

Biomasa de *Eucalyptus globulus* como materia prima en la obtención de biocombustible líquido*

Eucalyptus globulus biomass as a raw material in the obtaining liquid biofuel

NAVARRETE-RODRÍGUEZ, LUISA-FERNANDA¹; MORENO-TOVAR, ÁNGELA-MARÍA²; VERA-BARBOSA, ANDRÉS-DAVID³; BULLA-PEREIRA, EDWIN-ALBERTO⁴; CAICEDO-ORJUELA, OBRADITH⁵

Historial del artículo

Recibido para evaluación: 1 de Septiembre 2022

Aprobado para publicación: 30 de Agosto 2023

- * Proyecto de investigación de origen: "Reformado catalítico de la fracción líquida producto de la pirólisis de biomasa". Financiación: Universidad Libre – sede Bogotá. Culminación: 10 de noviembre de 2022
Universidad Libre, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación Tecnoambiental. M.Sc. Química. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-8747-0042>
- 2 Universidad Libre, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación Tecnoambiental. Ingeniera Ambiental. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-5530-7593>
- 3 Universidad Libre, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación Tecnoambiental. Ingeniero Ambiental. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-4466-690X>
- 4 Universidad Libre, Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación Tecnoambiental. M.Eng. BogotáColombia. <https://orcid.org/0000-0001-7244-8929>
- 5 Universidad Manuela Beltrán, Departamento de Ciencias Básicas. M.Sc. Química. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-3767-0636>

Correspondencia: luisaf.navarreter@unilibre.edu.co

Cómo citar este artículo

NAVARRETE-RODRÍGUEZ, LUISA-FERNANDA; MORENO-TOVAR, ÁNGELA-MARÍA; VERA-BARBOSA, ANDRÉS-DAVID; BULLA-PEREIRA, EDWIN-ALBERTO; CAICEDO-ORJUELA, OBRADITH. Biomasa de *Eucalyptus globulus* como materia prima en la obtención de biocombustible líquido. Revista Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, v. 22, n. 1, 2024, p. 17-28. Doi: <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v22.n1.2024.2221>

RESUMEN

La contaminación atmosférica y el acelerado deterioro ambiental por el creciente uso de combustibles fósiles, ha direccionado las investigaciones en el campo energético hacia la búsqueda de fuentes alternativas, renovables, eficientes y sobre todo más amigables con el medio ambiente. Entre la materia prima que cobra gran interés en la generación de biocombustibles, se encuentran los residuos lignocelulósicos que actualmente se producen en abundantes cantidades, ya sea por simple acción de la naturaleza o porque hacen parte de la cadena agroindustrial de una región dada. Es por ello que en el presente trabajo se evaluó la biomasa de *Eucalyptus globulus*, como fuente de bajo costo y amplia disponibilidad en la obtención de biocombustible líquido, para lo cual se llevó a cabo una caracterización física y química preliminar teniendo en cuenta especificaciones establecidas en normatividad del sector. Se realizaron ensayos de conversión termoquímica por medio de una pirólisis en atmósfera de N_2 y a través de la aplicación de un diseño experimental factorial (2^2) contemplando la influencia de variables experimentales tales como tiempo de residencia y temperatura, fue posible obtener a 550 °C y durante 20 min de reacción, un bioaceite con un rendimiento máximo del 45,2 % y cuyas propiedades físicas y químicas se encuentran dentro del rango estimado en literatura para biocombustibles de origen lignocelulósico, tal es el caso del poder calorífico (16,7 MJ/kg). Por lo tanto, la biomasa de *Eucalyptus globulus* puede ser considerada como materia prima con potencial a ser explorado en la generación de energéticos.

ABSTRACT

Atmospheric pollution and accelerated environmental deterioration for the increasing use of fossil fuels have directed research in the energy field towards the search for alternative, renewable, efficient and, above all, more environmentally friendly sources. Among the raw materials that are of great interest in the generation of biofuels are lignocellulosic residues, which are currently produced in abundant quantities, either by the simple action of nature or because they are part of the agro-industrial chain of a given region. For this reason in the present work, the biomass of *Eucalyptus globulus* was evaluated as a low-cost and widely available source for obtaining liquid biofuel, for which a preliminary physical and chemical characterization was carried out, by considering established standard specifications. Thermochemical conversion tests were carried out by pyrolysis in an N_2 atmosphere and through the application of a factorial experimental design (2^2) contemplating the influence of experimental variables such as residence time and temperature, it was possible to obtain at 550 °C and during 20 min of reaction, a bio-oil with a maximum yield of 45,2 % and whose physical and chemical properties are within the range estimated in the literature for biofuels of lignocellulosic origin, such as the calorific value (16,7 MJ/kg). Therefore, the biomass of *Eucalyptus globulus* can be considered as a raw material with potential to be explored in the generation of energy.

PALABRAS CLAVE:

Biocombustibles; Energías renovables; Biomasa de eucalipto; Pirólisis; Bioaceite; Gestión de residuos; Conversión Termoquímica; Material lignocelulósico; Energía de biomasa; Poder calorífico.

KEY WORDS:

Biofuels; Renewable energy; Eucalyptus biomass; Pyrolysis; Bio-oil; Waste management; Thermochemical conversion; Lignocellulosic material; Biomass energy; Heating value.

INTRODUCCIÓN

La descarga indiscriminada de material particulado, así como elevadas concentraciones de gases contaminantes, producto de la combustión de combustibles fósiles, han incrementado fenómenos naturales como el efecto invernadero, directo responsable del calentamiento global, a su vez que se acentúan smog industrial y lluvia ácida (Yoro and Daramola, 2020; Gupta *et al.*, 2021). Es por ello que las energías renovables (eólicas, fotovoltaicas y biocombustibles a partir de biomasa) han tomado impulso en el mundo entero, impactando positivamente el desarrollo sustentable de los países, ya que no sólo contribuyen con la reducción y/o reutilización de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) (Hoang *et al.*, 2021; Kumar *et al.*, 2022), sino que también incrementan la oferta energética y la disponibilidad a zonas aisladas y de difícil acceso.

En el aprovechamiento energético de materia orgánica (biomasa), Colombia cuenta con grandes sectores agrícolas y pecuarios, los cuales actualmente representan más de 177 millones de toneladas al año de biomasa residual, que podrían tener asociado un gran potencial energético (Ministerio del Medio Ambiente, 2022), tal es el caso del *Eucalyptus globulus* (Gonzalez-Benecke *et al.*, 2021), árbol de crecimiento rápido y de hoja perenne, que ha sido empleado en reforestación comercial, constituyendo así grandes cantidades de biomasa, las cuales, de acuerdo con sus propiedades físicas-químicas y en especial al contenido de material lignocelulósico, serán aprovechables como materia prima renovable y de alto valor agregado en la obtención de biocombustibles (Ignacio *et al.*, 2019; Gomes *et al.*, 2021). Entre los procesos para la conversión energética de la biomasa se destaca la pirólisis, que consiste en una transformación termoquímica en ausencia de oxígeno, en donde se obtienen diversos tipos de combustibles (Hu and Gholizadeh, 2019; Kumar *et al.*, 2020) y cuya selección de variables experimentales va a permitir generar bioaceite como producto principal.

Puesto que en el departamento de Cundinamarca en Colombia, así como en diferentes partes del mundo se registran diversos espacios verdes con abundante presencia de árboles de eucalipto, cuya biomasa en su mayoría no se aprovecha, el presente trabajo tiene por propósito estimar el potencial de dicha biomasa como materia prima en la generación de biocombustibles líquidos.

MÉTODO

Material Vegetal

La biomasa empleada es de eucalipto (*Eucalyptus globulus*), cuya recolección solamente incluyó ramas secas y trozos de corteza en etapa media de maduración.

Localización

Los árboles de eucalipto se encuentran en diferentes zonas verdes del campus Bosque Popular de la Universidad Libre, sede Bogotá, ciudad ubicada en la cordillera oriental a una altitud de 2600 m.s.n.m, que tiene por coordenadas 4°36'46"N 74°04'14"O y cuya clasificación climática general es Cfb (Oceánico templado) y con variables ambientales promedio en temperatura de 13,5 °C, humedad relativa entre 77 y 83 % y precipitaciones de 1881 mm (Universidad Nacional de Colombia, 2021).

Pretratamiento de la Materia Prima

Las ramas de la biomasa de eucalipto se sometieron a una reducción de tamaño de partícula sobre malla de 2 mm. Luego, fue lavada con poca agua, manteniendo una relación 3:1 con respecto a la cantidad de biomasa, lo que permitió eliminar impurezas que podrían llegar a influir en los resultados. Posteriormente, se dejó secar a

105 °C durante 12 h, en un horno (Memmert Modelo U-30), por último, se almacenó a temperatura ambiente y de forma adecuada en bolsas plásticas para ser empleada en los diferentes ensayos.

Caracterización fisicoquímica de biomasa

Se llevaron a cabo ensayos de caracterización fisicoquímica de la materia prima contemplando normas ASTM e ISO, las cuales se relacionan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Ensayos de caracterización física y química de biomasa y fracción líquida producto de pirólisis.

Ensayo	Norma
Contenido de humedad	ASTM D-871-82
Lignina, celulosa y hemicelulosa	ASTM D1106 - 96
Contenido de cenizas	ASTM D-1102
Carbono fijo	ASTM D3172
Materia Volátil	ASTM D3175-07
Poder Calorífico	Manual bomba calorimétrica Parr 1341 ASTM D3172-13
Análisis elemental	ASTM D5373-93
Análisis termogravimétrico	ASTM E1131-08
Análisis FTIR	Manual equipo FTIR Prestige 21, Shimadzu ASTM E168
Densidad	ASTM D4052 - 18 ^a
Contenido de humedad	ASTM D2216
Contenido de cenizas	ASTM D4928

Obtención de la fracción líquida

Los ensayos de pirólisis se llevaron a cabo en un horno horizontal, empleando un reactor de lecho fijo de 100 cm de longitud y 9 cm de diámetro interno, en donde se introdujeron aproximadamente 60 g de muestra, luego se permitió el paso de nitrógeno en flujo continuo de 50 mL/min. Una vez asegurada atmósfera inerte, se elevó la temperatura del horno con una velocidad de calentamiento de 5 °C/min, mientras que los gases de reacción fueron condensados en baño criostático (hielo-sal). A través de la aplicación de un diseño experimental tipo factorial 2², se evaluó la influencia de temperatura y tiempo de residencia. En el Cuadro 2 se indica el número de ensayos realizados, cada uno de ellos con su respectivo duplicado como criterio mínimo para expresar repetibilidad. Los datos obtenidos se analizaron con un ANOVA de dos factores con un nivel de confianza de 0,05 a través del software SPSS versión 21.

Cuadro 2. Relación ensayos pirólisis biomasa - variables de influencia.

Identificación muestra	Temperatura (°C)	Tiempo (min)
T1-E1	550	20
T1-E2	550	45
T1-E3	650	20
T1-E4	650	45

Caracterización física y química de la fracción líquida

La fracción líquida obtenida, se caracterizó física y químicamente, contemplando normas ASTM e ISO, que igualmente se relacionan en el Cuadro 1.

RESULTADOS

Caracterización fisicoquímica biomasa de eucalipto

Las propiedades fisicoquímicas y su posterior comparación con datos registrados en literatura permiten establecer si la biomasa de interés puede ser considerada como materia prima con potencial en la eventual obtención de biocombustibles.

Humedad, cenizas, lignina, celulosa, hemicelulosa y poder calorífico. En el Cuadro 3 se muestran los parámetros evaluados, los cuales se encuentran dentro o muy cerca del registro en literatura para biomasa de eucalipto variedad *Eucalyptus globulus*. Sin embargo, aquellas propiedades cuyos valores se alejan, se atribuyen en gran medida a la absorción y disponibilidad de nutrientes inherentes a la variedad, ubicación geográfica, temporada de recolección y condiciones climáticas, entre otras variables relacionadas con la siembra y cultivo de la planta (Evangelista Silva *et al.*, 2020).

Cuadro 3. Datos Caracterización Fisicoquímica – Biomasa Eucalipto.

Parámetro	Experimental	Literatura	Referencia
Humedad (%)	10,9	7,91 – 10,8	(Xu <i>et al.</i> , 2019; Rijo <i>et al.</i> 2022)
Cenizas (%)	1,68	1,25	(Pegoretti Leite De Souza <i>et al.</i> , 2021)
Lignina (%)	27,7	27,6	(Popescu <i>et al.</i> , 2007)
Celulosa (%)	43,9	44,7	(Wang <i>et al.</i> , 2019)
Hemicelulosa (%)	20,7	17,5	(Souza <i>et al.</i> , 2021)
Materia volátil (%)	83,3	81,5	(Singh <i>et al.</i> , 2020)
Carbono fijo (%)	13,4	17,9	
Poder calorífico (MJ/kg)	13,1	15,9	(Singh <i>et al.</i> , 2020)
Carbono (%)	48,7	48,2	(Malico and Goncalve <i>et al.</i> , 2020)
Hidrógeno (%)	6,22	6,16	(De Paula <i>et al.</i> , 2019)
Oxígeno (%)	43,3	44,2	(Malico and Goncalve <i>et al.</i> , 2020)
Nitrógeno (%)	0,08	0,22	(Pirraglia <i>et al.</i> , 2012)
Azufre (%)	0,15	0,01	(Fernandes <i>et al.</i> , 2021)

Se puede observar que los resultados para humedad y cenizas superan ligeramente el valor promedio de literatura, hecho que resulta razonable por el origen de la biomasa empleada. Cabe resaltar que el contenido de humedad de la materia prima influye en propiedades tan importantes como el poder calorífico, debido al calor de vaporización del agua (calor latente del agua), por tanto, entre más bajo sea el porcentaje de humedad mayor será el poder calorífico. En cuanto al contenido de cenizas, éstas se relacionan con el material inorgánico presente en la biomasa, razón por la que conviene que su porcentaje sea el más bajo posible, de lo contrario se dificultaría su aprovechamiento energético al disminuir el poder calorífico.

Factores tales como variedad, etapa de desarrollo, estado nutricional, condiciones edafoclimáticas y parte de la planta considerada, en este caso de la biomasa de eucalipto, afectan la composición química expresada en fracciones de lignina, celulosa y hemicelulosa; los valores obtenidos experimentalmente se encuentran en el mismo rango que aquellos que se registran en literatura y, cuyos porcentajes de lignina, celulosa y hemicelulosa

presentan la misma tendencia, es decir, bajo contenido de hemicelulosa (20,7 %), medio de lignina (27,7 %) y elevado de celulosa (43,9 %). Es importante resaltar que los biopolímeros ya mencionados, al someterse a procesos termoquímicos como la pirólisis, sufren cambios estructurales que van a determinar la composición del biocombustible a obtener (Kumar *et al.*, 2020); la celulosa es un polisacárido lineal que consta de fuertes enlaces intermoleculares (incluyendo los puentes de hidrógeno), la hemicelulosa es un polisacárido ramificado compuesto por diferentes monómeros de azúcar como glucosa, xilosa, manosa, galactosa y arabinosa y ácidos urónicos, que forman puentes de hidrógeno con la celulosa y la lignina (Giudicianni *et al.*, 2021) y, por último, la lignina que es una macromolécula fenólica con alto grado de reticulación entre unidades de fenilpropano, va a requerir mucha energía para romper sus enlaces y permitir su transformación a otras especies (Hoang *et al.*, 2021).

El poder calorífico es uno de los parámetros más importantes para la evaluación de un combustible, ya que representa el calor liberado durante el proceso de combustión (Ignacio *et al.*, 2019) (Cuadro 3), igualmente, se puede observar que la biomasa de interés reporta un poder calorífico muy cercano al límite inferior en el rango de valores registrados en literatura, hecho que se atribuye no sólo a la variedad de eucalipto, sino también a las condiciones de muestreo, almacenamiento de la biomasa, contenido de humedad, así como al tamaño de partícula empleado (Yang *et al.*, 2021). Se resalta además, que los residuos lignocelulósicos provenientes de eucalipto representan un poder calorífico promedio de 16,2 MJ/kg (Laloon *et al.*, 2022); al tener en cuenta que la biomasa de estudio reportó 13,1 MJ/kg, se puede considerar como materia prima con potencial apreciable en la obtención de biocombustibles.

Análisis elemental. El uso de biomasa como biocombustible requiere una caracterización elemental que permita establecer las concentraciones de elementos como O, N, H y C; los dos primeros deben estar presentes en el rango de 35-45 y < 0,5 % respectivamente, mientras que las proporciones de los elementos restantes serán mayores es decir, entre 6 y 8 % hidrógeno y 45 y 60 % para carbono, siendo los últimos los que constituyen directamente los hidrocarburos y por ende determinantes del poder calorífico (Agostinho da Silva *et al.* 2019). En el Cuadro 3 se aprecia que los valores experimentales para los elementos ya mencionados se encuentran dentro del rango registrado en literatura y, que las pequeñas diferencias, se pueden atribuir a características propias del árbol de eucalipto (tasa de crecimiento, edad, parte empleada como biomasa, etc.). En cuanto a la presencia de elementos como nitrógeno y azufre, es importante que se encuentren en niveles muy reducidos, puesto que son los responsables de la contaminación ambiental ocasionada por la generación de NO_x y SO_x (Agostinho Da Silva *et al.*, 2019).

Materia volátil 83,3 % – carbono fijo 13,4 %. Aunque los valores hallados experimentalmente difieren respecto al promedio registrado en literatura, se resalta que presentan la misma tendencia, es decir, elevado porcentaje de materia volátil reporta bajo contenido de carbono fijo. En la materia volátil contribuyen las composiciones de celulosa y hemicelulosa, mientras que el carbono fijo relaciona la lignina (Alvarez-Chavez *et al.*, 2019), en donde los bajos valores pueden llegar a ser benéficos, pues disminuyen la posibilidad de producir carbón residual.

Análisis TGA. El comportamiento de la biomasa de eucalipto bajo el efecto térmico controlado se puede apreciar en la Figura 1, donde la variación de peso se asocia con la formación de ciertas especies que dependen de la temperatura. Se observa una disminución de peso que inicia sobre los 25 hasta los 100 °C y que se asocia al agua propia de la biomasa (Fu *et al.*, 2020) luego, la pérdida de peso, aunque es pequeña, se mantiene constante hasta los 260 °C, temperatura a partir de la cual se produce la mayor pérdida de peso y que finaliza en 375 °C, en dicho rango de temperatura la disminución de peso corresponde a un 33 % y se relaciona con la formación de compuestos volátiles producto de la descomposición de hemicelulosa presente en la biomasa (Kumar *et al.*, 2021). Cabe resaltar que a los 375 °C, se produce la descomposición de la celulosa, como polímero relativamente largo, junto con su estado cristalino organizado (Carrillo *et al.*, 2018).

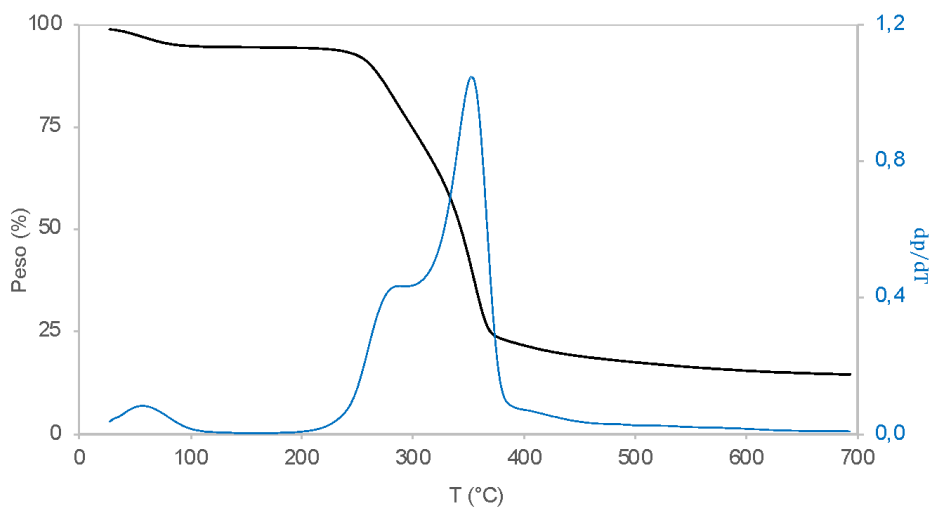


Figura 1. Análisis TGA biomasa de eucalipto.

En la última etapa, se aprecia disminución de peso que avanza lentamente desde los 375 hasta los 700 °C, este último fragmento se relaciona con la transformación de la biomasa sólida remanente, lo que incluye la descomposición de lignina que se compone de tres tipos de unidades de benceno-propano, fuertemente reticulados, lo que le confiere alta estabilidad térmica (Carrillo *et al.*, 2018). Finalizando el ensayo en 700 °C, la masa residual es aproximadamente del 15 %, correspondiente a materiales inorgánicos presentes como el óxido de calcio, cuya descomposición va a requerir de temperaturas más elevadas (Fu *et al.*, 2020).

Obtención fracción líquida – condiciones adecuadas. Los resultados que se muestran en la Figura 2 señalan que las condiciones para obtener el mayor porcentaje de fracción líquida son las del tratamiento denominado como T1-E1, las cuales corresponden a una temperatura de 550 °C y un tiempo de contacto de 20 minutos.

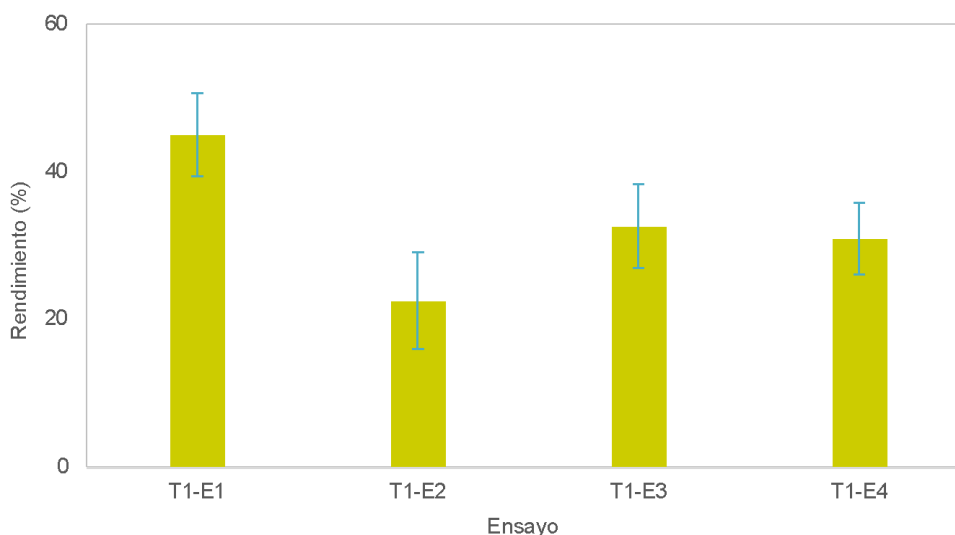


Figura 2. Ensayos pirólisis bajo diferentes condiciones experimentales.

Por otro lado, se evaluó el porcentaje de fracciones líquidas obtenidas bajo el diseño experimental que se muestra en el cuadro 2 a través de un ANOVA de dos factores; los resultados permitieron establecer que la temperatura ($p=0,6430$) y la interacción temperatura-tiempo ($p=0,0615$) no son factores determinantes para el porcentaje de la fracción líquida, sin embargo, el factor tiempo ($p=0,0396$) sí presenta diferencias estadísticamente significativas frente a las demás variables en estudio.

En literatura se reportan estudios cuyos resultados establecen que la descomposición de celulosa, hemicelulosa y la lignina abarcan un rango de temperaturas de 200 a 550 °C, correspondiendo el límite superior a la descomposición de la lignina debido a su naturaleza y heterogeneidad (Zheng *et al.*, 2021), sumado a ello, dentro del proceso de pirólisis a diferentes temperaturas, sobre 550 °C se disminuye la producción de líquidos y se favorece la fracción gaseosa (Samal *et al.*, 2021). En cuanto al tiempo de residencia, periodos cortos de reacción benefician la obtención de bioaceite, puesto que se eliminan más rápido los vapores orgánicos, que van a generar reacciones secundarias (Rijo *et al.*, 2022).

Caracterización física y química de la fracción líquida

Las propiedades físicas y químicas de la fracción líquida, reflejan la calidad del bioaceite obtenido bajo las condiciones experimentales más adecuadas ya establecidas y que corresponden a un tiempo de contacto de 20 min y una temperatura de reacción de 550 °C.

Acidez. Aunque el pH correspondiente a la fracción líquida es de carácter ácido (valor 3,0), éste se encuentra dentro del rango de valores que usualmente se registran para bioaceites (pH 2 a 4) (Yogalakshmi *et al.*, 2022), pues se relaciona con la presencia de ácidos orgánicos como el acético y el ácido fórmico.

Humedad, cenizas y poder calorífico. Propiedades determinadas en la fracción líquida que se observan en el Cuadro 4, donde 1,81 % como contenido de humedad, depende tanto de las propiedades de la materia prima como de reacciones que pueden conducir a deshidratación durante el proceso de pirólisis. Aunque el porcentaje de humedad es significativamente menor al que se registra en literatura entre 15 - 30 % para bioaceites de materias primas similares, no sucede lo mismo con el contenido de cenizas, lo cual sugiere que la mayor parte del material inorgánico presente en la biomasa de partida queda como constituyente de la fracción líquida obtenida, afectando, no sólo el rendimiento del bioaceite sino el poder calorífico del mismo, hecho que se refleja en el respectivo cuadro.

Cuadro 4. Humedad, cenizas y poder calorífico de la fracción líquida

Parámetro	Experimental	Literatura	Referencia
Humedad (%)	1,81	15-30	(Machado <i>et al.</i> , 2022)
Cenizas (%)	1,57	0,03-0,3	(Machado <i>et al.</i> , 2022)
Poder calorífico (MJ/kg)	16,7	13,0-18,0	(Ribeiro <i>et al.</i> , 2019)

Densidad. El biocombustible obtenido registró una densidad de 0,82 g/mL, valor que aunque se encuentra fuera del rango reportado en literatura para bioaceites que es de 1,1 a 1,3 g/mL (Gupta *et al.*, 2021), refleja no sólo el bajo contenido de humedad que éste tiene, sino que también puede indicar predominio de ácidos grasos de cadenas cortas en su composición.

Espectros FTIR. La caracterización química del bioaceite producto de la pirólisis de biomasa de eucalipto se puede llevar a cabo determinando la presencia de grupos funcionales orgánicos, los cuales se relacionan con la aparición de bandas de absorción en el espectro, tal como se muestra en la Figura 3.

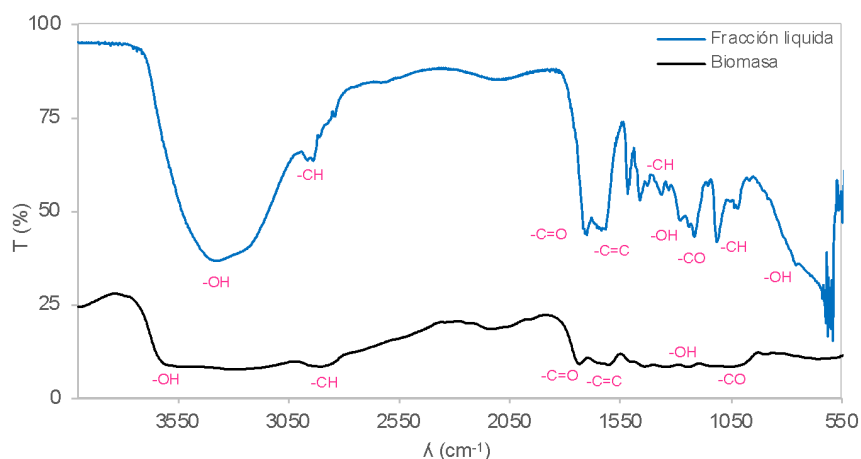


Figura 3. Espectros FTIR fracción líquida de pirólisis – biomasa de eucalipto

Se observa una banda ancha e intensa sobre 3350 cm^{-1} que corresponde al estiramiento del enlace OH^- en alcoholes, fenoles y ácidos carboxílicos. Las señales en 2920 y 2839 cm^{-1} , se asocian al estiramiento del enlace $-\text{CH}$ en hidrocarburos alifáticos, así como a la absorción de aldehídos. La banda que aparece en 1693 cm^{-1} se relaciona con el estiramiento del enlace $-\text{C}=\text{O}$ propio de aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos y ésteres, mientras que la señal en 1615 cm^{-1} representa el estiramiento del enlace $-\text{C}=\text{C}$ en alquenos y vibración del anillo aromático. Entre 1462 y 1377 cm^{-1} se aprecian señales correspondientes al enlace $-\text{CH}$ en alquenos y benceno. El doblamiento del enlace $-\text{OH}$ de alcoholes, fenoles y ácidos, se ubica en 1250 cm^{-1} y cerca de 1215 cm^{-1} la señal es del estiramiento del enlace $-\text{C}-\text{O}$ en alcoholes. En cuanto a las señales 1110 y 1018 cm^{-1} representan el doblamiento de enlaces $-\text{CH}$ en alquenos y en 725 cm^{-1} a $-\text{OH}$ en aromáticos (Guin, 2018; Rijo *et al.*, 2022).

En la Figura 3, se muestra también el espectro FTIR de la biomasa de eucalipto, cuya banda ancha y difusa ubicada entre 3603 y 3200 cm^{-1} corresponde al estiramiento del enlace $-\text{OH}$ presente en polisacáridos como la celulosa e incluso podría indicar agua débilmente absorbida. La señal en 2862 cm^{-1} representa el estiramiento del enlace $-\text{CH}$ en grupos metoxilo, metilo y metileno (Fernández *et al.*, 2021). En 1732 cm^{-1} la señal se asocia al estiramiento del enlace $-\text{C}=\text{O}$ en cetonas (Yuan *et al.*, 2022), con relación a las bandas en 1593 , 1219 y 1000 cm^{-1} se atribuyen al estiramiento del enlace $-\text{C}=\text{C}$ del anillo aromático, doblamiento del enlace $-\text{OH}$ y estiramiento del enlace $-\text{CO}$ en celulosa (Popescu *et al.*, 2007).

Se resalta además, que la comparación de espectros y las diferencias existentes entre ellos, permite evidenciar la transformación que experimenta la biomasa y la nueva composición química del producto pirolítico obtenido.

CONCLUSIONES

La determinación de las propiedades físicas y químicas de la biomasa de *Eucalyptus globulus*, permitió establecer su potencial como materia prima lignocelulósica en la generación de biocombustible líquido, el cual se obtuvo a través de pirólisis, contemplando un tiempo de contacto de 20 min y una temperatura de reacción de $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ como variables experimentales más adecuadas. El bioaceite producido, tuvo un rendimiento del 45,2 % y cuyas características se encuentran dentro del rango de valores reportado en literatura para bioaceites provenientes de material lignocelulósico. Es posible contemplar dicho bioaceite como opción energética que facilite la disminución de la dependencia energética de recursos fósiles, así como la reducción de la contaminación atmosférica asociada a SO_x y NO_x en países como Colombia, cuya elevada actividad agrícola le confiere el título de productor permanente de biomasa lignocelulósica, la cual de ser aprovechada adecuadamente y de forma integral permitirá a futuro la implementación de biorrefinerías, mejorando así el modelo económico existente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Libre – Bogotá, por la financiación del proyecto de investigación código 11030130, a la Universidad de Los Andes en donde se llevaron a cabo los ensayos de pirólisis, así como al programa “semilleros de investigación” por facilitar las herramientas y crear el espacio de formación en investigación a los estudiantes vinculados.

REFERENCIAS

- AGOSTINHO-DA SILVA, D.; ELOY, E.; OTOMAR-CARON, B.; TRUGILHO, F. Elemental Chemical Composition of Forest Biomass at Different Ages for Energy Purposes, *Floresta Ambiente*, v. 26, n. 4, 2019, e20160201. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.020116>
- ALVAREZ-CHAVEZ, B.; GODBOUT, S.; PALACIOS-RIOS, J.; LE ROUX, E.; RAGHAVAN, V. Physical, chemical, thermal and biological pre-treatment technologies in fast pyrolysis to maximize bio-oil quality: A critical review. *Biomass and Bioenergy*, v. 128, 2019, e105333. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105333>
- CARRILLO, I.; MENDONÇA, R.T.; AGO, M.; ROJAS, O.J. Comparative study of cellulosic components isolated from different Eucalyptus species. *Cellulose*, v. 25, 2018, p. 1011–1029. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-1653-2>
- DE PAULA-PROTÁSIO, T.; SCATOLINO, M.V.; DE ARAÚJO, A.C.C.; DE OLIVEIRA, A.F.C. F.; DE FIGUEIREDO, I.C.R.; DE ASSIS, M.R.; TRUGILHO, P.F. Assessing Proximate Composition, Extractive Concentration, and Lignin Quality to Determine Appropriate Parameters for Selection of Superior Eucalyptus Firewood. *Bioenergy Research*, v. 12, 2019, p. 626–641. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-10004-x>
- EVANGELISTA-SILVA, V.; NOGUEIRA, T.A.R.; ABREU-JUNIOR, C.H.; HE, Z.; BUZETTI, S.; LACLAU, J.P.; TEXEIRA-FILHO, M.C.M.; GRILLI, E.; MURGIA, I.; CAPRA, G.F. Influences of edaphoclimatic conditions on deep rooting and soil water availability in Brazilian Eucalyptus plantations. *Forest Ecology and Management*, v. 455, 2020, e117673. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117673>
- FERNANDES, F.; MATOS, S.; GASPAS, D.; SILVA, L.; PAULO, I.; VIEIRA, S.; PINTO, P.C.R.; BORDANO, J.; DOS SANTOS, R.G. Boosting the higher heating value of *Eucalyptus globulus* via thermochemical liquefaction. *Sustainability*, v. 13 n. 7, 2021, p.1–10. <https://doi.org/10.3390/su13073717>
- FU, S.; CHEN, H.; YANG, J.; YANG, Z. Kinetics of thermal pyrolysis of Eucalyptus bark by using thermogravimetric-Fourier transform infrared spectrometry technique. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 139, 2020, p. 3527–3535. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08763-y>
- GIUDICIANNI, P.; GARGIULO, V.; GROTTOLA, C.M.; ALFÈ, M.; FERREIRO, A.I.; MENDES, M.A.A.; FAGNANO, M.; RAGUCCI, R. Inherent Metal Elements in Biomass Pyrolysis: A Review. *Energy Fuels*, v. 35, n. 7, 2021, p. 5407–5478. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c04046>
- GOMES, D.G.; TEIXEIRA, J.A.; DOMINGUES, L. Economic determinants on the implementation of a Eucalyptus wood biorefinery producing biofuels, energy and high added-value compounds. *Applied Energy*, v. 303, 2021, e117662. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2021.117662>
- GONZALEZ-BENECKE, C.A.; FERNÁNDEZ, M.P.; ALBAUGH, T.J.; AHUMADA, R.; BOWN, H. E.; GAYOSO, J.; GERDING, V.; MARDONES, O.B.; RODRIGUEZ, A.R.; RUBILAR, R. General above-stump volume and biomass functions for *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. *Biomass and Bioenergy*, v. 155, 2021, e106280. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2021.106280>

- GUIN, L. Estudio de los procesos de Pílorisis-Gasificación de residuos agrícolas del cultivo de henequén [Tesis de Maestría en Ciencias en Energía Renovable]. Mérida (México): Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), 2018, 74 p.
https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1173/1/PCER_M_Tesis_2018_Guin_Lee.pdf
- GUPTA, S.; MONDAL, P.; BABU, V.; DALAI, A. Advances in upgradation of pyrolysis bio-oil and biochar towards improvement in bio-refinery economics: A comprehensive review *Environmental Technology & Innovation*, v. 21, 2021, e 101276.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101276>
- HOANG, A.T.; ONG, H.C.; FATTAH, I.M.R.; CHONG, C.T.; CHENG, C.K.; SAKTHIVEL, R.; OK, Y.S. Progress on the lignocellulosic biomass pyrolysis for biofuel production toward environmental sustainability. *Fuel Processing Technology*, v. 223, 2021, e106997.
<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106997>
- HU, X.; GHOLIZADEH, M. Biomass pyrolysis: A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation stage. *Journal of Energy Chemistry*, v. 39, 2019, p.109–143.
<https://doi.org/10.1016/j.jechem.2019.01.024>
- IGNACIO, L.H.; DAS, SANTOS, P.E. DE A.; DUARTE, C.A.R. An experimental assessment of *Eucalyptus urosemite* energy potential for biomass production in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 103, 2019, p.361–369.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.053>
- LALOON, K.; JUNSIRI, C.; SANCHUMPU, P.; ANSUREE, P. Factors affecting the biomass pellet using industrial eucalyptus bark residue. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2022, p.1-13.
<https://doi.org/10.1007/s13399-022-03126-4>
- KUMAR, K.; ROY, C.; YADAV, D.; VERMA, R.; DUTTA, S.; SMRITI, K.; SANGMESH, B.; KARUPPASAMY, K. Renewable and sustainable clean energy development and impact on social, economic, and environmental health. *Energy Nexus*, v. 7, 2022, e100118.
<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100118>
- KUMAR, R.; STREZOV, V.; WELDEKIDAN, H.; HE, J.; SINGH, S.; KAN, T.; DASTJERDI, B. Lignocellulose biomass pyrolysis for bio-oil production: A review of biomass pre-treatment methods for production of drop-in fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 123, 2020, e109763.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109763>
- KUMAR, P.; SUBBARAO, P.M. V.; KALA, L.D.; VIJAY, V.K. Thermogravimetry and associated characteristics of pearl millet cob and eucalyptus biomass using differential thermal gravimetric analysis for thermochemical gasification. *Thermal Science and Engineering Progress*, v. 26, 2021, e101104.
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101104>
- MACHADO, H.; CRISTINO, A.; ORIŠKOVÁ, S.; GALHANO, R. Review Bio-Oil: The Next-Generation Source of Chemicals. *Reactions*, v. 3, 2022, p.118 - 137.
<https://doi.org/10.3390/reactions3010009>
- MALICO, I.; GONÇALVES, A.C. *Eucalyptus globulus* Coppices in Portugal: Influence of Site and Percentage of Residues Collected for Energy. *Sustainability*, v. 13, 2021, 5775.
<https://doi.org/10.3390/su13115775>
- MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE (MINAMBIENTE). Plan de Acción para la Gestión Sostenible de la Biomasa Residual. 2022
<https://economiacircular.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/04/Plan-de-Accion-para-la-Gestion-Sostenible-de-la-Biomasa-Residual.pdf> [Consultado Marzo 12 de 2022].
- PEGORETTI-LEITE DE SOUZA, H.J.; MUÑOZ, F.; MENDONÇA, R.T.; SÁEZ, K.; OLAVE, R.; SEGURA, C.; DE SOUZA, D.P.L.; PROTÁSIO, T.D.P.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. Influence of lignin distribution, physicochemical characteristics and microstructure on the quality of biofuel pellets made from four different types of biomass. *Renewable Energy*, v. 163, 2021, p.1802–1816.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.065>
- PIRRAGLIA, A.; GONZALEZ, R.; SALONI, D.; WRIGHT, J.; DENIG, J. Fuel properties and suitability of *Eucalyptus benthamii* and *Eucalyptus macarthurii* for torrefied wood and pellets. *BioResources*, v. 7, n. 1, 2012, p.217–235.

- POPESCU, C.M.; POPESCU, M.C.; SINGUREL, G.; VASILE, C.; ARGYROPOULOS, D.S.; WILLFOR, S. Spectral characterization of eucalyptus wood. *Applied Spectroscopy*, v. 61 n. 11, 2007, p.1168–1177.
<https://doi.org/10.1366/000370207782597076>
- RIBEIRO, L.A.B.; MARTINS, R.C.; MESA-PÉREZ, J.M.; BIZZO, W.A. Study of bio-oil properties and ageing through fractionation and ternary mixtures with the heavy fraction as the main component. *Energy*, v. 169, 2019, p.344–355.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.042>
- RIJO, B.; SOARES-DIAS, A.P.; RAMOS, M.; AMEIXA, M. Valorization of forest waste biomass by catalyzed pyrolysis. *Energy*, v. 243, 2022, e122766.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122766>
- SAMAL, B.; VANAPALLI, K.R.; DUBEY, B.K.; BHATTACHARYA, J.; CHANDRA, S.; MEDHA, I. Influence of process parameters on thermal characteristics of char from co-pyrolysis of eucalyptus biomass and polystyrene: Its prospects as a solid fuel. *Energy*, v. 232, 2021, e121050.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121050>
- SINGH, R.K.; SHRIVASTAVA, D.K.; SARKAR, A.; CHAKRABORTY, J.P. Co-pyrolysis of eucalyptus and sodium polyacrylate: optimization and synergistic effect. *Fuel*, v. 277, 2020, e118115.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118115>
- SOUZA, A.G.; DE LIMA, G.F.; RODRIGUES, R.C.L.B.; CESARINO, I.; LEÃO, A.L.; ROSA, D.S. A New Approach for Conversion of Eucalyptus Lignocellulosic Biomass into Cellulose Nanostructures: A Method that Can Be Applied in Industry. *Journal of Natural Fibers*, v. 18, n. 10, 2021, p.1501–1511.
<https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1691125>
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Proyecto i-COOP B20431-CSIC (2020-2021). Instituto Eduardo Torroja (España): 2020-2021.
https://proyectovisbogota.ietcc.csic.es/?page_id=376 [Consultado agosto 3 de 2022]
- WANG, H.; WANG, B.; SUN, D.; SHI, Q.; ZHENG, L.; WANG, S.; LIU, S.; XIA, R.; SUN, R. Unraveling the Fate of Lignin from Eucalyptus and Poplar during Integrated Delignification and Bleaching. *ChemSusChem*, v. 12, n. 5, 2019, p.1059–1068.
<https://doi.org/10.1002/cssc.201802592>
- XU, J.; LIAO, Y.; LIN, Y.; MA, X.; YU, Z. Study on catalytic pyrolysis of eucalyptus to produce aromatic hydrocarbons by Zn-Fe co-modified HZSM-5 catalysts. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, v. 139, 2019, p.96–103.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.01.014>
- YANG, Q.; ZHANG, H.; WANG, L.; LING, F.; WANG, Z.; LI, T.; HUANG, J. Topography and soil content contribute to plant community composition and structure in subtropical evergreen-deciduous broadleaved mixed forests. *Plant Diversity*, v. 43, n. 4, 2021, p.264 - 274.
<https://doi.org/10.1016/j.pld.2021.03.003>
- YOGALAKSHMI, K.N.; DEVI T,P.; SIVASHANMUGAM, P.; KAVITHA S, YUKESH KANNAHR.; SUNITA, V. Lignocellulosic biomass-based pyrolysis: A comprehensive review. *Chemosphere*, v. 286 (Part 2), 2022, e131824.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131824>
- YORO, K.O.; DARAMOLA, M.O. CO₂ emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. En: MOHAMMAD REZA RAHIMPOUR, MOHAMMAD FARSI, MOHAMMAD AMIN MAKAR; *Advances in Carbon Capture. Methods, Technologies and Applications*. N.Y. (U.S.A.): Elsevier, 2020, 28 p.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819657-1.00001-3>
- YUAN, J.M.; LI, H.; XIAO, L.P.; WANG, T.P.; REN, W.F.; LU, Q.; SUN, R.C. Valorization of lignin into phenolic compounds via fast pyrolysis: Impact of lignin structure. *Fuel*, v. 319, 2022, e123758.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123758>
- ZHENG, A.; XIA, S.; CAO, F.; LIU, S.; YANG, X.; ZHAO, Z.; TIAN, Y.; LI, H. Directional valorization of eucalyptus waste into value-added chemicals by a novel two-staged controllable pyrolysis process. *Chemical Engineering Journal*, v. 404, 2021, e127045.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127045>