



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“EVALUACIÓN DE LOS RESIDUOS MADEREROS DE  
EUCALIPTO Y PINO PARA LA OBTENCIÓN DE  
BIOCOMBUSTIBLE A ESCALA LABORATORIO”**

**Trabajo de titulación**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERA QUÍMICA**

**AUTOR: CINTHIA GABRIELA LEMA GAVIDIA**

Riobamba – Ecuador

2021



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“EVALUACIÓN DE LOS RESIDUOS MADEREROS DE  
EUCALIPTO Y PINO PARA LA OBTENCIÓN DE  
BIOCOMBUSTIBLE A ESCALA LABORATORIO”**

**Trabajo de titulación**

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar el grado académico de:

**INGENIERA QUÍMICA**

**AUTOR: CINTHIA GABRIELA LEMA GAVIDIA**

**DIRECTORA: Ing. MSc. LINDA MARIUXI FLORES FIALLOS**

Riobamba – Ecuador

2021

**© 2021, Cinthia Gabriela Lema Gavidia**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho del Autor.

Yo, Cinthia Gabriela Lema Gavidia, declaro que el presente trabajo de titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 10 de septiembre de 2021

A handwritten signature in blue ink, reading "Cinthia Lema", with a large, stylized flourish above the name.

---

**Cinthia Gabriela Lema Gavidia**

**CI: 060523593-6**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo: Proyecto de Investigación, **EVALUACIÓN DE LOS RESIDUOS MADEREROS DE EUCALIPTO Y PINO PARA LA OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE A ESCALA LABORATORIO**, realizado por la señorita: **CINTHIA GABRIELA LEMA GAVIDIA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. / MSc. Paul Gustavo Palmay Paredes <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	_____	2021-09-10
Ing. / MSc. Linda Mariuxi Flores Fiallos <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN</b>	_____	2021-09-10
Ing. / MSc. Adrián Alejandro Rodríguez Pinos <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	_____	2021-09-10

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de titulación está dedicado a DIOS por ser luz en mi vida y permitirme llegar a ser una profesional, y para las cuatro mujeres más importantes de mi vida que son el motivo de mi lucha constante. A mi madre Carmita Gavidia, a mis hermanas Nicole Lema y Lisbeth Pino, a mi tía Cumanda Gavidia y a mi padre Próspero Lema, quienes, con su amor, bondad, consejos y apoyo incondicional han permitido que cumpla mi sueño.

Cinthia

## **AGRADECIMIENTO**

A DIOS por la vida, la sabiduría y todas las bendiciones que he recibido.

A mis padres por su protección, paciencia, cariño y apoyo incondicional durante toda mi vida. A mi hermana Lisbeth por enseñarme el amor a Dios y por ser ejemplo de mujer valiente y sabia. A mi tía Cumanda Gavidia a quién considero mi segunda madre, por sus consejos, motivación y amor. Sin ellas, no podría haberlo conseguido y lograr ser una mejor persona.

A mi directora de tesis la Ing. Linda Flores y al miembro el Ing. Adrián Rodríguez por guiarme en el transcurso de este trabajo, con mucha paciencia y dedicación. A la Ing. Mayra Zambrano por su orientación paso a paso en el desarrollo del trabajo.

Al Ing. Paúl Palmay por su aporte en el desarrollo experimental de mi tesis y sin duda alguna, como no agradecer a todos mis maestros que han sido parte de mi formación universitaria, por toda dedicación, sabiduría y paciencia con la que impartieron sus conocimientos.

Cinthia

## TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
SUMMARY.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>1. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. Antecedentes de la investigación.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. Marco conceptual o glosario.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2.1. Producción de madera en el Ecuador.....</b>	<b>4</b>
1.2.1.1. <i>Eucalipto</i> .....	4
1.2.1.2. <i>Pino</i> .....	5
<b>1.2.2. Biomasa.....</b>	<b>5</b>
1.2.2.1. <i>Clasificación según su origen</i> .....	5
1.2.2.2. <i>Composición general</i> .....	5
1.2.2.3. <i>Biomasa lignocelulósica</i> .....	6
1.2.2.4. <i>Características energéticas de la biomasa</i> .....	6
1.2.2.5. <i>Procesos de conversión de la biomasa</i> .....	8
<b>1.2.3. Residuos madereros.....</b>	<b>9</b>
1.2.3.1. <i>Aserrín o serrín</i> .....	9
<b>1.2.4. Bioenergía.....</b>	<b>9</b>
1.2.4.1. <i>Biocombustible</i> .....	9
<b>1.2.5. Pirólisis.....</b>	<b>10</b>
1.2.5.1. <i>Pirólisis térmica</i> .....	11
1.2.5.2. <i>Pirólisis de los residuos madereros</i> .....	13
<b>1.2.6. Reactor discontinuo o Batch.....</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO II</b>	
<b>2. METODOLOGÍA.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1. Hipótesis y variables.....</b>	<b>18</b>



<b>2.1.1. Hipótesis general</b> .....	18
<b>2.1.2. Hipótesis específicas</b> .....	18
<b>2.1.3. Identificación de variables</b> .....	18
2.1.3.1. <i>Variables independientes</i> .....	18
2.1.3.2. <i>Variables dependientes</i> .....	18
<b>2.1.4. Operacionalización de variables</b> .....	19
<b>2.1.5. Matriz de consistencia</b> .....	20
<b>2.2. Tipo y diseño de investigación</b> .....	21
<b>2.2.1. Tipo de investigación</b> .....	21
<b>2.2.2. Diseño de la investigación</b> .....	21
<b>2.3. Unidad de análisis</b> .....	23
<b>2.4. Población de estudio</b> .....	23
<b>2.5. Tamaño de muestra</b> .....	23
<b>2.6. Selección de la muestra</b> .....	23
<b>2.7. Técnicas de recolección de datos</b> .....	24
<b>2.7.1. Caracterización fisicoquímica del aserrín</b> .....	24
2.7.1.1. <i>Determinación de la densidad</i> .....	25
2.7.1.2. <i>Determinación del porcentaje de ceniza</i> .....	26
2.7.1.3. <i>Determinación del porcentaje de humedad</i> .....	27
2.7.1.4. <i>Determinación del porcentaje de materia volátil</i> .....	28
2.7.1.5. <i>Determinación del carbono fijo</i> .....	29
<b>2.7.2. Pirólisis del aserrín</b> .....	30
2.7.2.1. <i>Rendimiento de las fracciones obtenidas</i> .....	33
<b>2.7.3. Caracterización fisicoquímica del biocombustible</b> .....	34
2.7.3.1. <i>Prueba de densidad</i> .....	34
2.7.3.2. <i>Determinación de la viscosidad</i> .....	35
2.7.3.3. <i>Prueba de pH</i> .....	37
2.7.3.4. <i>Determinación de espectroscopía infrarroja FT-IR</i> .....	38
2.7.3.5. <i>Determinación del punto de inflamación</i> .....	39
 <b>CAPÍTULO III</b>	
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	41
<b>3.1. Resultados</b> .....	41
<b>3.1.1. Resultados de la caracterización fisicoquímica del aserrín</b> .....	41
3.1.1.1. <i>Determinación de la densidad</i> .....	41
3.1.1.2. <i>Determinación del porcentaje de ceniza</i> .....	41

3.1.1.3. <i>Determinación del porcentaje de humedad</i> .....	42
3.1.1.4. <i>Determinación del porcentaje de materia volátil</i> .....	42
3.1.1.5. <i>Determinación del carbono fijo</i> .....	42
<b>3.1.2. Resultados de la pirólisis del aserrín</b> .....	43
3.1.2.1. <i>Rendimiento de las fracciones obtenidas</i> .....	44
<b>3.1.3. Resultados de la caracterización fisicoquímica del biocombustible (bioaceite)</b> .....	46
3.1.3.1. <i>Prueba de densidad</i> .....	47
3.1.3.2. <i>Determinación de la viscosidad</i> .....	47
3.1.3.3. <i>Prueba de pH</i> .....	48
3.1.3.4. <i>Determinación de espectroscopía infrarroja FT-IR</i> .....	48
3.1.3.5. <i>Determinación del punto de inflamación</i> .....	49
<b>3.2. Pruebas de hipótesis</b> .....	49
<b>3.2.1. Hipótesis general</b> .....	49
<b>3.2.2. Hipótesis específicas</b> .....	50
<b>3.3. Discusión</b> .....	50
<b>CONCLUSIONES</b> .....	52
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	53
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-1:</b> Poder calórico superior de distintas biomásas y combustibles fósiles.....	8
<b>Tabla 2-1:</b> Procesos de transformación de la biomasa a biocombustibles.....	8
<b>Tabla 3-1:</b> Procesos de conversión de la biomasa con sus respectivos productos.....	9
<b>Tabla 4-1:</b> Diferentes tipos de pirólisis, sus condiciones de operación y los productos que se obtienen en mayor proporción .....	11
<b>Tabla 5-1:</b> Resultados de la pirólisis del aserrín y su caracterización fisicoquímica del bioaceite .....	13
<b>Tabla 6-1:</b> Rendimientos obtenidos en la degradación de madera según el tipo de pirólisis ...	17
<b>Tabla 1-2:</b> Operacionalización de variables que están dentro del proceso de pirólisis .....	19
<b>Tabla 2-2:</b> Matriz de consistencia .....	20
<b>Tabla 1-3:</b> Densidad aparente del aserrín de eucalipto y pino .....	41
<b>Tabla 2-3:</b> Porcentaje de Ceniza del aserrín .....	41
<b>Tabla 3-3:</b> Humedad presente en el aserrín .....	42
<b>Tabla 4-3:</b> Materia volátil del aserrín de eucalipto y pino.....	42
<b>Tabla 5-3:</b> Resultados de la caracterización fisicoquímica del aserrín de eucalipto y pino ....	42
<b>Tabla 6-3:</b> Características organolépticas en las fracciones de la pirólisis del aserrín .....	43
<b>Tabla 7-3:</b> Rendimientos de las fracciones obtenidas en la pirólisis térmica del aserrín .....	44
<b>Tabla 8-3:</b> Rendimientos promedios de las fracciones obtenidas en la pirólisis térmica del aserrín .....	45
<b>Tabla 9-3:</b> Resultados de la fracción líquida una vez filtrada .....	47
<b>Tabla 10-3:</b> Resultados de la viscosidad del biocombustible .....	48
<b>Tabla 11-3:</b> % T vs Wavenumber $\text{cm}^{-1}$ del ácido piroleñoso y su interpretación de resultados ..	48

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-1:</b> Esquema completo del proceso pirolítico en la descomposición del aserrín .....	13
<b>Figura 2-1:</b> Proceso de pirólisis efectuado en un reactor semi Batch.....	14
<b>Figura 3-1:</b> Espectro FT-IR del bioaceite de aserrín .....	15
<b>Figura 4-1:</b> Esquema del proceso para la obtención del ácido piroleñoso .....	16
<b>Figura 5-1:</b> Espectro IR del condensado (Fracción líquida).....	16
<b>Figura 1-2:</b> Toma de la muestra .....	24
<b>Figura 2-2:</b> Aserrín grueso.....	24
<b>Figura 3-2:</b> Procedimiento de la prueba de densidad del aserrín .....	26
<b>Figura 4-2:</b> Procedimiento de la prueba de ceniza del aserrín .....	27
<b>Figura 5-2:</b> Procedimiento de la determinación del porcentaje de humedad del aserrín .....	28
<b>Figura 6-2:</b> Procedimiento de la determinación de la materia volátil del aserrín.....	29
<b>Figura 7-2:</b> Pesaje de la muestra y colocación en el reactor.....	31
<b>Figura 8-2:</b> Atmósfera inerte .....	31
<b>Figura 9-2:</b> Sistema de condensación .....	32
<b>Figura 10-2:</b> Pirólisis térmica del aserrín.....	32
<b>Figura 11-2:</b> Pesaje de los productos de la pirólisis .....	33
<b>Figura 12-2:</b> Prueba de densidad al biocombustible .....	35
<b>Figura 13-2:</b> Viscosidad dinámica (Reología) .....	36
<b>Figura 14-2:</b> Prueba de pH al biocombustible .....	38
<b>Figura 15-2:</b> Espectroscopía infrarroja FT-IR .....	39
<b>Figura 16-2:</b> Procedimiento para hallar el punto de inflamación.....	40
<b>Figura 1-3:</b> Esquema del proceso utilizado durante la pirólisis del aserrín.....	43
<b>Figura 2-3:</b> Fracción líquida (a) y fracción sólida (b) .....	44
<b>Figura 3-3:</b> Resultados del CG-MS del bioaceite obtenido de aserrín de madera.....	46
<b>Figura 4-3:</b> Fracción líquida filtrada (a) y el alquitrán (b) .....	46

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-2:</b> Diagrama de flujo general del proceso.....	22
<b>Gráfico 2-2:</b> Diagrama de los ensayos. (T=temperatura, E=ensayo, % L, G, S=Porcentajes de ... la fracción líquida, gaseosa y sólida.).....	23
<b>Gráfico 1-3:</b> Rendimientos de las fracciones obtenidas en la pirólisis del aserrín .....	45
<b>Gráfico 2-3:</b> Espectro IR del ácido piroleñoso obtenido a 500°C .....	48

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** Especificaciones de los equipos utilizados en la investigación

**ANEXO B:** Tabla ASTM 53 A

**ANEXO C:** Reporte de la viscosidad dinámica a 40°C del ácido piroleñoso

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo la evaluación de los residuos madereros de eucalipto y pino para la obtención de biocombustible a escala laboratorio, que fue muestreado en la Industria Madera Buenaño de la ciudad de Riobamba. Se desarrolló en tres etapas: en la primera se realizó la caracterización fisicoquímica del aserrín de eucalipto y pino mediante pruebas de densidad, humedad, ceniza, materia volátil y carbono fijo, en la segunda etapa se obtuvo el biocombustible (bioaceite) mediante pirólisis térmica en un reactor tipo Batch, bajo las siguientes condiciones de operación: temperatura de 400 y 500°C, atmósfera inerte (N<sub>2</sub>), sistema de refrigeración de agua de 10°C, tiempo de residencia de 30 min y una velocidad de calentamiento de 0.3°C/s, y en la tercera etapa se determinó las propiedades fisicoquímicas del bioaceite con pruebas de densidad a 15°C, viscosidad cinemática a 40 °C, pH, punto de inflamación y espectroscopía infrarroja FT-IR. La biomasa utilizada presentó una densidad de 0.37g/ml, humedad del 13.44%, ceniza del 0.15%, materia volátil del 72.49% y carbono fijo del 13.92%. En el proceso pirolítico se consiguió mayor rendimiento de la fracción líquida a los 500°C, el 41.97% en masa, con su análisis fisicoquímico se determinó que este bioaceite presenta una densidad de 979kg/m<sup>3</sup>, viscosidad cinemática de 1.149x10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s, pH de 3.25, punto de inflamación de 60°C y en su estructura se encuentra compuesto por alcoholes, fenoles, alquinos, derivados de ácidos carboxílicos, amina secundaria, alcanos, compuestos oxigenados, éter, aminas, Haloalcano y naftaleno. De esta manera, se evidenció que a mayor temperatura se da la formación de productos gaseoso y que por las características fisicoquímicas del biocombustible se trata de un ácido piroleñoso. Se recomienda realizar estudios de los gases no condensables y de la fracción sólida (Char).

**Palabras clave:** <BIOENERGÍA> <RESIDUOS MADEREROS> <ASERRÍN>  
<BIOCOMBUSTIBLE> <PIRÓLISIS TÉRMICA> <ÁCIDO PIROLEÑOSO>



firmado electrónicamente por:  
HOLGER GERMAN  
RAMOS UVIDIA

1236-DBRA-UPT-2021

2021-06-21

## SUMMARY

The aim of this research was the evaluation of eucalyptus and pine wood waste to obtain biofuel at laboratory scale based on sampling method at Industria Maderera Buenaño in the city of Riobamba. It was developed in three stages: in the first, the physicochemical characterization of the eucalyptus and pine sawdust was carried out by means of testing density, moisture, ash, volatile matter and fixed carbon, in the second stage, the biofuel (bio-oil) was obtained by thermal pyrolysis in a Batch reactor, under the following operating conditions: temperature at 400 and 500 °C, inert atmosphere (N<sub>2</sub>), water cooling system at 10 °C, residence time 30 min and a heating rate at 0.3 °C/s, and in the third stage the physicochemical properties of the bio-oil were determined with density tests at 15 °C, kinematic viscosity at 40 °C, pH, flash point and FT-IR infrared spectroscopy. The biomass used presented a density of 0.37g/ml, moisture 13.44%, ash 0.15%, volatile matter 72.49% and fixed carbon 13.92%. In the pyrolysis process, a higher yield of the liquid fraction was achieved at 500 °C, 41.97% in mass, with its physicochemical analysis it was determined that this bio-oil has a density of 979 kg/m<sup>3</sup>, kinematic viscosity 1,149x10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s, pH 3.25, flash point 60 °C and its structure is composed of alcohols, phenols, alkynes, derivatives of carboxylic acids, secondary amine, alkanes, oxygenates, ether, amines, haloalkane and naphthalene. In this way, it was evidenced that at a higher temperature the formation of gaseous products occurs and due to the physicochemical characteristics of the biofuel, it is a pyroligneous acid. It is recommended to carry out studies of the non-condensable gases and the solid fraction.

**Keywords:** <BIOENERGY> <WOOD WASTE> <SAWDUST> <BIOFUEL> <THERMAL PYROLYSIS> <PYROLIGNEOUS ACID>



# **INTRODUCCIÓN**

## **Identificación del problema**

En la actualidad, la principal fuente de energía proviene de combustibles fósiles. Los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural han generado problemas medioambientales. El desafío es reducir los gases de efecto invernadero y confrontar el agotamiento del petróleo. Estos retos han impulsado a la búsqueda de fuentes de energía en los biocombustibles, identificados por ser sustentables y amigables para el medio ambiente.

En la industria forestal, la producción de la madera promueve una gran cantidad de residuos en los procesos de recolección, extracción, y fabricación. Solo el 28% del total de un árbol es empleado para producir madera y lo demás es considerado como residuos. Durante el proceso de aserrío, la biomasa que se origina comprende un 34%, mientras que el aserrín ocupa un 7.5% siendo altamente contaminante para el entorno y para la salud humana. (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 1991; citado en Ayala-Mendivil y Sandoval, 2018, p. 3) El aserrín es quemado o botado en el campo provocando altos niveles de contaminación ambiental.

Por otro lado, el aserrín es una de las fuentes de biomasa más importantes para el aprovechamiento energético. Su utilización presenta una alternativa de alto impacto para la producción de un biocombustible. En el último año la Industria Maderera Buenaño trabaja con el 90% de eucalipto y el 10% de pino y genera grandes cantidades de aserrín, lo cual se va a muestrear para la obtención de biocombustible a partir de estos residuos. La finalidad de este proyecto es reducir estos residuos madereros, adquirir beneficios económicos para la empresa y contribuir en el desarrollo de bioenergías sustentables para el ambiente.

## **Justificación del problema**

Alrededor del mundo, la producción anual de la biomasa lignocelulósica, compuesta por celulosa, lignina, y hemicelulosa es de  $1 \times 10^{10}$  millones de toneladas (Sánchez y Cardona, 2008; citados en Faba et al., 2014, p. 12). El aserrín es un tipo de biomasa lignocelulósica de gran capacidad energética, convirtiéndose en materia prima para la generación de biocombustibles de segunda generación y su precio es más competitivo que las materias primas agrícolas convencionales: caña de azúcar, arroz y maíz. Siendo el aserrín un residuo proveniente de la producción de la madera no compete con los cultivos alimentarios.

En el Ecuador, la producción de biomasa es prominente en las áreas: agrícola, pecuario y forestal. Desafortunadamente, no toda esta biomasa es aprovechada en su totalidad. La principal utilización de biomasa es en los biocombustibles (DCOELLAR 2017). La importancia de estas bioenergías promueve buscar nuevas alternativas para ocupar toda la biomasa que se produce en el Ecuador.

Las acumulaciones de aserrín en la industria de la madera están generando grandes problemas medioambientales y en la salud humana. Además, ocupan espacio físico considerable en estas industrias y su tiempo de residencia es de varios meses, convirtiéndose en fuentes directas para la propagación de plagas y enfermedades. Por estas razones, es conveniente el estudio de este problema que permita reducir este residuo.

Para la eliminación de este residuo maderero se optará por la obtención de biocombustible a partir de aserrín mediante pirólisis. Ya que, este proceso permite la degradación del material vegetativo y la recuperación de la fracción líquida (biocombustible). Este proyecto beneficiará a la Industria Maderera Buenaño, ubicada en el cantón Riobamba, provincia de Chimborazo.

Al no eliminar el aserrín, el problema seguirá existiendo y la contaminación ambiental cada vez será mayor e incluso afectará la salud de sus trabajadores. Para la empresa es una oportunidad de minimizar estos problemas, pues cuenta con la materia prima para la ejecución de este proyecto en la elaboración del biocombustible.

## **Objetivos de la investigación**

### **Objetivo general**

- Evaluar los residuos madereros de eucalipto y pino para la obtención de biocombustible a escala laboratorio.

### **Objetivos específicos**

- Caracterizar el aserrín de eucalipto y pino proveniente de la Industria Maderera Buenaño mediante pruebas fisicoquímicas.
- Obtener el biocombustible mediante pirólisis en un reactor Batch.
- Determinar las propiedades fisicoquímicas del biocombustible obtenido a partir de aserrín.

# CAPÍTULO I

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 Antecedentes de la investigación

En las últimas décadas, el uso de combustibles derivados del petróleo ha aumentado las emisiones globales de CO<sub>2</sub>. El Centro de Análisis de Información de Dióxido de Carbono reportó que las emisiones de CO<sub>2</sub> se incrementaron en un 90% durante el período 1970-2016, a causa de la combustión de combustibles fósiles y procesos industriales. Aproximadamente esto representa un 78% de las emisiones totales (Le Quéré et al., 2016; citados en Ayala-Mendivil y Sandoval, 2018, p. 2). Este consumo energético está trayendo consigo altos niveles de contaminación.

Durante los últimos años, se ha incrementado el consumo de energía, por lo que se busca diversificar la central energética, reducir la dependencia del petróleo y la contaminación ambiental, mediante la utilización de recursos renovables. Desde esta perspectiva, el Ecuador se ha enfocado en la incorporación de energías sustentables y amigables con el medio ambiente, una de ellas, es la que se obtiene de la biomasa, con el objetivo reemplazar a los combustibles tradicionales (Instituto Nacional de Preinversión, 2014, p. 5).

La biomasa es una de las fuentes de energía renovable, esta energía puede ser obtenida a partir de procesos bioquímicos (transformaciones anaerobias y la fermentación alcohólica) y termoquímicos (la biomasa sólida se transforma: sólidos, líquidos y gaseosos) (Instituto Nacional de Preinversión, 2014, p. 5). El aserrín es un tipo de biomasa residual que proviene de la industria maderera y puede ser empleado en la producción de biocombustibles, por esta razón es importante su estudio energético.

En la Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador se realizó un estudio del potencial energético de la biomasa residual que proviene de la madera (eucalipto, pino, colorado y laurel) para utilizarlo como combustible sustituto en una caldera de vapor. En estos residuos madereros se determinaron el contenido de humedad y ceniza, densidad aparente, poder calorífico y el análisis químico elemental. Al realizar esta caracterización les permitió evaluar su poder energético (Arroyo-Vinueza y Reina-Guzmán, 2016, pp. 20-24)

En la actualidad, la pirólisis se ha convertido en uno de los procesos más viables para la transformación de la biomasa en biocombustibles, debido a que al modificar las condiciones de operación se puede obtener en mayor proporción el producto de interés.

Desde el 2008, la compañía holandesa BTG BioLiquids (BTG-BTL) y la multinacional británica TechnipFMC, trabajan en el desarrollo de nuevas tecnologías de producción de biocarburentes. Anunciaron que implementarán su primera fábrica de producción en Suecia y estará lista para 2021, donde se pretende convertir entre 35.000 y 40.000 toneladas anuales de residuos de madera (aserrín) en aceite para convertirlo posteriormente en biocarburente avanzado que será procesado en la refinería de Preems (Rico, 2019).

Urien (2013, pp. 29-44) realizó la obtención biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual (madera de abeto), en un intervalo de 400-600°C aplicando el proceso GRAUTHERMIC-BIO (es un típico proceso de pirólisis convencional). Con la variación de la temperatura obtuvo diferentes proporciones de la fracción líquida, sólida y gaseosa. A una temperatura de 400°C la fracción líquida fue 52,8 %, biocarbón 26,4% y gas 20,8 %, a los 500°C se obtuvo 49,1% líquido, 24,4% biocarbón y gas 26,5%, y a 600°C la fracción líquida representó el 45,5%, el biocarbón 23,6% y la fracción gaseosa el 30,9 %.

## **1.2 Marco conceptual o glosario**

### ***1.2.1 Producción de madera en el Ecuador***

En el Ecuador se producen alrededor de 421 000 TM de madera (fina, regular, para la construcción, pallets y otros) (Corporación Financiera Nacional, 2017, p. 4).

#### ***1.2.1.1 Eucalipto***

Es un árbol de gran tamaño que puede llegar a medir hasta 70 m de altura, su tallo es recto y cilíndrico, sus flores son blancas y su fruto se encuentra en forma de cápsula (Vinueza, 2012).

En el país existen dos especies de eucalipto: el *eucalyptus globulus* y *eucalyptus urograndis*. Se encuentran distribuidos en las provincias de la Sierra (Frias, 2017).

### *1.2.1.2 Pino*

En el país se cultivan dos tipos de pinos: *pinus radiata* y *pinus patula*, siendo el primero el más plantado en la región Sierra después del eucalipto. Estos árboles presentan una gran altura y sus troncos son rectos y cilíndricos (Vinueza, 2013).

### *1.2.2 Biomasa*

Es la parte biológica degradable de los productos, desechos y residuos que se originan de actividades agrícolas, forestales, pecuarias, industriales y municipales (Herguedas et al., 2012, p. 4).

#### *1.2.2.1 Clasificación según su origen*

- **Natural:** aparece en el ecosistema de manera espontánea, donde el hombre no ha intervenido (Herguedas et al., 2012, p. 5).
- **Cultivos:** Son plantaciones vegetales destinadas específicamente para la producción energética (forestales de rotación corta, pastos y cultivos de plantas herbáceas o gramíneas).
- **Residuos:** comprenden los residuos de actividades agrícolas, forestales, pecuarios, industriales y desechos orgánicos.

(Urien 2013, p. 13)

#### *1.2.2.2 Composición general*

Al provenir de fuentes muy variadas pueden contener en su estructura:

- **Ligno-Celulosa:** es la porción fibrosa de la planta, constituida por: lignina, celulosa y hemicelulosa.
- **Carbohidratos, almidón, azúcares y grasas:** las frutas, granos y hortalizas son los principales productos de este tipo.

(Instituto Nacional de Preinversión, 2014, p. 9)

### *1.2.2.3 Biomasa lignocelulósica*

Es la biomasa de origen orgánico que se encuentra en mayor proporción en la tierra, proveniente de: bosques, cultivos agrícolas, residuos de cosechas y residuos de las industrias: maderera y los tableros, papel y del papel reciclado. Está constituida principalmente por: celulosa, hemicelulosa, lignina (Abril y Navarro, 2012, p. 17).

### *1.2.2.4 Características energéticas de la biomasa*

- **Composición química**

La biomasa está constituida por una parte orgánica, inorgánica y agua. Sus proporciones van a depender del tipo de biomasa. De manera general, esta se puede determinar realizando un análisis elemental de carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre. El oxígeno se obtiene de la diferencia del peso total (Herguedas et al., 2012, p. 8).

La composición elemental de la madera es idéntica en todas sus especies; carbono 50%, Hidrógeno 6,1%, nitrógeno y minerales 1% y el oxígeno 43% (Kollman, 1951; citado en Arroyo-Vinueza y Reina-Guzmán, 2016, p. 23).

Mientras que, la composición estructural de la madera comprende de celulosa (40-60%), hemicelulosa (15-30%) y de lignina (18-23%) (Fonseca, 2006, pp. 22-29).

- **Humedad**

Es la cantidad agua por kilogramo de materia seca. La humedad está relacionada directamente con el poder calórico, cuando menor sea el contenido de agua mayor será su poder calórico. En los procesos de conversión energética es conveniente que los valores de la humedad sean inferiores al 30% para evitar operaciones previas como el secado (Herguedas et al., 2012, p. 8).

- **Ceniza**

Es la porción de materia sólida no combustible por kilogramo de materia (Herguedas et al., 2012, p. 8)..

- **Densidad**

Es una propiedad física que se define como la masa por unidad de volumen de material (Herguedas et al., 2012, p. 9).

Es dependiente del contenido de humedad, si su porcentaje es menor hay un incremento en su poder calorífico y densidad energética (San Miguel & Gutiérrez, 2015; citados en Arroyo-Vinueza y Reina-Guzmán, 2016, p. 23).

- **Poder calorífico**

Es el contenido calórico por unidad de masa, con este parámetro se puede identificar el contenido de energía en la biomasa. El poder calorífico superior (PCS o HHV) es el calor que se produce al final de la combustión, y el poder calorífico inferior (PCI o LHV) es el calor aprovechable (Herguedas et al., 2012, pp. 8-9).

Para obtener el grado calórico neto de una sustancia sólida conociendo su humedad en base seca y su poder calorífico superior, se utiliza la siguiente fórmula:

$$PCI = \frac{PCS - 600(u + 9h)}{1 + u}$$

Donde:

PCS= poder calorífico superior (calorímetro adiabático)

600= calor de vaporización a 0 °C [kcal/kg]

u= humedad del combustible (referida al peso seco),

9= kilos de agua que se forman al oxidar un kilo de hidrógeno

h= proporción de hidrógeno 6,1 %.

(Kollman, 1951; citado en Arroyo-Vinueza y Reina-Guzmán, 2016, p. 24)

En la siguiente tabla, se muestra una comparación del poder calórico superior de diferentes tipos de biomasa con la de los combustibles fósiles, totalmente secos:

**Tabla 1-1:** Poder calórico superior de distintas biomásas y combustibles fósiles

		Poder calórico Superior (MJ/kg)
<b>BIOMASA</b>	Paja de sorgo	15,40
	Paja de arroz	15,95
	Rastrojo de maíz	18,25
	Paja de cebada	18,70
	Bagazo de caña de azúcar	19,00
	Paja de trijo	19,40
	Estiércol de vaca	20,75
	Carbón de leña	34,39
	Roble	19,80
	Álamo	20,11
<b>COMBUSTIBLES FÓSILES</b>	Lignito (carbón)	24,63
	Carbón bituminoso	30,23
	Ga natural	42,13
	Combustóleo No. 6	42,30
	Diésel	45,70
	Queroseno	46,50
	Propano	50,34

Fuente: Mendoza, 2016, p. 2.

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

#### 1.2.2.5 Procesos de conversión de la biomasa

Los procesos de conversión de la biomasa a biocombustibles (productos) dependen mucho del origen de la biomasa, de manera general se tienen los siguientes procesos:

**Tabla 2-1:** Procesos de transformación de la biomasa a biocombustibles

PROCESOS		PRODUCTOS	APLICACIONES
<b>Mecánicos</b>	Astillados	Leñas, astillas, briquetas y aserrín	Calefacción y electricidad
	Trituración		
	Compactación		
<b>Termoquímicos</b>	Pirólisis	Carbón, aceite y gasógeno	Calefacción, electricidad, transporte e industria química
	Gasificación		
<b>Bioteconológicos</b>	Fermentación	Etanol y biogás	Transporte, industria química, calefacción y electricidad
	Digestión anaerobia		
<b>Extractivos</b>	Extracción fisicoquímica	Aceites, ésteres e hidrocarburos	Transporte e industria química

Fuente: Salinas Callejas y Gasca Quezada, 2009, p. 77.



Por otro lado, mediante la aplicación de diversas tecnologías se puede optar por dos procesos de conversión para la biomasa proveniente de residuos forestales y obtener energía:

**Tabla 3-1:** Procesos de conversión de la biomasa con sus respectivos productos

<b>PROCESOS TERMOQUÍMICOS</b>	<b>PRODUCTOS</b>
Combustión	Calor, vapor y electricidad
Gasificación	Gas combustible, metano y gas de síntesis
Pirólisis	Bioaceites, líquidos de síntesis y carbón
<b>PROCESOS BIOQUÍMICOS</b>	<b>PRODUCTOS</b>
Fermentación con levaduras	Bioetanol y lípidos microbianos
Transformación Bacteriana	Biogás
Hidrólisis enzimática	Azúcares fermentables

**Fuente:** Ayala-Mendivil y Sandoval 2018, p. 4.

**Realizado por:** Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

### ***1.2.3 Residuos madereros***

Son aquellos que se generan como consecuencia de la producción de madera en la industria de aserrado (Industria de primera transformación). Entre estos residuos tenemos: virutas, costeros, recortes, aserrín, menudos, pérdidas varias y corteza (Ayala-Mendivil y Sandoval, 2018, p. 3).

#### ***1.2.3.1 Aserrín o serrín***

Son pequeñas partículas que se generan en el transcurso del proceso de aserrado de la madera, es decir, en todas las sierras (Herguedas et al., 2012, p. 20).

### ***1.2.4 Bioenergía***

Es la energía proveniente de la biomasa que puede ser aprovechada en la producción de electricidad y calor, combustible y ser materia prima para la producción de químicos (Cherubini, 2010; citado en Ayala-Mendivil y Sandoval, 2018, p. 3).

#### ***1.2.4.1 Biocombustible***

Son combustibles de origen biológico obtenidos de recursos renovables a partir de restos orgánicos (Armentrout y Armentrout, 2014, p. 3).

Según el origen de la materia prima se pueden clasificar en dos tipos:

- **Biocombustibles de primera generación:** Son obtenidos de cultivos de azúcares, almidón y materias primas oleaginosas (aceites vegetales).
- **Biocombustibles de segunda generación:** Se obtienen de biomasa genérica, materias primas oleaginosas (cultivos no alimentarios, aceites microbianos, algas), aceites y grasas de desecho, residuos (agrícolas, forestales y / o marinos).

(Serrano-Ruiz y Luque, 2011, p. 384)

Según su estado se pueden clasificar en:

- **Líquidos:** bioalcoholes, biohidrocarburos, aceites vegetales, ésteres derivados de aceites vegetales y aceites de pirólisis.
- **Sólidos:** paja, leña sin procesar, astillas, briquetas, pellets, triturados finos y carbón vegetal.
- **Gaseosos:** gasógeno, biogás e hidrógeno.

(Salinas Callejas y Gasca Quezada, 2009, p. 77)

### ***1.2.5 Pirólisis***

La pirólisis es un proceso de degradación térmica anaerobia. Permite que la biomasa se transforme en combustibles productivos. De esta conversión termoquímica se obtiene líquido (bioaceite), gas y residuo carbonoso (Sullivan y R. Ball, 2012; citado en Urien, 2013, p. 20).

La pirólisis analítica se la efectúa en atmosferas inertes utilizando gases como nitrógeno (N), helio (He) o argón (Ar) (Gómez et al., 2008, p. 11).

La pirólisis de la biomasa lignocelulósica es considerada como la desintegración del material vegetativo a altas temperaturas, sin llegar a descomponerse o a inflamarse (Díaz Velázquez, 2005, p. 47).

El rendimiento de productos y sus características son dependientes del tipo de biomasa, temperatura de operación, en que atmósfera se da la reacción, velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia de la materia prima en el reactor (Álvarez, 2013; citado en Cantos Macías et al., 2018, p. 402).

Varían según sus condiciones de operación:

**Tabla 4-1:** Diferentes tipos de pirólisis, sus condiciones de operación y los productos que se obtienen en mayor proporción

PROCESO	TIEMPO DE RESIDENCIA	VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO	TEMPERATURA (°C)	PRODUCTOS
Carbonización	Días	Muy lenta	400	Biochar
Convencional	5-30 min	Lenta	600	Gas, líquido y biochar
Rápida	0.5-5 s	Muy rápida	650	Bioaceites
Flash (líquidos)	< 1 s	Rápida	< 650	Bioaceites
Flash (gas)	< 1 s	Rápida	< 650	Químicos y gas
Ultrarrápida	< 0.5 s	Muy rápida	1000	Químicos y gas
Vacío	2-30 s	Media	400	Bioaceites
Hidropirólisis	< 10 s	Rápida	< 500	Bioaceites
Metanopirólisis	< 10 s	Rápida	> 700	Químicos

**Fuente:** Balat et al., 2009; citados en Urien, 2013, p. 20.

#### 1.2.5.1 Pirólisis térmica

Es un tipo de pirólisis que permite la degradación de la materia por medio del calor. Los tipos de esta pirólisis son:

- **Pirólisis convencional**

En este proceso de conversión termoquímica la temperatura de operación está entre 500-600 °C. Al trabajar con una velocidad de calentamiento lenta el tamaño de partícula no es importante. En esta pirólisis, se obtienen tres productos: sólidos (20%), líquidos (50%) y gases (30) (Balat et al., 2009; citados en Urien, 2013, p. 21).

Se puede trabajar con un rango de temperatura de 300-550 °C, tiempo de residencia de 5-30 min y una velocidad de calentamiento de 0,1-1 °C/s (Cortázar, 2014; Rincón y Silva, 2014; citados en Morocho Delgado, 2019).

- **Pirólisis rápida**

Se denomina así porque a velocidad de calentamiento es rápida, su temperatura de operación es de 650°C. Este tipo de pirólisis es utilizada cuando se requiere obtener mayor rendimiento de la

fracción líquida (Urien, 2013, p. 21). De este proceso se obtiene: Sólidos (12%), Líquidos (75%) y gases (12%) (Balat et al., 2009; citado en Urien, 2013, p. 21).

- **Flash pirólisis o pirólisis ultrarrápida**

La temperatura es más elevada (1000 °C) y los tiempos de residencias son aún más cortos. En este proceso, sus parámetros pueden variar, para favorecer la producción de gas (flash-gas) o de líquidos (flash-líquidos) % (Urien, 2013, p. 21).

Como resultado de la pirólisis térmica tenemos:

- **Fracción sólida**

Es la parte carbonizada del proceso (rico en carbono) (Wang et al., 2017, p.13; citados en Bastidas Iturralde y Miño Puente, 2019). Se lo identifica como biochar, Char, biocarbón y carbón vegetal. Puede ser empleado en la fabricación de carbón activado, mascarillas, plantillas para pies, filtros de agua y de aire acondicionado (Fajado,2017; citado en Lam Sanmartín, 2020, p. 14).

- **Fracción líquida**

Resulta de la condensación de los gases que desprende el proceso pirolítico, es un líquido orgánico (Wang et al., 2017, p.13; citados en Bastidas Iturralde y Miño Puente, 2019). Se lo conoce como Bioaceites, líquidos pirolíticos, aceites biocombustibles, condensado, bio-oil, entre otros (Urien, 2013; citado en Campoverde Jara, 2016, p. 40). Cuando proviene de biomásas vegetales es conocido como ácido piroleñoso. Está constituido por agua (20-25%), metoxifenoles, ácidos orgánicos (20-25%), compuestos no oxigenados (10-25%) y de hidrocarburos (5-10%) (Bu et al., 2012; citados en Campoverde Jara, 2016, p. 40). Puede ser utilizado como materia prima para la obtención de combustibles ricos en hidrocarburos (Álvarez, 2013; citado en Cantos Macías et al., 2018, p. 402).

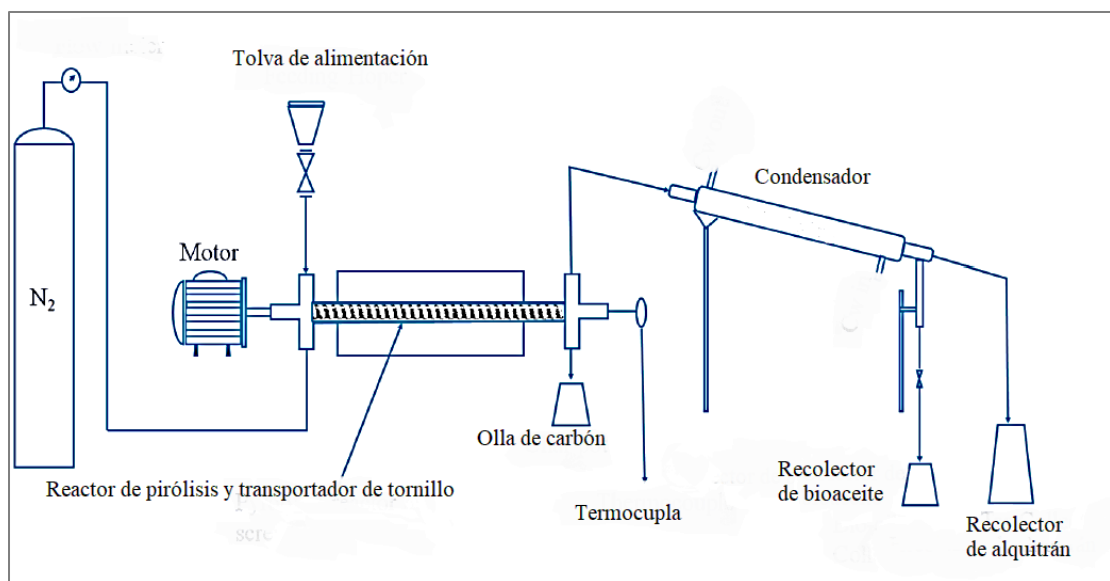
- **Fracción gaseosa**

Esta fracción representa los gases no condensables durante el proceso de pirólisis. Puede utilizarse como materia prima en la producción de otros productos químicos o bien en la generación de energía mecánica o térmica (Álvarez, 2013; citado en Cantos Macías et al., 2018, p. 402).

### 1.2.5.2 Pirólisis de los residuos madereros

- **Pirólisis del aserrín**

[En la degradación del aserrín de Acacia utilizaron un sistema de reactor de pirólisis de tornillo sinfín, el mismo que trabajó bajo las siguientes condiciones de operación: una tasa de flujo de nitrógeno de 300 cm<sup>3</sup>/min, una tasa de alimentación de la materia prima de 180 g/h, la rotación del transportador de tornillo de 4.5 RPM, el tiempo de residencia 5 min, el tamaño de partícula de 0.5-1.0 mm y un rango de temperatura de 400-600 °C] (Ahmed et al., 2020, p. 2).



**Figura 1-1.** Esquema completo del proceso pirolítico en la descomposición del aserrín

**Fuente:** Ahmed et al., 2020, p. 3.

A continuación, se presenta los resultados de dicho proceso y la caracterización del bioaceite:

**Tabla 5-1:** Resultados de la pirólisis del aserrín y su caracterización fisicoquímica del bioaceite

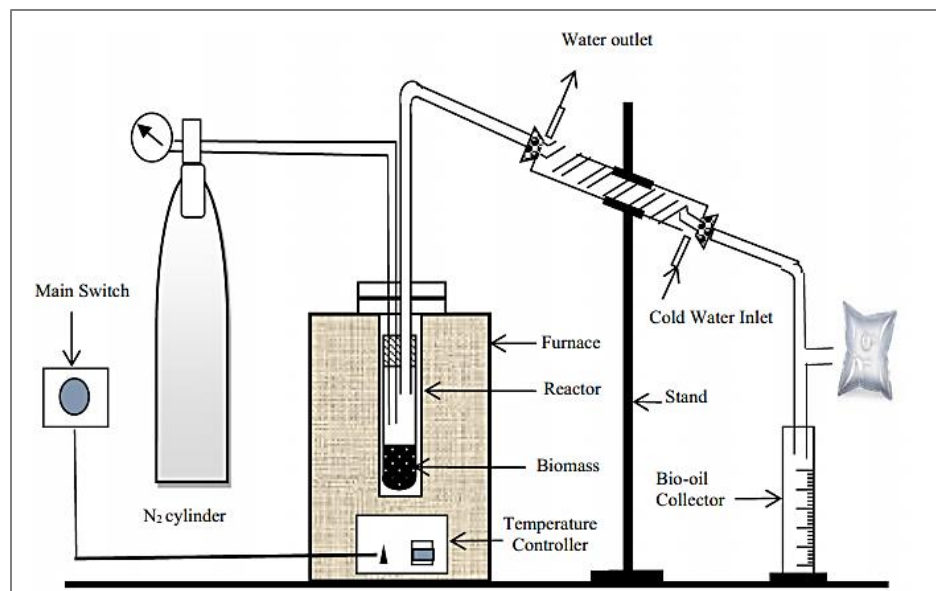
Temperatura (°C)	Rendimientos en masa (%)			Caracterización del bioaceite		
	Bio-oil	Biocarbón	Gases no condensables	Poder calórico (MJ/kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	pH
400	29,40	51,85	16,70	28,781	1065	2,9
500	45,10	35,23	19,67	29,771	1056	3,2
600	31,81	29,72	38,47	29,871	1043	3,4

**Fuente:** Ahmed et al., 2020, p. 4-5.

**Realizado por:** Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

[Entre los compuestos químicos identificados en el bio-oil están: fenoles, compuestos nitrogenados, guayacoles, ácidos orgánicos, cetonas, azúcares, anhídros, ésteres y aldehídos] (Ahmed et al., 2020, p. 2).

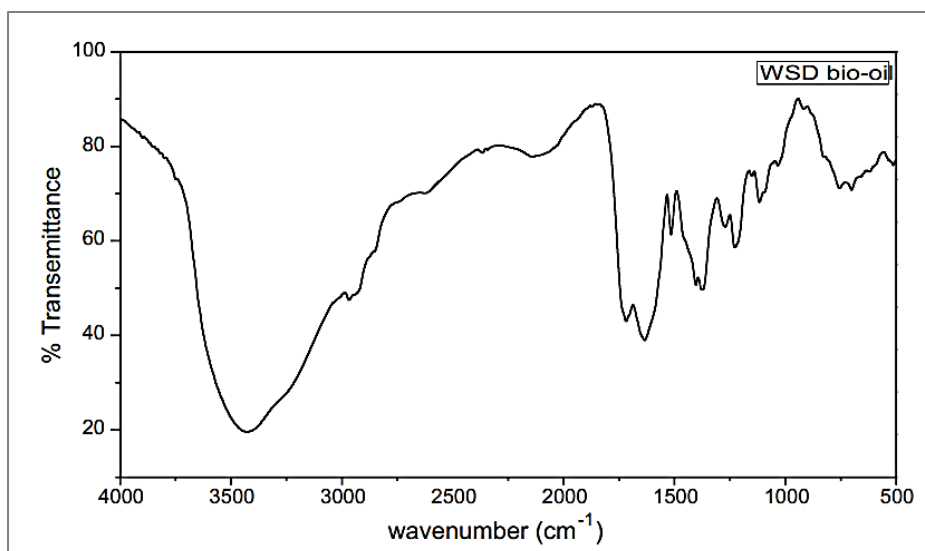
[En la pirólisis efectuada del aserrín de *Cedrus deodara* trabajaron con un reactor semi Batch a escala laboratorio **Figura 2-2**, con el objetivo de explorar la influencia que tiene las condiciones de operación sobre los rendimientos en las fracciones: sólida, líquida y gaseosa. Este estudio operó bajo las siguientes condiciones: temperatura de 350-650°C, velocidad de calentamiento de 10 y 50°C/min, Velocidad de flujo de N<sub>2</sub> de 50-200cm<sup>3</sup>/min y un tamaño de partícula menor a 0,25 y mayor a 1,7mm. Donde determinaron que, al trabajar con una temperatura de 500°C, velocidad de calentamiento de 50°C/min, velocidad de flujo de nitrógeno de 100cm<sup>3</sup>/min y un tamaño de partícula 0,6-1 mm se obtiene el 44,16% de bioaceite ] (Varma et al., 2019, pp. 224-229).



**Figura 2-1.** Proceso de pirólisis efectuado en un reactor semi Batch

**Fuente:** Varma et al., 2019, p.226.

[La caracterización fisicoquímica lo realizaron del bioaceite obtenido en mayor rendimiento, mediante pruebas de: densidad a 15°C(kg/m<sup>3</sup>), viscosidad a 40°C (cSt), punto de inflamación (°C) y pH. Cuyos resultados fueron 1083, 16.53, 68 y 2.6 respectivamente. Mediante el espectro FT-IR estipularon la presencia de alcanos, alquenos, aromáticos, aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos y fenoles **Figura 3-2**] (Varma et al., 2019, p. 232).



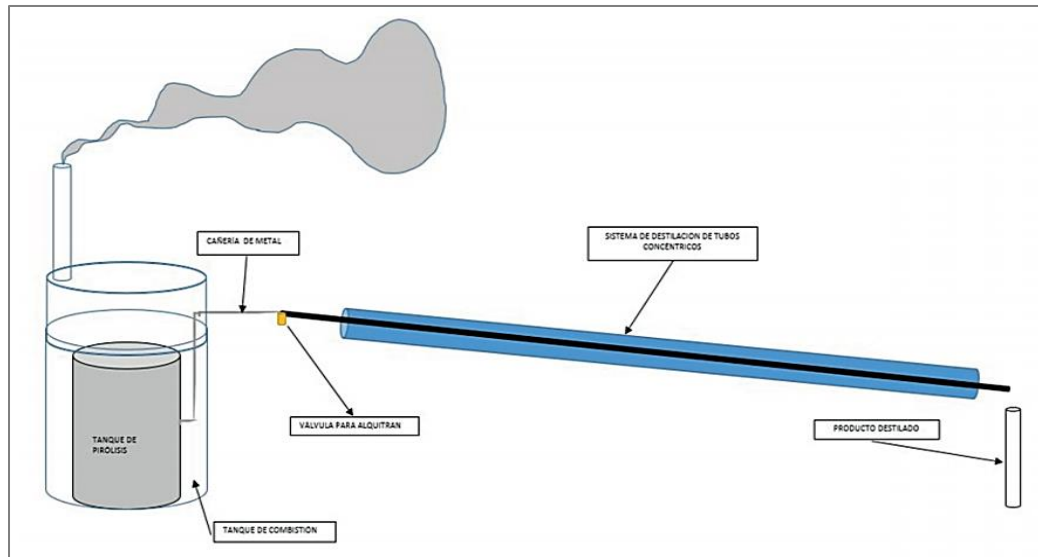
**Figura 3-1.** Espectro FT-IR del bioaceite de aserrín

**Fuente:** Varma et al., 2019, p. 230.

Por otro lado, en la pirólisis efectuada del aserrín de pino en lecho fluidizado que trabajó con un factor de aire de 0,4 y con temperaturas entre 600-1000°C, los rendimientos fueron del 19,5 % la parte líquida, el 80,3% gaseosa y el 0,2% sólida. La fracción líquida fue filtrada para su posterior destilación (101°C), en la que obtuvo bioaceite (destilado) y alquitrán (residuo que quedó en el balón de destilación). En la caracterización físico-química del aceite piroleñoso destilado determinó: la densidad (20°C, g/ml), viscosidad (20°C, cP), pH y tensión superficial (mN/m) cuyos resultados fueron 1.002, 0.953, 2.5 y 40,2 respectivamente. Las sustancias que halló en el aceite mediante pruebas químicas cualitativas son: compuestos orgánicos fácilmente oxidables, ácidos carboxílicos y fenoles, compuestos carbonílicos, grupos carbonílicos donantes de electrones en compuestos aromáticos y aminas primarias (Díaz Velázquez, 2005, pp. 47-49).

- **Pirólisis del Kikuyo y leña**

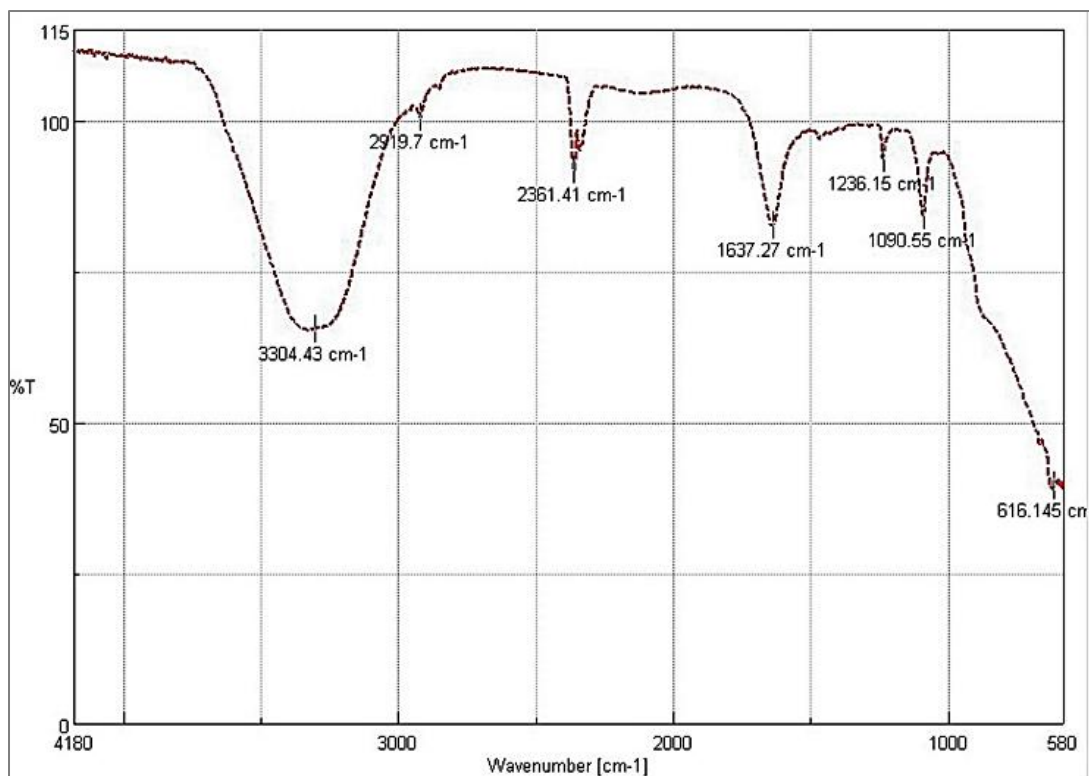
Burbano Salas (2019, pp. 254-261) utilizó un reactor de lecho fijo para pirolizar la biomasa, conectado a un sistema de condensación simple con agua de refrigeración de 10 °C. La materia que ingresó fue de 42 kg de Kikuyo y 28 kg de leña obteniendo 17 kg de la fracción sólida (Char), 95 ml de alquitrán y 500 ml de ácido piroleñoso. Al utilizar temperaturas que fluctúan entre 300, 450 y 600 °C los resultados en base al rendimiento fueron de 25-35 % para la parte sólida, 21-29 % en gases y el alquitrán del 5-9 %.



**Figura 4-1.** Esquema del proceso para la obtención del ácido pireneico

Fuente: Burbano Salas, 2019, p. 259.

Para la espectroscopía infrarroja FT-IR utilizó una dilución de 15 ml líquido pirólítico en 200 ml de agua destilada. Mediante el análisis del espectro determinó compuestos como: alcohol, grupos alifáticos, nitrilo, aminoácidos, éter, compuestos de organosilicio y fósforo, halogenados (Burbano Salas, 2019, pp. 254-261).



**Figura 5-1.** Espectro IR del condensado (Fracción líquida)

Fuente: Burbano Salas, 2019, p. 260.



- **Rendimientos del proceso**

**Tabla 6-1:** Rendimientos obtenidos en la degradación de madera según el tipo de pirólisis

TIPOS DE PIRÓLISIS	RENDIMIENTOS (% masa)			CONDICIONES DE TRABAJO			
	Fracción líquida	Fracción sólida	Fracción gaseosa	Tiempo	Velocidad de calentamiento (°C/s)	Temperatura final (°C)	Ambiente
Carbonización	20-30	30-40	30-40	Días	Muy lenta: 0,1-1	500	Atmósfera inerte
Convencional	40-50	10-20	20-30	5-30 min	Lenta: <2	600	
Rápida	65-75	10-15	10-20	<2 s	Muy rápida: 10-200	650	

**Fuente:** Manals et al., 2009; Peraza, 2002; citados en Cuesta 2019, p. 35-36.

**Realizado por:** Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

### ***1.2.6 Reactor discontinuo o Batch***

Es un tipo de reactor según su modo de operación, se caracteriza por ser un recipiente en el que se descargan sus productos una vez acabada la reacción. En cuanto a la producción se da en cantidades limitadas, es decir, por lotes (Ibáñez, 2020, p. 4).

## CAPÍTULO II

### 2. METODOLOGÍA

#### 2.1 Hipótesis y variables

##### 2.1.1 *Hipótesis general*

La obtención de biocombustible se puede realizar a partir de residuos madereros mediante pirólisis térmica.

##### 2.1.2 *Hipótesis específicas*

- La caracterización fisicoquímica del aserrín permite determinar si se deben realizar operaciones previas al proceso.
- La temperatura de pirólisis influye en el rendimiento de los productos.
- Las características fisicoquímicas de la fracción líquida determinan si puede ser empleado directamente como biocombustible.

##### 2.1.3 *Identificación de variables*

###### 2.1.3.1 *Variables independientes*

- Aserrín (eucalipto y pino)
- Cantidad de muestra
- Tamaño de partícula
- Temperatura de pirólisis
- Temperatura de condensación

###### 2.1.3.2 *Variables dependientes*

- Presión
- Velocidad de calentamiento
- % Rendimiento de la fracción líquida

- % Rendimiento de la fracción sólida
- % Rendimiento de la fracción gaseosa

### 2.1.4 Operacionalización de variables

**Tabla 1-2:** Operacionalización de variables que están dentro del proceso de pirólisis

VARIABLE	TIPO DE VARIABLE	DEFINICIÓN	CATEGORÍA	INDICADORES	RANGOS	INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN
Aserrín	Independiente, cuantitativa continua.	Es un residuo proveniente de la industria maderera.	-	Densidad	0,1-0,45 g/ml	Balanza analítica
				Ceniza	-	
				Materia volátil	-	
				Humedad	< 30%	Balanza de humedad
				Carbono fijo	-	-
Cantidad de muestra	Independiente, cuantitativa continua.	Es el contenido de un material a utilizar.	-	Peso	200 g	Balanza analítica
Tamaño de partícula	Independiente, cuantitativa continua.	Es la dimensión física de una partícula.		Diámetro de partícula	10-20 mm	Calibrador
Temperatura	Independiente, cuantitativa continua.	Es una magnitud física que indica la energía interna de un cuerpo, objeto o ambiente en general.	Temperatura de pirólisis	Calor	400 y 500 °C	Reactor Batch
			Temperatura de condensación		10 °C	Equipo de condensación
Presión	Dependiente, cuantitativa continua.	Designa una proyección de fuerza ejercida de manera perpendicular sobre una superficie, por unidad de superficie.	-	Presión	40-70 psi	Reactor Batch

Velocidad de calentamiento	Dependiente, cuantitativa continua.	Es la cantidad de calor que se suministra en un tiempo determinado.	-	Calor-tiempo	0,1-1 °C/s	Reactor Batch
Rendimiento	Dependiente, cuantitativa continua.	Es la relación entre el producto que se obtiene y la muestra inicial multiplicado por cien.	Rendimiento de la fracción líquida	%	40-50 %	Balanza analítica
			Rendimiento de la fracción sólida		10-20 %	
			Rendimiento de la fracción gaseosa		20-30 %	-

**Realizado por:** Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

### 2.1.5 Matriz de consistencia

**Tabla 2-2:** Matriz de consistencia

ASPECTOS GENERALES				
PROBLEMA GENERAL		OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	
La industria maderera durante la producción de la madera genera grandes cantidades de residuos, como el aserrín.		Evaluar los residuos madereros de eucalipto y pino para la obtención de biocombustible a escala laboratorio.	La obtención de biocombustible se puede realizar a partir de residuos madereros mediante pirólisis térmica.	
ASPECTOS ESPECÍFICOS				
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	VARIABLES DE LAS HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS
No se conocen las características fisicoquímicas del aserrín que se va a utilizar.	Caracterizar el aserrín de eucalipto y pino proveniente de la Industria Maderera Buenaño mediante pruebas fisicoquímicas.	La caracterización fisicoquímica del aserrín permite determinar si se debe realizar operaciones previas al proceso.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aserrín (eucalipto y pino)</li> <li>- Cantidad de muestra</li> <li>- Tamaño de partícula</li> </ul>	Pruebas de densidad, humedad, ceniza, materia volátil y carbono fijo.

¿Se puede obtener biocombustible mediante pirólisis en un reactor Batch?	Obtener el biocombustible mediante pirólisis en un reactor Batch.	La temperatura de pirólisis influye en el rendimiento de los productos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura (pirólisis y condensación)</li> <li>- Velocidad de calentamiento</li> <li>- Tiempo de residencia</li> <li>- Presión</li> <li>- Rendimiento de los productos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ensayos a diferentes temperaturas.</li> <li>- Mediante la fórmula del rendimiento</li> </ul>
Se desconocen las características fisicoquímicas del biocombustible (fracción líquida)	Determinar las propiedades fisicoquímicas del biocombustible obtenido a partir de aserrín.	Las características fisicoquímicas de la fracción líquida determinan si puede ser empleado directamente como biocombustible.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Volumen obtenido</li> </ul>	Determinación de la densidad, viscosidad, pH, espectroscopía infrarroja FT-IR y poder calórico.

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

## 2.2 Tipo y diseño de investigación

### 2.2.1 Tipo de investigación

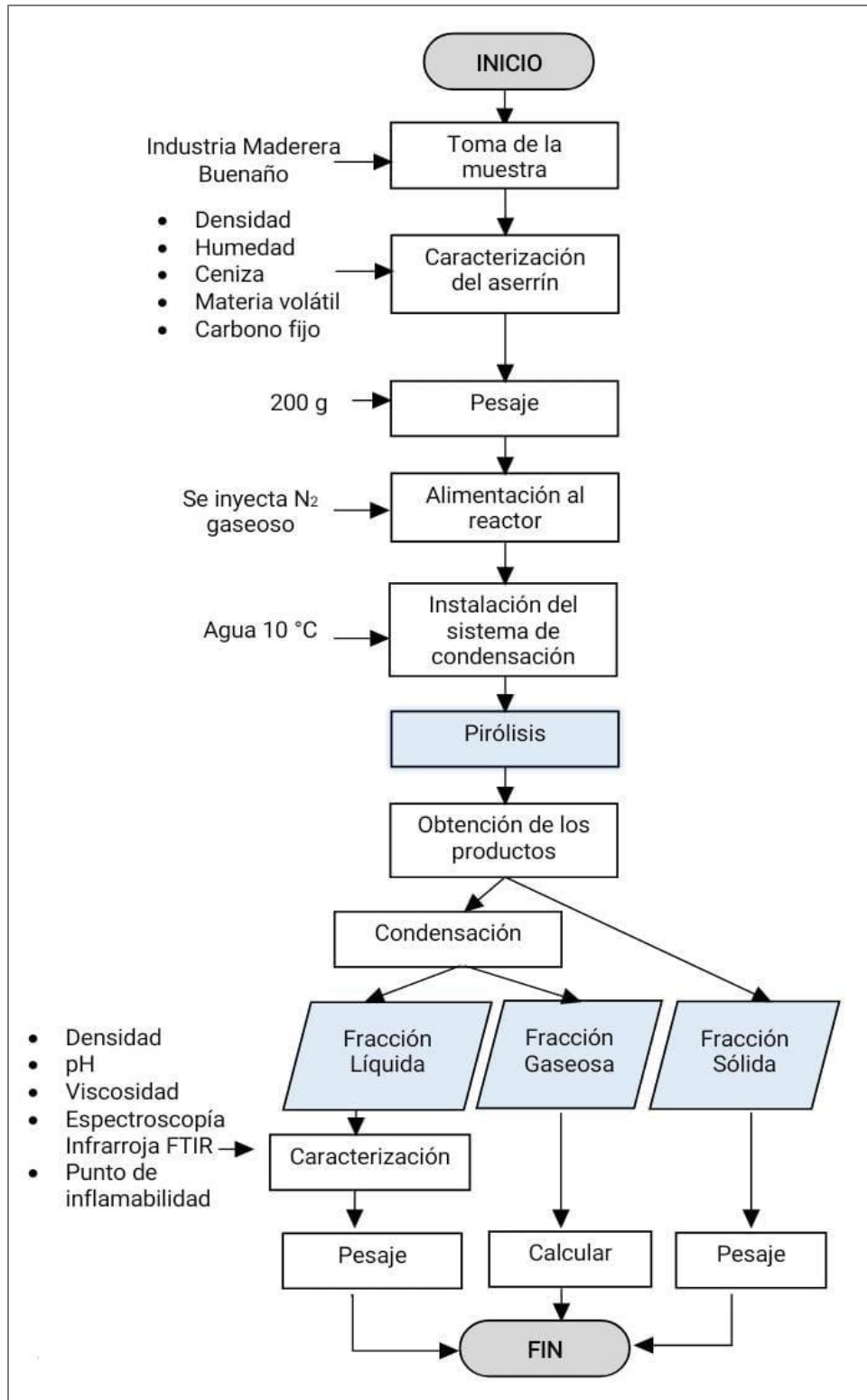
En el presente trabajo, el tipo de investigación es descriptiva ya que se enfoca en el análisis e investigación de los residuos madereros de eucalipto y pino para obtener biocombustible, mediante la selección de técnicas que permiten recolectar los datos.

### 2.2.2 Diseño de la investigación

Es una investigación experimental, debido a que se busca obtener biocombustible a partir de aserrín, mediante la manipulación de la temperatura en el proceso pirolítico en condiciones de laboratorio controladas.

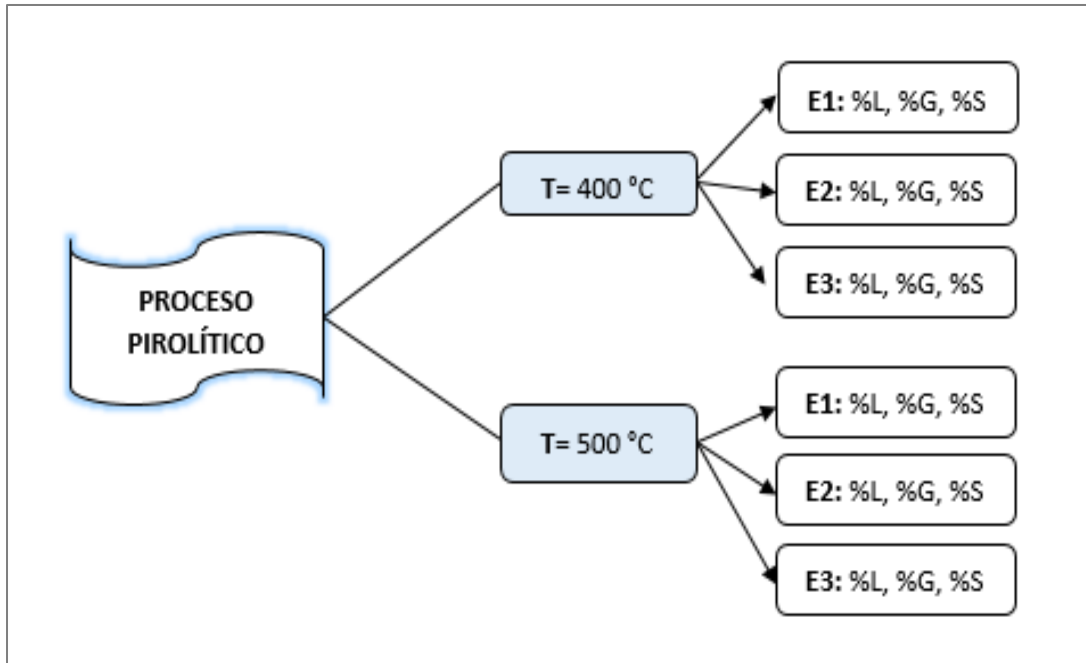
La parte experimental se desarrolló en tres etapas, en la primera se realizó la caracterización fisicoquímica del aserrín de eucalipto y pino, en la segunda etapa se obtuvo el biocombustible

mediante pirólisis en un reactor tipo Batch y en la tercera etapa se caracterizó el biocombustible obtenido, mediante pruebas de densidad, viscosidad, pH espectroscopía infrarroja FT-IR y punto de inflamación.



**Gráfico 1-2.** Diagrama de flujo general del proceso

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.



**Gráfico 2-2.** Diagrama de los ensayos. (T=temperatura, E=ensayo, % L, G, S=Porcentajes de la fracción líquida, gaseosa y sólida.)

**Realizado por:** Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

### 2.3 Unidad de análisis

La unidad de análisis de esta investigación es el aserrín de eucalipto y pino.

### 2.4 Población de estudio

La población de estudio comprendió el aserrín (eucalipto y pino) que se genera en la Industria Maderera Buenaño, ubicada en el cantón Riobamba, provincia de Chimborazo.

### 2.5 Tamaño de muestra

Para el desarrollo experimental se tomó una muestra de 200g por cada experimento con tres repeticiones.

### 2.6 Selección de la muestra

Las muestras fueron tomadas en campo, en la Industria Maderera Buenaño y se eligió el aserrín de eucalipto y pino proveniente de la madera recién aserrada. Luego llevaron al laboratorio para ser almacenadas en un lugar seco y libre de humedad.



**Figura 1-2.** Toma de la muestra

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

## 2.7 Técnicas de recolección de datos

La parte experimental de la investigación se llevó a cabo en los laboratorios de Química Analítica, Química Instrumental, Operaciones Unitarias e Ingeniería de petróleos que pertenecen a la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, ubicada en la Panamericana Sur km 1½, de la ciudad de Riobamba, a excepción de la determinación de la viscosidad del biocombustible realizado en el Laboratorio del Departamento de Petróleos, Energía y Contaminación ubicado en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Central Ecuador, ubicada en las calles Enrique Ritter y Bolivia.

### 2.7.1 Caracterización fisicoquímica del aserrín

La muestra utilizada en la investigación presentó un tamaño de partícula entre 10 y 20mm (aserrín grueso).



**Figura 2-2.** Aserrín grueso

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.



### 2.7.1.1 Determinación de la densidad

Su medición se llevó a cabo hallando las masas que ocuparon tres volúmenes determinados.

#### **Materiales**

- Probeta de 50ml
- Varilla de agitación
- Muestra de aserrín

#### **Equipos**

- Balanza digital

#### **Procedimiento**

- a. Colocar el aserrín en la probeta.
- b. Con ayuda de la varilla de agitación compactar bien el aserrín asegurándose que no se generen espacios y llenar hasta el volumen deseado.
- c. Pesar la probeta con el aserrín.
- d. Calcular su densidad mediante la siguiente formula:

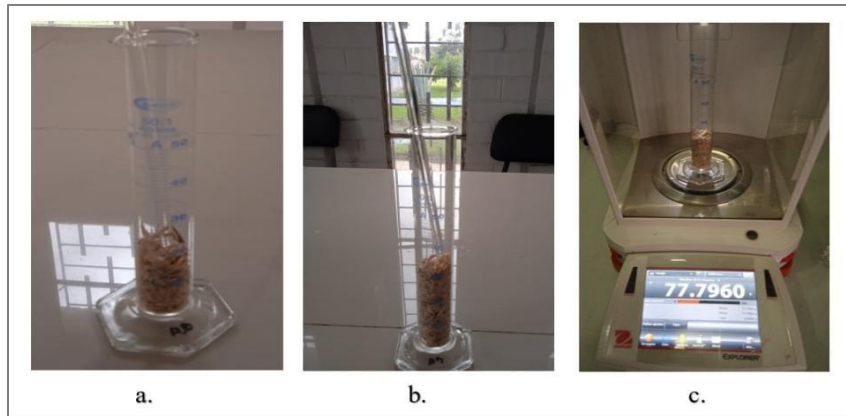
$$Ec.1: \rho = \frac{m}{v}$$

Donde:

$\rho$ : Densidad (g/ml)

m: Masa

v: Volumen



**Figura 3-2.** Procedimiento de la prueba de densidad del aserrín

Realizado por: LemaGavidia, Cinthia, 2021.

### 2.7.1.2 Determinación del porcentaje de ceniza

Se determinó el contenido de cenizas mediante la norma ASTM D 3172- 89 (02), la cual está especificada en (Vásquez y Herrera, 2006, p. 3562).

#### **Materiales**

- Cápsula de porcelana
- Balanza digital
- Pinza
- Muestra de aserrín

#### **Equipos**

- Mufla
- Desecador

#### **Procedimiento**

- a. Pesar la muestra.
- b. Calentar la muestra hasta 500 °C durante 30 minutos y subir la temperatura de 500 °C hasta 815 °C entre 60 a 90 minutos.
- c. Sacar la cápsula y dejar enfriar en el desecador para pesarla.
- d. Conservar a 815 °C hasta tener una masa constante.
- e. Calcular el porcentaje de ceniza mediante la siguiente fórmula:

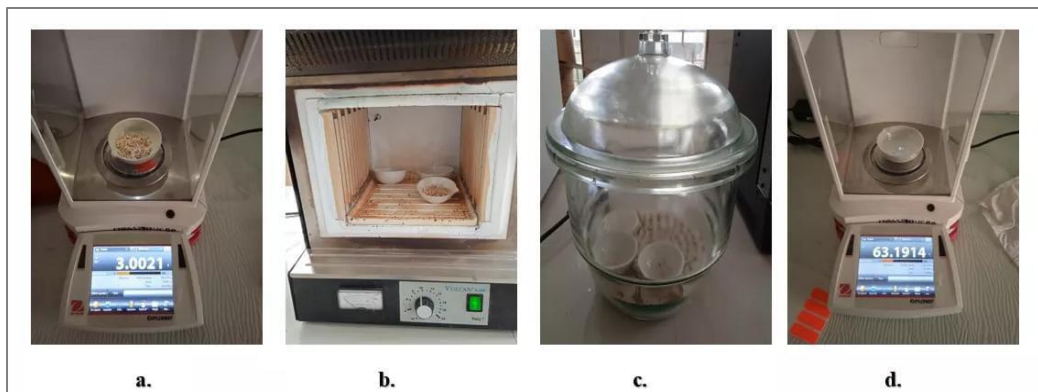
$$Ec. 2: C = \frac{m_c}{m_M} \times 100\%$$

Donde:

C: Ceniza (%)

$m_c$ : Masa de la ceniza

$m_M$ : Masa de la muestra



**Figura 4-2.** Procedimiento de la prueba de ceniza del aserrín

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

### 2.7.1.3 Determinación del porcentaje de humedad

Se llevó a cabo su determinación mediante el uso de una balanza de humedad (termobalanza).

#### **Materiales**

- Cápsula de porcelana
- Pinzas
- Muestra de aserrín

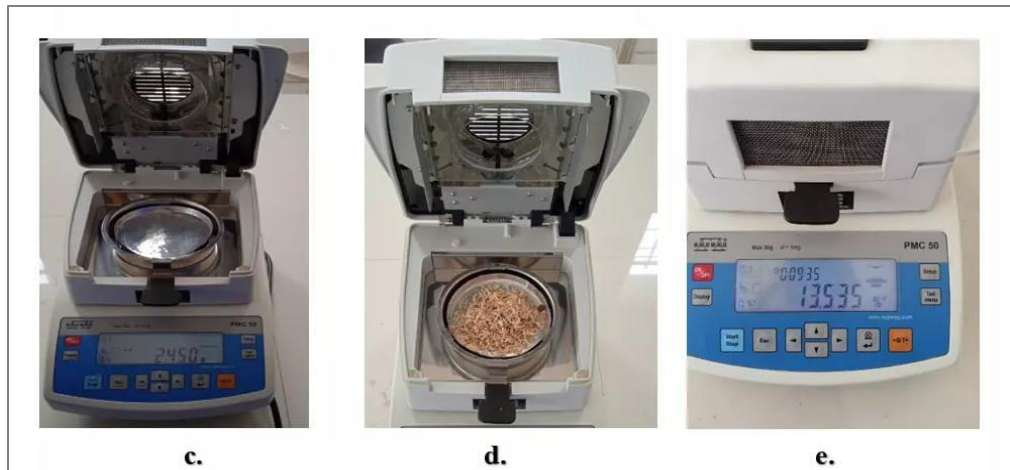
#### **Equipos**

- Balanza de humedad

#### **Procedimiento**

- a. Encender la balanza de humedad.

- b. Llevar a cero y presionar la tecla Start.
- c. Abrir la tapa de la balanza, colocar el platillo, cerrar la tapa y llevar a cero.
- d. Colocar la muestra en el plato y cerrar la tapa.
- e. Esperar que la balanza termine la medición.



**Figura 5-2.** Procedimiento de la determinación del porcentaje de humedad del aserrín

Realizado por: LemaGavidia, Cinthia, 2021.

#### 2.7.1.4 Determinación del porcentaje de materia volátil

Su determinación fue en base a la norma ASTM D 3175-89(02), la misma que se encuentra especificada por Vásquez y Herrera (2006, p. 3561).

#### **Materiales**

- Cápsula de porcelana
- Balanza digital
- Pinza
- Muestra de aserrín

#### **Equipos**

- Mufla
- Desecador

## Procedimiento

- Pesar la muestra.
- Calentar la muestra a 900°C durante 7 minutos.
- Dejar enfriar en el desecador por unos minutos
- Pesar la cápsula con la materia no volátil.
- Calcular el porcentaje de materia volátil mediante la siguiente fórmula:

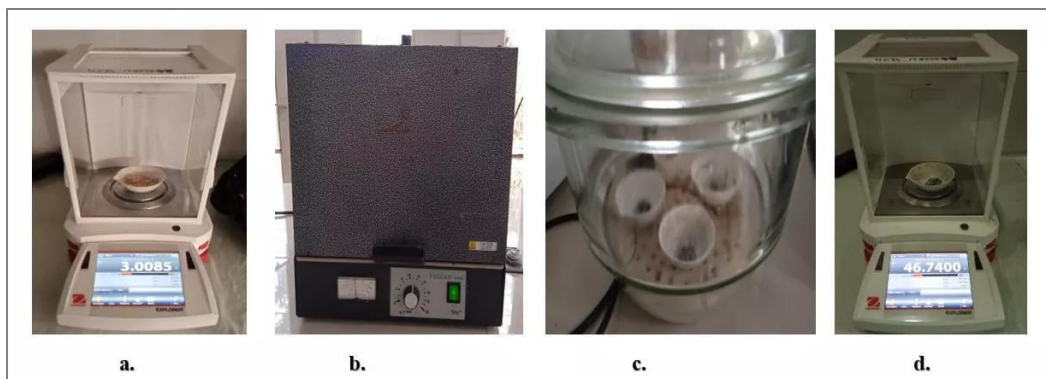
$$\text{Ec. 3: } MV = \frac{m_M - m_{NV}}{m_M} \times 100\%$$

Donde:

MV: Materia volátil (%)

$m_M$ : Masa de la muestra

$m_{NV}$ : Masa de los no volátiles



**Figura 6-2.** Procedimiento de la determinación de la materia volátil del aserrín

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

### 2.7.1.5 Determinación del carbono fijo

Se lo calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Ec.4: } CF = 100\% - (\% H + \% C + \% MV)$$

Donde:

CF: Carbono fijo (%)

% H= porcentaje de humedad

% C= porcentaje de ceniza

% MV= porcentaje de materia volátil

### ***2.7.2 Pirólisis del aserrín***

El tipo de pirólisis utilizada fue la convencional y se usó un reactor tipo Batch. Las experimentaciones se llevaron a cabo mediante dos temperaturas 400 y 500 °C, cada una con tres repeticiones, en un rango de presión de 40-70 psi, con una velocidad de calentamiento de 18°C/min (0,3°C/s) y un tiempo de residencia de 30 min. En cada ensayo se realizó el mismo proceso.

### **Materiales**

- Refrigerante recto de vidrio
- Mangueras
- Corcho
- Tubo capilar
- Pinza universal
- Soporte universal
- Matraz de 250 ml
- Muestra de aserrín

### **Equipos**

- Reactor tipo Batch

### **Reactivos**

- Nitrógeno gaseoso
- Thinner

## Procedimiento

- a. Pesar la muestra y colocarla dentro del cilindro del reactor de manera uniforme.



**Figura 7-2.** Pesaje de la muestra y colocación en el reactor

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

- b. Inyectar nitrógeno gaseoso para formar la atmósfera inerte hasta alcanzar una presión de 40 psi, esperar unos minutos para asegurarse que no haya fugas. Luego de esto se libera el gas por la válvula de salida del producto.



**Figura 8-2.** Atmósfera inerte

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

- c. Instalar el sistema de condensación que se conectará a la manguera de salida del producto (reactor): el sistema está compuesto de un refrigerante recto de vidrio por donde recircula el

agua a una temperatura de 10°C, enfiada previamente en el sistema de enfriamiento de agua. A la salida del refrigerante se coloca un matraz vidrio para recoger el producto final.



**Figura 9-2.** Sistema de condensación

**Realizado por:** Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

- d. Encender el reactor: dirigirse al panel de control y accionar los interruptores de mando y potencia, setear como temperatura inicial 100°C e ir subiendo la temperatura en rangos de 50°C hasta alcanzar a la temperatura deseada. Mantener la presión en un rango de 40-70 psi, abriendo la válvula de salida del producto, donde se liberarán los gases condensables y no condensables. Este estado se repite varias veces hasta haber degradado el aserrín en su totalidad.

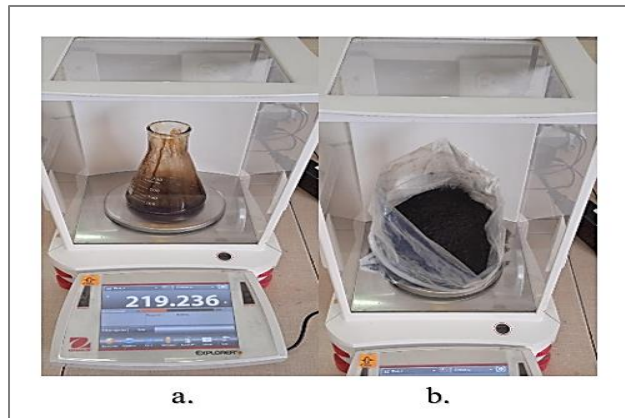


**Figura 10-2.** Pirólisis térmica del aserrín

**Realizado por:** Lema Gavidia, Cinthia, 2021.



- e. Pesar los productos obtenidos (fracción líquida y sólida) en una balanza analítica.



**Figura 11-2.** Pesaje de los productos de la pirólisis

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

- f. Se limpian los materiales y el equipo con Thinner.

#### 2.7.2.1 Rendimiento de las fracciones obtenidas

Los rendimientos se calcularon mediante las siguientes ecuaciones:

- **Fracción líquida**

$$\text{Ec. 5: } R_{FL} = \frac{m_{FL}}{m_M} \times 100\%$$

Donde:

$R_{FL}$ : Rendimiento de la fracción líquida (%)

$m_{FL}$ : Masa de la fracción líquida (g)

$m_M$ : Masa de la muestra (g)

- **Fracción sólida**

$$\text{Ec. 6: } R_{FS} = \frac{m_{FS}}{m_M} \times 100\%$$

Donde:

$R_{FL}$ : Rendimiento de la fracción sólida (%)

$m_{FS}$ : Masa de la fracción sólida (g)

$m_M$ : Masa de la muestra (g)

- **Fracción gaseosa**

$$Ec. 7: R_{FG} = 100\% - (R_{FL} + R_{FS})$$

Donde:

$R_{FG}$ : Rendimiento de la fracción gaseosa (%)

$R_{FL}$ : Rendimiento de la fracción líquida (%)

$R_{FS}$ : Rendimiento de la fracción sólida (%)

### ***2.7.3 Caracterización fisicoquímica del biocombustible***

El alquitrán fue separado del biocombustible mediante una filtración simple, para su posterior caracterización.

Se caracterizó la fracción líquida obtenida a 500°C, pues a esta temperatura se obtuvo mayor rendimiento, mediante las siguientes pruebas fisicoquímicas:

#### ***2.7.3.1 Prueba de densidad***

#### **Materiales**

- Probeta de 10ml

#### **Equipo**

- Balanza digital

## Reactivos

- Fracción líquida obtenida

## Procedimiento

- a. Pesar la probeta vacía.
- b. Llenar la probeta con la muestra y tomar su peso.
- c. Calcular la densidad mediante la siguiente fórmula:

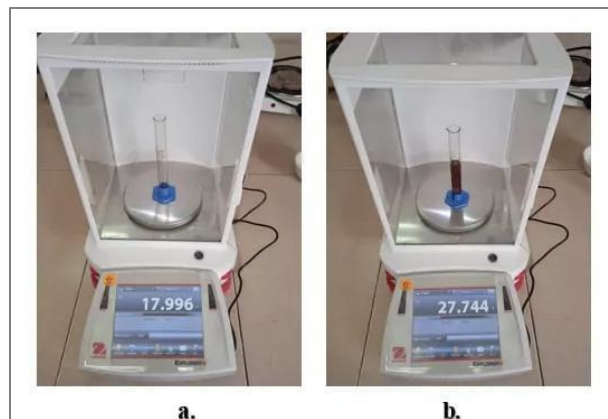
$$Ec.8: \rho = \frac{m}{v}$$

Donde:

$\rho$ : Densidad (g/ml)

m: Masa

v: Volumen



**Figura 12-2.** Prueba de densidad al biocombustible

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

### 2.7.3.2 Determinación de la viscosidad

La viscosidad dinámica ( $\mu$ ) se determinó mediante Reología a una temperatura de 40°C.

## Equipos

- Reómetro MCR 301

## Reactivos

- Fracción líquida obtenida

## Procedimiento

- Encender el compresor del Reómetro Physical MCR 301 y abrir los filtros para la eliminación de toda el agua que pudiera estar condensada.
- Esperar que la presión en el compresor sea de 5 bares para poner en funcionamiento el reómetro.
- Encender el reómetro.
- Abrir el software del equipo RHEOPLUS V3.40 y realizar las pruebas de inercia sin la colocación del husillo
- Escoger el tipo de porta muestra y husillo apropiado al tipo de viscosidad de la muestra que se va a trabajar. En este caso seleccionamos el husillo cilíndrico.
- Encender el sistema de refrigeración.
- En el software escoger la plantilla de acuerdo a la muestra a analizarse.
- Inicializar el reómetro, se coloca el sistema de medida y el plato de medida. Inicializamos el gap de medida, colocamos la chaqueta y procedemos a cerrar la chaqueta.
- Ajustar a la temperatura del ensayo, (40°C) a la cual se desea trabajar y colocamos el set “zero gap”.
- Agregar la muestra en el plato de medida y se lleva el sistema de medida a una posición de 1mm.
- Esperar que se complete el análisis.



**Figura 13-2.** Viscosidad dinámica (Reología)

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

Para la viscosidad cinemática ( $\nu$ ) se usó la fórmula:

$$Ec. 9: \nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Donde:

$\mu$ : viscosidad dinámica a 40°C (kg/ms)

$\rho$ : Densidad a 40°C (kg/m<sup>3</sup>)

### 2.7.3.3 Prueba de pH

Se midió el pH de manera directa utilizando un pH-metro.

#### **Materiales**

- Probeta de 50ml

#### **Equipos**

- pH-metro

#### **Reactivos**

- Fracción líquida obtenida
- Agua destilada

#### **Procedimiento**

- a. Encender el equipo.
- b. Introducir el electrodo de vidrio en el líquido.
- c. Esperar alrededor de 1 min para que la lectura se estabilice.
- d. Anotar el valor.



**Figura 14-2.** Prueba de pH al biocombustible

**Realizado por:** LemaGavidia, Cinthia, 2021.

#### 2.7.3.4 Determinación de espectroscopía infrarroja FT-IR

##### **Materiales**

- Gotero
- Algodón

##### **Equipos**

- Espectrofotómetro Infrarrojo FT-IR

##### **Reactivos**

- Fracción líquida obtenida
- Alcohol antiséptico

##### **Procedimiento**

- a. Encender el equipo.
- b. Ejecutar el software Spectra Manager para iniciar el barrido.
- c. Limpiar el área de cristal donde se colocará la muestra con un algodón empapado de alcohol y dejar la tapa abierta.
- d. Esperar unos segundos y realizar el Background (cerrar la tapa y presionar el botón Start).
- e. Se coloca la muestra sobre el área de cristal y se realiza el barrido espectral.
- f. Luego de ser analizada la muestra, se vuelve a limpiar el equipo.



**Figura 15-2.** Espectroscopía infrarroja FT-IR

**Realizado por:** Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

#### *2.7.3.5 Determinación del punto de inflamación*

Se lo ejecutó bajo la NTEINEN 1493:2005.

#### **Materiales**

- Probeta

#### **Equipos**

- Equipo de prueba de punto de inflamación Pensky-Martens

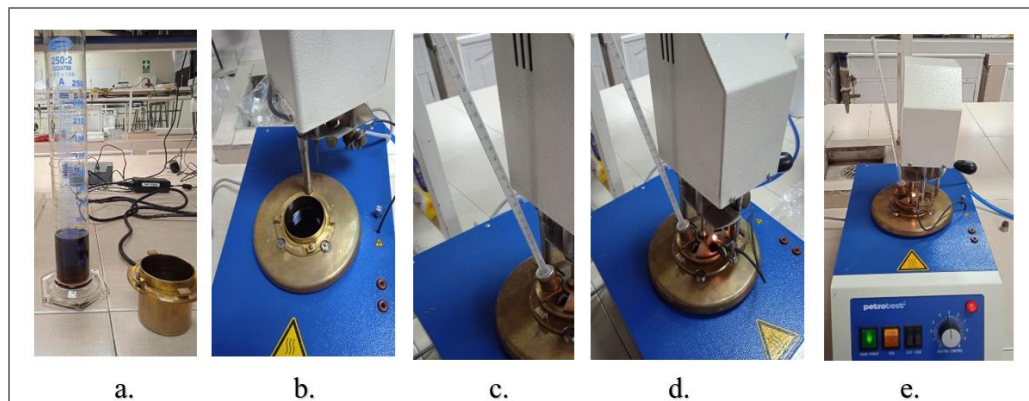
#### **Reactivos**

- Fracción líquida obtenida

#### **Procedimiento**

- a. Llenar la copa con la muestra hasta la marca indicada.
- b. Ensamblar la copa dentro del equipo y el cierre engancharlo correctamente.
- c. Insertar el termómetro en su sostenedor.
- d. Encender: el equipo, el calentamiento de la muestra, el agitador y la llama de 0,5 a 1 cm.

- e. Pasar la llama sobre la muestra por cada intervalo de 2 °C hasta que se produzca la primera llama y visualizar la temperatura en la cual se generó la primera llama (Punto de inflamación).



**Figura 16-2.** Procedimiento para hallar el punto de inflamación

**Realizado por:** Lema Gavidia, Cinthia, 2021.



## CAPÍTULO III

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Resultados

##### 3.1.1 Resultados de la caracterización fisicoquímica del aserrín

###### 3.1.1.1 Determinación de la densidad

En la tabla 1-3 se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos, mediante la Ec.1. Teniendo como resultado una densidad aparente promedio de 0,37 g/ml.

**Tabla 1-3:** Densidad aparente del aserrín de eucalipto y pino

Ensayos	Masa de la muestra (g)	Volumen (ml)	Densidad (g/ml )
1	6,9651	20	0,35
2	11,3114	30	0,38
3	15,0943	40	0,38

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

###### 3.1.1.2 Determinación del porcentaje de ceniza

El contenido de ceniza promedio en la muestra fue de 0,15 %, en la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos en cada ensayo con el uso de la Ec.2.

**Tabla 2-3:** Porcentaje de Ceniza del aserrín

Ensayos	Masa de la muestra (g)	Masa de la ceniza (g)	Ceniza (%)
1	3,0012	0,0046	0,15
2	3,0021	0,0044	0,15
3	3,0008	0,0043	0,14

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

### 3.1.1.3 Determinación del porcentaje de humedad

Para esta determinación se utilizó una termobalanza a una temperatura de 103°C. En la tabla 3-3 se muestran los resultados del porcentaje de humedad en el aserrín, teniendo como humedad promedio el 13,44%.

**Tabla 3-3:** Humedad presente en el aserrín

Ensayos	Masa de la muestra (g)	Humedad (%)
1	3,452	13,535
2	3,255	13,418
3	3,201	13,362

**Realizado por:** Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

### 3.1.1.4 Determinación del porcentaje de materia volátil

El porcentaje de materia volátil promedio fue del 72,49%. Sus resultados fueron conseguidos con el uso de la Ec. 3.

**Tabla 4-3:** Materia volátil del aserrín de eucalipto y pino

Ensayos	Masa de la muestra (g)	Masa de los no volátiles (g)	Materia Volátil (%)
1	3,0085	0,733	75,64
2	3,005	0,901	70,02
3	3,0015	0,846	71,81

**Realizado por:** Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

### 3.1.1.5 Determinación del carbono fijo

El contenido de carbono fijo se determinó una vez obtenido el porcentaje de ceniza, humedad y materia volátil, con la ayuda de la Ec.4, cuyo valor fue del 13,92%.

A continuación, se presenta la tabla 5-3 de la caracterización fisicoquímica del aserrín de eucalipto y pino.

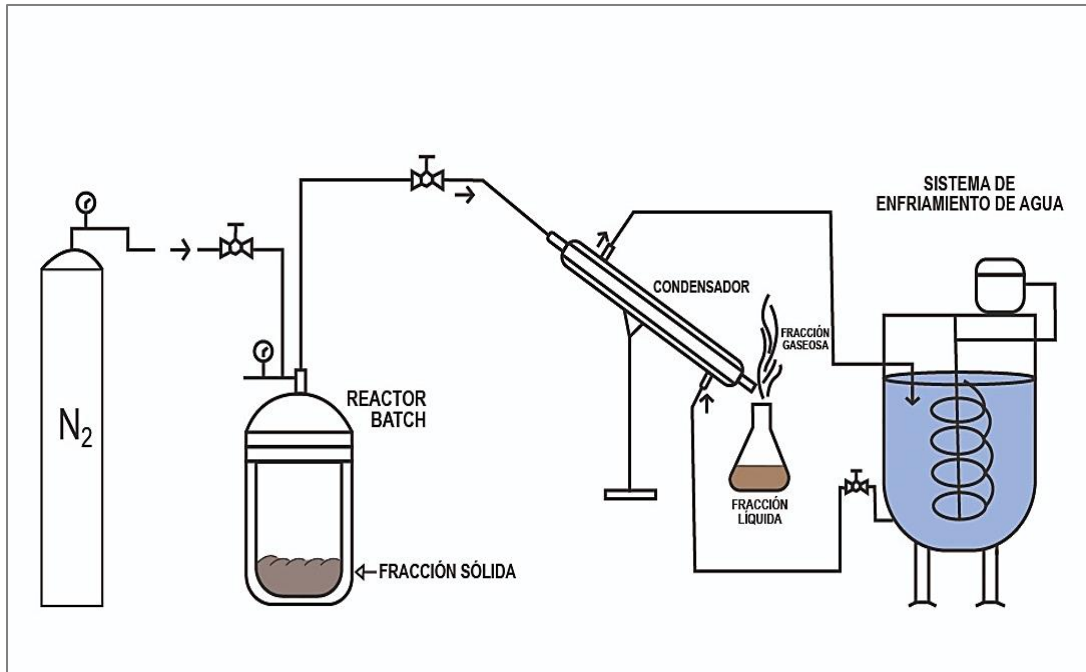
**Tabla 5-3:** Resultados de la caracterización fisicoquímica del aserrín de eucalipto y pino

PRUEBAS FISICOQUIMICAS				
Densidad (g/ml)	Ceniza (%)	Humedad(%)	Materia volátil (%)	Carbono Fijo (%)
0,37	0,15	13,44	72,49	13,92

**Realizado por:** Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

### 3.1.2 Resultados de la pirólisis del aserrín

La pirólisis térmica efectuada en esta investigación dio como resultado la formación de tres productos: biocarbón (fracción sólida), Bioaceite (fracción líquida) y los gases no condensables (fracción gaseosa).



**Figura 1-3.** Esquema del proceso utilizado durante la pirólisis del aserrín

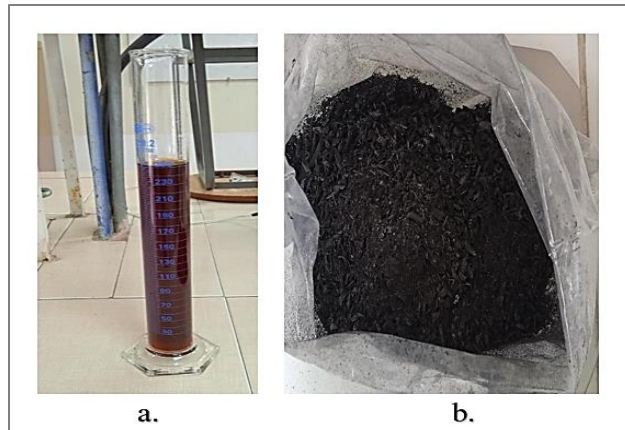
Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

Estas fracciones obtenidas mostraron las siguientes características organolépticas:

**Tabla 6-3:** Características organolépticas en las fracciones de la pirólisis del aserrín

Pruebas organolépticas	Fracciones de la pirólisis a 400 y 500°C		
	Sólida	Líquida	Gaseosa
Color	Negro intenso	Marrón oscuro	Blanco
Olor	Fuerte a carbón	Intenso a combustible	Intenso a combustible
Textura	Polvo muy fino	Muy fluido	-

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.



**Figura 2-3.** Fracción líquida (a) y fracción sólida (b)

**Realizado por:** Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

### 3.1.2.1 Rendimiento de las fracciones obtenidas

En la tabla 7-3 se presentan los rendimientos de las diferentes fracciones obtenidas para cada uno de los ensayos y en la tabla 8-3 el promedio de estos rendimientos.

**Tabla 7-3:** Rendimientos de las fracciones obtenidas en la pirólisis térmica del aserrín

Fracciones	Temperatura (°C)			
	400		500	
	Masa (g)	R (%)	Masa (g)	R (%)
Sólida	52,0012	26,00	30,0021	15,00
	50,5042	25,25	28,3501	14,18
	50,0119	25,01	28,0310	14,02
Líquida	60,0521	30,03	82,0350	41,02
	64,0020	32,00	83,7790	41,89
	66,0012	33,00	86,0024	43,00
Gaseosa	-	43,97	-	43,98
	-	42,75	-	43,94
	-	41,99	-	42,98

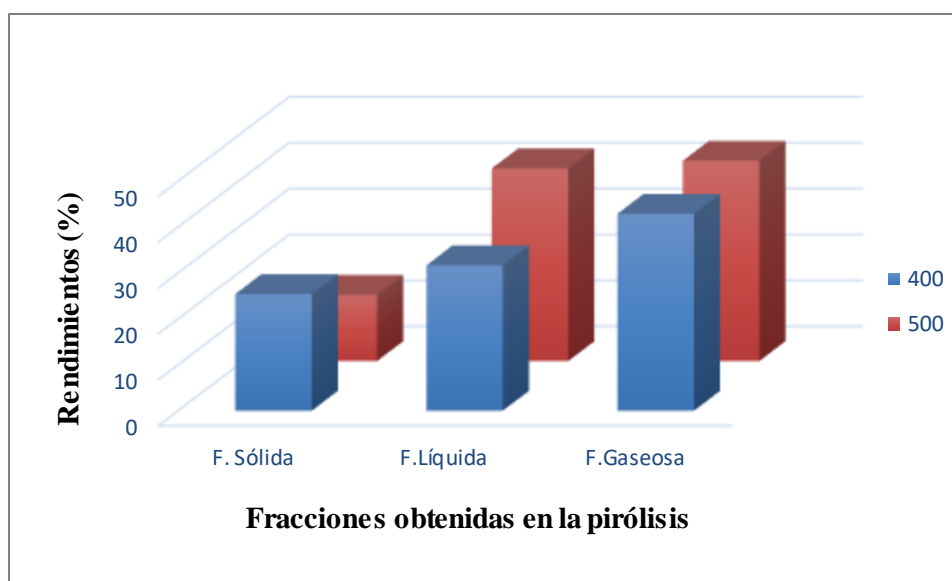
**Realizado por:** Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

**Tabla 8-3:** Rendimientos promedios de las fracciones obtenidas en la pirólisis térmica del aserrín

Temperatura (°C)	Rendimientos de las fracciones (%)		
	Sólida	Líquida	Gaseosa
400	25,42	31,68	42,90
500	14,40	41,97	43,63

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

En el gráfico 1-3 se puede evidenciar cómo influye la temperatura en el rendimiento de los productos. Para las fracciones líquida y gaseosa el rendimiento es mayor con forme aumenta la temperatura, de 31,68 a 41,97 % y de 42,90 a 43,63 entre los 400 y 500°C, respectivamente, mientras que para la fracción sólida disminuye de 25,42 a 14,40 %. [Esto ocurre debido a que, en la descomposición térmica del aserrín la hemicelulosa y celulosa se degrada entre los 200-344°C perdiendo un 52,56% en masa, y entre los 344-500°C se degrada la celulosa y algo de lignina perdiendo un 38,34% en masa, cabe mencionar que a partir de los 500°C hasta los 800°C la pérdida de masa es muy baja 1%] (Varma y Modal, 2018; citado en Varma et al., 2019, p. 227).



**Gráfico 1-3.** Rendimientos de las fracciones obtenidas en la pirólisis del aserrín

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

[La fracción líquida que se obtiene a partir del aserrín de madera es un bioaceite. La composición elemental (% en peso) de este biocombustible presenta: el 58.23% de carbono, el 7.13% de hidrógeno, el 0.70 % de nitrógeno sin contenido de azufre, el 33.94% de oxígeno, y una proporción molar de;  $O/C=0.71$ ,  $H/C=1.94$ , siendo su fórmula empírica  $CH_{1.94}O_{0.71}N_{0.007}$ . El rango del punto de ebullición está entre 63-360°C] (Varma et al., 2019, p. 230). [Cabe mencionar que,

la proporción molar H/C es semejante a la de los productos petrolíferos ligeros y pesados (1,5–1,9)] (Azargohar et al., 2013; citados en Varma et al., 2019, p. 229).

El resultado de la cromatografía de gases (CG-MS) del bioaceite obtenido por Varma et al. (2019, p. 230) se presenta en la figura 3-3, donde el rango del número de carbono de los compuestos volátiles está entre el C<sub>5</sub> al C<sub>12</sub>. Según este número de carbonos estaría dentro de la gasolina que va de C<sub>4</sub>-C<sub>12</sub> (Marqués, 2016; citado en Morocho Delgado, 2019, p. 78).

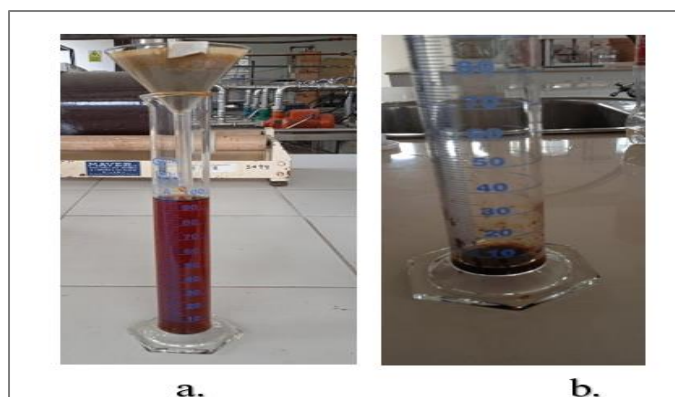
RT (min)	Peak area (%)	Compound name	Molecular formula
8.74	5.32	6-Methyl-2-heptyne	C <sub>8</sub> H <sub>14</sub>
8.92	4.67	4-Hydroxy-4-methyl-2-pentanone	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>
11.91	2.59	2-Methyl-1-buten-3-yne	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub>
12.93	2.86	3,4-Dimethyl-2-hexene	C <sub>8</sub> H <sub>16</sub>
13.82	3.62	2,5-Dimethyl pyridine	C <sub>7</sub> H <sub>9</sub> N
14.14	18.73	2-Methoxyphenol	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub>
15.88	18.54	Creosol	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>2</sub>
17.22	11.35	Benzene, 1,4-dimethoxy-2-methyl-	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>
18.24	9.35	2,6-Dimethoxyphenol	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>
18.53	2.28	Cyclohexene, 4,5-diethyl-1,2-dimethyl-	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub>
19.54	6.16	1,2,4-Trimethoxybenzene	C <sub>9</sub> H <sub>12</sub> O <sub>3</sub>
19.72	7.42	Phenol, 2-methoxy-4-(1-propenyl)-	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> O <sub>2</sub>
20.57	4.47	3-Amino-4-methoxybenzoic acid	C <sub>8</sub> H <sub>9</sub> NO <sub>3</sub>

**Figura 3-3.** Resultados del CG-MS del bioaceite obtenido de aserrín de madera

Fuente: Varma et al., 2019, p. 230.

### 3.1.3 Resultados de la caracterización fisicoquímica del biocombustible (bioaceite)

En la figura 4-3 se puede observar el cambio de color de la fracción líquida una separa del alquitrán.



**Figura 4-3.** Fracción líquida filtrada (a) y el alquitrán (b)

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

**Tabla 9-3:** Resultados de la fracción líquida una vez filtrada

Temperatura (°C)	Fracción líquida (g)	Alquitrán (g)	Bioaceite (g)
400	60,0521	1,9998	58,0523
	64,0020	2,0001	62,0019
	66,0012	3,0021	62,9991
500	82,0350	2,0113	80,0237
	83,7790	2,9520	80,8270
	86,0024	4,0020	82,0004

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

En la pirólisis efectuada por Burbano Salas (2019, p. 261), con temperaturas que oscilan entre 300, 450 y 600 °C de una mezcla de residuos de Kikuyo y leña obtiene entre 5-9 % en volumen del rendimiento del alquitrán. Al tomar como referencia la densidad del alquitrán de pirólisis de eucalipto (0.899 g/ml) reportada por Díaz Velázquez et al. (2007, p. 79), el alquitrán representa el 1.30% a 400°C y el 1.66% a 500°C, estos resultados son expresados del promedio de los tres ensayos (% en volumen). Los rendimientos obtenidos en la investigación se aproximan a los reportados Burbano Salas (2019), considerando que la biomasa en su totalidad no es la misma ni las temperaturas del proceso.

### 3.1.3.1 Prueba de densidad

La densidad fue tomada a una temperatura de 22°C:

$$\rho = \frac{m}{v}$$
$$\rho = \frac{9,748g}{10ml} = 0,9748 \text{ g/ml} = 974,8 \text{ kg/m}^3$$

Para corregir la densidad a 15°C partiendo de la temperatura tomada se utilizó la tabla ASTM 53A, donde su valor es 979 kg/m<sup>3</sup>.

### 3.1.3.2 Determinación de la viscosidad

La viscosidad cinemática es la característica más importante en los combustibles ya que, influye en la inyección, formación de mezclas y en los procesos de combustión (Silitonga et al., 2013; citados en García Muentes et al., 2018, p. 145).

**Tabla 10-3:** Resultados de la viscosidad del biocombustible

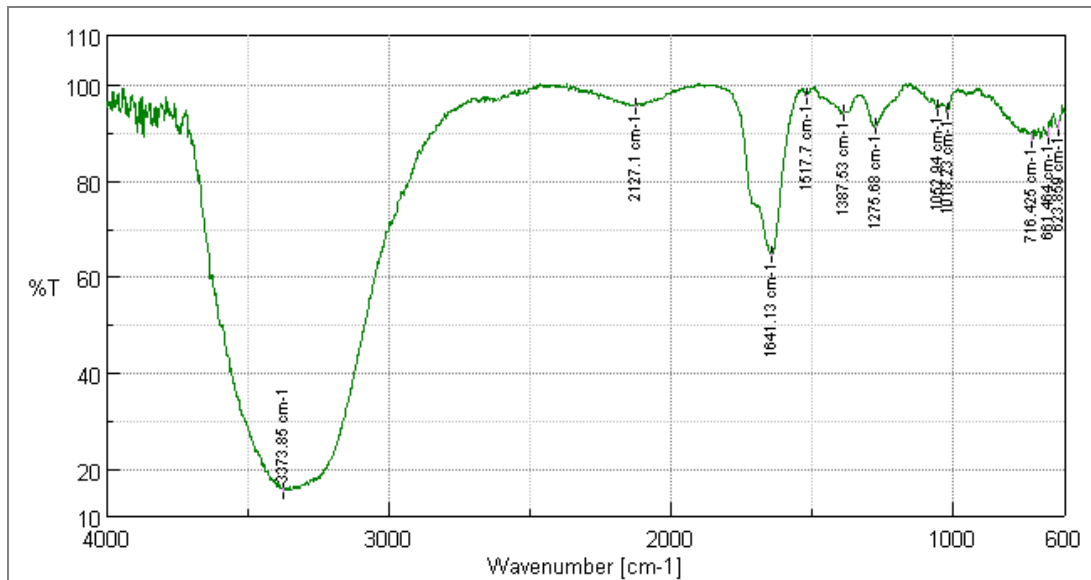
Temperatura	Densidad	Viscosidad dinámica		Viscosidad cinemática	
(°C)	(kg/m <sup>3</sup> )	(kg/ms)	(cP)	(m <sup>2</sup> /s)	(mm <sup>2</sup> /s= cSt)
40	967,39	1,111x10 <sup>-3</sup>	1,111	1,149x10 <sup>-6</sup>	1,149

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

### 3.1.3.3 Prueba de pH

El bioaceite presentó un pH de naturaleza fuertemente ácido de 3,25.

### 3.1.3.4 Determinación de espectroscopía infrarroja FT-IR



**Gráfico 2-3.** Espectro IR del ácido piroleñoso obtenido a 500°C

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

**Tabla 11-3:** % T vs Wavenumber cm<sup>-1</sup> del ácido piroleñoso y su interpretación de resultados

%T vs Wavenumber cm <sup>-1</sup>		Interpretación de resultados del espectro IR del ácido piroleñoso			
%T	Wavenumber cm <sup>-1</sup>	Número de onda cm <sup>-1</sup>	Familia	Grupo funcional	Asignación
15,2094	3373,85	3200-3400 (ancha) (f)	Alcoholes y fenoles	OH asociado intermolecular (polímero)	(v) O-H
95,2738	2127,1	2100-2200 (d)	Alquinos	C≡C	(v) C≡C
64,4479	1641,13	1640-1670	Derivados de ácido carboxílico	C=O	(v) C=O (amidas asociadas)
97,3201	1517,7	1490-1580 (d)	Amina secundaria	R2-NH	(δ) N-H



93,7745	1387,53	1385-1395	Alcanos	CH3 -C- CH3 CH3	( $\delta$ ) C-H (sim)
90,8904	1275,68	900-1300	Compuestos oxigenados	C-O	C-O
94,7162	1052,94	1020-1070	Eter	No saturado	(v) C-O (asim)
94,142	1018,23	1000-1200	Aminas	Todas	(v) C-N
88,3357	716,425	540-760 (m-d)	Haloalcano	C-X	(v) C-X
88,8207	661,464	650-750	Alquinos	C-H	( $\delta$ ) $\equiv$ C -H
90,5769	623,859	615-645	Naftaleno	Aromático	

Realizado por: Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

## Referencias:

Intensidad: fuerte (f); media (m); débil (d)

Modo de tensión: v

Modo de deformación:  $\delta$

Simétrico: sim

Asimétrico: asim

### 3.1.3.5 Determinación del punto de inflamación

El punto de inflamación en el biocombustible fue de 60°C. La NTP 379 manifiesta que la Instrucción Técnica Complementaria MIE APQ-001 clasifica a los líquidos según su punto de inflamación. Como líquido inflamable aquel con presente un punto de destello menor a 38°C y líquido combustible el que tenga igual o mayor a 38°C.

## 3.2 Pruebas de hipótesis

### 3.2.1 Hipótesis general

- La obtención de biocombustible se puede realizar a partir de residuos madereros mediante pirólisis térmica.

Una vez concluido con todo el proceso de esta investigación se puede decir que, si es posible la obtención de un biocombustible a partir de residuos madereros (aserrín) mediante degradación térmica.

### **3.2.2 Hipótesis específicas**

- La caracterización fisicoquímica del aserrín permite determinar si se deben realizar operaciones previas al proceso.

Con el porcentaje de humedad presente en el aserrín se pudo determinar que, esta biomasa no necesitaba ser sometida a ninguna operación previa ya que presentó un valor inferior del 30%.

- La temperatura de pirólisis influye en el rendimiento de los productos.

Una vez llevada a cabo la parte experimental se evidenció que la temperatura si tiene influencia en el rendimiento de los productos obtenidos en la pirólisis.

- Las características fisicoquímicas de la fracción líquida determinan si puede ser empleado directamente como biocombustible.

La caracterización de la fracción líquida realizada mediante pruebas de: densidad, pH, viscosidad, espectroscopía FT-IR y el punto de inflamación, demostró que no puede ser empleado directamente como biocombustible, ya que, al compararlo con la NTE INEN 2482: 2009 (Biodiésel) y la NTE INEN 935:2009 (Gasolina) no cumple con los requisitos

### **3.3 Discusión**

La densidad aparente del aserrín se encuentra entre 0,1 a 0,45 g/ml (Maher et al., 2008; citados en Pineda-Pineda et al., 2012, p. 97), y el obtenido fue de 0,37 g/ml encontrándose en el rango estipulado. En el estudio bibliográfico realizado por Cuesta (2019, p. 41) presenta un contenido de humedad del 7.7 y 7.1%, ceniza el 0.98 y 0.4%, materia volátil del 74.915 y 84,6% carbono fijo del 16.38% y 13,9% para la madera de eucalipto y pino respectivamente con un tratamiento previo de secado, la biomasa utilizada en esta investigación dio como resultado el 13,44%, 0,15%, 72,49% y 13,92% sin ningún proceso previo de secado, por lo que se considera que los resultados de la caracterización son similares. Estos resultados influyen en la degradación térmica del aserrín, Oasmaa et al. (2009; citados en Cuesta, 2019, p.40) y Varma (2019, p.227) mencionan que se debe tener un contenido de ceniza bajo y de materia volátil alto para el proceso de pirólisis, ya que esto favorece el rendimiento de la fracción líquida.

En la degradación térmica del aserrín se obtuvo mayor rendimiento a los 500°C, donde la fracción líquida representó el 41,97%. En Varma et al. (2019, p. 232) a la misma temperatura el rendimiento fue del 44,16% y en Ahmed et al. (2020, p. 4) fue del 45,10%, estos valores están muy cercanos al obtenido y varían por sus condiciones de operación.

En la fracción líquida se determinó la densidad a 15°C, viscosidad dinámica y cinemática a 40°C, pH, punto de inflamación y compuestos presentes, donde sus resultados fueron: 979kg/m<sup>3</sup>, 1.111 cP y 1.149 cSt, 3.25, 60°C y tuvo la presencia de alcoholes, fenoles, alquinos, derivados de ácidos carboxílicos, amina secundaria, alcanos, compuestos oxigenados, éter, aminas, Haloalcano y naftaleno, respectivamente. Los resultados de Varma et al. (2019, p.232) bajo estas mismas condiciones fueron: 1083 kg/m<sup>3</sup>, 16.53 cSt, 2.6, 68°C e identificaron alcanos, alquenos, aromáticos, aldehídos, cetonas, ácidos carboxílicos y fenoles, mientras que Ahmed et al. (2020, p. 5) obtuvo una densidad de 1056kg/m<sup>3</sup>, un pH de 3,2 y entre los compuestos identificó fenoles, compuestos nitrogenados, guayacoles, ácidos orgánicos, cetonas, azúcares, anhídros, ésteres y aldehídos, estos valores están muy cercanos al conseguido, a excepción de la viscosidad cinemática obtenida por Varma et al. (2019, p.232), su valor es mayor al obtenido debido a que, solo se separó la fase acuosa por medio de una sedimentación por gravedad, quedando aún en el bioaceite la fracción pesada (Alquitrán). Por otro lado, Burbano Salas (2019, p. 261) determinó compuestos como: alcohol, grupos alifáticos, nitrilo, aminoácidos, éter, compuestos de organosilicio y fósforo, halogenados y Díaz Velázquez (2005, p. 49) la presencia de compuestos orgánicos fácilmente oxidables, ácidos carboxílicos y fenoles, compuestos carbonílicos, grupos carbonílicos donantes de electrones en compuestos aromáticos y aminas primarias. Los espectros FT-IR (ácido piroleñoso) de Varma et al. (2019, p. 230) y Burbano Salas (2019, p. 260) son semejantes al obtenido.

EL bioaceite obtenido no cumple con los requisitos para ser empleado propiamente como biocombustible, ya que sus características fisicoquímicas: densidad a 15°C de 979 kg/m<sup>3</sup>, viscosidad cinemática de 1,149 mm<sup>2</sup>/s y un punto de inflamación de 60°C no se encuentran dentro de los rangos estipulados por la NTEINEN 2482:2009 (Biodiésel). Donde, se tiene una densidad a 15 °C máxima de 900 kg/m<sup>3</sup>, viscosidad cinemática en un intervalo de 3.5-5 mm<sup>2</sup>/s y un punto de inflamación mínimo de 120°C. Además, el estudio realizado por (Varma et al., 2019, p. 230) reporta un contenido de oxígeno del 33,94% y en la NTE INEN 935:2009 (Gasolina) indica que el contenido de oxígeno debe ser como máximo el 2,7%. El alto porcentaje de oxígeno del bioaceite obtenido a partir de aserrín de madera, es otra de las características que le impiden ser utilizado como biocombustible directamente. Por todas estas limitaciones Urien (2013, p. 57) sugiere que para

corregir estas características se deben realizar varios tratamientos posteriores, como, por ejemplo: filtración, decantación, destilación, extracción líquido-líquido, evaporación.

## CONCLUSIONES

- Se evaluó los residuos madereros de eucalipto y pino (aserrín grueso) para la obtención de biocombustible (ácido piroleñoso) a escala laboratorio mediante su degradación térmica.
- Se caracterizó el aserrín de eucalipto y pino mediante pruebas de densidad, ceniza, humedad, materia volátil y carbono fijo, donde sus resultados fueron: 0.37g/ml, 0.15%, 13.44%, 72.49% y 13.92% respectivamente. Esta biomasa al tener un alto porcentaje de materia volátil y un bajo contenido de ceniza favoreció el rendimiento de la fracción líquida. Además, su bajo contenido de humedad permitió que no sea sometida a un proceso previo de secado.
- El biocombustible fue obtenido mediante pirólisis térmica a 400 y 500°C con la utilización de un reactor Batch. En esta degradación se produjeron tres fracciones: sólida, líquida y gaseosa. A 400°C la fracción sólida fue del 25.42%, la fracción líquida del 31.68% y la fracción gaseosa del 42.90%, mientras que, a los 500°C se obtuvo el 14.40%, 41.97% y el 43.63% respectivamente. La fracción líquida fue tomada como biocombustible que es conocida como ácido piroleñoso.
- Se determinó las propiedades fisicoquímicas del ácido piroleñoso obtenido a partir del aserrín, mediante pruebas de: densidad a 15°C, la viscosidad dinámica y cinemática a 40°C, pH, punto de inflamación y espectroscopía infrarroja FT-IR. Donde, se obtuvo: 979 kg/m<sup>3</sup>, 1.111x10<sup>-3</sup> kg/ms y 1,149x10<sup>-6</sup>, 3.25, 60°C y se encontró la presencia de alcoholes, fenoles, alquinos, derivados de ácidos carboxílicos, amina secundaria, alcanos, compuestos oxigenados, éter, aminas, Haloalcano, naftaleno, respectivamente.

## **RECOMENDACIONES**

- Se recomienda realizar estudios para mejorar las características del biocombustible (ácido piroleñoso), y estudiar los dos productos restantes (biochar y gases no condensables) para darles un valor agregado.
- Se recomienda usar otro tipo de residuo maderero, con el objetivo de comparar los rendimientos que se obtengan.
- La optimización de los parámetros de operación en el proceso de pirólisis, deberían ser estudiados, para conseguir mejores resultados.

## BIBLIOGRAFÍA

**ABRIL, A; & NAVARRO, E.** *Etanol a partir de biomasa lignocelulósica* [en línea], 2012. S.l.: Aleta Ediciones. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/241216642\\_Etanol\\_a\\_partir\\_de\\_biomasa\\_lignocelulosica](https://www.researchgate.net/publication/241216642_Etanol_a_partir_de_biomasa_lignocelulosica).

**AHMED, A; et al.** Sawdust pyrolysis from the furniture industry in an auger pyrolysis reactor system for biochar and bio-oil production. *Energy Conversion and Management* [en línea], 2020, vol. 226, no. August, pp. 113502. ISSN 01968904. DOI 10.1016/j.enconman.2020.113502. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113502>.

**ARMENTROUT, D; & ARMENTROUT, P.** *Los biocombustibles* [en línea], 2014. S.l.: IICA, 2014. Disponible en: [https://books.google.com.ec/books?id=5FYmAOPfhEcC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbg\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=5FYmAOPfhEcC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbg_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false).

**ARROYO-VINUEZA, J.S; & REINA-GUZMÁN, W.S.** Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor. *Ingenius* [en línea], 2016, pp. 20-29. DOI <https://doi.org/10.17163/ings.n16.2016.03>. Disponible en: <https://doi.org/10.17163/ings.n16.2016.03>.

**AYALA-MENDIVIL, N; & SANDOVAL, G.** Bioenergía a partir de residuos forestales y de madera. *Madera y Bosques* [en línea], 2018, vol. 24, no. Special Issue, pp. 1-14. ISSN 14050471. DOI 10.21829/myb.2018.2401877. Disponible en: <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401877>.

**BASTIDAS ITURRALDE, D.X; & MIÑO PUENTE, N.A.** *Caracterización comparativa del proceso de pirólisis de dos biomásas* [en línea], 2019. S.l.: UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/19356>.

**BURBANO SALAS, D.** Uso del Kikuyo (*Pennisetum Clandestinum* L), residuo de la poda de áreas verdes para la obtención de ácido piroleñoso con fines agropecuarios. *Ciencia Digital* [en línea], 2019, vol. 3, no. 3.4., pp. 354-364. ISSN 2602-8085. DOI 10.33262/cienciadigital.v3i3.4..884. Disponible en: <https://cienciadigital.org/revistacienciadigital2/index.php/CienciaDigital/article/view/884>.

**CAMPOVERDE JARA, X.M.** *Obtención y Valoración de Combustible Líquido por Medio de Pirolisis, a Partir de Residuos Sólidos Domésticos* [en línea], 2016. S.l.: UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA SEDE CUENCA CARRERA. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12769/1/UPS-CT006624.pdf>.

**CANTOS MACÍAS, M.A; et al.** Cinética de la pirólisis de residuos madereros ecuatorianos. *Revista Cubana de Química* [en línea], 2018, vol. 30, no. 3, pp. 400-422. ISSN 2224-5421. Disponible en: <https://cubanaquimica.uo.edu.cu/index.php/cq/article/view/4114>.

**CORPORACIÓN FINANCIERA NACIONAL.** Explotación de viveros forestales y madera en pie. [en línea], 2017. [Consulta: 30 noviembre 2020]. Disponible en: <https://www.cfn.fin.ec/wp-content/uploads/2017/10/Ficha-Sectorial-Viveros-y-Madera-en-Pie.pdf>.

**CUESTA, E.** *Valorización De Serrín Mediante Pirólisis : Obtención De Vinagre De Madera* [en línea], 2019. S.l.: UNIVERSIDAD DE CANTABRIA. Disponible en: <http://repositorio.unican.es:8080/xmlui/handle/10902/16451?show=full>.

**DCOELLAR.** BIOMASA EN EL ECUADOR. [en línea], 2019. [Consulta: 7 noviembre 2020]. Disponible en: <https://www.eoi.es/blogs/merme/biomasa-en-el-ecuador/>.

**DÍAZ VELÁZQUEZ, M.** Introducción Nuestro país se ha sumado a la labor de fomentar Objetivo general Caracterizar los líquidos obtenidos por pirólisis. *Tecnología Qupimica* [en línea], 2005, vol. XXV, no. 2, pp. 46-51. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543747007>.

**DÍAZ VELÁZQUEZ, M ; et al .** INFLUENCIA DEL METANOL Y EL ACETATO DE ETILO EN LA ESTABILIZACIÓN DEL ALQUITRÁN DE PIRÓLISIS DE LA MADERA DE EUCALIPTO. *Tecnología Química* [en línea], 2007 , vol. XXVII, no. 1, pp. 77-82. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543752011.pdf>.

**FABA, L; et al.** Transformación de biomasa en biocombustibles de segunda generación. *Madera y Bosques* [en línea], 2014, vol. 20, nº 3, pp. 11-24. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-04712014000300002](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-04712014000300002)

**FONSECA, M.** *Determinación de la composición química de la madera de pino Candelillo (Pinus maximinoi H. E. Moore) procedente de la finca Río Frío, Tactic, Alta Verapaz.* [en línea], 2006. S.l.: Universidad San Carlos de Guatemala. Disponible en:

[http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0992\\_Q.pdf?fbclid=IwAR1SKli872\\_L5sdRj5FGC0b4e6ldNihAWoE6qYcWowajeR4DBKr5aI7mLsw](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0992_Q.pdf?fbclid=IwAR1SKli872_L5sdRj5FGC0b4e6ldNihAWoE6qYcWowajeR4DBKr5aI7mLsw).

**FRIAS, E.** El Eucalipto genera impactos sobre la naturaleza. [en línea], 2017. 24 febrero 2017. Disponible en: <https://www.elcomercio.com/tendencias/eucalipto-impactos-naturaleza-incendios-fuego.html>.

**GARCÍA MUENTES, S.A ; et al .** Propiedades fisicoquímicas del aceite y biodiesel producidos de la *Jatropha curcas* L. en la provincia de Manabí, Ecuador. *Revista Cubana de Química*, vol. 30, no. 1 (2018), pp. 143-159. ISSN 2224-5421.

**GÓMEZ, A; et al.** *Pirólisis de biomasa: cusco de palma de aceite* [en línea], 2008. S.l.: kassel university press GmbH. ISBN 9783899584578. Disponible en: [https://books.google.com.ec/books?id=2Pa8EGyKFE8C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=2Pa8EGyKFE8C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false).

**HERGUEDAS, A; et al.** *Biomasa, Biocombustibles Y Sostenibilidad* [en línea], 2012. S.l.: Graficolor-Palencia S.L. ISBN 978-84-931891-5-0. Disponible en: <http://sostenible.palencia.uva.es/content/biomasa-biocombustibles-y-sostenibilidad>.

**IBÁÑEZ, S.** Sistemas De Control “on Line” De Reactores Quimicos Batch. [en línea], 2020. S.l.: Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/185196/Memoria.pdf?sequence=7&isAllowed=y>.

**INSTITUTO NACIONAL DE PREINVERSIÓN.** Atlas bioenergético de la República del Ecuador. [en línea], 2014. [Consulta: 14 noviembre 2020]. Disponible en: <http://biblioteca.olade.org/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=5720>.

**LAM SANMARTÍN, E.P.** *PRODUCCIÓN POTENCIAL DE BIO OIL Y BIOCHAR POR PIRÓLISIS DE RESIDUOS DE BANANO Y ARROZ* [en línea], 2020. S.l.: Universidad Técnica de Machala. Disponible en: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/16320>.

**MENDOZA, A.** Comparación del contenido energético de diferentes tipos de biomasa. Energía: pasado presente y futuro. [en línea], 2016. Mexico: Disponible en: <http://hdl.handle.net/11285/630762>.



**MOROCHO DELGADO, S.K.** *Obtención De Combustible Mediante Pirólisis Térmica a Partir De Polipropileno Reciclado* [en línea], 2019. S.l.: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/13804>.

**NTE INEN 1493:2005.** *Productos de petróleo. Determinación del punto de inflamación en vaso cerrado (Pensky-Martens).*

**NTE INEN 2482:2009.** *Biodiesel Requisitos.*

**NTE INEN 935:2016.** *Productos derivados del petróleo. Gasolina. Requisitos.*

**PINEDA-PINEDA, J; et al.** Aserrín de pino como sustrato hidropónico. I: Variación en características físicas durante cinco ciclos de cultivo. *Revista Chapingo, Serie Horticultura* [en línea], 2012, vol. 18, no. 1, pp. 95-111. ISSN 1027152X. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1027-152X2012000100007&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2012000100007&lng=es&nrm=iso).

**RICO, J.** Serrín de aserraderos para producir un biocombustible apto para el transporte. [en línea], 2019. Disponible en: <https://www.energias-renovables.com/biocarburantes/serrin-de-aserraderos-para-producir-un-biocarburante-20190923%0A%0A>.

**SALINAS CALLEJAS, E; & GASCA QUEZADA, V.** Los Biocombustibles. *El Cotidiano* [en línea], 2009, vol. 157, pp. 75-82. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/325/32512739009.pdf>.

**SERRANO-RUIZ, J.C; & LUQUE, R.** Biocombustibles líquidos : procesos y tecnologías. [en línea], 2011, vol. 107, pp. 383-389. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3794128>.

**SIERRA, E.T.** NTP 379: Productos inflamables: variación de los parámetros de peligrosidad. *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo* [en línea], 1995. S.l.: Disponible en: [http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp\\_379.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_379.pdf).

**URIEN, A.** *Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual* [en línea], 2013. S.l.: Universidad Nacional de Educación a Distancia. Disponible en: <http://digital.csic.es/handle/10261/80225%0Ahttp://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIO>

CARBONES\_CENIM\_CSIC.pdf.

**VARMA, A.K ; et al.** Pyrolysis of wood sawdust: Effects of process parameters on products yield and characterization of products. *Waste Management* [en línea], 2019, vol. 89, pp. 224-235. ISSN 18792456. DOI 10.1016/j.wasman.2019.04.016. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.016>.

**VÁSQUEZ, E; & HERRERA, J.** Metodología para la Caracterización de Combustibles Sólidos Maderables del Área Metropolitana del Valle de Aburrá. *Rev. Fac. Nac. Agron.* [en línea], 2006, vol. 59, no. 2, pp. 3557-3564. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1799/179914075011.pdf>.

**VINUEZA, M.** Ficha Técnica N° 10: EUCALIPTO [en línea], 2012. [Consulta: 30 noviembre 2020]. Disponible en: <https://ecuadorforestal.org/fichas-tecnicas-de-especies-forestales/ficha-tecnica-no-10-eucalipto/>.

**VINUEZA, M.** Ficha Técnica No. 13 Pino (*Pinus radiata*) [en línea], 2013. [Consulta: 30 noviembre 2020]. Disponible en: <https://ecuadorforestal.org/fichas-tecnicas-de-especies-forestales/ficha-tecnica-no-14-pino-pinus-patula/#:~:text=El Pino pátula%2C es una.>

## ANEXOS

### ANEXO A: Especificaciones de los equipos utilizados en la investigación

#### Balanza analítica



**Marca:** OHAUS EXPLORER

**Modelo:** EX 224N

**Capacidad máxima:** 220 g

**Resolución:** 0,1 mg

**Lectura mínima:** 1 mg

#### Balanza digital



**Modelo:** TRUPER 10G/5KG

**Capacidad:** 5kg

**División:** 1g

**Función:** TARA (peso neto sin recipiente)

**Apagado:** Automático

#### Balanza de humedad (termobalanza)



**Modelo:** PMC 50

**Marca:** Radwag

**Capacidad máxima:** 50 g

**Legibilidad [d]:** 0,1 mg

**Rango de temperatura de secado:** máximo 160°C

**Rango de tara:** -50 g

## Reactor Batch



**Fuente de conexión:** 220V con neutro

**Válvulas:** una de salida del producto y otra de entrada de nitrógeno

**Temperatura máxima de trabajo:** 550 °C

**Presión máxima:** 120psi

**Calentamiento:** por resistencias eléctricas

## Sistema de enfriamiento de agua



**Flujo:** contracorriente

**Fuente de conexión:** 110V

**Capacidad:** 80L

**Refrigerante:** 404a

## pH-metro



**Marca:** Fisherbrand

**Modelo:** AB150

**Rango de pH:** -2.000 a 20.000 pH

**Resolución de pH:** 0,1, 0,01, 0,001 pH

**Precisión de pH:**  $\pm 0,002$  pH

## Mufla



**Marca:** VULCAN

**Modelo:** A-550

**Fuente de conexión:** 110V

**Temperatura máxima:** 1100°C (2000°F)

## Reómetro



**Marca:** Physica

**Modelo:** MCR 301

**Software del equipo:** RHEOPLUS V3.40

Rango de temperatura máxima: -150 a 1000°C

Velocidad máxima: 3000 1/min

## Espectrofotómetro



**Modelo:** JASCO FT-IR-4100

**Rango de medida del número de onda:** 7 800 a 350  $\text{cm}^{-1}$

**Resolución:** 0,9  $\text{cm}^{-1}$

**Software:** Quick Start System

**Fuente de luz:** Fuente de cerámica de alta intensidad

## Equipo de prueba del punto de inflamación Pensky-Martens



**Marca:** Petrotest

**Modelo:** PM 4

**Rango de temperatura:** 40 a 360°C (104 a 680°F)

**Tipo de encendido:** gas-eléctrico

**Velocidad de agitación:** 120 o 250rpm

**Realizado por:** Lema Gavidia, Cinthia, 2021.

ANEXO B: Tabla ASTM 53 A


TABLE 53A. GENERALIZED CRUDE OILS  
DENSITY CORRECTION TO 15 °C

DENSITY AT OBSERVED TEMPERATURE


Temp °C	972.0	974.0	976.0	978.0	980.0	982.0	984.0	986.0	988.0	990.0	Temp °C
CORRESPONDING DENSITY AT 15 °C											
21.75	976.1	978.1	980.1	982.1	984.1	986.1	988.0	990.0	992.0	994.0	21.75
22.00	976.2	978.2	980.2	982.2	984.2	986.2	988.2	990.2	992.2	994.2	22.00
22.25	976.4	978.4	980.4	982.4	984.4	986.4	988.3	990.3	992.3	994.3	22.25
22.50	976.6	978.5	980.5	982.5	984.5	986.5	988.5	990.5	992.5	994.5	22.50
22.75	976.7	978.7	980.7	982.7	984.7	986.6	988.6	990.6	992.6	994.6	22.75
23.00	976.9	978.8	980.8	982.8	984.8	986.8	988.8	990.8	992.8	994.8	23.00
23.25	977.0	979.0	981.0	983.0	985.0	987.0	988.9	990.9	992.9	994.9	23.25
23.50	977.2	979.1	981.1	983.1	985.1	987.1	989.1	991.1	993.1	995.1	23.50
23.75	977.3	979.3	981.3	983.3	985.3	987.3	989.2	991.2	993.2	995.2	23.75
24.00	977.5	979.5	981.4	983.4	985.4	987.4	989.4	991.4	993.4	995.4	24.00
24.25	977.6	979.6	981.6	983.6	985.6	987.6	989.5	991.5	993.5	995.5	24.25
24.50	977.8	979.8	981.7	983.7	985.7	987.7	989.7	991.7	993.7	995.6	24.50
24.75	977.9	979.9	981.9	983.9	985.9	987.9	989.8	991.8	993.8	995.8	24.75
25.00	978.1	980.0	982.0	984.0	986.0	988.0	990.0	992.0	994.0	995.9	25.00
25.25	978.2	980.2	982.2	984.2	986.2	988.2	990.1	992.1	994.1	996.1	25.25
25.50	978.4	980.3	982.3	984.3	986.3	988.3	990.3	992.3	994.3	996.2	25.50
25.75	978.5	980.5	982.5	984.5	986.5	988.4	990.4	992.4	994.4	996.4	25.75
26.00	978.7	980.7	982.6	984.6	986.6	988.6	990.6	992.6	994.6	996.5	26.00
26.25	978.8	980.8	982.8	984.8	986.8	988.7	990.7	992.7	994.7	996.7	26.25
26.50	979.0	981.0	982.9	984.9	986.9	988.9	990.9	992.9	994.9	996.8	26.50
26.75	979.1	981.1	983.1	985.1	987.1	989.0	991.0	993.0	995.0	997.0	26.75
27.00	979.3	981.3	983.2	985.2	987.2	989.2	991.2	993.2	995.1	997.1	27.00
27.25	979.4	981.4	983.4	985.4	987.4	989.3	991.3	993.3	995.3	997.3	27.25
27.50	979.6	981.6	983.5	985.5	987.5	989.5	991.5	993.5	995.4	997.4	27.50
27.75	979.7	981.7	983.7	985.7	987.7	989.6	991.6	993.6	995.6	997.6	27.75
28.00	979.9	981.9	983.8	985.8	987.8	989.8	991.8	993.8	995.7	997.7	28.00
28.25	980.0	982.0	984.0	986.0	988.0	989.9	991.9	993.9	995.9	997.9	28.25
28.50	980.2	982.2	984.1	986.1	988.1	990.1	992.1	994.0	996.0	998.0	28.50
28.75	980.3	982.3	984.3	986.3	988.3	990.2	992.2	994.2	996.2	998.2	28.75
29.00	980.5	982.5	984.4	986.4	988.4	990.4	992.4	994.3	996.3	998.3	29.00
29.25	980.6	982.6	984.6	986.6	988.6	990.5	992.5	994.5	996.5	998.5	29.25
29.50	980.8	982.8	984.7	986.7	988.7	990.7	992.7	994.6	996.6	998.6	29.50
29.75	980.9	982.9	984.9	986.9	988.8	990.8	992.8	994.8	996.8	998.8	29.75
30.00	981.1	983.1	985.0	987.0	989.0	991.0	993.0	994.9	996.9	998.9	30.00
30.25	981.2	983.2	985.2	987.2	989.1	991.1	993.1	995.1	997.1	999.0	30.25
30.50	981.4	983.4	985.3	987.3	989.3	991.3	993.2	995.2	997.2	999.2	30.50
30.75	981.5	983.5	985.5	987.5	989.4	991.4	993.4	995.4	997.4	999.3	30.75
31.00	981.7	983.7	985.6	987.6	989.6	991.6	993.5	995.5	997.5	999.5	31.00
31.25	981.8	983.8	985.8	987.8	989.7	991.7	993.7	995.7	997.7	999.6	31.25
31.50	982.0	984.0	985.9	987.9	989.9	991.9	993.8	995.8	997.8	999.8	31.50
31.75	982.1	984.1	986.1	988.1	990.0	992.0	994.0	996.0	997.9	999.9	31.75
32.00	982.3	984.2	986.2	988.2	990.2	992.2	994.1	996.1	998.1	1000.1	32.00
32.25	982.4	984.4	986.4	988.4	990.3	992.3	994.3	996.3	998.2	1000.2	32.25
32.50	982.6	984.5	986.5	988.5	990.5	992.5	994.4	996.4	998.4	1000.4	32.50
32.75	982.7	984.7	986.7	988.7	990.6	992.6	994.6	996.6	998.5	1000.5	32.75
33.00	982.9	984.8	986.8	988.8	990.8	992.8	994.7	996.7	998.7	1000.7	33.00
33.25	983.0	985.0	987.0	989.0	990.9	992.9	994.9	996.9	998.8	1000.8	33.25
33.50	983.2	985.1	987.1	989.1	991.1	993.1	995.0	997.0	999.0	1001.0	33.50
33.75	983.3	985.3	987.3	989.2	991.2	993.2	995.2	997.2	999.1	1001.1	33.75
34.00	983.5	985.4	987.4	989.4	991.4	993.3	995.3	997.3	999.3	1001.3	34.00
34.25	983.6	985.6	987.6	989.5	991.5	993.5	995.5	997.4	999.4	1001.4	34.25
34.50	983.8	985.7	987.7	989.7	991.7	993.6	995.6	997.6	999.6	1001.5	34.50
34.75	983.9	985.9	987.9	989.8	991.8	993.8	995.8	997.7	999.7	1001.7	34.75

WHEN USING A DENSITY IN G/ML, G/CC, OR KC/L MULTIPLY BY 1000 BEFORE ENTERING THE ABOVE TABLE

ANEXO C: Reporte de la viscosidad dinámica a 40°C del ácido piroleñoso



**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
 DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



**INFORME DE RESULTADOS**  
**PETRÓLEOS**

---

Informe Nº 21-049.1  
Fecha 2021-03-09

**Referencia:**  
**Empresa:**  
**Atención:**  
**Dirección:**  
**Tipo de ensayos:**  
**Tipo de muestra:**  
**Identificación de la muestra:**  
**Descripción de la muestra:**  
**Muestra tomada por:**  
**Fecha de ingreso de la muestra:**  
**Código de muestra:**  
**Fecha de realización de ensayos:**

**21-049**  
**PARTICULAR**  
 Srta. Cinthia Lema  
 Ciudadela José de Lascano entre Trujillo y Opinión – Robamba  
 Análisis Físicoquímicos  
 ÁCIDO PIROLEÑOSO  
 ÁCIDO PIROLEÑOSO  
 Muestra en envase de plástico con tapa rosca  
 El cliente  
 2021-03-03  
 21-049.1  
 2021-03-09

DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO	INCERTIDUMBRE (k=2)
VISCOSIDAD DINÁMICA A 40°C*	cP	MÉTODO INTERNO / REOLOGÍA	1,111	-

**Nota.-** Los ensayos marcados (\*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE

**Nota.-** Los resultados que constan en el presente informe solo están relacionados con la muestra entregada por el cliente al DPEC

**Condiciones Ambientales.** - Presión: 545,1 mm Hg; Temperatura: 18,2 °C

AN: FTL  
Realizado por: VRT

Revisado por:



Ing. Fernanda Toasa L.  
RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado por:



Ing. Ghem Carvajal C.  
DIRECTOR DEL LAB. DEL DPEC

ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS.

Dirección: Enrique Ritter s/n y Boivía

Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26  
QUITO - ECUADOR

E-mail: [fig.secretaria@dpec@uce.edu.ec](mailto:fig.secretaria@dpec@uce.edu.ec)

MC2201-P01-7 Hoja 1 de 1

Fuente: Laboratorio del departamento de petróleos, energía y contaminación. Universidad Central del Ecuador, 2021.





**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO**

**DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS Y RECURSOS DEL  
APRENDIZAJE**



**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS  
REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA**

**Fecha de entrega:** 23 / 07 / 2021

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> CINTHIA GABRIELA LEMA GAVIDIA
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> CIENCIAS
<b>Carrera:</b> INGENIERÍA QUÍMICA
<b>Título a optar:</b> INGENIERA QUÍMICA
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b> Lcdo. Holger Ramos, MSc.



Firmado electrónicamente por:  
**HOLGER GERMAN  
RAMOS UVIDIA**

1236-DBRA-UPT-2021