido, trayendo consigo que el régimen de calentamiento dentro de la partícula sea menos intenso, y varíen así los rendimientos de los productos de la pirólisis obtenidos.

Tabla 1- Propiedades físico-químicas del Capín de Elefante y la paja de caña de azúcar

Propiedades	Unidades	Paja de caña de azúcar	Capín de Elefante
Composición elemental.			
(Libre de cenizas)			
C	% (m)	44,51 ± 0,51	43,16 ± 0,51
H	% (m)	5,47 ± 0,09	5,55 ± 0,08
N	% (m)	0,73 ± 0,06	1,78 ± 0,15
S	% (m)	< 0,15	< 0,15
O (por diferencia)	% (m)	49,29 ± 0,30	49,51 ± 0,50
Análisis inmediato			
Humedad	% (m)	11,98 ± 0,10	14 ± 0,12
Volátiles	% (m)	75,60±0,45	74,00 ± 0,5
Cenizas	% (m)	7,10 ± 0,15	11,00 ± 0,13
Carbono fijo	% (m)	19,30 ± 0,18	15,00 ± 0,14
Poder calórico superior	MJ kg ⁻¹	17,35 ± 0,42	16,8 ± 0,5
Composición química			
(Libre de cenizas y agua)			
Hemicelulosa y extractivos	% (m)	32,40	32,10
Celulosa	% (m)	45,10	40,30
Lignina	% (m)	22,50	27,60
Otras propiedades			
Densidad real de las partículas	kg m ⁻³	1 440 ± 20	1 468±7
Densidad aparente de las partículas	kg m ⁻³	535 ± 15	763 ± 14
Porosidad de las partículas	mm	0,63 ± 0,37	0,48 ± 0,01
Distribución del tamaño de partícula	mm	0,55<Dp<1,25	1,68<Dp<2,38

La porosidad de este material (tabla 1) facilita los fenómenos de transferencia de calor por convección, conducción y radiación que generan, a su vez, productos de las reacciones de descomposición como: carbón, gases y vapores.

Y por último, la densidad influye en los rendimientos, si la densidad de la biomasa a ser pirolizada aumenta, disminuye el rendimiento de alquitrán primario y aumenta el rendimiento de carbón y gas, favoreciéndose más el proceso de carbonización del material. Los resultados obtenidos de la caracterización físico-química de la biomasa empleada son similares a los reportados por Volpe *et al.*⁽¹⁴⁾ en cuanto al efecto sinérgico entre el contenido de lignina y celulosa en el proceso de pirólisis de los residuos agrícolas.

Análisis de los rendimientos de los productos de la pirólisis

Del análisis de la tabla 2 se deduce que las reacciones de descomposición de la biomasa ocurridas generaron condensado líquido (bio-aceite-ácido piroleñoso) 60 % (1,003 t), carbón 25 % (0,417 t) y gases no condensables 15 % (0,250 t).

El condensado líquido obtenido estaba formado por dos fases, una acuosa caracterizada por la presencia de agua y compuestos orgánicos de baja masa molar y alta polaridad, y la otra orgánica, donde prevalecían los compuestos orgánicos de mayor masa molar y baja polaridad.

Tabla 2- Rendimientos de los productos de la pirólisis rápida *

Productos	Cantidad (t)	Rendimiento (% m)
Bio-aceite	0,822	49,20
Ácido piroleñoso	0,181	10,80
Carbón	0,417	25,00
Gases no condensables	0,250	15,00
Total	1,670	100

*Condiciones de pirólisis: biomasa alimentada: 200 kg h⁻¹, temperatura media del reactor: 500-550 °C, agente fluidizante: aire, flujo de aire másico: 86,5 kg h⁻¹, tiempo de residencia de las partículas: < 2s, tamaño de partícula: < 2 mm. Tiempo de duración de la corrida experimental: 9 h.

El rendimiento de los productos del proceso de pirólisis rápida, específicamente el bio-aceite, está en el rango de 50-75 %, similar al obtenido por otras tecnologías propuestas por Shun-

Feng *et al.*⁽¹³⁾ El rendimiento de los productos de la pirólisis depende de la composición y contenido de agua de la biomasa, así como de la temperatura de pirólisis y el tiempo de residencia de los vapores.⁽¹⁴⁾

Análisis de las fracciones caracterizadas por cromatografía gaseosa (CG/MS)

Las fracciones obtenidas del bio-aceite fueron caracterizadas por cromatografía gaseosa con detector de masa en la Central Analítica del Instituto de Química de la Universidad Estadual de Campinas (UNICAMP), Brasil.

El criterio de comparación usado para la identificación de los compuestos orgánicos fue la superposición de, al menos, 8 picos del cromatograma de la muestra patrón con la analizada. Ambas fracciones mostraron perfiles cromatográficos complejos, se identificaron 93 compuestos orgánicos, 51 en la fracción A y 42 en la fracción B.

La caracterización química del bio-aceite de la fracción A (tabla 3) y la fracción B (tabla 4) se realizó sobre la base de los picos identificados, tiempo de retención y la masa molar de los fragmentos y de los iones moleculares.

La cuantificación de los componentes se basó en la relación de área del pico entre el componente y el estándar interno, en comparación con la curva estándar trazada entre la relación de área del pico frente a la relación de concentración entre el componente y el estándar interno.

Tabla 3- Caracterización química del bio-aceite de la fracción A por GC-MS

No. Pico	Tiempo retención (min)	Compuestos detectados (Identificados)	Fórmula molecular	Masa molar (g mol ⁻¹)	Ion (m z ⁻¹)	Abundancia relativa (%)
1	4,000	ácido propionico	C ₃ H ₆ O ₂	74	45, 57, 74, 83, 102	1,55
2	4,670	1-hidroxi-2-propanona	C ₃ H ₆ O ₂	74		0,13
3	5,251	ácido butanoico	C ₄ H ₈ O ₂	88	29, 43, 60, 71, 88, 101	0,32
4	6,270	ácido 4-hidroxibutanoico	C ₄ H ₈ O ₃	104	31, 42, 56, 86,103	0,11
5	8,296	furfural	C ₅ H ₄ O ₂	96	45, 53, 66, 82, 95,105	1,00
6	8,945	ácido 2-butenico	C ₄ H ₆ O ₂	86	41, 55, 69, 86, 99	0,10
7	9,403	ácido 3-metilbutanoico	C ₅ H ₁₀ O ₂	102	41, 57, 70, 85, 103, 115	0,12
8	12,108	ácido pentanoico,	C ₅ H ₁₀ O ₂	102	41, 57, 73, 85, 101, 115	0,69
9	12,229	2-metil-2-ciclopenteno-1-ona,	C ₆ H ₈ O	96	41, 53, 67, 81, 96	0,60
10	12,585	1-(2-furanyl)-etanona	C ₆ H ₁₀ O ₂	120	39, 67, 81, 95, 110	0,25
11	13,097	ácido 3-pentenoico	C ₅ H ₈ O ₂	100	43, 55, 69, 83, 100, 128	0,50
12	13,359	ácido 4-pentenoico	C ₅ H ₈ O ₂	100	43, 55, 69,	0,21

					83, 100, 113	
13	13,501	1-metil-1-pentanol	$C_6H_{14}O$	102	143, 75, 99	0,13
14	13,767	2,5-Hexanodiona	$C_6H_{10}O_2$	114	51, 71, 81, 99, 114	0,31
15	14,328	5-metil-2(5H)-furanona	$C_5H_8O_2$	97	43, 55, 69, 83, 98	0,14
16	14,516	ácido 2-metileno-butanoico	$C_5H_8O_2$	100		0,17
17	15,340	ácido 2-metil-2-butenoico	$C_5H_8O_2$	100	207, 295, 73	0,16
18	16,058	3-metil-2-ciclopenteno- 1-ona,	C_6H_8O	96	41, 53, 67, 97, 109, 129	0,41
19	16,110	ácido 2-pentenoico	$C_5H_8O_2$	100	151, 91, 45	0,39
20	16,370	ácido 4-metilpentanoico	$C_6H_{12}O_2$	116	43, 60, 73, 81, 88, 101,	0,27
21	16,856	3-metil-2(5H)-furanona	$C_5H_8O_2$	98	41, 53, 69, 98	0,09
22	16,884	ácido furoico	$C_5H_4O_3$	112		0,29
23	17,525	fenol	C_6H_6O	94	31, 39, 55, 66, 74, 94	0,08
24	18,548	2,5-dihidroxi-3,5- dimetil-2-furanona	$C_6H_8O_2$	112	41, 55, 69, 83, 97, 112	0,15
25	18,716	ácido hexanoico	$C_6H_{12}O_2$	116	43, 60, 73, 99, 129, 144	0,22

26	20,806	3-metil-1,2-ciclopentanodiona	$C_6H_8O_2$	112	41, 55, 69, 97, 112, 137	0,30
27	21,111	3,4-dimetil 2-ciclopenteno-1-ona,	C_7H_9O	109	41, 53, 81, 95, 110, 124	0,05
28	21,163	ácido butanodioico	$C_4H_6O_4$	118		0,16
29	21,633	4-metil-5H-furano-2-ona	$C_4H_6O_2$	86	41, 50, 69, 112,124 139	1,21
30	22,519	3,4-dimetil-2-hidroxi-2-ciclopenteno-1-ona,	$C_7H_{10}O_2$	126	41, 55, 83, 98, 126, 140	0,61
31	22,768	2-metilfenol	C_7H_8O	108	51, 63, 79, 89, 108	0,35
32	23,232	ácido 4-oxopentanoico	$C_5H_8O_3$	116	43, 55, 74, 99, 129, 144	0,25
33	23,496	ácido pentanodioico	$C_5H_8O_4$	132		0,33
34	24,153	2,5-dihidroxi-3-etil-5-metil-2-furanona	$C_7H_{10}O_2$	126	41, 69, 83, 97, 126, 140	0,09
35	24,258	4-metilfenol	C_7H_8O	108	51,63,77,91	0,29
36	24,779	4-metoxifenol	$C_7H_8O_2$	124	39, 53, 65, 81, 109, 124	1,10
37	25,183	ácido 4-heptenoico	$C_7H_{12}O_2$	128	41, 55, 68, 110,127,141	0,19
38	25,825	ácido heptanoico	$C_7H_{14}O_2$	130	43, 60, 73, 113, 129,	0,21

39	27,073	3-etil-2-hidroxi-2-ciclopenteno-1-ona,	C ₇ H ₁₀ O ₂	126	43, 55, 69, 83, 97, 126	0,59
40	30,723	2-etilfenol	C ₈ H ₁₀ O	138	182, 73, 167	0,70
41	30,774	4-etilfenol	C ₈ H ₁₀ O	138	39, 51, 65, 77, 107, 122	0,68
42	30,888	ácido benzoico	C ₇ H ₆ O ₂	122	27,37,51,91 105,122,132	0,23
43	31,270	ácido 3-metilbenzoico	C ₈ H ₈ O ₂	136	179, 210, 78	0,17
44	32,907	ácido octanoico	C ₈ H ₁₆ O ₂	144	183, 75, 45	0,12
45	33,115	ácido 4-hidroxibenzoico	C ₇ H ₆ O ₃	138	268,223 193	0,27
46	33,228	ácido 4-metilbenzoico	C ₈ H ₈ O ₂	136	179, 210, 75	0,37
47	33,560	ácido metilsuccínico	C ₅ H ₈ O ₄	132	29, 43, 55, 101,115,129	0,10
48	38,071	ácido bencenpropanoico	C ₉ H ₁₀ O ₂	150	162, 310, 73	0,24
49	40,120	ácido 4-hidroxihidrocínamico	C ₉ H ₁₀ O ₃	166	162, 31, 75	0,36
50	43,032	2,6-dimetoxifenol	C ₈ H ₁₀ O ₃	154	39, 51, 111, 125,139,154	4,50
51	56,646	3,4-dihidroxiacetofenona	C ₈ H ₈ O ₃	152	43,109,123, 137, 157	0,21

En la fracción A fueron identificados ácidos carboxílicos de baja y alta masa molar, compuestos fenólicos (fenol y fenoles sustituidos), alcoholes, cetonas, furfural y derivados del furano.

La identificación de 29 ácidos carboxílicos representa el 54,9 % de la fracción; fue reconocida la presencia de compuestos de cadena lineal de 4 átomos de carbono saturado y no saturado, compuestos aromáticos (ácido benzoico y sus derivados).

Es probable que, debido al alto contenido de oxígeno en la celulosa de la biomasa empleada, su descomposición térmica durante la pirólisis generase principalmente compuestos oxigenados, que pueden tener polaridad muy diferente según el tipo de grupo funcional oxigenado.

Los ácidos carboxílicos propanoico y butanoico proceden, principalmente, de la escisión de los grupos acetyl de la hemicelulosa.⁽²⁶⁾

En la fracción B (tabla 4) se identificaron 42 compuestos orgánicos, muy rica en compuestos fenólicos, fenol y sus derivados, fenol sustituido por el grupo metilo (-CH₃) en las posiciones 2, 3 y 4 del anillo bencénico, fenoles sustituidos por el grupo etilo (-CH₂-CH₃) y el grupo metoxilo (-OCH₃), otros sustituidos por grupos más complejos, algunos son éteres de la lignina y difenoles (1,3-dihidroxibenceno y 1,4-dihidroxibenceno).

Tabla 4- Caracterización química del bio-aceite de la fracción B por GC-MS

No. Pico	Tiempo retención (min)	Compuestos detectados (Identificados)	Fórmula molecular	Masa molar (g mol ⁻¹)	Ion (m z ⁻¹)	Abundancia relativa (%)
1	17,445	fenol	C ₆ H ₆ O	90	39, 55, 66, 74, 94	1,06
2	22,595	2-metilfenol	C ₇ H ₈ O	108	43, 51, 63, 79, 89, 108	0,27
3	24,206	4-metilfenol	C ₇ H ₈ O	108	43, 51, 63, 77, 91, 107	0,23
4	25,185	3-metilfenol	C ₇ H ₈ O	108	138,123,67	0,25
5	26,710	4-metoxifenol	C ₇ H ₈ O ₂	124	39, 53, 65, 81,109,124	1,08
6	28,716	2-etilfenol	C ₈ H ₁₀ O	138	39, 51, 63, 77, 107, 122	0,75

7	30,132	2-metoxi-4-metilfenol	C ₈ H ₁₀ O ₂	122	39, 55, 67, 107,123,138	0,89
8	31,323	1,2-dihidroxibenceno	C ₆ H ₆ O ₂	110	169, 182, 151	0,45
9	32,540	4-hidroxibenzaldehido	C ₇ H ₆ O ₂	122	121, 182, 65, 151	0,92
10	33,125	3-hidroxi-4- metoxibenzaldehido	C ₈ H ₈ O ₃	152	194, 151, 179	0,98
11	33,250	3-hidroxiopropiofenona	C ₉ H ₁₀ O ₂	150	151, 81, 53	0,24
12	33,520	2,6-dimetilfenol	C ₈ H ₁₀ O	122	194, 179, 73	0,17
13	33,775	1-cloro-4- metoxinaftaleno	C ₁₀ H ₉ OCl	159	192, 177, 151	0,03
14	34,102	2,6-dimetil-4- fenilpiridina	C ₁₃ H ₁₃ N	183	192, 151, 73, 45	0,02
15	34,501	2,3-dihidrobzofurano	C ₈ H ₈ O	120	51, 63, 77, 91,105,120	1,36
16	35,453	1,3-dihidro-2H-indeno-2- ona	C ₉ H ₈ O	132	132, 104, 78, 50	0,92
17	36,570	2-etil-6-metilfenol	C ₉ H ₁₂ O	136	39, 51, 91, 107,121,136	0,12
18	37,994	4-etil-2-metoxifenol	C ₉ H ₁₂ O ₂	152	51, 65,109, 122,137,152	0,15
19	40,497	2-metoxi-4-vinilfenol	C ₉ H ₁₀ O ₂	150	51, 63, 77, 107,118,135	0,13
20	41,260	1-metoxifenazina	C ₁₃ H ₁₀ ON	196	179,210,195	0,01

21	42,130	2-metoxifenazina	C ₁₃ H ₁₀ ON	196	206,191,137	0,02
22	43,007	2,6-dimetoxifenol	C ₈ H ₁₀ O ₃	154	51, 65, 79, 125,139,154	2,45
23	44,225	1,3-dihidroxibenceno	C ₆ H ₁₆ O ₂	120	254, 73, 45	0,21
24	45,125	1,4-dihidroxibenceno	C ₆ H ₁₆ O ₂	120	254, 75, 45	0,37
25	50,178	3-alil-6-metoxifenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	180	55, 65, 77, 131,149,164	0,09
26	55,580	1,2,4-trimetoxibenceno	C ₉ H ₁₂ O ₃	168	52, 69, 79, 137,153,168	0,11
27	60,120	4-hidroxifeniletanol	C ₈ H ₁₀ O ₂	154	73, 282, 267	0,41
28	63,930	2-metoxi-4-(1-propenil)fenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	164	55, 65, 77, 131,149,164	1,32
29	64,322	2-hexil-5-hexiloctahidro-1H-indeno	C ₂₁ H ₄₀	292	41, 57, 81, 151,165,179	0,03
30	65,723	2,6-dimetoxi-4-(2-propenil)fenol	C ₁₁ H ₁₄ O ₃	194	103, 119, 131, 147	1,42
31	66,160	1-(4-hidroxi-3-metoxifenil)etanona	C ₉ H ₁₀ O ₃	166	43, 65, 77, 123,136,151	0,10
32	66,920	2,6-diterbutil-4-metilfenol	C ₁₅ H ₂₄ O	220	205,220,177	0,13
33	67,560	ácido hexadecanoico	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	272	57, 71, 85, 41	0,09
34	68,237	ácido octadecanoico	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	300	117, 75, 55	0,07
35	69,810	n-hexadecano	C ₁₆ H ₃₄	226	57, 71, 85	0,02

36	70,210	n-octadecano	C ₁₈ H ₃₈	254	97, 57,123	0,01
37	71,577	n-eicosano	C ₂₀ H ₄₂	282	57, 71, 85	0,03
38	72,227	n-docosano	C ₂₂ H ₄₆	310	117, 75,41	0,01
39	74,314	n-tetracosano	C ₂₄ H ₅₀	338	51, 71, 85,	0,04
					41, 111	
40	76,909	n-hexacosano	C ₂₆ H ₅₄	366	57, 71, 85,	
					41,111,125	0,02
41	77,280	n-octacosano	C ₂₈ H ₅₈	390	57, 71, 85,	0,03
					41,111,139	
42	79,501	n-triacontano	C ₃₀ H ₆₂	422	57, 71, 85,	0,01
					44, 97	

En esta fracción se reportan dos hidrocarburos policondensados nitrogenados (1-metoxifenazina y 2-metoxifenazina), dos ácidos carboxílicos de elevada masa molar (ácido hexadecanoico y ácido octadecanoico), así como, una serie de n-alcanos saturados de cadena lineal de elevada masa molar de C₁₆-C₃₀.

Se ha demostrado en trabajos realizados por Demiral⁽²⁵⁾ y Demirbas⁽²⁶⁾ que a medida que se incrementa la temperatura, las reacciones de pirólisis de la lignina favorecen la formación de compuestos que enriquecen los alquitranes o fracción insoluble (FI). Esto se debe, principalmente, a la ruptura de los enlaces más reactivos, como el enlace C-O de los grupos metoxilo y las reacciones de condensación de los productos de elevada masa molar que le siguen. La formación de compuestos a partir de la lignina es el resultado de la ruptura de estos enlaces relativamente débiles y la consiguiente formación de estructuras más resistentes. Esta degradación da lugar a la formación de compuestos aromáticos y compuestos fenólicos, principalmente, metoxifenoles y metilfenoles.⁽²⁵⁻²⁶⁾

En la tabla 5 se muestran los resultados cuantitativos correspondientes al porcentaje de la familia de compuestos identificados en el bio-aceite.

La familia de compuestos que predomina dentro del bio-aceite son los fenoles y derivados con 19,15 %; los ácidos carboxílicos con 8,10 %; aldehídos y cetonas con 6,24 %; los derivados del furano con 3,14 %. Las restantes familias de compuestos oxigenados solo contribuyen con

el 1,67 %. Es meritorio destacar que en la composición del bio-aceite predominan los compuestos oxigenados que representan el 99,56 % y los no oxigenados que están formados por una serie de n-alcenos saturados de cadena lineal de elevada masa molar de C₁₆-C₃₀ representan solo el 0,44 %.

Tabla 5- Porcentaje de compuestos identificados en el bio-aceite

Familia de compuestos	Identificados	Fracción		% en el bio-aceite
		A	B	
Ácidos carboxílicos	29	27	2	8,10
Fenoles y derivados	27	7	20	19,15
Cetonas	11	8	3	4,34
Aldehídos	2	-	2	1,90
Alcoholes	2	1	1	0,54
Derivados del furano	8	7	1	3,14
n-alcenos saturados (C ₁₆ -C ₃₀)	8	-	8	0,17
Policondensados nitrogenados	3	-	3	0,05
Otros compuestos	3	1	2	1,08
Total	93	51	42	38,48

Análisis de las propiedades físico-químicas del bio-aceite

En la tabla 6 se presentan los resultados de los análisis de algunas propiedades físico-químicas determinadas al bio-aceite obtenido en el proceso de pirólisis rápida.

Tabla 6- Propiedades físico-químicas del bio-aceite

Propiedades	Unidades	bio-aceite obtenido	Otros bio-aceites ⁽²⁵⁾
Composición Elemental			
C	% (m)	61,10±0,5	48,00-63,50
H	% (m)	7,64±0,02	5,20-7,20
N	% (m)	1,22±0,01	0,07-0,39
S	% (m)	<0,15	0,00-0,05
O (por diferencia)	% (m)	30,04±0,17	32,00-46,00
Color		Negro	Marrón
Humedad	% (m)	10,80	10,20-35,00
Densidad 20 °C	kg m ⁻³	1 400	1 208-1 238
Viscosidad cinemática 20 °C	cSt	~ 2 000	50-672
Lignina pirolítica	% (m)	86	15-30
Contenido de sólidos insolubles en metanol	% (m)	7,2	0,17-1,14
pH	Unidades	2,9	2,0-3,8
Poder calórico superior	MJ kg ⁻¹	20,20	15-24,3

El bio-aceite obtenido es líquido de color negro, rico en su composición química elemental en carbono y oxígeno, de olor fuerte y penetrante, con una viscosidad cinemática muy alta (~2 000 cSt) provocada por cantidades significativas de finos de carbón (7,2 %) y lignina pirolítica insoluble (86 %). Su elevada acidez (2,9 unidades) se debe a la presencia de cantidades apreciables de ácidos carboxílicos, fenoles y otros compuestos presentes en su composición química descrita en las tablas 3 y 4.

Al comparar las propiedades físico-químicas con las de otros bio-aceites, se observó que existen diferencias con respecto al color, la viscosidad (2,97 veces mayor), la densidad (1,13 veces mayor), el contenido de insoluble (6,32 veces mayor); la composición elemental de

hidrogeno, azufre y nitrógeno es ligeramente superior. A pesar de esas irregularidades, su poder calórico es 20,20 MJ kg⁻¹, superior al de muchos bio-aceites reportados en la tabla 6, y es prácticamente la mitad de la del combustible diesel 42 MJ kg⁻¹.

La aplicación más inmediata del bio-aceite es su uso como combustible industrial. No obstante se ha estudiado la aplicación de este producto en calderas, hornos industriales, hornos de cal, motores de combustión interna, turbinas y plantas termoeléctricas.⁽²⁷⁾

En el año 2010 fue aprobada la primera norma de bio-aceite combustible para uso industrial (ASTM D7544). La especificación describe un tipo de combustible para hornos industriales, y su objetivo principal es facilitar el comercio y guiar al consumidor en este tipo de combustible.

A pesar de lo expresado anteriormente, es necesario argumentar que el bio-aceite obtenido de proceso de pirólisis posee algunos componentes que impiden que sea utilizado como combustible de transporte, debido a que le aportan propiedades indeseadas como alto contenido de agua, oxígeno y cenizas, alta viscosidad, corrosividad y bajo poder calórico, haciendo que sea altamente oxigenado y químicamente inestable, por lo cual debe ser sometido a procesos de transformación que permitan la reducción del contenido de oxígeno o remoción de residuos.

Para ser utilizados en el sector del transporte de forma directa, se debe realizar una adecuación del producto para aumentar su calidad y facilitar el uso.

Dentro de los métodos de mejora de los bio-aceites se encuentran:

- Craqueo catalítico, proceso en el cual se implementan zeolitas como catalizadores para llevar a cabo la desoxigenación del bio-aceite sin necesidad de una corriente de hidrógeno. Sin embargo, el craqueo catalítico requiere de temperaturas mayores a 623 K y presiones entre 689,48 y 13 789,51 kPa, bajo condiciones severas, lo que lo convierte en un proceso costoso e ineficiente energéticamente, formando a su vez una alta cantidad de carbón que afecta la vida útil del catalizador.⁽³⁾
- Tratamiento térmico con alta presión, en este proceso ocurre la separación de fases del producto por el aumento de la temperatura, observándose una fase líquida, una fase

oleosa, una gaseosa y una de agua; sin embargo, hay un aumento en la masa del bio-aceite por la polimerización de los compuestos de la biomasa.⁽⁶⁻¹²⁾

- Fluidos supercríticos, este es un método que se usa para mejorar el valor calórico y reducir la viscosidad con ayuda de un solvente orgánico como etanol, butanol, acetona 1, 2-propanol y n-hexanol; sin embargo, estos compuestos orgánicos hacen que el proceso sea muy costoso. Su implementación permite que los compuestos no solubles en el disolvente, ya sea en fase líquida o gaseosa, se disuelvan para llevar a cabo la adecuación.⁽¹⁶⁾
- Adición de solventes o esterificación, es el proceso en el que se agregan solventes como el metanol, el etanol y el furfural al bio-aceite para disminuir su viscosidad y aumentar su capacidad calorífica significativamente, a partir de una reacción de esterificación o acetalización, tal como se evidencia en las figuras 2 y 3, respectivamente, siendo este el proceso más práctico para aumentar la calidad del bio-aceite.⁽¹¹⁾

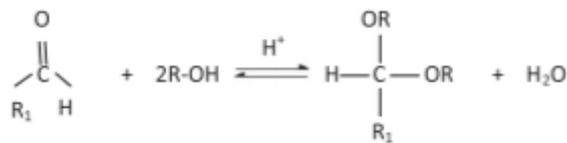


Fig. 2- Reacción de esterificación

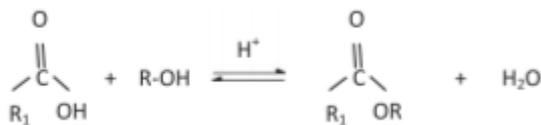


Fig. 3- Reacción de acetilización

- Hidrotratamiento, en este proceso se implementan catalizadores heterogéneos con el objetivo de retirar la mayor cantidad de oxígeno presente en el bio-aceite con ayuda de una corriente de hidrógeno, lo que permite aumentar el rendimiento del

biocombustible. Este procedimiento requiere bajas presiones y temperaturas aproximadas de 773 K.⁽⁹⁾

Es así como a diferencia de los demás métodos, el hidrotratamiento permite obtener una mejor calidad del bio-aceite de manera económica y eficiente, al reducir al máximo la cantidad de oxígeno presente en él, y aumentar su contenido de hidrógeno, produciendo un incremento significativo en la capacidad calorífica del producto para su uso como combustible de transporte.

Los resultados de este trabajo muestran un potencial químico y termoquímico para la biomasa residual de procesos agrícolas, una composición química del bio-aceite compleja, caracterizada por la presencia de varias familias de compuestos orgánicos, la dependencia de las propiedades físico-químicas, están asociadas al tipo de biomasa y al proceso de pirólisis empleado, la mayoría de los compuestos identificados corresponden con la composición química de otros bio-aceites caracterizados y reportados en la literatura.⁽²⁸⁾

Estos bio-aceites en la actualidad tienen una marcada importancia en otras aplicaciones en campos de la industria y la agricultura.⁽²⁹⁻³⁰⁾

Conclusiones

El bio-aceite obtenido es una mezcla de distintos componentes derivados de la despolimerización y fragmentación de la celulosa, hemicelulosa y lignina. Su aspecto físico es un líquido de color negro, rico en su composición química elemental en carbono y oxígeno, de olor fuerte y penetrante, con una viscosidad cinemática muy alta (~2 000 cSt) provocada por cantidades significativas de finos de carbón (7,2 %) y lignina pirolítica insoluble (86 %). Su acidez es significativa (2,9 unidades), la composición química está basada en ácidos carboxílicos, compuestos aromáticos oxigenados, fenol y derivados fenólicos alquílicos, furfural, derivados del furano, ciclopentanona y otros derivados cetónicos, una serie homóloga de n-alcanos de alta masa molar y algunos compuestos aromáticos nitrogenados.

Predominan, por tanto, los compuestos oxigenados, lo que explica el elevado contenido en oxígeno. El poder calórico de 20,20 MJ kg⁻¹, facilita su posible uso como bio-combustible.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecemos profundamente al personal de la Empresa Bioware-Tecnologías de Termoconversión de Biomasa, Campinas Sao Paulo, Brasil, por la posibilidad de intercambiar conocimientos y trabajar en sus instalaciones. A la Central Analítica del Instituto de Química de la Universidad Estatal de Campinas (UNICAMP), Brasil, por su apoyo y profesionalidad en la caracterización química de los productos de la pirólisis rápida y al profesor e investigador Ph.D. Juan Miguel Mesa por su conocimiento y experiencia, las cuales fueron de mucha utilidad para desarrollar esta investigación científica.

Referencias bibliográficas

1. SHANHUI, Z.; YONGHAO, L. “Multiscale Modeling of Lignocellulosic Biomass Thermochemical Conversion Technology: An Overview on the State-of-the-Art”. *Energy & Fuels*. 2020, **34** (10), 11867-11886. ISSN: 1520-5029.
2. PAVLO, K.; BROADBELT, L. J. “Progress in Modeling of Biomass Fast Pyrolysis: A Review”. *Energy & Fuels*. 2020. ISSN: 1520-5029.
3. XUE-YU, R. *et al.* “Catalytic Conversion of Coal and Biomass Volatiles: A Review”. *Energy & Fuels*. 2020, **34** (9), 10307-10363. ISSN: 1520-5029.
4. CHAO, L. *et al.* “Impact of Acidic/Basic Sites of the Catalyst on Properties of the Coke Formed in Pyrolysis of Guaiacol: A Model Compound of the Phenolics in Bio-oil”. *Energy & Fuels*. 2020, **34** (9), 11026-11040. ISSN: 1520-5029.
5. LEN-MARTÍNEZ, T. S. *et al.* “Paja de la caña de azúcar. Sus usos en la actualidad. ICIDCA”. *Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*. 2013, 47(2), 13-22. ISSN: 1025-3076.

6. AZAD, T. *et al.* “Model Lignin Oligomer Pyrolysis: Coupled Conformational and Thermodynamic Analysis of β -O-4' Bond Cleavage”. *Energy & Fuels*. 2020, **34**(8), 9709-9724. ISSN: 1520-5029.
7. MALIEKKAL, V.; DAUENHAUER, P. J; NEUROCK, M. “Glycosidic C–O Bond Activation in Cellulose Pyrolysis: Alpha *versus* Beta and Condensed Phase Hydroxyl-Catalytic Scission”. *ACS Catalysis*. 2020, **10**(15), 8454-8464. ISSN: 2155-5435.
8. CHUN, H. L. *et al.* “Minireview on Bio-Oil Upgrading via Electrocatalytic Hydrogenation: Connecting Biofuel Production with Renewable Power”. *Energy & Fuels*. 2020, **34**(7), 7915-7928. ISSN: 1520-5029.
9. SHUMEIKO, B. *et al.* “Efficient One-Stage Bio-Oil Upgrading over Sulfided Catalysts”. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2020, **8**(40), 15149-15167. ISSN: 2168-0485.
10. STAŠ, M. *et al.* “Petroleomic Characterization of Pyrolysis Bio-oils: A Review”. *Energy & Fuels* 2017, 31 (10), 10283-10299. ISSN: 1520-5029.
11. SUOTA, M. J. *et al.* “Esterification, Distillation, and Chemical Characterization of Bio-Oil and Its Fractions”. *Energy & Fuels*. 2019, **33**(10), 9886-9894. ISSN: 1520-5029.
12. XUEYONG, R.; JIN GUO, J.; LI, S.; CHANG, J. “Thermogravimetric Analysis–Fourier Transform Infrared Spectroscopy Study on the Effect of Extraction Pretreatment on the Pyrolysis Properties of Eucalyptus Wood Waste”. *ACS Omega*. 2020, **5**(36), 23364-23371. ISSN: 2470-1343.
13. SHUN-FENG, J.; GUO-PING, S.; HONG, J. “Advances in the Characterization Methods of Biomass Pyrolysis Products”. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2019, **7**(15), 12639-12655. ISSN: 2168-0485.
14. VOLPE, R.; ZABANIOTOU, A. A.; SKOULOU, V. “Synergistic Effects between Lignin and Cellulose during Pyrolysis of Agricultural Waste”. *Energy & Fuels*. 2018, **32**(8), 8420-8430. ISSN: 1520-5029.
15. STAŠ, M. *et al.* “Petroleomic Characterization of Pyrolysis Bio-oils: A Review”. *Energy & Fuels*. 2017, 31(10), 10283-10299. ISSN: 1520-5029.
16. ZHENG, A. *et al.* “Toward Fast Pyrolysis-Based Biorefinery: Selective Production of Platform Chemicals from Biomass by Organosolv Fractionation Coupled with Fast

Pyrolysis”. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. **2017**, 5 (8) , 6507-6516. ISSN: 2168-0485.

17. ASTM D591-92. “Standard Test Method for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen, and Nitrogen in petroleum and lubricants”. Easton, MD: *American Society for Testing and Materials*.

18. ASTM D1762-84. “Standard Test Method for Chemical Analysis of Wood Charcoal”. Easton, MD: *American Society for Testing and Materials*.

19. GARCÍA-PÉREZ, M.; CHAALA, A.; ROY, C. “Vacuum pyrolysis of sugarcane bagasse”. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2002, 65, 111–136. ISSN: 01652370.

20. OASMAA, C.; PEACOCKE, A. “Guide to physical property characterization of biomass-derived fast pyrolysis liquids, VTT Energy, Espoo, Finland”. Publication 450. 2001. p.65, app.34. ISBN:951-38-6365-4.

21. ASTM D1744-88. Standard Test Method for water in liquid petroleum products by Karl Fischer reagent. Easton, MD: *American Society for Testing and Materials*.

22. ASTM D445-88. Standard Test Method for kinematic density viscosity of transparent and opaque liquids (and the calculation of dynamic viscosity). Easton, MD: *American Society for Testing and Materials*.

23. ASTM D4052-88. Standard Test Method for density and relative of liquids by digital density meter. Easton, MD: *American Society for Testing and Materials*.

24. DIN 51900-77. Testing of solid and liquid fuels; determination of gross calorific value by bomb calorimeter and calculation of net calorific value; method with the adiabatic jacket. Berlin: DIN (Deutsches Institut für Normung), Germany.

25. DEMIRAL, I.; AYAN, E. A. “Pyrolysis of grape bagasse: effect of pyrolysis conditions on the product yields and characterization of the liquid product”. *Bioresource Technology*. 2011, 102, 3946-3951. ISSN: 0960-8524.

26. DEMIRBAS, A. “Effects of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of agricultural residues”. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2004, 72, 243-248. ISSN: 01652370.

27. ASADULLAH, M. *et al.* “Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse”. *Fuel*. 2007, **86**, 2514-2520. ISSN: 2292-8782.
28. FERRELL, J. R. *et al.* “Standardization of chemical analytical techniques for pyrolysis bio-oil: history, challenges, and current status of methods”. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2016, **10** (5), 496-507. ISSN: 1932-1031.
29. CZERNIK, S.; BRIDGWATER, A.V. “Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil”. *Energy & Fuels*. 2004, **18**, 590-598. ISSN 1520-5029.
30. GREWAL, A.; LORD ABBEY, L.; RAO-GUNUPURU, L. “Production, prospects and potential application of pyroligneous acid in agriculture”. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2018, **135**, 152–159. ISSN: 01652370.

Conflicto de interés

Los autores expresan no tener conflictos de intereses en la publicación del presente manuscrito.

Contribución de los autores

Roberto Alfonso Viltres Rodríguez. Participó en experimento de la Planta de Pirólisis rápida de biomasa, en la caracterización de los productos de la pirólisis y en elaboración y discusión de los resultados científicos que se muestran en el manuscrito del trabajo.

Alejandro Alarcón-Zayas. Participó activamente en la discusión de los resultados científicos, la revisión y aprobación de la revisión final del manuscrito del trabajo.