

Valoración energética de bio-aceite (bio-oil) producto de la gasificación de tusa de maíz recuperado vía húmeda

Energy evaluation of bio-oil product of the gasification of corn cob recovered wet way

Julio Daniel Chaverra Herrera

Estudiante de Ingeniería Mecánica

Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería

julio.chaverrah@upb.edu.co

0000-0002-4530-891X

Colombia

Diego Alejandro Camargo Trillos

Docente de Ingeniería Mecánica

Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Montería

diego.camargo@upb.edu.co

0000-0002-2698-2749

Colombia

Resumen

En este trabajo se evaluó la recuperación y valoración energética del bio-aceite producto de la gasificación de tusa de maíz en un reactor de flujo descendiente y lecho fijo, obtenido por sistemas de lavado con agua (vía húmeda) en el laboratorio de energías renovables de la Universidad Pontificia Bolivariana. A este subproducto se le caracterizaron las propiedades físicas y químicas a partir de una composición química teórica, se correlacionan propiedades como composición química elemental, poder calorífico superior y las fracciones que tiene este bio-aceite para su valoración energética. Primero se llevó a cabo el diseño del sistema de recuperación del bio-aceite mediante decantadores y un sistema de destilación para separarlo. Se valoró la distribución de compuestos orgánicos del bio-aceite en función de ligero, medio y pesado, para temperaturas de destilación 115°C y 215°C. El cálculo de la composición química elemental CHON y el poder calorífico se realizó para dos puntos de operación: por decantado del sistema de lavado y condensación directa, obteniendo C41.0540%, H5.8588%, O35.6199%; N0%, con HHV de 21.2621 MJ/kg y C76.0071%, H 8.4019%, O%, N% con HHV 23.8563 MJ/kg, respectivamente.

Palabras clave: caracterización composicional; compuestos orgánicos; composición elemental; destilación; poder calorífico

Abstract

In this work was evaluated the recovery and energetic valuation of the bio-oil product of the gasification of corncob in a fixed-bed downdraft reactor, obtained by washing systems with water (wet route) in the renewable energy laboratory of the Bolivarian Pontifical University. The physical and chemical properties of this by-product were characterized from a theoretical chemical composition, properties such as elemental chemical composition, higher calorific value, and the fractions that this bio-oil has for its energy evaluation are correlated.

Recibido:23/06/2021

1 Revisado:19/11/2021

Aprobado:23/03/2022



Los artículos de Environment & Technology se comparten con Licencia Creative Commons: CC BY-NC-ND

First, the design of the bio-oil recovery system was carried out using decanters and a distillation system to separate it. The distribution of organic compounds of the bio-oil was evaluated as light, medium and heavy for distilled temperature of 115°C y 215°C. The calculation of the elemental chemical composition CHON and the calorific power was carried out for two operating points: By decanting the washing system and direct condensation, obtaining C41.0540%, H5.8588%, O35.6199%; N0%, with HHV of 21.2621 MJ/kg and C76.0071%, H 8.4019%, O%, N% with HHV 23.8563 MJ/kg respectively.

Key words: compositional characterization; organic compounds; elemental composition; distillation; heating value

Introducción

La generación de energía a partir de biomasa en Colombia es un campo relativamente nuevo; no fue hasta el 2012 cuando se empezó a ver un ligero aumento de cerca del 8%, gracias a pequeñas plantas usadas generalmente en zonas rurales, donde hay difícil acceso al fluido eléctrico (Semana, 2017). Para el 2016, se generaron aproximadamente 65900 GWh de energía eléctrica donde cerca de 590 GWh fueron producidos a partir de biomasa, lo cual equivale solo al 0.9% del total de la energía eléctrica producida nacionalmente (Cleanenergybrief, 2018).

En el departamento de Córdoba se producen anualmente cerca de 2, 261,839T de biomasa residual (Ministerio de agricultura y FNCE, 2010). La gran mayoría de estos desechos simplemente son descartados, por lo que se estima que el departamento tiene un gran potencial energético en cuanto a biomasa se refiere. Teniendo en cuenta los datos anteriores, el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Montería, viene desarrollando investigaciones referentes a la optimización y producción de energía en ese campo.

La biomasa, con el gran auge de fuentes de energía renovables, ha venido tomando un gran papel a partir de su procesamiento para la generación de energía (Semana, 2017). En Colombia, según el Ministerio de Minas y Energía, se producen aproximadamente 71,943,162T al año de biomasa residual, de las cuales 492,738T son de cascarilla de arroz y 369.505T son de tusa de maíz (Ministerio de agricultura y FNCE, 2010) que es un residuo en la obtención de maíz producto de la agricultura. Estos residuos, mediante procesos termoquímicos, se transforman en biocombustible. Entre estos procesos están la gasificación y la pirólisis, principalmente producen tres grandes elementos, gases (syngas), líquidos (bio-oil) y carbón (biochar). Los rendimientos obtenidos en la pirólisis son aproximadamente de

47.3% para bio-oil, 28.7% para syngas, 24% para bio-char; en la gasificación son del 20% para bio-oil, 70% para syngas y 10% para bio-char (Bridgwater, 2003).

El bio-aceite resultante de biomasa lignocelulósica, como la tusa de maíz, proveniente de los procesos de gasificación y pirólisis, tiene propiedades como combustible líquido y abre una gran oportunidad de almacenarlo para usarlo en la generación de energía, sustituyendo potencialmente al combustible fósil, siempre y cuando el sector de la energía pueda adaptarse a las propiedades especiales que posee (Buffi, Cappelletti, Rizzo, Martelli y Chiaramonti, 2018), ofrece un HHV (higher heating value) de hasta 24MJ/kg (Channiwala y Parikh, 2002) por tal, en el futuro no sería raro que el comercio automotor modifique las normas respecto al uso y mejoramiento de las propiedades de ese combustible .

El objetivo principal en este trabajo es evaluar el proceso de recuperación de bio-aceite producto de la gasificación y pirólisis de tusa de maíz, condensado vía húmeda por lavado del gas en scrubber, para su posterior caracterización de la composición **CHONS** y valoración energética **HHV**.

Metodología

Origen del bio-aceite

El proceso inicia con la tusa de maíz previamente seca, que en el proceso de gasificación en un microgasificador de biomasa tipo downdraft se obtiene un bio-aceite bruto, el cual tiene una parte soluble y que está inmerso en agua, que proviene de un proceso de gasificación (**Figura 1**), que es un residuo de la agricultura del departamento de Córdoba, Colombia.

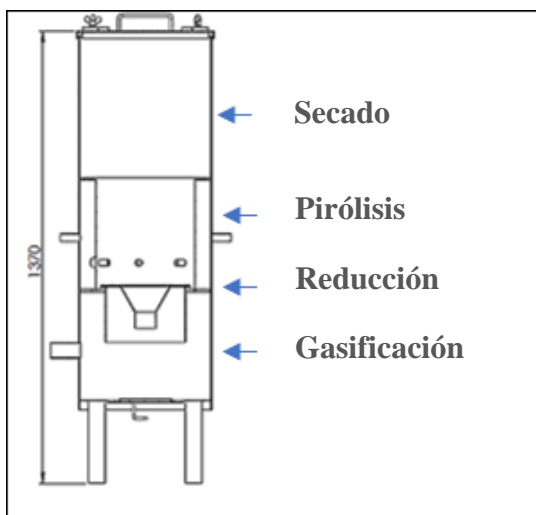


Figura 1. Diagrama de un reactor de gasificación tipo downdraft. Fuente: Elaboración propia

Funcionamiento básico del microgasificador

Este equipo tiene un reactor o cámara de combustión, cuenta con 6 tubos de alimentación de aire, en la parte inferior hay una malla con su respectiva granulometría para el paso del biochar. El gas producido viaja por las tuberías hasta el intercambiador donde se enfría el syngas y se condensa el bio-aceite, gracias al agua que es movida por la electrobomba, a su vez, esta hace que el syngas viaje al tanque debido a una caída de presión, donde se sigue enfriando y se termina de condensar el bio-aceite. Finalmente, el gas se lleva desde la parte superior del tanque por tuberías para hacer pruebas cromatográficas (Restán, 2019) (**Figura 3**).

Sistemas de recuperación de bio-aceite

Para la recuperación del bio-aceite se empleó un sistema sencillo de decantación, usado para una separación macro, que, por la acción de la gravedad sobre los líquidos, envía a los de mayor densidad hacia abajo, como el agua (Raffino, 2018). Se usaron dos decantadores, el primero fabricado en PVC y el segundo una “jirafa” comúnmente usada para el dispendio de líquidos (**Figura 2**).

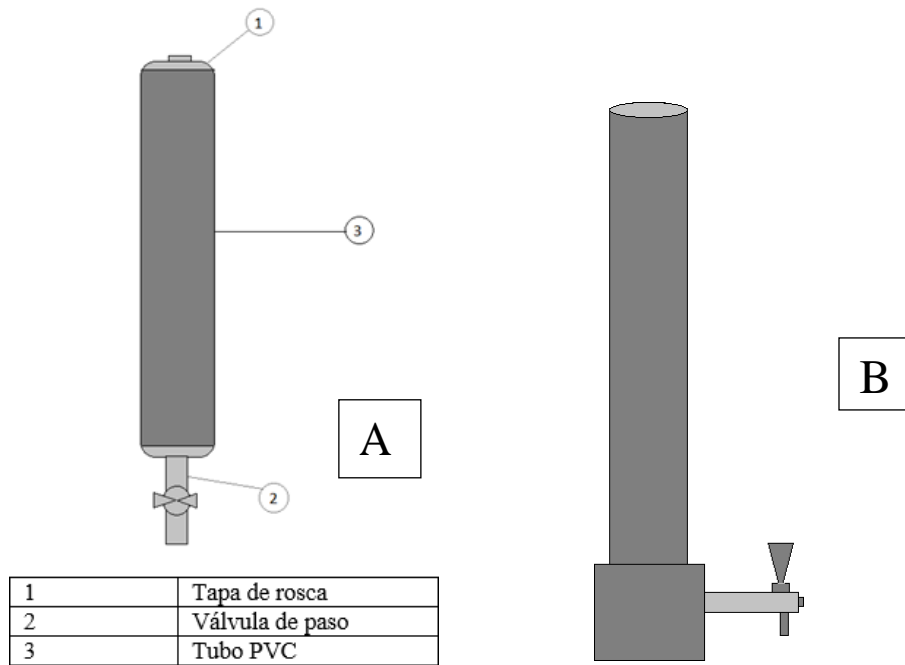


Figura 2. Diagramas de los decantadores. Fuente: Elaboración propia

El aceite siempre quedará en la parte superior, tanto del depósito como del decantador, donde se acciona la pequeña llave y se hace bajar el nivel de agua, permitiendo acumular una columna de aceite.

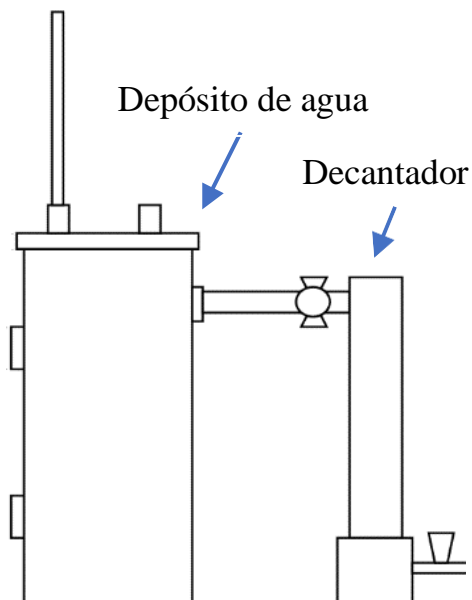


Figura 3. Diagrama del sistema de recuperación vía húmeda. Fuente: Elaboración propia

Separación del bio-aceite

El bio-aceite tiene varias fracciones o productos, entre las principales está el TAR, la cual es una fracción alquitranosa y otra parte menos viscosa que se puede separar en ligero, medio o pesado. Estos productos se obtienen mediante un sistema de destilación, donde se separan a diferentes temperaturas de acuerdo a sus puntos de ebullición; la temperatura a la que se destila el bio-aceite ligero es 115°C y la fracción media a 215° (Omar y Robinson, 2014).

El producto remanente es el bio-aceite pesado, en este caso se lleva a cabo un montaje que nos permite calentar y burbujear nitrógeno (gas) como se muestra en la **Figura 4**. Se comienza tomando datos de pesos de las muestras de bio-aceite a separar y se pone en un tubo de ensayo para luego calentarlo mediante una malla calentadora, aumentando de 2 grados por minuto, al alcanzar los 115° se deja allí 15min y luego lo mismo en 215°.

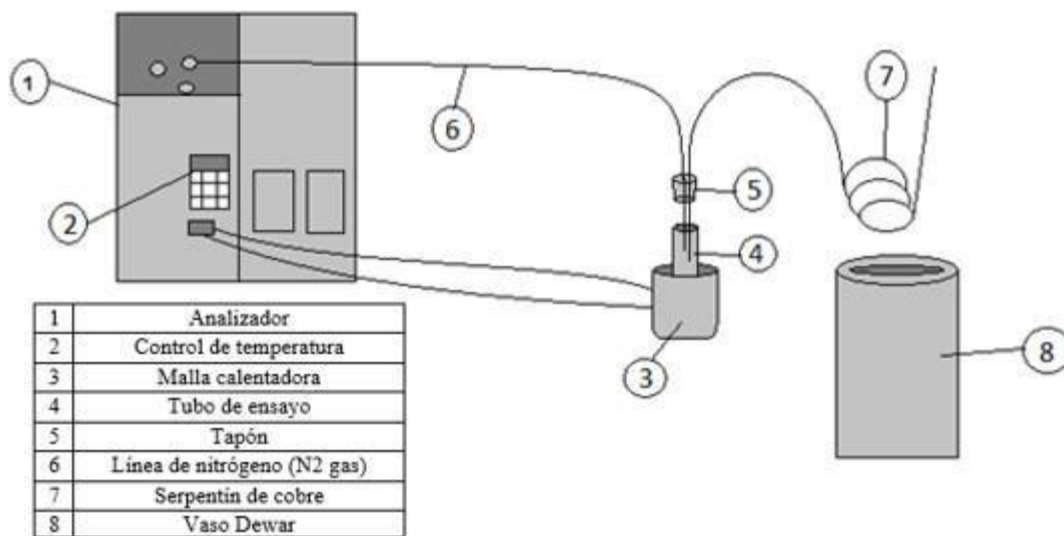


Figura 4. Diagrama del montaje para separación de bio-aceite. Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, se montó una vía de escape de los gases hacia un serpentín de cobre que se encuentra inmerso en un vaso Dewar lleno de nitrógeno líquido que se iba llenando a medida que bajaba el nivel. En este serpentín se condensan y recuperan los productos, es decir, este montaje cuenta con una fase de evaporación y otra de condensación de bio-aceite.

Caracterización teórica del bio-aceite

Para esta caracterización partimos de una lista de compuestos plenamente identificados y caracterizados de bio-aceite de tusa de maíz (Mullen et al., 2010) que se muestra en la **Tabla 1**.

Tabla 1. *Compuestos del bio-aceite*

Método	Compuestos	(wt% de bio-oil)
Compuestos derivados Celulosa/hemicelulosa		
HPLC	Levoglucosan (1)	5.31
HPLC	Hidroxiacetaldehido (2)	1.44
HPLC	Ácido Acético (3)	6.43
HPLC	Acetol (4)	10.14
GC	Furfural (5)	1.2
GC	Furfuril alcohol (6)	0.3
GC	3-Metil-2-ciclopentano-1-uno (7)	0.38
GC	4-Hidroxi-4-metil-2-pentanona (8)	0.12
Compuestos derivados Lignina		
GC	Fenol (9)	0.79
GC	o-Cresol (10)	0.17
GC	p-Cresol (11)	0.19
GC	m-Cresol (12)	0.17
GC	2,4-Dimetil fenol (13)	0.05
GC	3,5-Dimetilfenol (14)	0.02
GC	4-Etil fenol (15)	0.54
GC	3-Etilfenol (16)	0.02
GC	2-Etilfenol (17)	0.01
GC	Guaiacol (18)	0.61
GC	2-Metoxi-4-metil fenol (19)	0.31
GC	Isoeugenol (20)	0.28
GC	2,6-Dimetoxifenol (21)	0.63

Fuente: (Mullen et al., 2010)

Lo siguiente fue calcular la composición de cada elemento (CHONS en función del número de átomos) clasificándolos por su peso molecular, fracción molar y carga térmica (kJ/kg) con las fórmulas 1, 2, 3 y 4, que se presentan a continuación:

$$PM = (C)(12.0107) + (H)(1.00784) + (O)(15.999) + (N)(14.0067) + (S)(2.065) \quad (1)$$

$$Moles = \frac{(1)(\%peso)}{\frac{100}{PM}} \quad (2)$$

$$Fracción molar = \frac{Moles}{\sum Moles} \quad (3)$$

$$Carga térmica = \frac{\%peso(\Delta h vap)}{100} \quad (4)$$

Con los cálculos anteriores se hizo una corrección multiplicando la composición inicial por su fracción molar y se hace una sumatoria para obtener el porcentaje elemental (CHONS) pasado a masa y luego se calcula la fracción másica con las siguientes fórmulas (5, 6 y 7):

$$Corrección composición = \#átomos(fracción molar) \quad (5)$$

$$Masa = (\sum corrección composición) (masa atómica) \quad (6)$$

$$Fracción másica (i) = \frac{Masa}{\sum Masa} \quad (7)$$

Bio-aceite por condensación directa

Los cálculos se realizaron para dos puntos de operación: condensación directa y por decantado del sistema de lavado. La primera simulando un bio-aceite obtenido directamente de un condensador, por lo que se tomaron todos los componentes como en “Caracterización teórica del bio-aceite”. Para el poder calorífico se usa una correlación (8) de Channiwala y Parikh (2002), que es específicamente para biomasa:

$$HHV = (0.349C_i + 1.1783H_i - 0.1034O_i - 0.0151N_i)(100) \quad (8)$$

Bio-aceite por decantado del sistema de lavado

Para este caso se quitan los compuestos solubles en agua para simular que el bio-aceite pasa por este proceso, ya que la decantación separa de forma macro el agua del aceite. Para el poder calorífico se usó la misma correlación (8).

Resultado y discusión

Recuperación del bio-aceite vía húmeda

Para la recuperación del bio-aceite por este método, se modificó una parte del sistema de lavado del microgasificador, se agregó una llave de paso y se conectó el decantador a esta, con el fin de semi-automatizar el proceso. El bio-aceite yace en la parte superior del tanque y mediante la válvula de paso se logra que pase solo la fracción superior del contenido del tanque, reduciendo considerablemente la cantidad de agua y haciendo más eficiente el proceso de recuperación (**Figura 3**)

Caracterización teórica del bio-aceite

Para el poder calorífico se usó una fórmula de correlación (8) de Channiwala y Parikh (2002) y se calculó la fracción másica de CHON. Esta correlación se aplica para los dos puntos de operación, tanto por condensación directa como por decantado del sistema de lavado.

$$HHV = (0.349C_i + 1.1783H_i - 0.1034O_i - 0.0151N_i)(100) \quad (8)$$

Bio-aceite por condensación directa

Los datos obtenidos con el procedimiento de condensación directa se presentan en la **Tabla 2**, donde se destaca la obtención de un HHV con valor de 21.2621609 MJ/kg.

Tabla 2. Hoja de cálculo del bio-aceite por condensación directa

	Porcentaje de peso	Temp. de ebullición (K)	Δh vap	PM	Kmol-1kg	Fracción molar	Carga Térmica (kJ/kg)	C	H	O	N	S	
1	5.31	657	92.2	162.1376	0.0003275	0.092853	4.89582	0.55712	0.92853	0.46426	0	0	
2	1.44	404.4	70.5	60.05076	0.0002398	0.067987	1.0152	0.13597	0.27195	0.13597	0	0	
3	6.43	391.2	23.7	60.05076	0.0010708	0.303583	1.52391	0.60717	1.21433	0.60717	0	0	
4	10.14	418	42	74.07714	0.0013688	0.388096	4.2588	1.16429	2.32857	0.77619	0	0	
5	1.2	236.5	149.6	96.08286	0.0001249	0.03541	1.7952	0.17705	0.14164	0.07082	0	0	
6	0.3	443	53.6	98.09854	0.0000306	0.00867	0.1608	0.04335	0.05202	0.01734	0	0	
7	0.38	430.65	39.42	96.12592	0.0000395	0.011208	0.149796	0.06725	0.08966	0.01121	0	0	
8	0.12	441.05	52.13	116.15628	0.0000103	0.002929	0.062556	0.01757	0.03515	0.00586	0	0	
9	0.79	633.15	58.8	94.11024	0.0000839	0.0238	0.46452	0.1428	0.1428	0.0238	0	0	
10	0.17	464.15	44.89	108.13662	0.0000157	0.004457	0.076313	0.0312	0.03566	0.00446	0	0	
11	0.19	474.9	46.61	108.13662	0.0000176	0.004982	0.088559	0.03487	0.03985	0.00498	0	0	
12	0.17	475.92	60.6	108.13662	0.0000157	0.004457	0.10302	0.0312	0.03566	0.00446	0	0	
13	0.05	485.37	51.8	122.163	0.0000041	0.00116	0.0259	0.00928	0.0116	0.00116	0	0	
14	0.02	492.65	55.3	122.163	0.0000016	0.000464	0.01106	0.00371	0.00464	0.00046	0	0	
15	0.54	491.05	53.2	122.163	0.0000442	0.012533	0.28728	0.10026	0.12533	0.01253	0	0	
16	0.02	491.55	68.1	122.163	0.0000016	0.000464	0.01362	0.00371	0.00464	0.00046	0	0	
17	0.01	477.67	64.5	122.163	0.0000008	0.000232	0.00645	0.00186	0.00232	0.00023	0	0	
18	0.61	478.15	62.6	124.13562	0.0000491	0.013932	0.38186	0.09753	0.11146	0.02786	0	0	
19	0.31	494.15	70.9	138.162	0.0000224	0.006361	0.21979	0.05089	0.06361	0.01272	0	0	
20	0.28	539.15	56.17	164.19908	0.0000171	0.004835	0.157276	0.04835	0.05802	0.00967	0	0	
21	0.63	534.15	54.17	154.161	0.0000409	0.011586	0.341271	0.09269	0.11586	0.03476	0	0	
					0.0035271	1	16.039001	3.41812	5.81331	2.22639	0	0	
								Masa					
								41.054	5.85889	35.62	0	0	
								Fración másica					
								0.49743	0.07099	0.43159	0	0	

Fuente: Elaboración propia

Bio-aceite por decantado del sistema de lavado

Los datos obtenidos con el procedimiento de decantado del sistema de lavado se presentan en la **Tabla 3**, destacándose la obtención de un HHV con valor de 23.8563271 MJ/kg.

Tabla 3. Hoja de cálculo del bio-aceite por decantado del sistema de lavado

	Porcentaje de peso	Temp. de ebullición (K)	Δh vap	PM	Kmol-1kg	Fracción molar	Carga Térmica (kJ/kg)	C	H	O	N	S		
1	5.31	657	92.2	162.1376	0.000327	0.400809	4.89582	2.40486	4.00809	2.00405	0	0		
5	1.2	236.5	149.6	96.08286	0.000125	0.152849	1.7952	0.76424	0.6114	0.3057	0	0		
7	0.38	430.65	39.42	96.12592	3.95E-05	0.04838	0.149796	0.29028	0.38704	0.04838	0	0		
8	0.12	441.05	52.13	116.15628	1.03E-05	0.012643	0.062556	0.07586	0.15172	0.02529	0	0		
9	0.79	633.15	58.8	94.11024	8.39E-05	0.102735	0.46452	0.61641	0.61641	0.10273	0	0		
10	0.17	464.15	44.89	108.13662	1.57E-05	0.01924	0.076313	0.13468	0.15392	0.01924	0	0		
11	0.19	474.9	46.61	108.13662	1.76E-05	0.021503	0.088559	0.15052	0.17203	0.0215	0	0		
12	0.17	475.92	60.6	108.13662	1.57E-05	0.01924	0.10302	0.13468	0.15392	0.01924	0	0		
13	0.05	485.37	51.8	122.163	4.09E-06	0.005009	0.0259	0.04007	0.05009	0.00501	0	0		
14	0.02	492.65	55.3	122.163	1.64E-06	0.002004	0.01106	0.01603	0.02004	0.002	0	0		
15	0.54	491.05	53.2	122.163	4.42E-05	0.054098	0.28728	0.43278	0.54098	0.0541	0	0		
16	0.02	491.55	68.1	122.163	1.64E-06	0.002004	0.01362	0.01603	0.02004	0.002	0	0		
17	0.01	477.67	64.5	122.163	8.19E-07	0.001002	0.00645	0.00801	0.01002	0.001	0	0		
18	0.61	478.15	62.6	124.13562	4.91E-05	0.06014	0.38186	0.42098	0.48112	0.12028	0	0		
19	0.31	494.15	70.9	138.162	2.24E-05	0.02746	0.21979	0.21968	0.2746	0.05492	0	0		
20	0.28	539.15	56.17	164.19908	1.71E-05	0.02087	0.157276	0.2087	0.25044	0.04174	0	0		
21	0.63	534.15	54.17	154.161	4.09E-05	0.050014	0.341271	0.40011	0.50014	0.15004	0	0		
							0.000817	1	9.080291	6.33393	8.40199	2.97723	0	0
							Masa							
							76.075	8.46786	47.6327	0	0			
							Fracción másica							
							0.57556	0.06407	0.36037	0	0			

Fuente: Elaboración propia

Caracterización experimental del bio-aceite

Los porcentajes de cada una de las fracciones obtenidas en las pruebas se muestran en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Fracción peso a peso de las fracciones de bio-aceite separado por destilación

Fracción	P1	P2	P3
% w/w F1	2%	15%	17%
% w/w F2	24%	22%	25%
% w/w F3	74%	63%	58%

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la separación del bio-aceite se muestran en la **Tabla 4**, en donde P1 corresponde a la primera prueba de separación realizada, P2 a la segunda y P3 a la tercera y las fracciones se refieren, en el caso de F1, a la fracción separada a los 115°C, F2 a la fracción separada a los 215°C y F3 a la fracción remanente del proceso. Según la teoría (Omar y Robinson, 2014) esta última fracción (F3) corresponde a la fracción de bio-aceite pesado, lo cual sorprendió bastante, ya que visualmente se observaba la muestra completa como bio-aceite ligero. Las fracciones medias del bio-aceite contienen $6\% \pm 0.4$ de compuestos ligeros, $23\% \pm 0.5$ de compuestos medianos y $65\% \pm 5.2$ de compuestos pesados (**Figura 5**).

Visualmente las muestras separadas permiten analizar muy poco, aunque levemente es visible un color más claro en las fracciones F1 de cada prueba. Cabe mencionar que F0 (**Figura 5**) son muestras del bio-aceite original o sin separar.

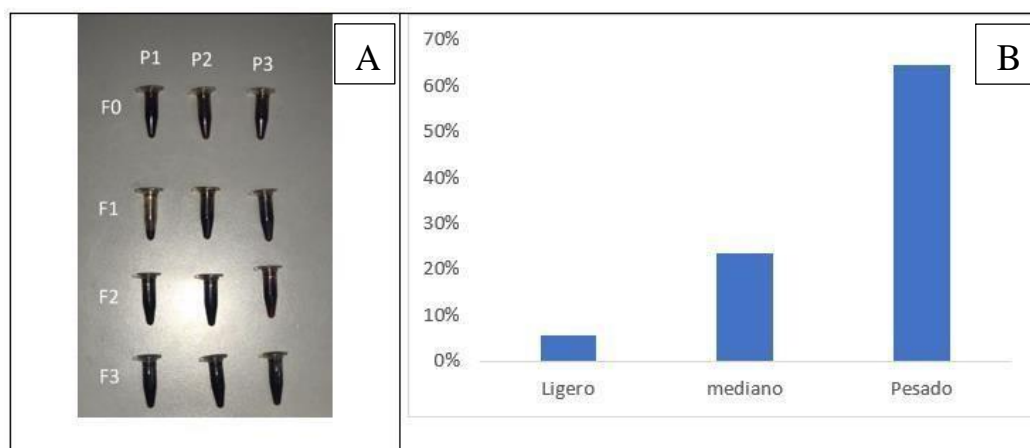


Figura 5. Muestras de bio-aceite separado (A) y porcentajes (B). Fuente: Elaboración propia

Se utilizó un picnómetro de 5cm³ para el cálculo del volumen (**Tabla 5**) y la densidad (**Tabla 6**) del bio-aceite; la masa se midió en una balanza de precisión.

Tabla 5. *Datos para calcular el volumen*

Picnómetro (g)	Picnómetro con aceite original (g)	Picnómetro con aceite remanente (g)	Volumen (cm ³)
7.6558	12.3116	12.3086	5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. *Datos de densidad*

	Aceite original (g)	Aceite remanente (g)
Masa (g)	4.6558	4.6528
Volumen (cm ³)	5	5
Densidad (g/ cm ³)	0.93116	0.93056

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

Se validó la facilidad de recuperación de bio-aceite producto de gasificación y pirólisis de tusa de maíz condensado vía húmeda, con la implementación de sistemas simples tipo decantadores, que permitieron la recuperación de subproductos con un bajo costo de inversión.

El bio-aceite recuperado de la transformación termoquímica de la biomasa en microgasificador de lecho fijo descendente, se caracterizó por una fuerte participación de compuestos orgánicos pesados (temperatura ebullición $> 215^{\circ}\text{C}$), que representaron un 65% de sus componentes orgánicos.

Una comparación del poder calorífico superior **HHV** del bio-aceite obtenido de la decantación (vía húmeda) y directa condensación con valores de 21.26216087 (MJ/kg) y 23.85632707 (MJ/kg) respectivamente, muestra una reducción de la energía potencial del bio-aceite no mayor a 12.20%, cuando se implementan sistemas de lavado con agua.

Referencias

- Bridgwater, A. V. (2003). Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. *Chemical Engineering Journal*, 91(2–3), 87–102. [https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00142-0](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00142-0)
- Buffi, M., Cappelletti, A., Rizzo, A. M., Martelli, F., & Chiaramonti, D. (2018). Combustion of fast pyrolysis bio-oil and blends in a micro gas turbine. *Biomass and Bioenergy*, 115(April), 174–185. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.04.020>
- Channiwala, S., & Parikh, P. (2002). A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *Fuel*, 81(8), 1051–1063. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00131-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00131-4)
- Energia limpia XXI. (28 de abril de 2017). Biomasa: Caña de azúcar y energía biomasa en Colombia. Recuperado de <https://energialimpiaparatodos.com/2017/04/28/cana-de-azucar-y-energia-biomasa-en-colombia/comment-page-1/>
- Ministerio de Agricultura y Fuentes No Convencionales de Energía FNCE. (2010). Potencial energético de la biomasa residual del sector agrícola en Colombia. Recuperado de <http://www.si3ea.gov.co/Home/Biomasa/tabid/76/language/es-ES/Default.aspx>
- Mullen, C., Boateng, A., Goldberg, N., Lima, I., Laird, D., & Hicks, K. (2010). Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. *Biomass and Bioenergy*, 34(1), 67–74. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.09.012>
- Omar, R., & Robinson, J. (2014). Conventional and microwave-assisted pyrolysis of rapeseed oil for bio-fuel production. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 105, 131–142. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.10.012>
- Raffino, M.(2018, December 18). Concepto de Decantación. Recuperado de <https://concepto.de/decantacion/>

Restán D. (2019). Estudio de Sensibilidad del Syngas Producto de la Gasificación de Tusa de Maíz con la Modificación del Campo CO₂ Durante la Gasificación. Universidad Pontificia Bolivariana.

Semana, S. (2017, septiembre 26). Los secretos ocultos de la biomasa. Recuperado de <https://sostenibilidad.semana.com/negocios-verdes/articulo/la-biomasa-genera-energia-para-llevar-electricidad-a-zonas-apartadas/38697>