

**OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE A TRAVÉS DE CO-PIRÓLISIS RÁPIDA DE  
BIOMASA DE EUCALIPTO Y PALMA**

**DANIELA ALEJANDRA MELO ROMERO  
CODIGO: 64151042**



**UNIVERSIDAD LIBRE  
FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA AMBIENTAL  
BOGOTA, D.C., 2021**

**OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE A TRAVÉS DE CO-PIRÓLISIS RÁPIDA DE  
BIOMASA DE EUCALIPTO Y PALMA**

**DANIELA ALEJANDRA MELO ROMERO**

Cod.64151042

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Ambiental

Directora

Luisa Fernanda Navarrete Rodríguez

Química, MSc.

Universidad Libre

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Ambiental

Bogotá, D.C., 2021

**Declaratoria de originalidad:**

“El presente trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Ambiental de la Universidad Libre no ha sido aceptado o empleado para el otorgamiento de calificación alguna, ni de título, o grado diferente o adicional al actual. La propuesta de tesis es resultado de las investigaciones del autor (es), excepto donde se indican las fuentes de Información consultadas”.

A handwritten signature in black ink that reads "Daniela Melo Romero". The script is cursive and somewhat informal, with the first letter 'D' being significantly larger and more decorative than the rest of the letters.

Daniela Alejandra Melo Romero  
064151042

## **Dedicatoria**

Le agradezco a Dios y a mis padres Juan Carlos Melo y Miryam Romero, por acompañarme y guiarme en este proceso, sus consejos, dedicación y amor hacia mí, me han llevado a consolidar esta etapa de mi vida.

A mi madre que admiro con todo mi corazón, porque gracias a su esfuerzo y entrega, siempre será mi motivación más grande.

A mi padre por su paciencia y apoyo en todas mis ideas, y en todo lo que he necesitado, seguiré tus pasos como persona perseverante y luchadora.

A mi hermana Alison que, con su carisma y manera de pensar, han sido fundamental para seguir adelante motivándome y ayudándome para cumplir con mis ideales.

Con mi más sentido amor todos mis logros son para ustedes.

A familiares y amigos que compartieron conmigo su conocimiento, alegrías, pero también tristezas, fueron un pilar importante con sus consejos y palabras de aliento, de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

A las personas que ya no se encuentran conmigo físicamente, pero sé que me siguen guiando y cuidando en donde quiera que se encuentren.

## **Agradecimientos**

A la universidad Libre por brindarme las aulas, equipos y espacios para poder llevar a cabo mi proyecto de grado, los docentes y académicos que con su enseñanza, experiencia y dedicación fueron necesarios para seguir fortaleciendo e incentivando mi conocimiento.

A mi directora Luisa Navarrete porque siempre me colaboró y estuvo pendiente de mi proceso, fue mi gran ayuda y soporte para terminar el proyecto, y pese algunos inconvenientes que se tuvo, ella siempre estuvo con una actitud perseverante y motivadora para seguir, mi respeto y admiración ya que además de lo aprendido académicamente, me enseñó el amor y la dedicación por su trabajo.

## Tabla de contenido

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	1
2. JUSTIFICACIÓN.....	2
3. <b>OBJETIVOS</b> .....	4
GENERAL .....	4
ESPECÍFICOS.....	4
4. MARCO REFERENCIAL.....	5
5. MARCO GEOGRÁFICO .....	8
6. MARCO LEGAL.....	9
<b>Tabla 1.</b> Normatividad biocombustibles en Colombia .....	9
7. METODOLOGÍA.....	11
<b>Tabla 2.</b> Caracterización física y química de la biomasa .....	11
Tabla 3. Relación de variables – niveles en la aplicación del diseño experimental .....	12
<b>Tabla 4.</b> Combinación de variables – número de ensayos a realizar .....	13
<b>Tabla 5.</b> Caracterización física y química del combustible.....	13
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	14
Gráfico 1. Caracterización física y química de mezcla 50-50 eucalipto-palma.....	14
Gráfico 2. Análisis próximo mezcla 50-50 eucalipto-palma.....	15
Gráfico 3. Espectro FTIR biomasa de co-pirólisis.....	16
Gráfico 4. Análisis TGA de mezcla 50-50 biomasa eucalipto-palma.....	17
Gráfico 5. Análisis CHONS .....	18
Gráfico 6. Rendimiento fracción líquida obtenida bajo diferentes condiciones experimentales. ....	18
Gráficos 7. Caracterización de la mezcla eucalipto – palma a) Fracción líquida, b) biomasa.....	19
Gráfico 8. Espectros FTIR fracción líquida bajo diferentes tratamientos experimentales .....	20
Gráficos 9. Espectros FTIR a) biomasa y b) fracciones líquidas con y sin tratamiento hidrolítico .....	21
Gráfico 10. Influencia hidrólisis en bioaceite.....	22
9. CONCLUSIONES .....	23
10. RECOMENDACIONES .....	24
11. REFERENCIAS .....	25

## **INTRODUCCIÓN**

En la búsqueda de alternativas energéticas sustentables y menos contaminantes, el uso de la biomasa lignocelulósica ha cobrado gran importancia, ya que no sólo es renovable, sino que se encuentra en grandes cantidades; el uso de eucalipto – palma en la obtención de biocombustibles se lleva a cabo a través de co-pirólisis de en relación másica 50:50, contemplando temperatura y tiempo de contacto como variables de importancia en el proceso de transformación termoquímica. Los resultados obtenidos han permitido establecer el potencial energético que representa emplear dichas biomásas como materia prima renovable y más amigable con el medio ambiente.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La alta demanda energética ha hecho que se incremente de forma exponencial la dependencia sobre los combustibles derivados de recursos no renovables como el petróleo y el carbón [1], cuya combustión ha conducido indiscutiblemente al deterioro del medio ambiente, no sólo porque se disminuye la calidad del aire por presencia de material particulado en altas concentraciones, sino también porque se producen emisiones de gases contaminantes [2-3], tales como los denominados SO<sub>x</sub>, los cuales tienen un efecto devastador en los diferentes ecosistemas, pues son directos responsables del fenómeno conocido como lluvia ácida [4], en el que las precipitaciones disminuyen drásticamente su pH generando la desaparición y deceso tanto de flora como de fauna, ocasionando igualmente serios problemas de salud en los seres humanos.



## 2. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad se desarrollan numerosas investigaciones que se enfocan hacia la búsqueda y explotación de recursos renovables considerados como fuente potencial de combustibles menos contaminantes y más amigables con el medio ambiente; entre las distintas posibilidades, la biomasa lignocelulósica [5] ocupa un lugar destacado, ya que a partir de ella es posible obtener diversos biocombustibles con aplicación directa en medios de transporte.

Aunque existen varias rutas para la obtención de biocombustibles, se puede señalar a la pirólisis como una de las más versátiles, pues a partir de ella se generan biocombustibles en estado sólido, líquido o gaseoso, lo cual va a depender de variables de proceso tales como temperatura, tiempo de contacto, tamaño de partícula, entre otras [6-7]. La pirólisis rápida se emplea cuando el interés radica en la fracción líquida o bioaceite, el cual constituye un producto sumamente interesante, cuya calidad depende no sólo de las propiedades y composición de la materia prima sino también de las condiciones experimentales [8-9], en donde la co-pirólisis surge como método en el que se busca modificar las características físicas y químicas del bioaceite a través de la pirólisis rápida de mezclas de biomasa de diferente fuente [6,8,10].

Actualmente se registran diversos estudios sobre co-pirólisis, resaltando algunos trabajos en los que:

- Emplean plásticos de PVC y biomasa de aserrín de madera de pino chino, en atmosfera de  $N_2$  y mediante la variación de temperaturas y velocidades de calentamiento, logran obtener reducción de agua y oxígeno en el líquido, así como también un aumento en el rendimiento de alcoholes y del bioaceite, basándose en una comparación entre la mezcla obtenida por medio de las dos materias primas y los materiales puros [11].
- Incluyen en el bioaceite cáscaras de cacahuate con una mezcla de almidón de yuca, obteniendo como resultado un incremento del 58.2% en el rendimiento del bioaceite, así como disminución del contenido de agua en 3.4% [12].
- Aprovechan los neumáticos usados y los residuos de aceites provenientes de buques, encontrando que los hidrocarburos que se generan son más livianos, con relación a la degradación térmica, además de aumentar la composición en parafina y disminuir el contenido de compuestos aromáticos [13].

En Colombia, la universidad Pontificia Bolivariana, desarrolló un trabajo en el que se emplearon mezclas de pino y neumáticos bajo atmósfera inerte, en donde se modificó la temperatura y velocidad de reacción, cuyos resultados permitieron concluir que la

adición de neumáticos beneficia el material de alimentación porque se generan porcentajes bajos de aldehídos y compuestos fenólicos [14].

En la universidad Libre – sede Bogotá, actualmente se adelantan trabajos en los que a través de ensayos de co-pirólisis se evalúan residuos de cuesco de palma y neumáticos bajo atmósfera de CO<sub>2</sub>, que contempla diferentes temperaturas y porcentajes de mezcla cuesco – neumáticos [15].

En el país, hay residuos de diferentes cultivos que se han incrementado exageradamente por beneficios gubernamentales, caso particular de la generación de biomasa a partir de la palma aceitera, gracias a la producción de biodiesel [7]. También existe otro tipo de biomasa como la del eucalipto, cuya presencia en ciertas regiones del país (especialmente en Bogotá y sus alrededores) ocasiona cambios en la calidad del suelo, así como en la disposición de las fuentes de agua cercanas [16-17]. Puesto que a la fecha no se registran trabajos sobre co-pirólisis de biomasa de palma y eucalipto, el presente trabajo se plantea como parte de la posible solución energética, obteniendo un biocombustible de buena calidad, a partir del aprovechamiento de desechos vegetales.

### **3. OBJETIVOS**

#### **GENERAL**

Evaluar la co-pirólisis rápida de biomasa de eucalipto y palma como método de obtención de biocombustible líquido.

#### **ESPECÍFICOS**

- Establecer las propiedades físicas y químicas propias de las biomásas de palma y eucalipto, que permiten aprovecharlas como fuentes potenciales generadoras de biocombustibles.
- Determinar las condiciones experimentales que permitan obtener una mayor proporción de fracción líquida producto de la co-pirólisis rápida de biomasa de palma y eucalipto.
- Estimar el efecto de un pretratamiento hidrolítico ácido en el rendimiento de la fracción líquida producto de la co-pirólisis rápida.

#### 4. MARCO REFERENCIAL

Los combustibles fósiles representan gran poder energético, razón por la cual aún en la actualidad siguen siendo de preferencia en diversas actividades humanas, a pesar de significar deterioro ambiental no sólo por los métodos que se emplean en su extracción, sino también por la gran variedad de gases contaminantes que se expulsan a la atmósfera terrestre como producto de su combustión [18].

Como parte de las estrategias en pro de la preservación del medio ambiente, han surgido los biocombustibles, cuya materia prima proviene de fuentes renovables como la denominada biomasa, la cual de acuerdo a sus características físicas y químicas va a definir en gran medida la calidad del biocombustible a obtener [19].

Entre los métodos de obtención de biocombustibles se encuentra la pirólisis, que básicamente consiste en un proceso termoquímico y que, bajo atmósfera inerte, transforma la biomasa en productos sólidos, líquidos o gaseosos de gran interés energético, en donde las variables experimentales influyentes definen tanto el tipo de pirólisis a llevar a cabo, como el estado físico y rendimiento del biocombustible [19]. Actualmente, la fracción líquida se constituye en tema especialmente prometedor, debido a su versátil composición química; a través de la denominada pirólisis rápida [20] y, teniendo en cuenta factores como tipo de biomasa, velocidad de calentamiento entre (10-200 °C/s), temperaturas elevadas (400-600 °C), tiempos de residencia cortos y tipo de reactor, se logran rendimientos entre 60 – 75% en términos de producción de bioaceite [21,22,23]. Sin embargo, los líquidos que se obtienen por medio de pirólisis rápida tienden a presentar algunos inconvenientes relacionados con el contenido de humedad y la concentración de grupos funcionales oxigenados, convirtiendo el bioaceite en corrosivo y viscoso ante ciertos periodos de almacenamientos, razón por la que en muchas ocasiones se dificulta su uso directo como sustituyente de biodiesel o gasolina, aunque se debe mencionar que tiene gran potencial en turbinas, calderas y hornos [19,24,25].

En pro de mejorar la calidad del bioaceite, surge una técnica conocida como copirólisis, en donde se modifica tanto las propiedades como la calidad del líquido a obtener, lo cual se debe a la interacción de más de un material en la alimentación, el contenido de agua que está presente en el bioaceite se reduce drásticamente, además el pH suele incrementar, debido a que se producen menos ácidos lo cual beneficia ya que disminuye la corrosión ácida en el proceso, también aumenta el poder calorífico, e impide la generación de ácido acético y formación de especies que contienen O, y compuestos que contienen N [26][27].

Entre los beneficios que reporta la implementación de co-pirólisis como método de transformación termoquímica, se encuentra la reducción en el contenido de cenizas, constituyendo, además, una forma energética de aprovechamiento de residuos, y la mejora en la utilización tanto de la madera del eucalipto como el cuesco [28]. Aunque el mecanismo de operación es el mismo que el de una pirólisis convencional, en la co-pirólisis la sinergia existente entre los materiales constituyentes, permiten mejorar la calidad del bioaceite [27,28], se aumenta considerablemente el rendimiento del líquido y disminuyendo por lo tanto el rendimiento del gas [26].

Las propiedades físicas y químicas, así como el rendimiento del bioaceite a obtener, en gran medida se establecen por la biomasa a emplear, la cual en su mayoría corresponde al tipo lignocelulósico, pues no compite con la canasta alimenticia. Los materiales lignocelulósicos se caracterizan por la presencia de tres compuestos; a) celulosa, biopolímero con largas cadenas lineales que se unen a través de puentes de hidrógeno y fuerzas de van der Waals, b) hemicelulosa, polímero conformado por pentosas, de las cuales se forman cadenas ramificadas, la estructura de este compuesto puede cambiar dependiendo de las especies que se pueden encontrar [21], c) lignina, polímero fenólico que cumple la función de unir las fibras de celulosa-hemicelulosa, y las recubre para protegerlas del agua cuando recorre la planta por medio del proceso de transporte, dando rigidez e impermeabilidad a la planta. Entre los principales grupos funcionales que se pueden encontrar en la lignina están hidroxilos, metoxilos, carboxilos, y sulfonatos [29,30].

Aunque la composición química de la biomasa lignocelulósica depende en gran parte de la variedad precursora, en el caso del cuesco de palma, se reporta un porcentaje de lignina superior al 48%, así como un bajo contenido porcentual de azufre y nitrógeno, los cuales se registran menor o igual a 0.2 y 0.32 respectivamente [31]. En cuanto al eucalipto, además del alto contenido de lignina y celulosa, tiene una presencia considerable de monómeros de hemicelulosa e igualmente bajo porcentaje de azufre y nitrógeno [32,33].

Actualmente en Colombia, el aprovechamiento que se le da a la biomasa lignocelulósica principalmente consiste en:

- Fabricación de adoquines con el cuesco de palma africana [31], los cuales se emplean en vías o caminos de cultivos. También se utiliza en compostaje y de forma directa como combustible para calderas [34]. Además, pequeñas fracciones de estos residuos se utilizan en la elaboración de alimentos para animales, carbones activados, etc. [35].
- El cuesco de palma se ha implementado como material de construcción, de manera sostenible debido a las propiedades que se obtienen de dicha biomasa, este material se integra a la mezcla de concreto, sirviendo como alternativa del concreto convencional [36].

- Obtención de carbón activado a partir de residuos de eucalipto, cuya principal aplicación es tratamiento de aguas contaminadas por metales pesados y compuestos fenólicos [37].
- Eucalipto como material de construcción para fabricar paneles de aislamiento, obteniendo una disminución en las emisiones de carbono y, dando una alternativa al sector de la construcción sostenible [38].
- Se implementa el aceite de eucalipto como alternativa para pesticidas químicos con el fin de combatir insectos de almacenamiento, lo cual contribuye a mejorar no solo el ambiente, sino que permite disminuir los contaminantes tanto del suelo como del agua [39].

## 5. MARCO GEOGRÁFICO

En Colombia, la mayor producción de palma de aceite se ubica en los departamentos de Bolívar, Casanare, Cesar, Magdalena, Meta, Nariño, Norte de Santander y Santander, posicionando al país en el 5to puesto mundial en cuanto a producción de aceite se refiere [40]. En cuanto al eucalipto, éste se encuentra en grandes cantidades en los departamentos de Antioquia, Cundinamarca, Valle y Boyacá [41].

Puesto que el aprovechamiento de la biomasa lignocelulósica de palma y eucalipto no sólo debe representar su existencia en grandes cantidades, sino también facilidad de transporte, en la figura 1 se muestra el área de estudio del presente trabajo, que comprende el departamento del Meta para la obtención del cuesco de palma, mientras que el eucalipto se recolecta en el departamento de Cundinamarca en especial en la ciudad de Bogotá, incluyendo el campus de la Universidad Libre, sede Bosque Popular.

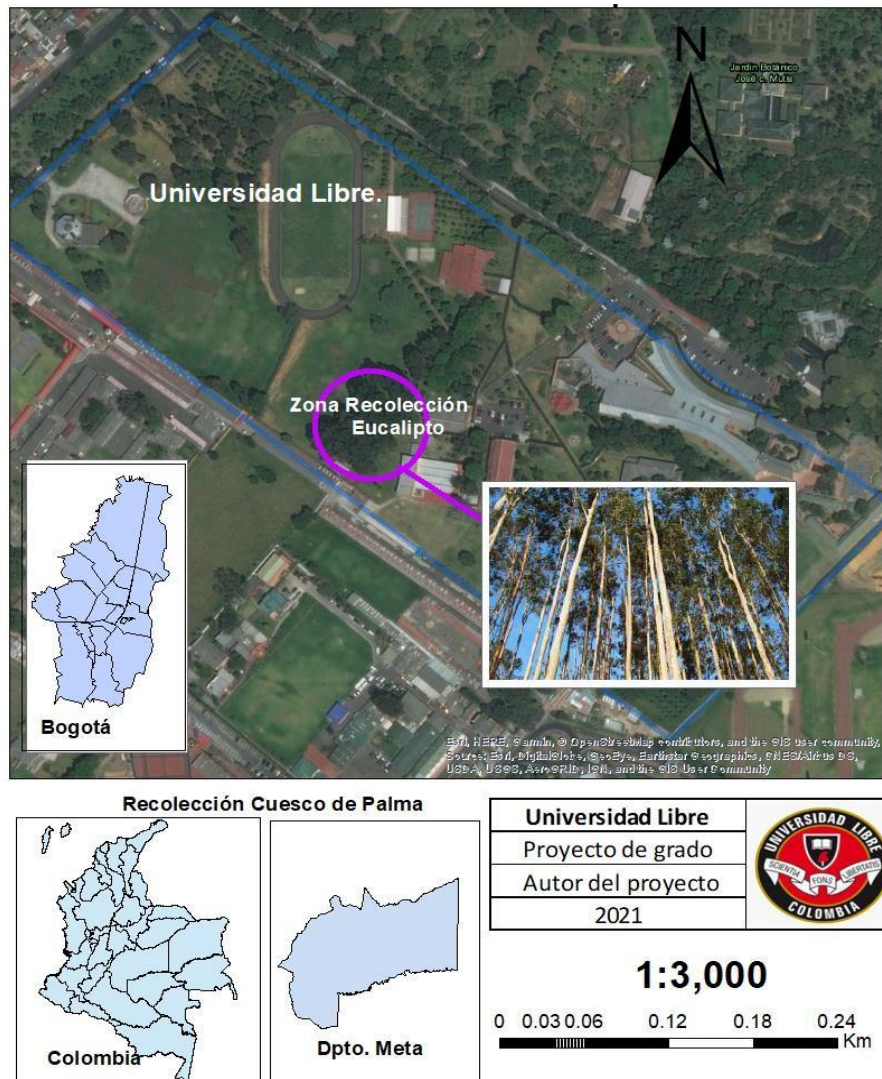


Figura 1: Localización de recolección materia prima

## 6. MARCO LEGAL

El aprovechamiento del bioaceite como biocombustible sostenible ambiental, social y económicamente, debe contemplar el conjunto de normas y leyes establecidas para tal fin, en la tabla 1 se relaciona la normatividad existente en Colombia para biocombustibles.

**Tabla 1.** Normatividad biocombustibles en Colombia [42]

NORMATIVIDAD	DESCRIPCIÓN
Resolución 41010 05 oct 2018	Se modifica la resolución 181780 del 29 dic del 2005, que establece los procedimientos para producir un biocombustible, se estipula un precio para su eventual comercialización para gasolina y mezclas.
Resolución 40184 27 de feb 2018	Se estipula el biocombustible de origen vegetal y animal en los motores diésel en un 10 %, para la ciudad de Bogotá, Llanos orientales, y Centro del país.
Ley 1715 de 2014	En su artículo 18, Energía de Residuos, se considera como FNCER y se obtiene un gran aprovechamiento energético de los residuos de la biomasa.
Decreto 4892 23 dic de 2017	Beneficios ambientales, sociales y económicos, mayor aprovechamiento y buena calidad, por medio de mezclas con alcoholes, carburantes y biocombustibles, además se estipula parámetros de buenas prácticas de mejora al biocombustible.
Decreto 181556 31 de Ag de 2010	Se estipula precios de ACPM y mezcla de los biocombustibles para uso de motores diésel otorgado por el MinMinas desde la producción hasta su eventualidad distribución.
Resolución 181120 28 de jun 2010	Grandes plantas de biocombustible ubicadas en: Caquetá, Tolima, Huila y Putumayo, tienen en cuenta las especificaciones de calidad técnica y ambiental para uso de motores diésel B-10 con una mezcla del 10%.
CONPES Lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia.	Distribución geográfica de la biomasa en el país, y su posterior producción de biocombustible, parámetros de calidad sin generar una afectación a la biodiversidad



Resolución 182087 de 2007	Icontec expide la norma NTC 5444, que habla de la producción de biocombustibles para los motores diésel, adecuando los criterios de calidad y resaltando especificaciones por cumplir.
La ley 939 de 2004	Estimula producción y comercialización de biocombustibles del cultivo de palma para uso de Motores diésel.

## 7. METODOLOGÍA

El presente trabajo se realizó teniendo en cuenta diferentes etapas, las cuales se describen a continuación [5,20,30]:

- **Recolección materia prima – biomasa:** se obtuvo una cantidad suficiente de biomasa lignocelulósica de cuesco de palma y eucalipto, provenientes de los departamentos de Meta y Cundinamarca (Bogotá, D.C.)
- **Pretratamiento de biomasa:** se realizó lavados con agua, incluyendo un secado a temperatura adecuada, el cual disminuyó la humedad extrínseca, también se llevó a cabo reducción de tamaño de partícula en un rango de 2 a 3 mm, y finalmente se culminó con el tamizado [43].
- **Caracterización física y química:** con el propósito de establecer el potencial energético de la biomasa de palma y eucalipto, se llevó a cabo la determinación de propiedades físicas y químicas relacionadas en la tabla 2, de forma individual y en mezcla en la misma proporción (50-50%).

**Tabla 2.** Caracterización física y química de la biomasa [44,45,46,47,48,49]

ANÁLISIS	DESCRIPCIÓN	NORMA
Contenido de humedad	Determinación gravimétrica, en donde se ubican 10 g de la muestra en crisoles, se llevan al horno a una temperatura de 105°C durante dos horas, luego se deja enfriar y por último pesar.	ASTM D-871-82
Contenido de Celulosa y Lignina	Determinación volumétrica a través de titulaciones redox, previa digestión de la muestra en medio fuertemente ácido.	ASTM D1106 – 96
Contenido de cenizas	La muestra se lleva a la mufla a una temperatura de 700 a 750 °C por 2 horas, luego se eleva la temperatura de 900 a 950°C aproximadamente por 2 horas, después se dejan enfriar en desecador y se pesan.	ASTM D-1102
Poder calorífico	Por medio de una bomba previamente calibrada, se introduce 1 g de muestra y, en atmosfera de oxígeno se genera una corriente eléctrica,	Manual bomba calorimétrica Parr 1341 ASTM D3172-13

	registrando constantemente temperatura y tiempo	
Material volátil	A una temperatura de 900°C se lleva la muestra por 7 min (también se puede relacionar como la diferencia entre humedad y cenizas).	ASTM D3175-07
Carbono fijo	Suma de los datos obtenidos de humedad, cenizas y material volátil, anteriormente tomados, con esta diferencia se encuentra el carbono fijo	ASTM D3172
Análisis espectrofotométrico FTIR	Determinación de la presencia de grupos funcionales orgánicos	Manual del equipo FTIR Prestige 21, Shimadzu  ASTM E168
Análisis Termogravimétrico	Descomposición térmica de una muestra en atmósfera controlada. La pérdida de masa en un rango de temperatura específica, proporciona un análisis básico de la composición de la muestra.	ASTM E1131-08
Análisis Elemental (CHONS)	Determinación porcentual en la muestra de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre, lo cual se lleva a cabo en analizador automático que requiere poca cantidad de muestra.	ASTM D5373-93

- **Obtención de fracción líquida:** Se llevó a cabo en un pirolizador que consta de un reactor de lecho fijo, en donde se introdujo mezcla 50-50 de biomasa (Cuesco de Palma y Eucalipto) y bajo atmosfera de N<sub>2</sub> (50 ml/min), se evaluó el porcentaje de fracción líquida a través de un diseño de experimentos factorial tipo 2<sup>k</sup>, contemplando la influencia de variables como temperatura y tiempo de residencia, en diferentes niveles tal como se observa en la tabla 3.

**Tabla 3.** Relación de variables – niveles en la aplicación del diseño experimental

Variables	Nivel bajo (-)	Nivel alto (+)
Temperatura (°C)	550	650
Tiempo (min)	20	45

El número total de ensayos, así como la respectiva combinación de variables, se aprecia en la tabla 4. Cabe mencionar que, con el propósito de obtener datos confiables en cuanto a reproducibilidad, cada ensayo se realizó por duplicado.

**Tabla 4.** Combinación de variables – número de ensayos a realizar.

<b>Ensayo</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tiempo (min)</b>
1	550	20
2	550	45
3	650	20
4	650	45

Una vez realizados los ensayos pirolíticos, los productos obtenidos en fase líquida, se caracterizaron a través de ensayos físicos y químicos que se relacionan en la tabla 5 (incluyendo algunos citados en la tabla 3)

**Tabla 5.** Caracterización física y química del combustible [33,43,45,46]

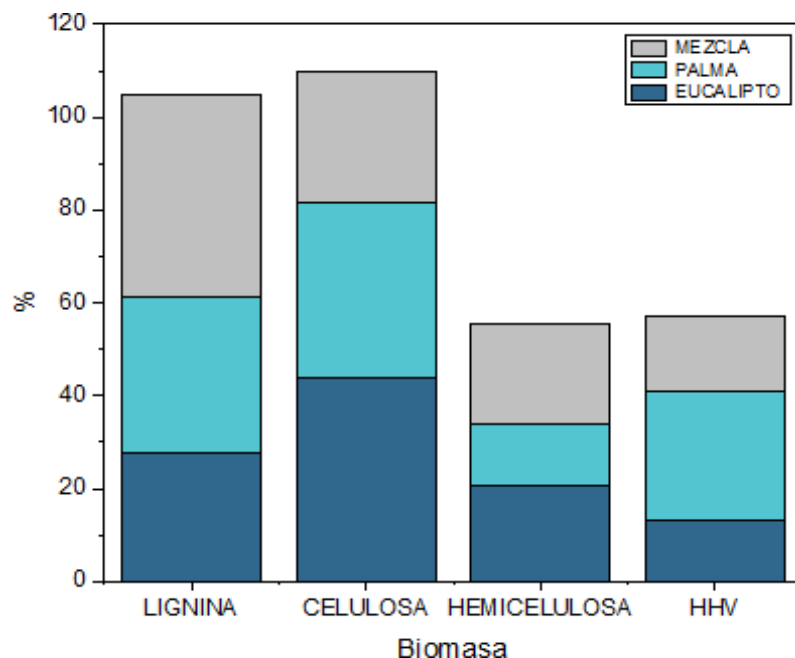
<b>ANALISIS</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>NORMA (Ref)</b>
Densidad	Se lleva a cabo empleando un picnómetro, se introduce el líquido obtenido y luego pesar.	ASTM D4052 ISO 3675

- **Evaluación influencia tratamiento hidrolítico:** con las condiciones experimentales más adecuadas, determinadas en el anterior ítem, se llevará a cabo un ensayo de co-pirólisis con muestra sometida a tratamiento hidrolítico con ácido clorhídrico 3% v/v.

## 8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 8.1 Caracterización biomasa

La determinación de las propiedades físicas y químicas de la biomasa de estudio, permiten establecer el potencial energético de la materia prima en la obtención de biocombustibles; en el gráfico 1 se muestra la caracterización de la mezcla palma – eucalipto en una relación 50-50%, incluyendo algunos datos registrados en literatura para los componentes individuales.



**Gráfico 1.** Caracterización física y química de mezcla 50-50 eucalipto-palma [19, 25, 47,50,51,52]

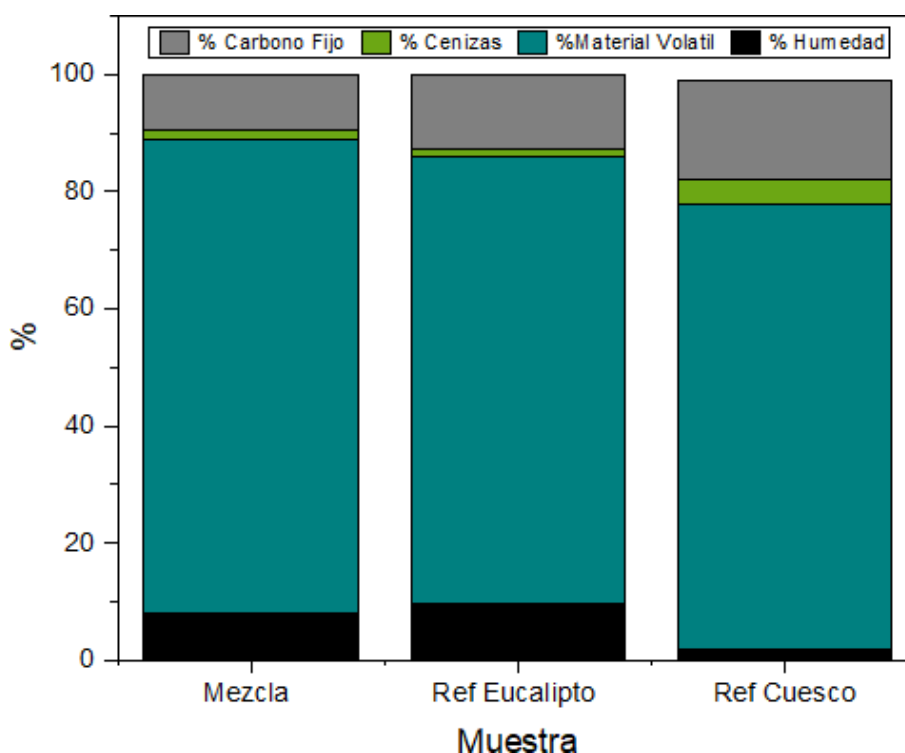
Como tendencia general, en la mezcla se observa disminución en los valores de la gran mayoría de parámetros evaluados con respecto a los componentes individuales, evidenciando una posible sinergia entre las biomásas empleadas; el contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, cada una se encuentran por debajo del 50%, lo cual eventualmente va a facilitar la transformación de dichos polímeros en unidades estructurales más pequeñas y por ende productos (líquidos, sólidos y gaseosos) de carácter energético [5].

Puesto que el poder calorífico es uno de los parámetros de importancia en cuanto a calidad se refiere, la determinación de éste en la biomasa permite estimar el

rendimiento y calidad del líquido a obtener [53-55]. En el gráfico se observa que la mezcla palma – eucalipto, representa un valor medio entre los datos registrados en literatura para los componentes individuales, reflejando la influencia de la composición de la mezcla en cuanto a aporte energético se refiere [56-59].

## 8.2 Análisis Próximo biomasa

El análisis próximo brinda información básica relacionada con las propiedades de la biomasa, en el gráfico 2 se aprecian resultados de humedad, materia volátil, carbono fijo y cenizas, para la mezcla de biomasa eucalipto – palma.



**Gráfico 2.** Análisis próximo mezcla 50-50 eucalipto-palma

*Humedad:* disminución con respecto al eucalipto, pero un ligero aumento con respecto al cuesco, lo cual se podría atribuir no solo a las características edafoclimáticas del cultivo de donde provienen las diferentes biomásas, sino a la variedad de las especies empleadas [56].

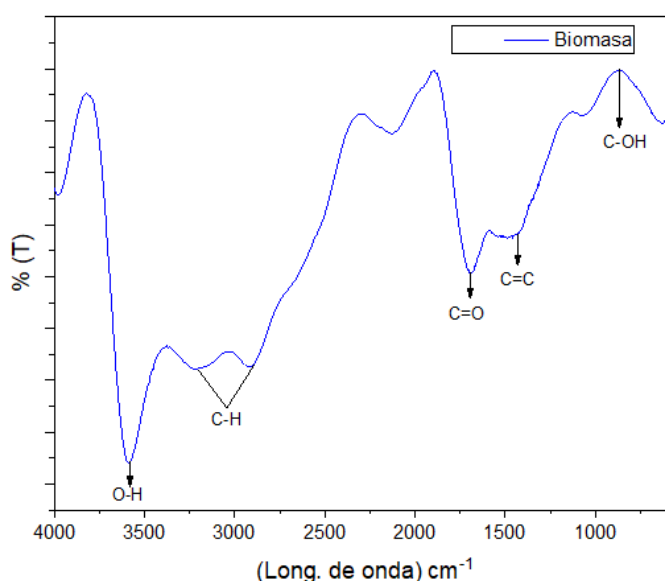
*Cenizas:* reducción significativa del contenido de cenizas en la mezcla, lo cual señala menor cantidad de material inorgánico en la fracción líquida a obtener [54].

*Materia volátil*: parámetro en el que contribuyen las composiciones de celulosa y hemicelulosa, en la mezcla éste sobrepasa el 80% y se encuentra en mayor proporción que los componentes individuales registrados en literatura [60].

*Carbono fijo*: aunque es algo bajo con respecto a los componentes individuales, puede llegar a ser benéfico, pues se disminuye la posibilidad de producir carbón residual [61].

### 8.3 Espectro FTIR biomasa

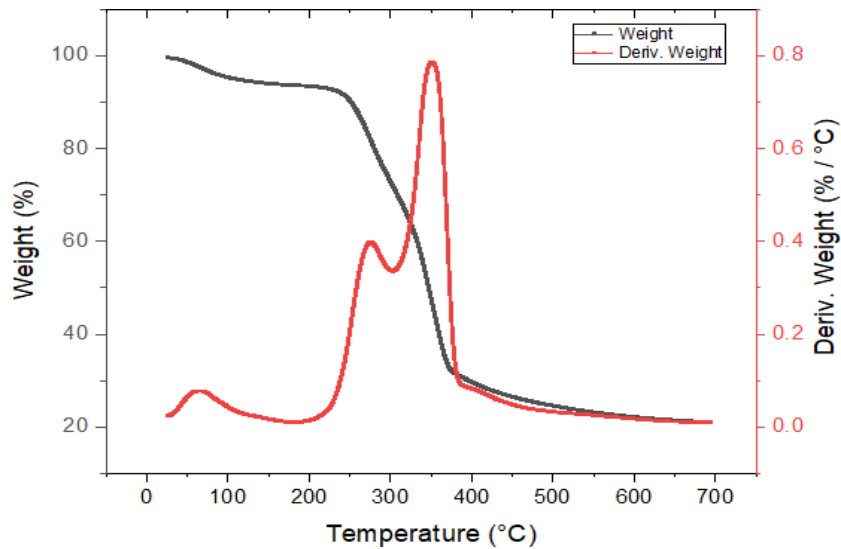
La composición química de la biomasa se estimó a través de análisis espectrofotométrico FTIR, el cual se aprecia en el gráfico 3.



**Gráfico 3.** Espectro FTIR biomasa de co-pirólisis

Se pueden observar bandas características de materiales lignocelulósicos; la señal entre 3200-3600  $\text{cm}^{-1}$  se relaciona con la presencia de O-H asociados a alcoholes o fenoles, mientras que las dos bandas ubicadas entre 3000-2850  $\text{cm}^{-1}$  se asocian con enlaces C-H presencia de alcanos. En cuanto a las señales entre 1650-1750  $\text{cm}^{-1}$ , éstas representan enlaces C=O, cuya presencia se debe a ácidos carboxílicos, aldehídos, cetonas, y aquellas en 1600-1400  $\text{cm}^{-1}$ , van a indicar presencia de enlaces C=C asociados a grupos aromáticos y por último, entre 1300-1000  $\text{cm}^{-1}$ , se tiene el enlace C-OH que se relaciona con grupos de alcoholes, fenoles, ésteres [62-63].

**8.4 Análisis TGA- biomasa:** la descomposición térmica controlada de la biomasa de eucalipto – palma, se aprecia en el gráfico 4.

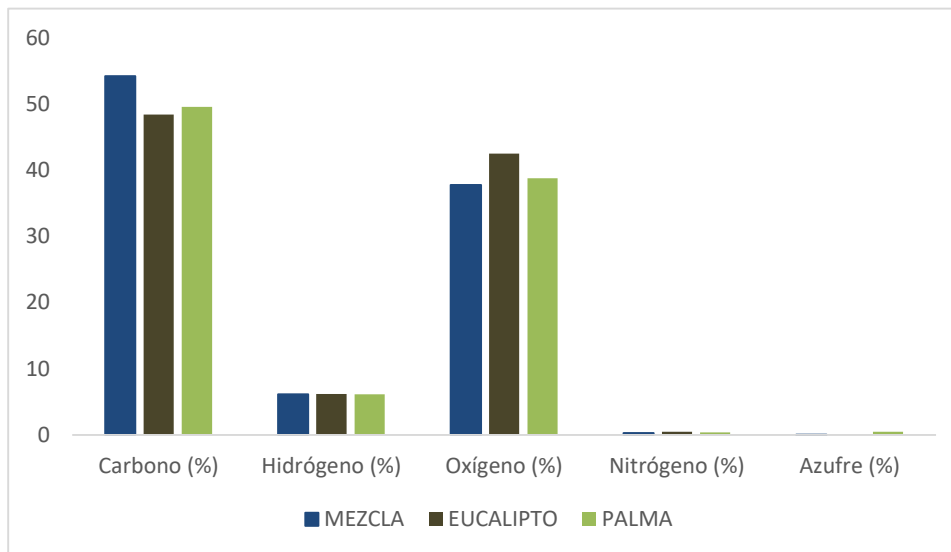


**Gráfico 4.** Análisis TGA de mezcla 50-50 biomasa eucalipto-palma

Se observa que la pérdida de peso inicia aproximadamente sobre los 60°C, temperatura que permite la liberación paulatina de la humedad, luego se aprecia una pérdida de peso considerable entre 275 – 360 °C, rango de temperaturas que se asocia al desprendimiento de compuestos volátiles, así como a la degradación de parte de los biopolímeros constituyentes de la estructura lignocelulósica de la biomasa; descomposición de hemicelulosa y celulosa. En cuanto a la lignina, al tener una estructura más compleja, su descomposición se registra a temperaturas más altas, con pérdidas de peso menores [64].



**8.5 Análisis CHONS.** La presencia de elementos tales como C,H,O,N y S, se lleva a cabo a través del análisis elemental , el cual se aprecia en el gráfico 5.

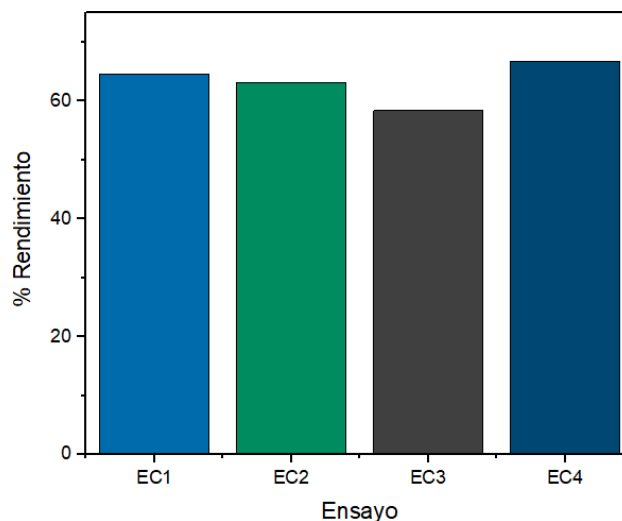


**Gráfico 5.** Análisis CHONS de mezcla 50-50 biomasa eucalipto-palma

Se aprecia que el contenido de carbono en la mezcla de biomásas está en mayor proporción con respecto a los componentes individuales, resultados que se consideran adecuados puesto que el carbono junto con el hidrógeno, constituyen los hidrocarburos que se pueden llegar a generar. En cuanto al oxígeno, aunque disminuye su porcentaje en la mezcla, representa una cantidad considerable, la cual eventualmente podría promover reacciones poco deseables, tales como oxidación e hidratación. Finalmente, la composición de nitrógeno y azufre, es bastante baja, lo cual resulta consistente con el origen de la materia prima, representando beneficio ambiental, al disminuir significativamente la formación de gases contaminantes como los SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>

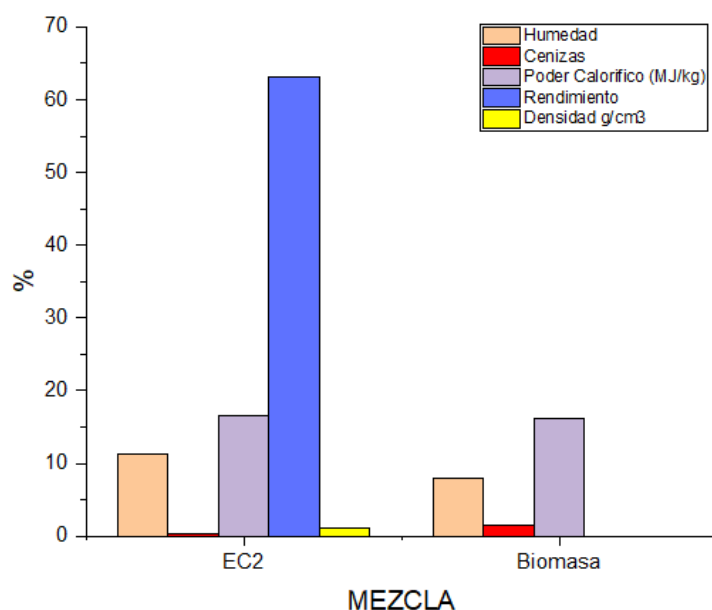
## 8.6 Bioaceite – Rendimiento

En el gráfico 6, se aprecia el rendimiento en la fracción líquida producto de la copirólisis de biomasa de eucalipto – palma, evaluando temperatura y tiempo de contacto como variables de influencia



**Gráfico 6.** Rendimiento fracción líquida obtenida bajo diferentes condiciones experimentales.

Se observa que el rendimiento del bioaceite cambia con respecto a los diferentes ensayos, siendo aquellos con temperaturas de 550 °C, dos de los que reportan mayor porcentaje y en valores bastante cercanos, lo cual se relaciona con el rango de temperaturas en donde se registró la mayor pérdida de peso en el análisis TGA. Cabe señalar que el ensayo llevado a cabo a mayor temperatura y tiempo de contacto, significó incrementar ligeramente el rendimiento, producto de la degradación de la lignina. Sin embargo, al tener en cuenta los resultados del ya mencionado análisis TGA, es posible, por lo tanto, establecer que las condiciones más adecuadas para la obtención de fracciones líquidas, son las que se representan en la muestra EC2, de modo que la caracterización física y química se llevó a cabo sobre dicha muestra, cuyos resultados se aprecian en el gráfico 7 y, se incluyen los datos obtenidos con la biomasa de partida, con el propósito de evidenciar cambios.



**Gráfico 7.** Caracterización de la mezcla eucalipto – palma a) Fracción líquida, b) biomasa

*Poder calorífico:* incrementa, como resultado del proceso termoquímico al cual fue sometida la biomasa, evidenciando mejora en la propiedad energética, con respecto a la materia prima.

*Cenizas:* reporta un porcentaje bajo, el cual disminuye con respecto a la biomasa, por lo que se podría inferir que el material inorgánico restante permanece en la fracción sólida. Puesto que la ceniza interfiere no sólo en el rendimiento del líquido sino en sus propiedades corrosivas, resulta deseable que el contenido sea lo más reducido posible [65].

*Humedad:* se produce un ligero aumento, el cual se podría atribuir a las reacciones de deshidratación que se llevan a cabo durante el proceso de co-pirólisis, lo cual se refleja en el porcentaje de humedad de la fracción líquida [6].

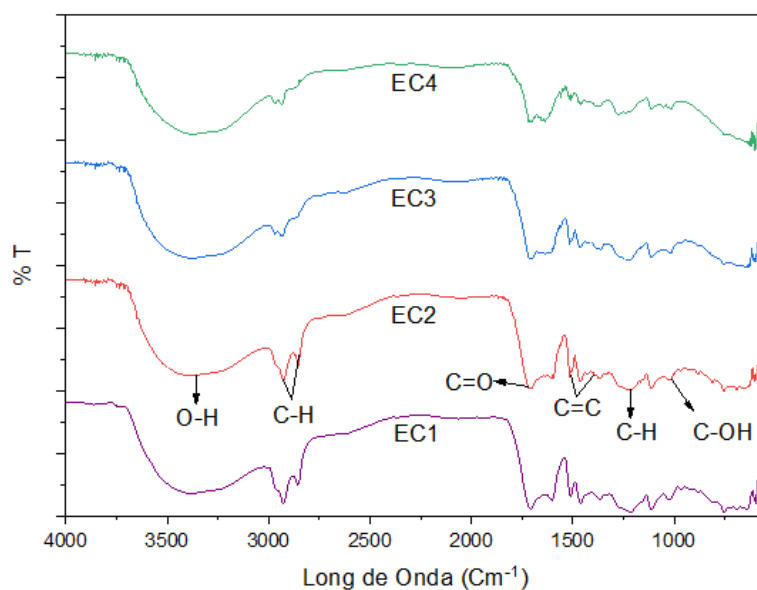
*Densidad:* la fracción líquida obtenida, reportó una densidad de 1.053 g/cm<sup>3</sup>, valor mayor que la de combustibles fósiles, pero que se encuentra en el rango de bioaceites a partir de materia prima lignocelulósica [61,66]

## 8.7 Bioaceite – carácter ácido

El bioaceite producto de la co-pirólisis de biomasa de eucalipto – palma, reportó carácter ácido (pH de 3 aprox.), producto del tipo de biomasa empleada, pues de acuerdo con literatura, de la biomasa lignocelulósica se obtienen fracciones líquidas con pH 2 - 3, con concentraciones apreciables de ácidos orgánicos como acético y fórmico [66], además de cetonas, aldehídos, derivados del furano, pirano y derivados fenólicos, que contribuyen en la acidez del líquido [57]

## 8.8 Espectros FTIR.

La caracterización química de la fracción de los líquidos de pirólisis obtenidos, se llevó a cabo a través de la identificación de los grupos funcionales orgánicos presentes en los respectivos FTIR gráfico 8, los cuales se relacionan con bandas de acuerdo a la ubicación, forma y las modificaciones que éstas puedan llegar a tener con respecto al tratamiento realizado.



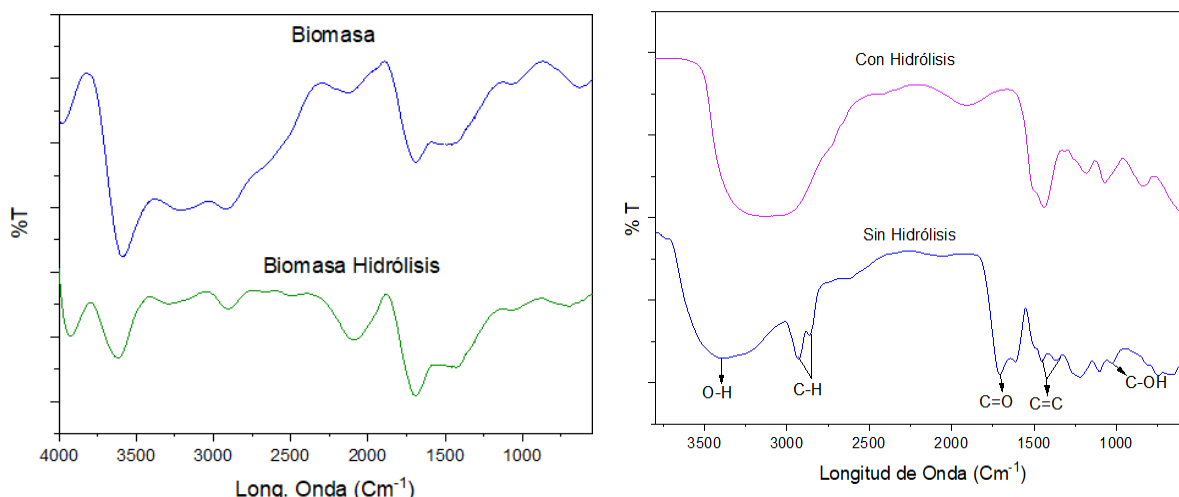
**Gráfico 8.** Espectros FTIR fracción líquida bajo diferentes tratamientos experimentales

Como tendencia general, en todos los espectros se aprecia la banda intensa ubicada entre  $3600-3100\text{ cm}^{-1}$  que corresponde enlace O-H, asociado con agua y ácidos carboxílicos [68]. Se observan igualmente, señales entre  $3000-2850\text{ cm}^{-1}$ , que representan estiramientos del enlace C-H presente en alcanos, siendo de mayor intensidad en las muestras EC1 y EC2 cuya temperatura de transformación fue de  $550^{\circ}\text{C}$ . En cuanto a las bandas que se ubican entre  $1650-1750\text{ cm}^{-1}$ , corresponden al enlace C=O asociado a cetonas, aldehídos y ácidos carboxílicos, las cuales disminuyen en intensidad en las muestras EC3 y EC4, que fueron las que experimentaron una temperatura de  $650^{\circ}\text{C}$ . Señales en el rango de  $1600-1400\text{ cm}^{-1}$ ,

pertencen a enlaces C=C, propios de alquenos, dichas señales son algo intensas en las muestras EC1 y EC2, mientras que en EC3 y EC4 tienden a disminuir. En todas las muestras, aparecen las bandas entre  $1400-1310\text{ cm}^{-1}$  que indican deformación del enlace C-H alifático propio de alcanos. Finalmente, entre  $1300-1000\text{ cm}^{-1}$ , las señales se atribuyen al estiramiento del enlace C-OH y eventual vibración del enlace O-H, indicando presencia de alcoholes, ésteres, éteres, fenoles [61], las cuales cambian en su forma a mayor temperatura del tratamiento pirolítico.

### 8.9 Influencia tratamiento hidrolítico

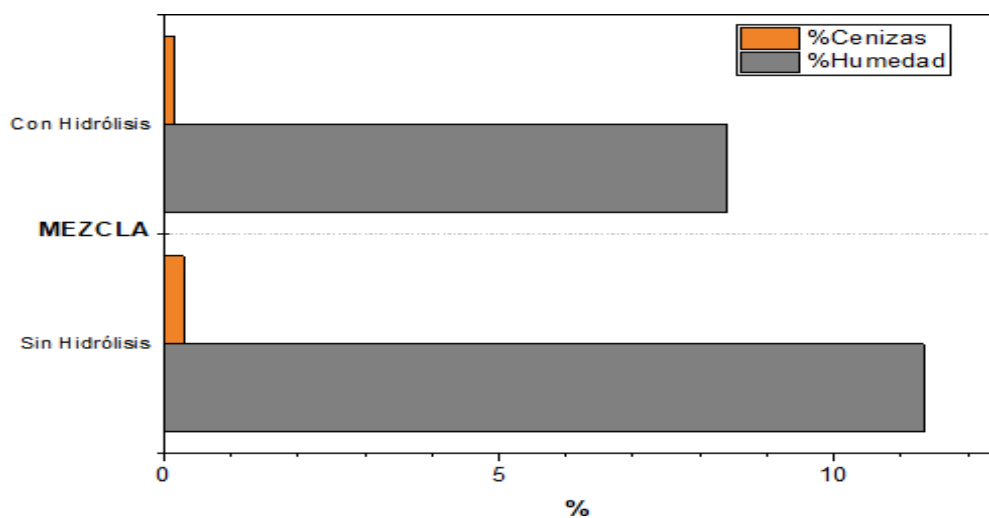
Con el propósito de estimar el efecto del tratamiento hidrolítico, tanto en la composición de la biomasa materia prima como en la posterior fracción líquida producto de la co-pirólisis, se llevó a cabo análisis FTIR, cuyos espectros se muestran a continuación en los gráficos 9a y 9b.



**Gráficos 9.** Espectros FTIR a) biomasa y b) fracciones líquidas con y sin tratamiento hidrolítico

Como resultado del tratamiento hidrolítico realizado, se aprecian grandes diferencias, especialmente entre  $2750-3300\text{ cm}^{-1}$ ; desaparición de bandas, así como desplazamiento y modificación tanto en forma como intensidad de la banda correspondiente al enlace OH. Igualmente, se observa que entre  $1800-2000\text{ cm}^{-1}$ , se intensifica de forma significativa la señal. En cuanto a las bandas en el rango de  $1750-1450\text{ cm}^{-1}$ , éstas se desplazan y modifican en forma, por último, entre  $1000-750\text{ cm}^{-1}$  las señales tienen diferencias considerables, que para el caso específico se asocian con la hidrólisis ácida [59,67].

Igualmente, el tratamiento hidrolítico influyó en propiedades como cenizas y humedad, lo cual se puede observar en el gráfico 10.



**Gráfico 10.** Influencia hidrólisis en bioaceite

*Cenizas:* se solubilizó parte de la materia inorgánica constituyente de la biomasa de partida, lo cual permitió disminuir el porcentaje de cenizas en el bioaceite.

*Humedad:* disminuye, debido a que la hidrólisis ácida al promover la degradación de estructuras complejas, probablemente limita la fracción de reacciones de deshidratación que se puedan llevar a cabo, lo cual conduciría a reducir el porcentaje de humedad en la fracción líquida.

## 9. CONCLUSIONES

- La mezcla de biomasa de eucalipto y palma, al presentar bajo contenido de humedad y cenizas, así como porcentajes significativos de lignina, celulosa y hemicelulosa, puede considerarse con propiedades susceptibles de ser aprovechadas en la generación de biocombustibles.
- El poder calorífico que reportó la mezcla de biomasa de eucalipto y palma, al encontrarse dentro del rango que se registra en literatura para materiales lignocelulósicos y que tienen potencial energético, permite proyectar esta mezcla de biomasa como materia prima para obtener biocombustibles.
- La determinación de los respectivos espectros FTIR a cada fracción líquida obtenida mediante los diferentes ensayos de pirólisis, permitió establecer cambios en la composición química, como producto de las condiciones de temperatura y tiempo de residencia evaluadas.
- El análisis TGA realizado sobre la mezcla de biomasa, así como los cuatro diferentes ensayos experimentales de pirólisis, permitieron establecer 550°C y 45 min como los valores de temperatura y tiempo de residencia, más adecuados para llevar a cabo el proceso de transformación termoquímica, cuyo rendimiento en términos de fracción líquida fue del 64%.
- El tratamiento hidrolítico aplicado sobre la mezcla de biomasa, influyó sobre la composición de la fracción líquida obtenida, pues no sólo se modificó el espectro FTIR, sino que disminuyeron los porcentajes de parámetros tales como humedad y cenizas.
- La co-pirólisis como proceso de transformación termoquímica de la mezcla biomasa eucalipto - palma, aunque no representó rendimientos en fracciones líquidas superiores al 85%, si permitió obtener un bioaceite con propiedades físicas y químicas adecuadas para ser exploradas en el campo energético.
- Resulta interesante llevar a cabo el proceso de co-pirólisis empleando mezcla de biomasa de eucalipto - palma, de las cuales no sólo se obtuvo un líquido con características físicas y químicas adecuadas para ser empleado como combustible, sino que además dichas biomasa se encuentran en grandes cantidades.

## 10.RECOMENDACIONES

- Plantear trabajos que involucren las diferentes fracciones (sólida, líquida y gaseosa), con el propósito de evaluar de forma integral el potencial energético que tiene la biomasa de estudio.
- Ampliar las proporciones (80:20 y 60:40) de los componentes individuales de la biomasa de partida, para evidenciar el efecto de la variación de la materia prima.
- Contemplar la influencia de otras variables experimentales tales como la velocidad de calentamiento.



## 11. REFERENCIAS

- [1] DINCER, Ibrahim. Comprehensive Energy Systems. En: Fossil Fuels. vol.1, pp 521-567, 2018
- [2] JOSHI, Girdhar. PANDEY, Jitendra. RANA, Sravendra. et al. Challenges and opportunities for the application of biofuel. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews N° 79, pp 850-866, Oct.2017
- [3] NINAWA, Gaurav. KIRAN, Seghal. SELVIN, Joseph. et al. Utilization of bioresources for sustainable biofuels: A Review. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews N°73, pp 205-214, 2017
- [4] QUISPE, Isabel. NAVIA, Rodrigo. KAHHAT Ramzy. Energy potential from rice husk through direct combustion and fast pyrolysis: A review. En: Waste Management N°59, pp 200-210, Sept, 2017
- [5] DHYANI, Vaibhav. THALLADA, Bhaskar. A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass En; Renewable Energy, vol. 129, pp 695-716. 2018
- [6] ABNISA, Faisal. DAUD WMAW. A review on co-pyrolysis of biomass: An optional technique to obtain En; Energy Conversion and Management, vol. 87, pp 71- 85, Oct, 2014.
- [7] BASU. Prabi, "Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction" chapter 1. Introduction, En; Elsevier Inc, 3rd Edition, Jun,2018.
- [8] BRIDGWATER, A.V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading, En; Biomass and Bioenergy., vol.38, pp 68-94, Marzo,2012.
- [9] KUMAR. Deepak, VINU. Ravikrishnan, Copyrolysis of Lignocellulosic Biomass with Waste Plastics for Resource Recovery, En Waste Biorefinery, pp 349-391, Ene, 2018
- [10] CAI. Junmeng. HE. Yifeng, YU. Xi., et al. "Review of physicochemical properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. En: Renewable and Sustainable Energy Reviews., vol.76, pp, 309-322, Sept 2017
- [11] FOLGUERAS, M.B. FERNÁNDEZ F.J.et al. Fast pyrolysis of Guadua angustifolia-Kunt. En; Energy Procedia N°136, pp 60 – 65, Jul, 2017
- [12] MESSINA. LIGurevich, BONELLI, P.R. Copyrolysis of peanut shells and cassava starch mixtures: Effect of the components proportion, En; Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 113, pp 508-517, Marzo, 2015.
- [13] ONENC. Sermin, BREBU, Mihai, VASILE. Corneria, YANIK. Jale, Copyrolysis of scrap tires with oily wastes, En; Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol.

94, pp, 184-189, 2012.

[14] MARTINEZ. Juan, VECES. Alberto, MASTRAL. Ana, et al. Co-pyrolysis of biomass with waste tyres: Upgrading of liquid bio-fuel, En: Fuel processing Technology, vol.119, pp 263- 271, Feb, 2014.

[15] REYES. Omar, REYES. Diego, Evaluación del proceso de pirolisis y co-pirolisis de cuesco de palma y neumáticos usados en una atmosfera de CO2, Bogotá, 2019, Trabajo de grado, Universidad Libre, Facultad de Ingeniería, 2019.

[16] Ocampo-Durán. A, “La palma aceitera africana, un recurso de alto potencial para la producción animal en el trópico”, en línea, Disponible en: <http://www.fao.org/3/v4440t/v4440t0g.htm>

[17] VEIRAS. Xosé, SOTO. Miguel Ángel, “La conflictividad de las plantaciones de eucalipto en España y Portugal” Greenpeace, en línea, disponible en: <https://archivos.greenpeace.org/espana/Global/espana/report/bosques/InformeEucalipto2011.pdf>

[18] WOOD, Nathan. ROELICH, Katy. Tensions, capabilities, and justice in climate change mitigation of fossil fuels. Energy Research & Social Science, vol. 52, pag.114–122, 2019.

[19] X.Zhou, L.J. Broadbelt, R.Vinu, Chapter Two - Mechanistic Understanding of Thermochemical Conversion of Polymers and Lignocellulosic Biomass, Advances in Chemical Engineering, Vol. 49, Pág, 95-198, 2016.

[20] AHMAD, Farah. ZHANG, Zhanying. DOHERTY, William. The outlook of the production of advanced fuels and chemicals from integrated oil palm biomass biorefinery. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 109, pag.386–411, 2019.

[21] J. M. Rincón. E. E. Silva. Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad. La Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía. Bogotá – Colombia, 2014

[22] DAI, Leilei. WANG, Yunpu, LIU, Yuhuan. Et al. Integrated process of lignocellulosic biomass torrefaction and pyrolysis for upgrading bio-oil production: A state-of-the-art review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 107, pag. 20-36, 2019

[23] ABIOLA, Fakayode. ABOAGARIB, Elmuez, ZHOU, Cunshan, MA, Haile, Co-pyrolysis of lignocellulosic and macroalgae biomasses for the production of biochar - A review, Bioresource Technology, 2019

[24] KAN, Tao. STREZOV, Vladimir. EVANS Tim. Lignocellulosic biomass pyrolysis: A review of product properties and effects of pyrolysis parameters. Renewable and

Sustainable Energy Reviews, vol. 57, pág. 1126-1140, 2016.

[25] KUMAR, R. STREZOV, V. WELDEKIDAN, H. 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. Vol.123, 2020

[26] CHEN, Wei. CHEN, Yingquan. YANG, Haiping. Et al, Co-pyrolysis of lignocellulosic biomass and microalgae: Products characteristics and interaction effect. Bioresource Technology, 2017.

[27] UZOEJINWA, Benjamin. HE, Xiuhua. WANGA, Shuang. Co-pyrolysis of biomass and waste plastics as a thermochemical conversion technology for high-grade biofuel production: Recent progress and future directions elsewhere worldwide. Energy Conversion and Management, vol.163 pág. 468–492, 2018.

[28] AHMED MJ, HAMEED BH, Insight into the co-pyrolysis of different blended feedstocks to biochar for the adsorption of organic and inorganic pollutants: A review, Journal of Cleaner Production, 2020

[29] PECHA, Brennan, GARCIA Manuel. Chapter 26 - Pyrolysis of Lignocellulosic, Biomass: Oil, Char, and Gas. Bioenergy, Biomass to biofuels, pág 413-442, 2015.

[30] P. Basu, Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction, chapter 3. Biomass characteristics, Elsevier Inc, 3rd Edition, 2018.

[31] GARCÍA – NUÑEZ. Jesús, et al. Evolution of palm oil mills into bio-refineries: Literature review on current and potential uses of residual biomass and effluents. Resources, Conservation and Recycling vol. 110, pp 99–114, 2016.

[32] OREA-IGARZA. U, CORDERO MACHADO. E, et al. Estudio comparativo de la composición química de la corteza de tres especies de eucaliptos a tres alturas del fuste comercial, En: Revista redalyc, Dic. 2006

[33] SHURONG. Wang, et al. Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. Progress in Energy and Combustion Science vol. 62, 2017

[34] BECERRA. Erika, Caracterización del desecho agroindustrial de la palma de aceite “cuesco” para el mejoramiento de las capas granulares de la estructura de pavimento, Bogotá, 2017, Especialista en ingeniería de pavimentos, Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de Ingeniería – Dirección de Posgrados

[35] MENDOZA. David, Residuos de palma africana purifican agua y aire, En; UN periódico, N°. 177, (May. 2014) Universidad Nacional

[36] FANIJO, Ebenezer. BABAFEMI, John. AROWOJOLU, Olaniyi. Performance of laterized concrete made with palm kernel shell as replacement for coarse aggregate, Construction and Building Materials, vol 250, 2020.

- [37] RINCÓN. Nelson, MORENO. Juan. Carlos, GIRALDO Liliana, Uso de semillas de eucalipto para descontaminar aguas residuales, núm.18, 2015, Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias
- [38] CASAS, Yannay. DAZA, Karen. CEA, Juan. Et al, Life cycle assessment of innovative insulation panels based on eucalyptus bark fibers, [Journal of cleaner production, vol 249, 2020.](#)
- [39] ADAK, Totan. BARIK, Nishant, PATIL, Naveenkumar. Nanoemulsion of eucalyptus oil: An alternative to synthetic pesticides against two major storage insects (Sitophilus oryzae (L.) and Tribolium castaneum (Herbst)) of rice, Industrial Crops & Products, vol 143. 2020.
- [40] “La palma de aceite en Colombia” Fedepalma, en línea, Disponible en: <http://web.fedepalma.org/la-palma-de-aceite-en-colombia-departamentos>
- [41] Min de comercio Industria y Turismo, “Invierta en Colombia trabajo, compromiso, ingenio”, sep.2009, en línea, disponible en: [https://www.inviertaencolombia.com.co/Adjuntos/089\\_Sector%20Forestal.pdf](https://www.inviertaencolombia.com.co/Adjuntos/089_Sector%20Forestal.pdf)
- [42] Normatividad General de los Biocombustibles en Colombia, fedebiocombustibles, en línea, disponible en: <http://www.fedebiocombustibles.com/v3/main-pagina-id-29.htm>
- [43] MÜLLER. Niels, TESSINI. Catherine, SEGURA. Cristina, et al, Pirólisis rápida de biomasa, En; Bioenergía & Biorrefinaria, (2013). pp.459-482
- [44] MONTOYA. Jorge, CASTILLO. Edgar, ACERO. Julia, et al Pirólisis Rápida de Biomasa, Ecopetrol, Medellín, 2014, Universidad Nacional de Colombia
- [45] American Society for Testing and Materials, ASTM International, Estados Unidos: <https://www.astm.org/>
- [46] \_VÁSQUEZ SIERRA. Erika, HERRERA Builes. Jhon Fredy, Metodología para la caracterización de combustibles sólidos maderables del área metropolitana del valle de Aburrá “amva”, Medellín Colombia, Vol. 59, núm. 2, 2015 Revista Facultad Nacional de Agronomía.
- [47] RINCÓN. Nelson, MORENO. Juan. Carlos, GIRALDO Liliana, Uso de semillas de eucalipto para descontaminar aguas residuales, núm.18, 2015, Universidad de los Andes, Facultad de Ciencias
- [48] CASAS, Yannay. DAZA, Karen. CEA, Juan. Et al, Life cycle assessment of innovative insulation panels based on eucalyptus bark fibers, [Journal of cleaner production, vol 249, 2020.](#)
- [49] ADAK, Totan. BARIK, Nishant, PATIL, Naveenkumar. Nanoemulsion of

eucalyptus oil: An alternative to synthetic pesticides against two major storage insects (Sitophilus oryzae (L.) and Tribolium castaneum (Herbst)) of rice, Industrial Crops & Products, vol 143. 2020.

[50] “La palma de aceite en Colombia” Fedepalma, en línea, Disponible en: <http://web.fedepalma.org/la-palma-de-aceite-en-colombia-departamentos>

[51] Min de comercio Industria y Turismo, “Invierta en Colombia trabajo, compromiso, ingenio”, sep.2009, en línea, disponible en: [https://www.inviertaencolombia.com.co/Adjuntos/089\\_Sector%20Forestal.pdf](https://www.inviertaencolombia.com.co/Adjuntos/089_Sector%20Forestal.pdf)

[52] Normatividad General de los Biocombustibles en Colombia, fedebiocombustibles, en línea, disponible en: <http://www.fedebiocombustibles.com/v3/main-pagina-id-29.htm>

[53] MÜLLER. Niels, TESSINI. Catherine, SEGURA. Cristina, et al, Pirólisis rápida de biomasa, En; Bioenergía & Biorrefinaria, (2013). pp.459-482

[54] MONTOYA. Jorge, CASTILLO. Edgar, ACERO. Julia, et al Pirólisis Rápida de Biomasa, Ecopetrol, Medellín, 2014, Universidad Nacional de Colombia

[55] American Society for Testing and Materials, ASTM International, Estados Unidos: <https://www.astm.org/>

[56] \_VÁSQUEZ SIERRA. Erika, HERRERA Builes. Jhon Fredy, Metodología para la caracterización de combustibles sólidos maderables del área metropolitana del valle de Aburrá “amva”, Medellin Colombia, Vol. 59, núm. 2, 2015 Revista Facultad Nacional de Agronomía.

[57] ÁLVAREZ. Ana, PIZARRO. Consuelo, Belén. María, Caracterización química de biomasa y su relación con el poder calorífico, 2012, Universidad de Oviedo Dpto. de Energía.

[58] AL-KASSIR. Raúl, Caracterización y preparación de residuos de biomasa con ensayos experimentales de secado térmico y combustión no contaminante,2013, Instituto Politécnico de Portoalegre.

[59] Operating Instruction Manual, 1341 Oxygen Bomb Calorimeter, No. 204M

[60] OCANHA, Enzo. ZINANI, Flávia. MODOLO, Regina. SANTOS, Fernando. Assesment of the effects of chemical and physical parameters in the fluidization of biomass and sand binary mixtures through statistical analysis, Energy. (2019)

[61] MYTHILI, R. VENKATACHALAM, P. SUBRAMANIAN, D. Characterization of

bioresidues for biooil production through pyrolysis, Vol.138, Pag. 71-78, 2013.

[62] SOH. Loh, Biocombustibles de segunda generación de la biomasa de palma de aceite, Palmas, vol.37 (Especial Tomo II), pp. 137-148, 2016

[63] NÚÑEZ, D. Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el Departamento del Meta. 2012

[64] FANTINI, M. Chapter 2 Biomass Availability, Potential and Characteristics, Biorefineries, pág. 21-54, 2017

[65] YUFU, X. XIANGUO, Hu. WENDONG, Li. YINYAN, Shi. Preparation and Characterization of Bio-Oil from Biomass, Progress in Biomass and Bioenergy Production, 2011.

[66] VINICIUS, Silva. RODRIGUES, Thiago. ABREU-JUNIOR, Cassio. Et al. Influences of edaphoclimatic conditions on deep rooting and soil water availability in Brazilian Eucalyptus plantations, Forest Ecology and Management, vol. 455, (2020)

[67] OJHA, D. Fast pyrolysis kinetics of lignocellulosic biomass of varying compositions, Energy Conversion and Management: X, 2021

[68] BERTERO, M. Fuels from bio-oils: Bio-oil production from different residual sources, characterization and thermal conditioning, Fuel, vol 95, pp 263- 271, 2012

[69] KUMAR, R. 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, Vol. 123, 2020

[70] UZOEJINWA, B. Co-pyrolysis of biomass and waste plastics as a thermochemical conversion technology for high-grade biofuel production: Recent progress and future directions elsewhere worldwide, Energy Conversion and Management, vol. 163, pp 468-492, 2018

[71] FERREIRA, M. Generation of biofuels by slow pyrolysis of palm empty fruit bunches: Optimization of process variables and characterization of physical-chemical products, Biomass and Bioenergy, Vol.140, 2020

[72] Li, C. Interaction of the volatiles from co-pyrolysis of pig manure with cellulose/ glucose and their effects on char properties, Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol. 8, 2020

[73] ZHANG, L. Comparative study on the two-step pyrolysis of different lignocellulosic biomass, Effects of components, Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2020

[74] NGUYEN, Q. Improvement of bio-crude oil properties via co-pyrolysis of pine sawdust and waste polystyrene foam, Journal of Environmental Management, Vol, 237, pp 24-29, 2019

- [75] SAKULKIT, P. Characteristics of pyrolysis products from pyrolysis and co-pyrolysis of rubber wood and oil palm trunk biomass for biofuel and value-added applications, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Vol. 8, 2020
- [67] AL-MAARI, M. Co-pyrolysis of oil palm empty fruit bunch and oil palm frond with low-density polyethylene and polypropylene for bio-oil production, *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 14, 2021
- [66] ABDULLAH, N. Characterisation of Oil Palm Empty Fruit Bunches for Fuel Application, *Journal of Physical Therapy Science*, vol. 22, 2011
- [68] LEAL, L. E., Juárez, V., Terán, M., Composición química de la madera de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden, *Revista de Ciencias Forestales [en línea]* 2011, procedente de Finca Las Maravillas, Departamento de Orán, Salta. Quebracho
- [69] CHEN. Rongjie, LUN. Liyong, CONG. Kunlin, et al. Insights into pyrolysis and co-pyrolysis of tobacco stalk and scrap tire: Thermochemical behaviors, kinetics, and evolved gas analysis, *Energy*, vol. 183, pp. 25-34, 2019.
- [70] DA SILVA. Luis, ALMEIDA. Pedro, RIBEIRO. Carlos, An experimental assessment of *Eucalyptus urosemense* energy potential for biomass production in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol.103, pp. 361-369, 2019
- [71] POLLARD, A. Characterization of bio-oil recovered as stage fractions with unique chemical and physical properties, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol, 93, pp 129-138, 2012
- [72]. DEWAYANTO, N. Use of palm oil decanter cake as a new substrate for the production of bio-oil by vacuum pyrolysis. *Energy Conversion and Management*, Vol. 86, pp 226-232, 2014
- [73] BRIDGWATER, A.V. BRAMMER. J.G, The influence of feedstock drying on the performance and economics of a biomass gasifier-engine CHP system, *Biomass & Bioenergy*, vol.22, pp. 271-281, 2000



















