

Análisis de los Parámetros que Inciden en la Descomposición y Degradación Termoquímica de  
Biomasa Residual Proveniente de la Piña Evaluando el Impacto que Generan en la  
Producción de Bioaceites

Diego Armando Mogollón Reyes y Keren Daniela Mendoza Nevado

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Yesid Javier Rueda Ordoñez

Ph.D en Ingeniería Química

Codirector

Pablo Antonio Nieto Rangel

Ph. D (c) en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Ingeniería Mecánica  
Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

*A Dios, por ser mi guía durante estos años, por la fortaleza y sabiduría que me brindo para afrontar todos los desafíos que se me presentaron, por siempre brindarme la fuerza para levantarme y seguir construyendo este sueño que hoy se hace realidad. Sin su luz, no habría sido posible.*

*A mis padres, por ser el pilar de mi vida, por su apoyo incondicional, porque cada logro mío es también suyo y porque son mi mayor motivación para seguir adelante.*

*A los desafíos, porque “De cada caída se aprende, y de cada aprendizaje, se crece”, cada desafío superado ha sido un paso más hacia el profesional que hoy me convierto.*

#### **Diego Armando Mogollón Reyes**

*A Dios, por ser mi guía y mi camino, por darme la fuerza, llenarme de su amor y ser mi sustento día a día para avanzar durante mi carrera universitaria, por todas las oportunidades dadas en estos cinco años y por permitirme alcanzar este título universitario como Ingeniera Mecánica.*

*A mi Madre y a mi Padre, por su amor y comprensión, por todo el esfuerzo dado para que hoy este sueño se haga realidad, porque cada logro es para ustedes y por ustedes.*

*A mi abuela Elizabeth, por acogerme y llenarme de su amor, sabiduría, alegría y fe durante  
estos 5 años*

*A mi hermano Lucas, por ser mi apoyo, por todas sus risas y amor brindado.*

*A Brigitte por estar presente en la distancia, aconsejarme y apoyarme.*

*“cada día es una nueva oportunidad”*

**Keren Daniela Mendoza Nevado**

### **Agradecimientos**

*A la Universidad Industrial de Santander y a la escuela de Ingeniería Mecánica, por brindarnos un espacio para nuestro desarrollo personal y profesional.*

*A nuestro director Yesid Rueda, por ser nuestra guía, por compartir sus conocimientos y orientarnos durante el desarrollo y culminación de este proyecto.*

*A nuestro codirector Pablo Nieto, por guiarnos, aconsejarnos, ayudarnos y compartir sus conocimientos durante el desarrollo y la culminación de este proyecto.*

*A Edinson Lizarazo, por sus consejos y ayuda brindada durante la realización y culminación de este de este proyecto.*

*A nuestros profesores, por compartir su conocimiento y ser fuente de inspiración para nuestra formación profesional.*

*A nuestros amigos, por los momentos inolvidables, risas y angustias vividas durante estos años.*

*A mi compañero de proyecto, por aceptar este reto, por sus conocimientos y paciencia, porque hoy culminamos juntos esta etapa universitaria. Sin su esfuerzo esto no hubiese sido posible.*

*A mi compañera de proyecto, por la entrega y el tiempo dedicado a nuestro proyecto, por su paciencia, buena actitud y por mostrarme que siempre hay algo bueno donde parece no haberlo. Sin su esfuerzo esto no hubiese sido posible.*

**Tabla de contenido**

Introducción .....	12
1. Planteamiento del problema.....	14
2. Objetivos .....	15
2.1. Objetivo general.....	15
2.2. Objetivos específicos .....	16
3. Marco teórico .....	16
3.1. Antecedentes .....	16
3.1.1. “Pirólisis de los residuos lignocelulósicos del henequén para la obtención de bioaceite.” (Fonseca, 2013).....	16
3.1.2. “Aprovechamiento energético de la cáscara de piña como biomasa, para la obtención de bioetanol y bromelina en la universidad autónoma de Bucaramanga” (Jaramillo, 2022). .....	17
3.1.3. “Obtención de biocombustible a través de co-pirólisis rápida de biomasa de eucalipto y palma” (Melo, 2021). .....	17
3.1.4. “Extraction and characterization of bromelain from pineapple core: a strategy for pineapple waste valorization” (Fossore et al., 2023). .....	18
3.2. Referentes .....	18
3.2.1. Biomasa.....	18
3.2.2. Tipos de piña.....	19
3.2.2.1. Piña perolera: .....	19
3.2.2.2. Piña golden (oro miel): .....	19
3.2.2.3. Piña cayena Lisa: .....	19
3.2.2.4. Piña manzana: .....	19
3.2.3. Rastrojo de piña .....	20
3.2.4. Diseño de experimentos (DOE).....	20
3.2.5. Proceso termoquímico para la transformación de biomasa .....	21
3.2.6. Análisis termogravimétrico (TGA).....	21
3.2.7. Pirólisis .....	21
3.2.8. Pirólisis rápida .....	22
3.2.9. Líquido pirolítico o bioaceite.....	22
3.2.10. Atmósfera inerte.....	22

3.2.11. Gas de arrastre.....	22
4. Metodología .....	23
4.1. Fase 1 (preparación de muestras de biomasa de piña).....	23
4.1.1. Equipos y materiales .....	23
4.1.1.1. Rastrojo de piña: .....	23
4.1.1.2. Molino eléctrico de cuchillas:.....	24
4.1.1.3. Horno tipo mufla:.....	25
4.1.1.4. Balanza de precisión pioneer: .....	25
4.1.1.5. Erlenmeyer:.....	26
4.1.1.6. Condensador de vidrio: .....	26
4.1.1.7. Desecador:.....	27
4.1.1.8. Reactor de pirólisis: .....	27
4.1.2. Análisis experimental.....	28
4.1.2.1. Análisis próximo:.....	28
4.1.2.1.1. Determinación de humedad (norma ASTM D3173): .....	29
4.1.2.1.2. Determinación de cenizas (norma ASTM 3174): .....	30
4.1.2.1.3. Determinación de material volátil (norma ASTM D3175): .....	31
4.1.2.1.4. Determinación de carbono fijo: .....	31
4.1.2.2. Análisis termogravimétrico (TGA).....	31
4.1.2.3. Pruebas preliminares .....	33
4.2. Fase 2 (configuración y ejecución del proceso de pirólisis).....	34
4.2.1. Diseño de experimento factorial .....	34
4.2.2. Ejecución del proceso de pirólisis.....	35
4.2.3. Cuantificación de resultados .....	37
4.3. Fase 3 (evaluación de los productos resultantes del proceso).....	37
4.3.1. Prueba de viscosidad.....	38
4.3.2. Prueba de densidad .....	38
4.3.3. Prueba de poder calorífico .....	39
5. Análisis de resultados .....	40
5.1. Resultados primera fase .....	40
5.1.1. Análisis próximo de la evaluación inicial de la mezcla corona + cáscara de piña	40

5.1.2.	Análisis próximo de la biomasa de trabajo .....	42
5.1.3.	Análisis TGA .....	43
5.1.4.	Pruebas preliminares .....	46
5.2.	Resultados segunda fase .....	47
5.2.1.	Resultado experimental del proceso de pirólisis.....	47
5.3.	Resultados tercera fase.....	49
5.3.1.	Análisis gráfica de efectos principales para fracción líquida.....	49
5.3.2.	Análisis gráfica de interacción para fracción líquida.....	51
5.3.3.	Análisis diagrama de pareto de efectos estandarizados .....	52
5.3.4.	Resultado del cálculo de la viscosidad cinemática .....	54
5.3.5.	Resultado del cálculo de la densidad. ....	55
5.3.6.	Resultado del cálculo del poder calorífico.....	56
6.	Conclusiones .....	58
	Referencias bibliográficas.....	59

**Lista de tablas**

Tabla 1	Número de tratamientos según notación de Yates (valores para los niveles altos y bajos de las variables evaluadas utilizados en el diseño factorial).....	34
Tabla 2	Resultados del análisis próximo realizado a la mezcla corona + cáscara .....	40
Tabla 3	Resultados del análisis próximo de la corona de piña .....	42
Tabla 4	Resultados del análisis próximo para la biomasa de trabajo.....	42
Tabla 5	Valores seleccionados para realizar las pruebas preliminares.....	46
Tabla 6	Resultados obtenidos de las pruebas preliminares .....	46
Tabla 7	Variables operaciones seleccionadas para realizar las pruebas de pirólisis .....	47
Tabla 8	Resultados del proceso de pirólisis en términos del rendimiento obtenido .....	48
Tabla 9	Datos de medición de viscosidad de las tres pruebas realizadas.....	55
Tabla 10	Poder calorífico del aceite.....	56

**Lista de figuras**

Figura 1	Biomasa: (a) corona de piña, (b) corona de piña triturada, (c) corona de piña seca .....	24
Figura 2	Molino eléctrico de cuchillas.....	25
Figura 3	Horno tipo mufla (Terrigeno D8 Serie 2254).....	25
Figura 4	Balanza de precisión Pioneer.....	26
Figura 5	Matraz Erlenmeyer .....	26
Figura 6	Esquema de la unidad de pirólisis .....	27
Figura 7	Placas de Petri en vidrio .....	29
Figura 8	Crisoles refractarios.....	30
Figura 9	Equipo termogravimétrico.....	33
Figura 10	Sección de condensación y recolección del bioaceite .....	37
Figura 11	Equipo: (a) Viscosímetro, (b) Tubo capilar (Size 50 Z791) .....	38
Figura 12	Picnómetro de 10 ml.....	39
Figura 13	Bomba calorimétrica de oxígeno (PARR modelo 6200).....	40
Figura 14	Mezcla de cáscara + corona de piña .....	41
Figura 15	Análisis próximo: (a) rastrojo después de la prueba de humedad, (b) rastrojo después de la prueba de cenizas, (c) rastrojo después de la prueba de volátiles .....	41
Figura 16	Corona de piña antes y después de su trituración.....	42
Figura 17	Análisis próximo: (a) corona de piña después de la prueba de humedad, (b) corona de piña después de la prueba de cenizas, (c) corona de piña después de la prueba de volátiles .....	43
Figura 18	Termogravimetría en atmosfera de nitrógeno: (a) corona de piña a 20°C/min, (b) corona de piña a 30°C/min, (c) corona de piña a 45°C/min, (d) corona de piña a 60°C/min.....	43
Figura 19	Rendimientos obtenidos .....	48
Figura 20	Efectos principales para la fracción líquida.....	50

Figura 21 Interacción entre las variables en sus niveles altos y bajos .....	51
Figura 22 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.....	52
Figura 23 Prueba de viscosidad .....	54
Figura 24 Prueba con el picnómetro: (a) peso en gramos del picnómetro, (b) masa en gramos de aceite depositado en el picnómetro .....	55

### Resumen

**Título:** Análisis de los Parámetros que Inciden en la Descomposición y Degradación Termoquímica de Biomasa Residual Proveniente de la Piña Evaluando el Impacto que Generan en la Producción de Bioaceites\*

**Autor:** Diego Armando Mogollón Reyes y Keren Daniela Mendoza Nevado\*\*

**Palabras Clave:** Bioaceite, pirólisis rápida, Diseño de experimentos (DOE), poder calorífico, rastrojo de piña.

**Descripción:** El rastrojo de piña es un subproducto agrícola subutilizado el cual posee características y propiedades que permiten un aprovechamiento energético de este. Un medio para la descomposición y transformación termoquímica de la biomasa en productos como bioaceite o biocarbon, es el proceso de pirólisis rápida. Para la evaluación de los parámetros incidentes en la descomposición y degradación termoquímica de la corona de piña, ésta se sometió a una serie de experimentos con temperaturas de proceso de 500 y 550 °C y velocidades de calentamiento de 45 y 60 °C/min, el desarrollo de los experimentos fue guiado mediante un diseño de experimentos 2<sup>2</sup> desarrollado en el Software Minitab. Como resultado de la fase de experimentos se obtuvo un mayor rendimiento de fracción líquida de 48,5533% bajo condiciones de operación de 500°C y 60°C/min; El resultado del efecto de los factores influyentes en el proceso se analizó mediante un análisis DOE arrojando que la producción de bioaceite es mayormente influenciada por la combinación de los factores A y B. el valor energético del bioaceite obtenido es de  $22 \pm 0.1423$  MJ/Kg, sugiriendo su posible uso como una alternativa para energías renovables.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Ingeniería Mecánica. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez. Ph.D en Ingeniería Química. Codirector: Pablo Antonio Nieto Rangel. Ph.D en Ingeniería Mecánica (c)

**Abstract**

**Title:** Analysis of Parameters Affecting the Decomposition and Thermochemical Degradation of Pineapple Residual Biomass and Evaluating their Impact on Bio-oil Production\*

**Authors:** Diego Armando Mogollón Reyes and Keren Daniela Mendoza Nevado\*\*

**Key Words:** Bio-oil, pyrolysis, DOE, calorific value, Pineapple stubble.

**Description:** Pineapple agricultural waste is an underutilized agricultural by-product with characteristics and properties that allow an energetic utilization of it. Fast pyrolysis is a process used for the decomposition and thermochemical transformation of biomass into products such as bio-oil or biocarbon. For the evaluation of the parameters involved in the decomposition and thermochemical degradation of the pineapple crown, a series of experiments were conducted at process temperatures of 500 and 550 °C and heating rates of 45 and 60 °C/min. The experiment followed a 2<sup>2</sup> factorial design in Minitab software. As a result of the experimental phase, the highest liquid fraction yield of 48.5533% was obtained under operating conditions of 500°C and 60°C/min; the result of the effect of the influential factors in the process was analyzed through a DOE analysis showing that the production of bio-oil is mostly influenced by the combination of factors A and B. The energy value of the bio-oil obtained is  $22 \pm 0.1423$  MJ/Kg, suggesting its possible use as an alternative for renewable energies.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Mechanical Engineering. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez. Ph.D. en Ingeniería Química. Codirector: Pablo Antonio Nieto Rangel Ph. D en Ingeniería Mecánica

## Introducción

Actualmente existen diferentes desafíos relacionados con la contaminación y la transición hacia fuentes de energía más sostenibles. La dependencia de combustibles fósiles no solo contribuye al agotamiento de los recursos naturales, a su vez también es una de las principales causas de emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, buscar alternativas energéticas que sean eficientes y ecológicas es de gran relevancia. De acuerdo con Urien (2013), Una de estas alternativas es la producción de bioaceite extraído de los residuos agrícolas por medio del proceso de pirólisis rápida, un proceso en el cual se pueden aprovechar los residuos sólidos de la agricultura promoviendo la diversificación de fuentes energéticas.

El rastrojo de piña, al igual que otros residuos agrícolas, es una biomasa que actualmente se desaprovecha o se considera un desecho, Sin embargo, a través de procesos termoquímicos es posible transformar esta biomasa en productos de valor agregado.

En diferentes regiones de Colombia, se evidencian deficiencias en el sistema de recolección y tratamiento de los residuos sólidos que se generan a diario. Como consecuencia de este exceso, se generan acumulaciones de estos residuos como tallos, hojas y restos de la cosecha, que contribuyen a la degradación del suelo y contaminación de fuentes hídricas. Además, su disposición final termina en prácticas no amigables con el ambiente, como la incineración no controlada al aire libre, en lugar de ser aprovechados como fuentes de energía o insumos para diferentes procesos industriales.

En el departamento de Santander, los municipios de Lebrija y Girón cuentan con una gran cantidad de cultivos de piña, del cual se genera el subproducto agrícola conocido como rastrojo de piña, el cual, principalmente está compuesto por las hojas, la corona y la cascara de esta fruta. Este

subproducto es considerado un residuo sin valor, que después de la cosecha puede afectar la tierra del cultivo si no se le da una adecuada disposición final. Sin embargo, el rastrojo de piña se puede aprovechar debido a su composición rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, los cuales son componentes que resultan adecuados para los procesos de conversión termoquímica como la pirólisis. (Alfaro et al., 2024)

El proceso de pirólisis destaca en la valorización de estos residuos agrícolas, ya que es un proceso por el cual se obtienen diferentes productos, tales como, el bioaceite, biocarbón y gases no condensables, entre los que se destaca el potencial del uso de estos productos como aceites combustibles usados en un marco de sostenibilidad.

La eficiencia de este proceso depende del tipo y composición de biomasa que se utilice y en las variables operacionales del proceso, como la temperatura y velocidad de calentamiento; por esto, es importante conocer la influencia de las diferentes condiciones de operatividad en la distribución de los productos pirolíticos y su influencia.

En el caso del bioaceite, la influencia de estos parámetros es fundamental para su producción y generar una base de datos experimental, la cual, se pueda tener como referencia en proyectos para la generación de biocombustible a gran escala que involucren el rastrojo de piña como biomasa de trabajo.

El desarrollo de este proyecto se centrará en el análisis de la obtención de bioaceite como producto principal mediante la pirólisis rápida de la biomasa bajo diferentes condiciones de temperatura y velocidad de calentamiento.

## 1. Planteamiento del problema

El cultivo de piña en la agricultura desempeña una acción importante que toma relevancia en la producción y comercialización de frutas tropicales a nivel mundial. Según Big (2021), en su investigación de Producción Mundial de Piña muestra que, Costa Rica produce 3'418.155 toneladas de piña, Brasil cuenta con una producción de 2'650.479 toneladas al año y Colombia quien se ubica en el puesto número diez produce 900.295 toneladas de piña, además, Colombia es uno de los países con mayor superficie (Hectáreas) para la siembra de esta fruta (21.641 hectáreas).

Sin embargo, durante la cosecha de esta fruta se generan grandes cantidades de desperdicios orgánicos, denominados rastrojo de piña, producto de diversas razones que pueden variar según las condiciones del cultivo y la región donde se producen: piñas con tamaño y grado de madurez inadecuado, que presentan afectaciones por malas prácticas de cosecha, problemas de suelo y malas condiciones climáticas. “Los subproductos de la piña, consisten en la piel pelada, el corazón, la punta de la corona, etc., representan el 60% del peso de la fruta de la piña y se eliminan como residuos, generando problemas de eliminación y contaminación” (Sarangi et al., 2023)

En Colombia, de acuerdo con el Ministerio de Agricultura (2018), en los municipios de Lebrija y Girón en el año 2018 se produjeron el 47% de la producción total de piña en el país, (950.000 Ton). Sin embargo, del 47% de la producción, en promedio un 59.4% corresponde a residuo vegetal remanente de la piña, (Granados & Aguillón, 2019). Además, un estudio realizado a las plazas de mercado de la ciudad de Bucaramanga ubica a la plaza San Francisco como la segunda plaza con mayor generación de residuos sólidos, donde 7138,42 kg corresponden a residuos de cascara de piña siendo esto el 25,16 % del total de los residuos generados en la plaza, (Vargas, 2016).

En vista de lo anterior, estos residuos generan problemas ambientales y económicos, como la contaminación del suelo, la proliferación de plagas y la emisión de gases de efecto invernadero. Además, cuando estos residuos se pudren emanan olores desagradables, por lo que es necesario considerar alternativas para el aprovechamiento y valorización de estos residuos. La pirólisis es un proceso mediante el cual se puede realizar una gestión eficiente de dichos residuos y contribuir a la generación de nuevas formas de energía usando como base los productos obtenidos de este proceso. De esta forma, se pueden obtener biocombustibles como biocarbón y bioaceite que pueden generar beneficios económicos y ambientales.

Este último producto obtenido del proceso de pirólisis, puede usarse como fuente de energía, el cual podría ser un sustituto parcial a los combustibles industriales comúnmente utilizados. La calidad y composición del bioaceite dependerá en gran medida de las condiciones del proceso, tales como, temperatura, velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia de los vapores en el reactor (Kintek, 2024). Es por esto, que se busca optimizar algunas de estas variables para maximizar el rendimiento de la fracción líquida para de esta forma tener un mayor aprovechamiento del proceso de pirólisis, siendo el bioaceite el producto objetivo del proceso.

## **2. Objetivos**

### **2.1. Objetivo general**

Establecer cómo las variaciones de temperatura y velocidad de calentamiento influyen en el proceso de pirólisis para la obtención del bioaceite producto de los residuos sólidos de piña generados en la ciudad de Bucaramanga.

## 2.2. Objetivos específicos

1. Determinar las condiciones de temperatura y velocidad de calentamiento en el proceso de pirólisis para la obtención del producto pirolítico.
2. Cuantificar el rendimiento de las combinaciones y condiciones de los parámetros del proceso de pirólisis que permiten obtener la máxima cantidad de bioaceite.
3. Calcular el efecto de la temperatura y la velocidad de calentamiento individualmente y en conjunto en la obtención de bioaceite.

## 3. Marco teórico

A continuación, se presentan los antecedentes, referentes y conceptos fundamentales necesarios para comprender y desarrollar el proyecto, por medio de la revisión de la literatura existente se identificaron estudios y enfoques teóricos que han abordado temáticas similares en la obtención de bioaceite.

Los antecedentes brindan una visión histórica y contextual del tema, permitiendo identificar avances relevantes. Así mismo, los referentes y conceptos fundamentales estructuran un marco conceptual del proyecto, asegurando una comprensión sólida y coherente.

### 3.1. Antecedentes

#### 3.1.1. *“Pirólisis de los residuos lignocelulósicos del henequén para la obtención de bioaceite.” (Fonseca, 2013)*

El proyecto caracterizó el residuo lignocelulósico del henequén evaluando el rendimiento de los productos obtenidos en el proceso de pirólisis y determinando la composición del bioaceite obtenido. El proceso se realizó en un reactor al cual se le suministro un flujo de nitrógeno ( $N_2$ ) y se usó un sistema de enfriamiento de etilenglicol y hielo para condensar los gases y vapores

producidos en el proceso de pirólisis para obtener el bioaceite. Este proceso se realizó para cuatro diferentes temperaturas en un rango de 450°C a 600°C con una velocidad de calentamiento de 10°C/min y un tiempo de residencia de 60 minutos. Se encontró que con la muestra de tallo verde se obtuvo el mayor rendimiento de bioaceite, con un valor de  $50.33 \pm 0.06\%$  en peso a 550°C,  $28.40 \pm 0.44\%$  en carbón y  $21.25 \pm 0.43\%$  de gases no condensables.

### ***3.1.2. “Aprovechamiento energético de la cáscara de piña como biomasa, para la obtención de bioetanol y bromelina en la universidad autónoma de Bucaramanga” (Jaramillo, 2022).***

En este proyecto se planteó un proceso para el aprovechamiento de los desechos generados a partir de la cascara de piña como biomasa, para la obtención de bioetanol y un subproducto con ayuda del simulador ASPEN PLUS. Dada la ejecución de diferentes procesos como: identificación de composición de la materia prima, simulación del proceso, pretratamiento de la cáscara, neutralización e hidrólisis, fermentación y separación del etanol, se obtuvo como resultado 18.34 kg de bioetanol (etanol de origen biológico, tipo de alcohol etílico producto de biomasa), al 99,5% m/m por cada 100 kg de cáscara de piña tratada.

### ***3.1.3. “Obtención de biocombustible a través de co-pirólisis rápida de biomasa de eucalipto y palma” (Melo, 2021).***

El objetivo de este proyecto fue evaluar el proceso de co-pirólisis rápida usando biomasa de eucalipto y palma para obtener biocombustible líquido, donde se incorporó una proporción 50:50 de la biomasa a descomponer. Para esto, se contempló el efecto de la variación de la temperatura y el tiempo de residencia en el proceso de transformación que permitiera obtener una mayor proporción de fracción líquida de biocombustible.

Los resultados obtenidos mostraron que el ensayo que obtuvo mejor rendimiento en cuanto a la fracción líquida obtenida fue en el ensayo 2 donde se obtuvo la mayor cantidad de biocombustible con un tiempo de residencia de 45 minutos. Además, se evidencio que el poder calorífico del biocombustible obtenido mejoró con respecto al de la materia prima.

#### ***3.1.4. “Extraction and characterization of bromelain from pineapple core: a strategy for pineapple waste valorization” (Fossore et al., 2023).***

Este Proyecto realizado en Brasil; se propuso extraer y caracterizar la bromelina del núcleo de la piña, para la obtención de bioaceite a partir de esta. El objetivo de este proyecto fue evaluar la viabilidad de utilizar el núcleo como una fuente alternativa y rica en bromelina para la producción de bioaceites, destacando las potenciales aplicaciones en la industria de biocombustibles. Para este, se prepararon extractos proteicos crudos del núcleo, que fueron sometidos a electroforesis SDS-PAGE y espectrometría de masas para identificar y comparar las propiedades de la bromelina extraída. El proceso de pirólisis del núcleo de la piña se llevó a cabo para analizar la cantidad y calidad del bioaceite producido, empleando técnicas específicas para cuantificar los rendimientos y las características químicas del producto.

### **3.2. Referentes**

#### ***3.2.1. Biomasa***

De acuerdo con Basu (2010), la biomasa hace referencia a la materia orgánica de origen biológico, como residuos agrícolas, animales y forestales que, a diferencia de los combustibles fósiles, la biomasa se produce en poco tiempo, desarrollándose a partir del proceso de fotosíntesis llevado a cabo por las plantas, árboles y ciertos microorganismos. Es considerada una fuente de

energía renovable que puede ser transformada en diferentes formas de energía, como biocombustibles.

### **3.2.2. Tipos de piña**

#### **3.2.2.1. Piña perolera:**

De acuerdo con Jaramillo (2022), la piña perolera es una variedad de piña altamente cultivada en Colombia, se caracteriza por la ausencia de espinas en sus hojas, poseer un equilibrio de sabor entre dulce y ácido y su geometría es cilíndrica con corona de hojas mediana.

#### **3.2.2.2. Piña golden (oro miel):**

De acuerdo con Jaramillo (2022), este tipo de piña es una variedad de piña más dulce y aromática, contiene mayor cantidad de azúcares y vitamina C. Es un poco más pequeña en comparación con la piña Perolera.

#### **3.2.2.3. Piña cayena Lisa:**

De acuerdo con Jaramillo (2022) la piña cayena lisa es una variedad de piña característica por su gran tamaño en las hojas, su pulpa posee un alto contenido de sólidos solubles. El cultivo de esta piña en Colombia es escaso.

#### **3.2.2.4. Piña manzana:**

De acuerdo con Jaramillo (2022), este tipo de piña es una mutación de la variedad perolera, sus hojas no presentan espinas en los bordes. Su fruto es de color rojo intenso cuando madura, tiene ojos menos profundos que la variedad perolera.

### **3.2.3. *Rastrojo de piña***

Según Córdoba & Molina (2014), el rastrojo de piña hace referencia a los desechos o restos de la piña que quedan en el campo o en áreas de procesamiento después de la cosecha de esta fruta, y está compuesto de la raíz, el tallo, las hojas y las cascaras de piña. Es un desecho lignocelulósico, es decir, está compuesto en gran proporción por celulosa, hemicelulosa y lignina y contiene una variedad de nutrientes, como nitrógeno, potasio y fósforo. De acuerdo con Rojas (2019), la distribución en porcentaje de los carbohidratos estructurales del rastrojo de piña está dada de la siguiente manera: Celulosa (57,5%), Hemicelulosa (37,6%) y lignina (4.9%), de los cuales, la celulosa y hemicelulosa son de gran interés para el desarrollo del proyecto, ya que en el proceso de degradación térmica se descomponen en compuestos volátiles los cuales se condensan para obtener el bioaceite.

### **3.2.4. *Diseño de experimentos (DOE)***

El diseño de experimentos es un procedimiento estadístico utilizado para evaluar como se ve afectada la variable de respuesta de un proceso mediante el análisis de los diferentes factores involucrados. Esta evaluación se puede realizar de manera individual para cada variable y de forma conjunta para determinar si se da una interacción sinérgica o antagónica entre las variables involucradas. Una de las formas del diseño factorial, es el diseño  $2^k$ , donde “k” representa el número de factores a evaluar y “2” representa el número de niveles asociados a los factores, nivel alto (1) y nivel bajo (-1), es decir, es un diseño en el cual para cada factor o variable a evaluar se tienen dos valores de referencia.

### ***3.2.5. Proceso termoquímico para la transformación de biomasa***

Con base en, (Fonseca, 2013), los procesos termoquímicos de conversión de biomasa aprovechan el calor y las reacciones químicas para la obtención de bioenergía, estos métodos con enfoque termoquímico utilizan en procesos controlados de gasificación, combustión y pirólisis altas temperaturas para transformar y descomponer la biomasa en productos energéticos.

### ***3.2.6. Análisis termogravimétrico (TGA).***

Es un análisis empleado para evaluar la estabilidad térmica y el comportamiento de descomposición de la biomasa, en el cual se mide la pérdida de masa en función de la temperatura asociado a una tasa de calentamiento. El TGA permite caracterizar la degradación térmica de la biomasa e identificar las temperaturas o rangos de temperaturas óptimas para el proceso de pirólisis.

### ***3.2.7. Pirólisis***

De acuerdo con, Fonseca (2013), la pirólisis es un proceso termoquímico que se realiza en ausencia de oxígeno, en el cual, se genera la descomposición y degradación de la biomasa. La descomposición implica la ruptura de las moléculas orgánicas de la biomasa, descomponiéndose en compuestos más simples como carbono, hidrógeno y otros productos gaseosos, líquidos y sólidos. El proceso de pirólisis permite la conversión de la biomasa en productos útiles como biocombustibles, carbón vegetal o gases. Este proceso generalmente se realiza a presión atmosférica y altas temperaturas que pueden variar desde los 300 a 600°C de acuerdo con el tipo de biomasa. La calidad de estos productos va a depender de factores como la temperatura, la velocidad de calentamiento, la dosificación de la biomasa, el tiempo de residencia, entre otros.

### ***3.2.8. Pirólisis rápida***

La pirólisis rápida se logra cuando la rapidez del proceso no permite que los compuestos volátiles de la biomasa se transformen en gases no condensables, lo cual, favorece la formación de bioaceite y reduce la producción de carbón sólido y gases. Para esto, la muestra de biomasa se debe someter a una temperatura adecuada teniendo en cuenta que no pueden ser temperaturas intermedias bajas, lo cual, favorecerá la formación de carbón. Así mismo, el contenido de humedad de la biomasa debe ser inferior al 10% por lo cual, para el proceso de pirólisis rápida se debe secar previamente la biomasa. El aceite formado mediante este proceso tiene un valor calórico igual a la mitad del valor correspondiente al diésel. (Klug, 2012).

### ***3.2.9. Líquido pirolítico o bioaceite***

De acuerdo con, Urien (2013), es la fracción líquida obtenida del proceso de pirólisis. Se obtiene mediante procesos de condensación y tiene una composición química compleja que puede contener hidrocarburos, fenoles y compuestos aromáticos.

### ***3.2.10. Atmósfera inerte***

Es un entorno químicamente estable con el cual se evitan reacciones químicas no deseadas en diferentes procesos termoquímicos. Una atmósfera inerte evita que el oxígeno y otros agentes reactivos interfieran en el proceso, impidiendo que se dé lugar la combustión.

### ***3.2.11. Gas de arrastre***

Se utiliza principalmente para transportar o arrastrar muestras o subproductos de un proceso termoquímico sin participar químicamente en el proceso. El gas de arrastre transporta los vapores que se generan en el interior del reactor hacia los sistemas de enfriamiento y condensación, donde se captura el bioaceite.

## 4. Metodología

En este apartado se describe el enfoque metodológico que se aplicó en el estudio del proceso de pirólisis del rastrojo de piña con el fin de analizar el impacto de la temperatura y velocidad de calentamiento en la producción de bioaceite. La metodología comprende las diversas actividades realizadas para la ejecución del proyecto. Actividades como la preparación de las muestras, la definición de las condiciones experimentales y la configuración y análisis del proceso.

### 4.1. Fase 1 (preparación de muestras de biomasa de piña)

#### 4.1.1. Equipos y materiales

Para el desarrollo del proyecto se utilizaron equipos y materiales específicos que permitieron realizar el proceso de pirólisis.

##### 4.1.1.1. Rastrojo de piña:

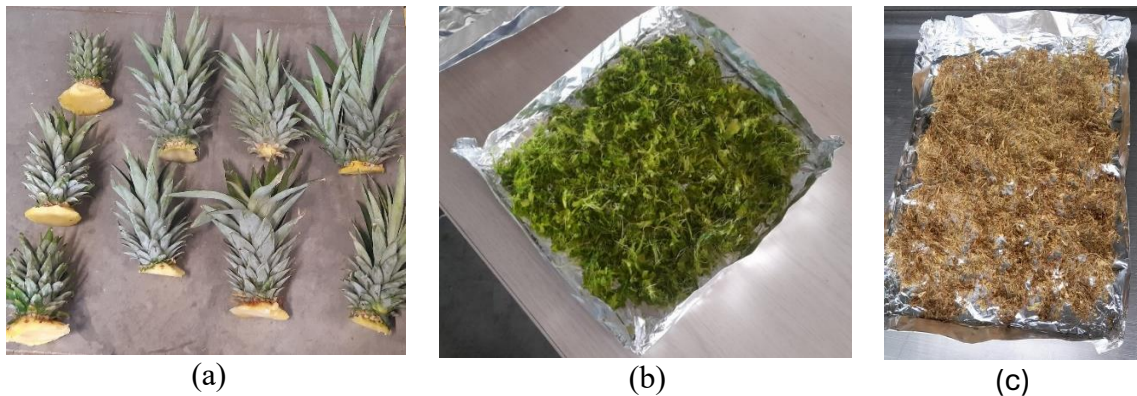
El rastrojo de piña es la materia prima utilizada en el proceso de pirólisis. La muestra se seleccionó considerando el estado de madurez de la piña, la identificación de áreas de producción y procesamiento de la fruta, para posteriormente realizar la preparación y homogenización de la muestra. Esta preparación consta de su trituración hasta lograr un tamaño de partícula uniforme y de un proceso de secado previo al proceso de pirólisis para reducir el porcentaje de humedad de la muestra y así homogenizar las muestras utilizadas en el lecho del reactor de pirólisis.

Entre las variedades de piña que predominan en el mercado, se encuentran la piña perolera, manzana, cayena lisa y oro miel. De las anteriores, la piña perolera es el tipo de piña más comercializado en el país. Por lo cual, al ser la variedad más cultivada, genera una alta disponibilidad de desechos agrícolas, por esto, para el estudio en cuestión se decidió trabajar con el rastrojo de esta variedad de piña.

El rastrojo de piña se recolectó en dos lugares diferentes: la Plaza San Francisco y la Plaza la Concordia ubicadas en la ciudad de Bucaramanga. La elección de estas áreas de procesamiento se debe a que allí se evidencia una alta cantidad de residuos de diferentes frutas, entre esas la piña, siendo ésta una de las frutas que más desechos genera diariamente.

### Figura 1

*Biomasa: (a) corona de piña, (b) corona de piña triturada, (c) corona de piña seca*



#### 4.1.1.2. Molino eléctrico de cuchillas:

Se empleó un molino eléctrico de cuchillas de doble punta para reducir el tamaño de las partículas del rastrojo, hasta un tamaño mínimo de 3 mm en el que se logrará observar la homogeneidad de la muestra. La trituración es importante para garantizar una superficie de reacción uniforme y facilitar el manejo de las muestras durante el proceso.

**Figura 2**

*Molino eléctrico de cuchillas*

**4.1.1.3.Horno tipo mufla:**

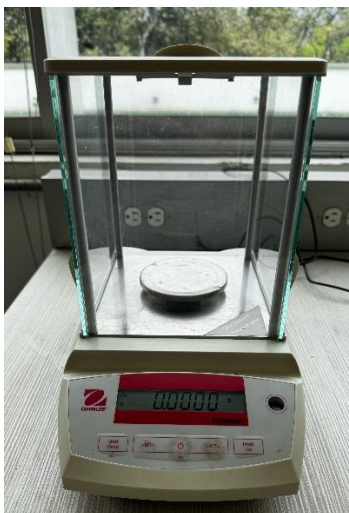
El horno tipo mufla fue utilizado para el secado de la muestra después de la trituración de esta, con el fin de eliminar el contenido de humedad, para evitar interferencias en el proceso de pirólisis y asegurar consistencia en las pruebas.

**Figura 3**

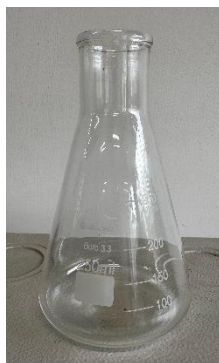
*Horno tipo mufla (Terrigeno D8 Serie 2254)*

**4.1.1.4.Balanza de precisión pioneer:**

Para la medición precisa de las muestras utilizadas en el desarrollo de este proyecto, se usó una balanza Pioneer, la cual cuenta con una precisión de 0.0001 gramos. Esta balanza es de gran importancia en el cálculo del rendimiento de los productos obtenidos en cada experimento.

**Figura 4***Balanza de precisión Pioneer***4.1.1.5. Erlenmeyer:**

Se utilizó un matraz Erlenmeyer para recolectar y conservar el bioaceite obtenido durante el proceso de pirólisis para su posterior análisis.

**Figura 5***Matraz Erlenmeyer***4.1.1.6. Condensador de vidrio:**

Se empleó un condensador de vidrio en el sistema de recolección de vapores, el cual permitió la condensación de los vapores generados durante la pirólisis. El condensador facilitó la

obtención de la fase líquida de los productos del proceso, enfriando los vapores para su posterior almacenamiento en los recipientes.

#### 4.1.1.7. Desecador:

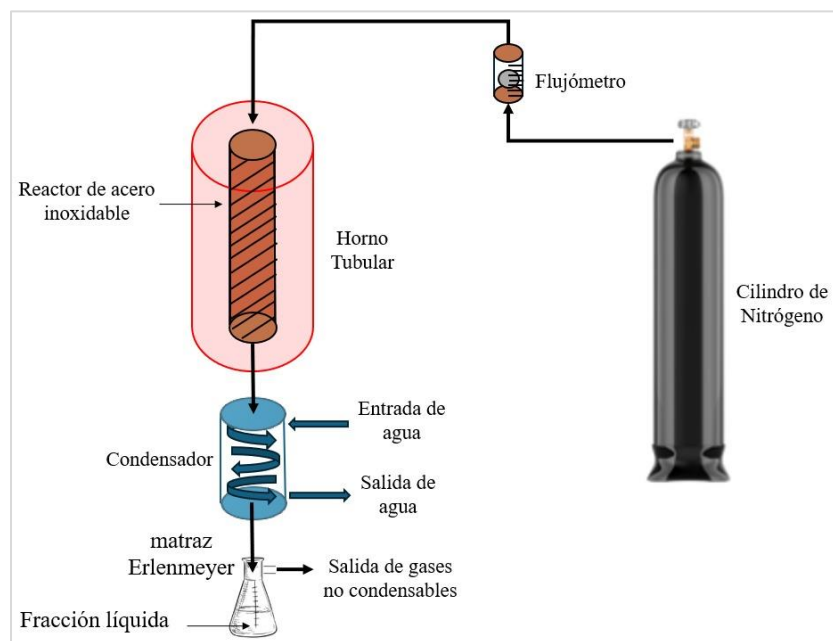
El desecador fue utilizado para enfriar y evitar la reabsorción de humedad del ambiente en las muestras posterior al análisis próximo. Este recipiente contiene gel de sílice el cual es el encargado de absorber la humedad del aire y mantener seca la muestra de biomasa.

#### 4.1.1.8. Reactor de pirólisis:

El reactor de pirólisis u horno vertical tubular fue el equipo principal en el que se realizó el proceso de descomposición térmica del rastrojo. Se empleó un reactor de lecho fijo, en el cual se establecieron las condiciones operacionales medibles del proceso, permitiendo un calentamiento uniforme de las muestras a las condiciones seleccionadas para el estudio.

### Figura 6

*Esquema de la unidad de pirólisis*



La unidad cuenta con los siguientes componentes:

- Cilindro de nitrógeno
- Regulador de presión
- Flujómetro
- Válvula de paso
- Horno tubular
- Reactor de acero inoxidable

#### ***4.1.2. Análisis experimental***

##### **4.1.2.1. Análisis próximo:**

Para caracterizar la biomasa utilizada en el proceso de pirólisis, se realizó un análisis próximo para determinar el contenido de humedad, cenizas, compuestos volátiles y carbón fijo de la muestra.

El análisis se llevó a cabo siguiendo las indicaciones estándares de la norma ASTM D7582, la cual especifica los métodos para evaluar la composición de la biomasa y otros materiales combustibles.

El rastrojo de piña al ser un residuo proveniente de una fruta contiene altos niveles de humedad, por lo que, trabajar directamente con la biomasa de esa forma puede causar complicaciones o resultados no deseados en la calidad y las características del bioaceite. Por esto, la biomasa utilizada en este estudio es rastrojo de piña, la cual previamente paso por un proceso de trituración y secado.

Los métodos específicos se detallan a continuación:

#### 4.1.2.1.1. *Determinación de humedad (norma ASTM D3173):*

Para este análisis, la muestra de rastrojo de piña fue pesada inicialmente en placas de Petri en vidrio, en las cuales se depositó la cantidad de  $2 \pm 0.0034$  gramos de muestra. Para la prueba se utilizaron cuatro placas de Petri que fueron colocadas en el horno tipo mufla previamente calentado a una temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ . La muestra es secada en el horno por un periodo de 3 horas, una vez pasado este tiempo, las muestras son retiradas del horno y colocadas en un desecador por 10 minutos para evitar la reabsorción de humedad. Cuando las muestras alcanzaron la temperatura ambiente, se pesan nuevamente para determinar por medio de la diferencia de masa la pérdida de ésta debido a la evaporación del agua.

#### **Figura 7**

*Placas de Petri en vidrio*



El porcentaje de humedad se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{Humedad} = \frac{m_b - (m_p - m_c)}{m_b} * 100 \quad (1)$$

Donde:

$m_b$  = es la masa de biomasa en las placas de Petri.

$m_p$  = es la masa después de la prueba, calculada como la suma de la masa del crisol y la biomasa inicial, menos la humedad perdida.

$m_c$  = es la masa del crisol.

#### 4.1.2.1.2. *Determinación de cenizas (norma ASTM 3174):*

Para determinar el contenido de cenizas, la muestra debe estar completamente seca, para asegurar que solo quede el material inorgánico al finalizar el proceso.

La muestra seca se pesó y se colocó en cuatro crisoles refractarios sin tapa en los cuales se dispusieron  $2 \pm 0.0035$  gramos de la muestra. Los crisoles con las muestras se introducen en el horno tipo mufla previamente calentado hasta una temperatura de  $550 \pm 25^\circ\text{C}$  durante 3 horas, en una atmósfera oxidante para asegurar una combustión completa del material orgánico en la muestra. Después de calcinarse, las muestras se retiran del horno y se dejan enfriando en el desecador hasta que alcancen la temperatura ambiente. Una vez alcanzada la temperatura ambiente se pesan nuevamente para determinar el peso asociado a las cenizas.

### Figura 8

*Crisoles refractarios*



El porcentaje de cenizas se calculó de la siguiente manera:

$$\%Cenizas = \frac{m_p - m_c}{m_b} * 100$$

(2)

**4.1.2.1.3. Determinación de material volátil (norma ASTM D3175):**

Para esta prueba, la muestra seca se coloca en un crisol con tapa con el propósito de minimizar el contacto de la muestra con el oxígeno. En cada uno de los cuatro crisoles se dispusieron  $2 \pm 0.0006$  gramos de muestra que se introdujeron en el horno tipo mufla precalentado a  $950 \pm 20^\circ\text{C}$ . Las muestras se dejaron durante 7 minutos sin permitir la entrada de aire para evitar la combustión de la muestra. Este proceso en ausencia de oxígeno causa la descomposición térmica del material, permitiendo la liberación del material volátil en forma de gases.

Al igual que las pruebas anteriores, las muestras se dejan enfriar en el desecador y se pesan nuevamente para determinar la pérdida de peso asociado al material volátil.

El porcentaje de material volátil se calculó de la siguiente manera:

$$\%Volatiles = \frac{m_b - (m_p - m_c)}{m_b} * 100 - \%Humedad \quad (3)$$

**4.1.2.1.4. Determinación de carbono fijo:**

El contenido de carbón fijo se calcula indirectamente, ya que no se tiene un procedimiento estándar normalizado. Para determinar la cantidad de carbono fijo de la biomasa se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Carbón fijo (\%)}: 100\% - (\text{Humedad (\%)} + \text{Material Volátil (\%)} + \text{Cenizas (\%)}) \quad (4)$$

**4.1.2.2. Análisis termogravimétrico (TGA).**

El análisis termogravimétrico se realizó en el Centro Integrado de Laboratorios de Ingeniería Química (CILIQ) de la Universidad Industrial de Santander, siguiendo lo establecido

en la norma ASTM E1131. Se utilizó un equipo de marca TA – INSTRUMENTS modelo Discovery 5500. Se realizaron cuatro pruebas con las siguientes características:

La primera prueba fue realizada a una tasa de calentamiento de 20°C/min, la cual, es la tasa comúnmente utilizada en diferentes procesos de pirólisis, esto, con el fin de registrar el comportamiento de descomposición de la biomasa con una velocidad de calentamiento baja.

Las tres pruebas restantes se realizaron con las siguientes velocidades de calentamiento:

- Prueba 1: A una velocidad de calentamiento de 30°C/min.
- Prueba 2: A una velocidad de calentamiento de 45°C/min.
- Prueba 3: A una velocidad de calentamiento de 60°C/min.

Las pruebas se realizaron en un rango de temperatura de 30 a 700°C de acuerdo con las especificaciones del equipo y en atmósfera de nitrógeno para evitar la oxidación de la muestra, asegurando que la degradación térmica ocurriera sin combustión.

Las velocidades de calentamiento utilizadas en las pruebas de termogravimetría fueron seleccionadas según el proceso de interés. En este caso, el bioaceite será obtenido mediante pirólisis rápida, por lo cual, es conveniente realizar las pruebas a altas velocidades de calentamiento para observar el comportamiento de degradación a estas condiciones y establecer si estas velocidades son adecuadas para el proceso.

**Figura 9**

*Equipo termogravimétrico*



*Nota.* Referencia del equipo de termogravimetría utilizado. Tomado de (TA INSTRUMENTS, 2016).

**4.1.2.3. Pruebas preliminares.**

Previo al proceso experimental, se llevaron a cabo pruebas preliminares con el fin de evaluar el comportamiento del rastrojo de piña en el proceso de pirólisis bajo diferentes condiciones de temperatura y tasas de calentamiento. Las pruebas preliminares se hicieron utilizando tres velocidades de calentamiento ( $30^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,  $45^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ,  $60^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) y tres temperaturas objetivo elegidas, seleccionadas con base en el análisis termogravimétrico y las especificaciones operacionales del reactor utilizado. En total, se obtuvieron nueve combinaciones experimentales preliminares. El propósito de estas pruebas fue identificar un rango de condiciones operacionales que proporcionara un mejor rendimiento en la producción de bioaceite y una adecuada descomposición térmica.

La elección de los valores se basó en los análisis previos. Mediante el análisis próximo se conoció la composición inicial de la biomasa (humedad, cenizas y volátiles), mientras que con la termogravimetría se identificaron las temperaturas clave de descomposición, permitiendo identificar un rango de temperaturas para establecer las condiciones de operación utilizadas para realizar las pruebas preliminares.

Con los resultados de estas pruebas preliminares, se establecieron los rangos óptimos de operación para el proceso de pirólisis, niveles altos y bajos de las variables en cuestión, los cuales sirvieron como punto de partida en la planificación del diseño factorial. Con este enfoque, se logra un análisis más robusto, confiable y eficiente de las variables involucradas.

## **4.2. Fase 2 (configuración y ejecución del proceso de pirólisis)**

### ***4.2.1. Diseño de experimento factorial***

Por medio del software Minitab se configuró el diseño de experimento factorial  $2^k$  (k factores y dos niveles). Se establece la velocidad de calentamiento y la temperatura de operación como los factores analizar para la obtención del bioaceite. De acuerdo con el diseño factorial los experimentos a realizar son cuatro, y para efectos de obtener resultados consistentes cada una de las pruebas se realizó por triplicado garantizando repetibilidad y precisión en los resultados. Los valores de temperatura y velocidad de calentamiento se establecieron con base en la prueba de termogravimetría y las pruebas preliminares establecidas por la capacidad de operación del horno de pirólisis.

La tabla 1 muestra los valores utilizados para los factores empleados en el diseño de experimento factorial. La notación utilizada para el nombramiento y el desarrollo de los tratamientos se basa en la notación de Yates como se muestra en la tabla 1.

#### **Tabla 1**

*Número de tratamientos según notación de Yates (valores para los niveles altos y bajos de las variables evaluadas utilizados en el diseño factorial)*

Tratamiento	A	B
(1)	500	45
a	550	45
b	500	60
ab	550	60

*Nota.* A: representa los valores de temperatura en [°C], B: representa los valores de velocidad de calentamiento en [°C/min]

#### 4.2.2. Ejecución del proceso de pirólisis

La ejecución de las combinaciones obtenidas en el diseño de experimentos  $2^2$  para la obtención del bioaceite, se llevó a cabo en un reactor de pirólisis ubicado en el laboratorio 314 de combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Para el montaje de los 12 experimentos, se contó con una capacidad de muestra de biomasa de rastrojo de piña de aproximadamente  $10 \pm 0.0254$  gramos, debido a que está es la masa asociada al volumen del equipo de pirólisis.

Para el montaje previo a la realización de los experimentos, los instrumentos utilizados (Erlenmeyer, condensador y porta muestras) fueron pesados en la balanza Pioneer para obtener el valor de su peso antes del proceso de pirólisis.

El procedimiento realizado durante el montaje del reactor consta de:

1. Ubicar la muestra de biomasa en el porta muestras e introducirlo en el reactor.
2. Abrir el paso constante de flujo de nitrógeno de 150 ml/min, a una presión de 1 bar durante aproximadamente 15 minutos para crear una atmósfera inerte dentro del horno. A su vez, el nitrógeno actúa como gas de arrastre para los gases y vapores que se generan del proceso y sean llevados hasta la unidad condensadora.
3. Ubicar los instrumentos de condensación y recolección del bioaceite en la plataforma del reactor. El condensador utilizado fue un condensador de tubos concéntricos a contra flujo, el

fluido de enfriamiento fue agua a temperatura ambiente, la cual, fue impulsada por un sistema de bombeo.

4. Configurar el reactor con las condiciones de operación correspondientes al experimento a realizar e iniciar el proceso.

La configuración y control del reactor se realiza por medio de un control PID, uno de los parámetros es el tiempo de calentamiento del horno, el cual se calcula mediante la siguiente expresión:

$$T_c = \frac{T_p - T_h}{V_c} \quad (5)$$

Donde:

T<sub>c</sub> = Temperatura de calentamiento.

T<sub>p</sub> = Temperatura de proceso.

T<sub>h</sub> = Temperatura del horno.

V<sub>c</sub> = Velocidad de calentamiento.

Dada la culminación del proceso de pirólisis, se realiza el desmontaje del reactor, iniciando con el cierre del flujo de nitrógeno y el desmontaje de los instrumentos de condensación y recolección para posteriormente ser pesados y obtener el valor de estos. Los datos obtenidos a partir de la diferencia del peso de los instrumentos fueron utilizados para conocer la cantidad de bioaceite y biocarbón producidos en cada experimento, el valor de la fracción gaseosa generada durante los experimentos fue obtenida por medio de la diferencia del 100% de productos esperados durante el desarrollo de proceso de pirólisis menos la suma de la fracción líquida y la fracción sólida obtenida.

#### 4.2.3. *Cuantificación de resultados*

Los resultados obtenidos de la cantidad de aceite recolectada en el condensador y el Erlenmeyer, así como la cantidad de carbón en el reactor fueron registrados en un libro Excel, con el fin de conocer la cantidad de masa sólida, líquida y gaseosa, así como el rendimiento líquido de cada experimento, para posteriormente obtener los valores en porcentaje de fracción líquida, sólida y gaseosa.

#### **Figura 10**

*Sección de condensación y recolección del bioaceite*



#### **4.3. Fase 3 (evaluación de los productos resultantes del proceso)**

Una vez culminada la fase de experimentos y con los resultados de la variable de respuesta, se realiza el análisis del diseño factorial por medio del diagrama de Pareto de efectos estandarizados, grafica de efectos principales y gráfica de interacción.

Para dar continuidad a la evaluación del bioaceite obtenido, este fue sometido a diferentes pruebas para determinar algunas de sus características físico-químicas y evaluar su potencial como fuente de energía.

#### 4.3.1. Prueba de viscosidad

Para determinar la viscosidad del aceite obtenido, se utilizó un baño de viscosidad cinemática modelo KV3000 y un viscosímetro capilar del laboratorio ubicado en la sede UIS – Guatiguará. Este análisis se logra mediante la medición del tiempo que tarda en fluir un volumen definido del aceite a través de un capilar (viscosímetro) bajo la influencia de la gravedad, a una temperatura controlada para garantizar mediciones precisas. La prueba se realizó mediante la norma ASTM D445 que proporciona las directrices para realizar el procedimiento.

Para el cálculo de la viscosidad se realiza la siguiente ecuación:

$$\nu \text{ [cSt]} = \text{Constante del viscosímetro [cSt]} * \text{tiempo [s]} \quad (6)$$

La prueba fue realizada tres veces para asegurar la exactitud y reproducibilidad de los datos.

#### Figura 11

Equipo: (a) Viscosímetro, (b) Tubo capilar (Size 50 Z791)



(a)



(b)

#### 4.3.2. Prueba de densidad

Para determinar la densidad se utilizó un picnómetro calibrado siguiendo los lineamientos establecidos por la norma ASTM D1217, la cual regula el procedimiento para determinar la

densidad de líquidos a temperaturas específicas. Esta prueba se realizó en el laboratorio 314 de combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica y se calculó mediante la siguiente ecuación.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (7)$$

### Figura 12

*Picnómetro de 10 ml*



#### 4.3.3. Prueba de poder calorífico

El poder calorífico representa la cantidad de energía que puede liberar un combustible cuando se quema completamente. Para evaluar el potencial como biocombustible del aceite obtenido, se determinó el poder calorífico superior (PCS) de este aceite siguiendo el método estándar de la norma ASTM D240 mediante una bomba calorimétrica de oxígeno PARR modelo 6200 del laboratorio de la escuela de Ingeniería Química ubicado en la sede UIS – Guatiguará. Con el fin de obtener valores más precisos y reducir el margen de error, se realizaron 3 repeticiones de la prueba.

**Figura 13**

*Bomba calorimétrica de oxígeno (PARR modelo 6200)*



*Nota.* Referencia del equipo utilizado. Tomado de (Parr Instrument Company, 2025)

## 5. Análisis de resultados

### 5.1. Resultados primera fase

#### 5.1.1. Análisis próximo de la evaluación inicial de la mezcla corona + cáscara de piña

Este análisis permitió evaluar la composición de la mezcla en cuanto a humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo como se muestra en la tabla 2.

**Tabla 2**

*Resultados del análisis próximo realizado a la mezcla corona + cáscara*

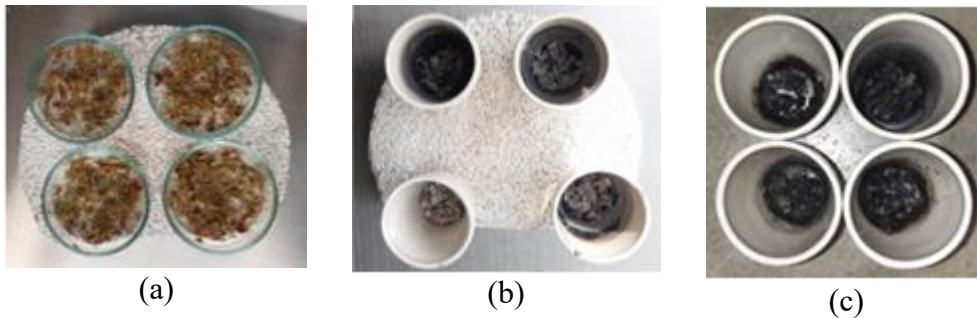
<b>Parámetro</b>	<b>Resultado (%)</b>
Humedad	80,1607
Materia Volátil	16,4646
Cenizas	0,8722
Carbono fijo	2,5026
<b>Total</b>	<b>100</b>

**Figura 14**

*Mezcla de cáscara + corona de piña*

**Figura 15**

*Análisis próximo: (a) rastrojo después de la prueba de humedad, (b) rastrojo después de la prueba de cenizas, (c) rastrojo después de la prueba de volátiles*



Los resultados obtenidos mostraron un alto porcentaje de humedad en la mezcla, este es un valor de consideración, debido a que cuanto mayor sea la cantidad de humedad presente en la biomasa se tendrán mayores complicaciones en el tratamiento, ya que un porcentaje superior al 20% de humedad puede afectar la eficiencia térmica del proceso de pirólisis y aumentar los costos energéticos del secado previo, por esto, se decidió trabajar únicamente con la corona de la piña.

El análisis próximo de la corona de piña también arrojó un alto porcentaje de humedad como se muestra en la tabla 3, sin embargo, se optó por desarrollar este estudio con la corona debido a su facilidad de manipulación, homogeneidad en la composición de la biomasa y menor contenido de impurezas que la cáscara.

**Tabla 3***Resultados del análisis próximo de la corona de piña*

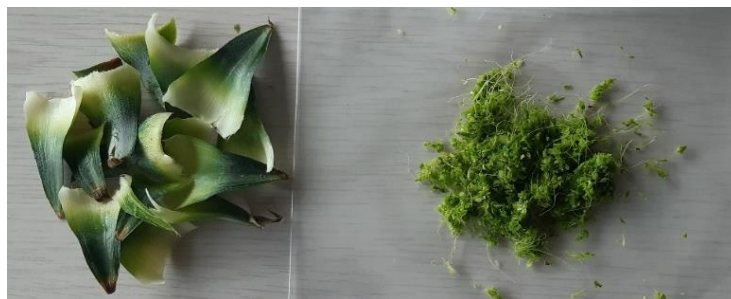
<b>Parámetro</b>	<b>Resultado (%)</b>
Humedad	75,2365
Materia Volátil	20,5367
Cenizas	0,7871
Carbono fijo	3,4397
<b>Total</b>	<b>100</b>

**5.1.2. Análisis próximo de la biomasa de trabajo**

Los resultados obtenidos del análisis próximo de la corona de piña previamente secada se muestran a continuación en la tabla 4.

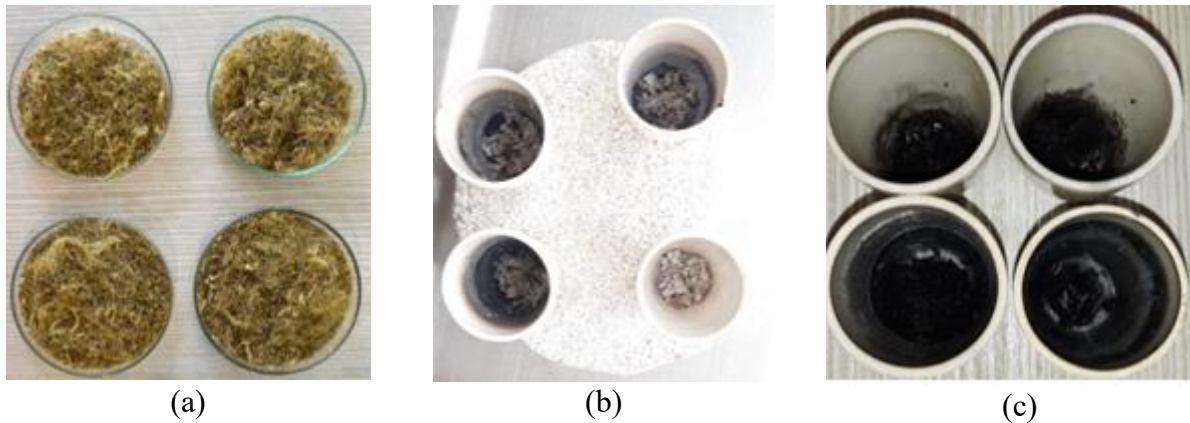
**Tabla 4***Resultados del análisis próximo para la biomasa de trabajo*

<b>Parámetro</b>	<b>Resultado (%)</b>
Humedad	8,1151
Material Volátil	69,857
Cenizas	5,5274
Carbono fijo	16,5005
<b>Total</b>	<b>100</b>

**Figura 16***Corona de piña antes y después de su trituración*

**Figura 17**

*Análisis próximo: (a) corona de piña después de la prueba de humedad, (b) corona de piña después de la prueba de cenizas, (c) corona de piña después de la prueba de volátiles*



Estos porcentajes nos indican que la corona de piña posee un alto contenido de material volátil, lo cual, lo hace adecuado para la producción de bioaceite, debido a que el material volátil incluye compuestos orgánicos que, al calentarse se liberan en forma de gases y vapores los cuales se condensan y se obtiene bioaceite (Viltres & Alarcón, 2022). Así mismo, el bajo contenido de cenizas indica que hay una menor formación de residuos sólidos inorgánicos.

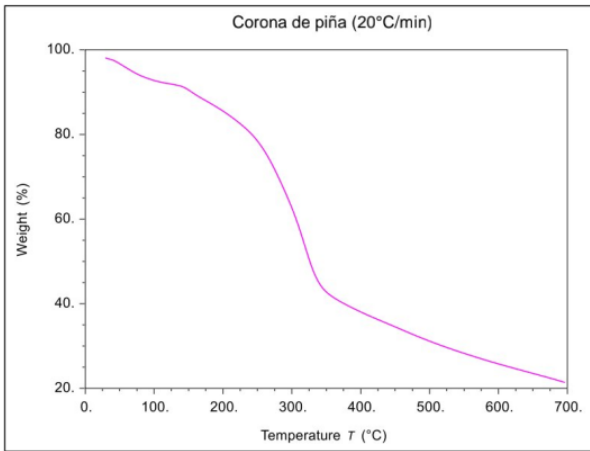
**5.1.3. Análisis TGA**

Como resultado del análisis TGA realizado a la corona de piña, se obtuvieron curvas representativas en las cuales se observa el comportamiento en el proceso descomposición mediante la pérdida de masa y liberación de sus componentes.

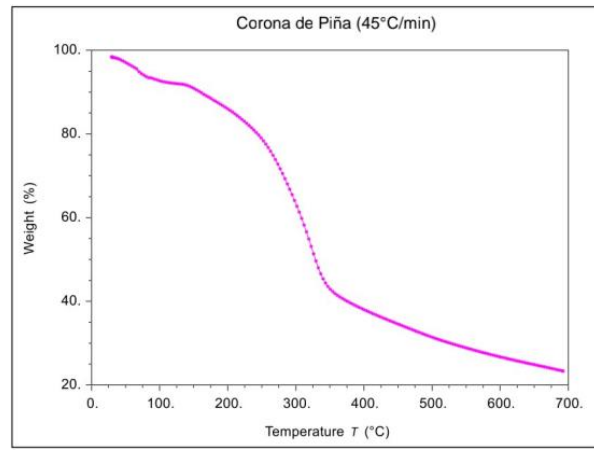
Las transiciones del proceso para cada taza de calentamiento se presentan en las siguientes curvas:

**Figura 18**

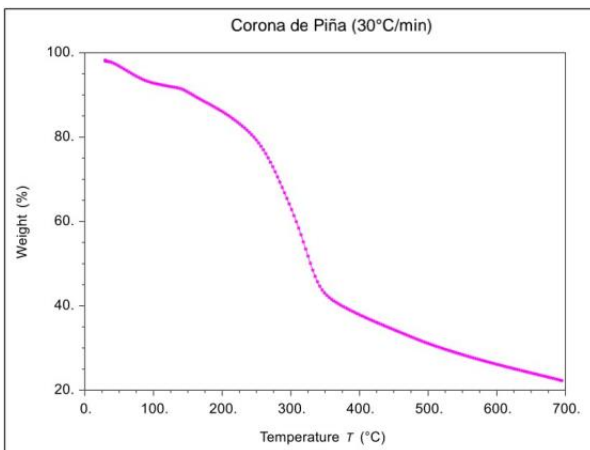
*Termogravimetría en atmosfera de nitrógeno: (a) corona de piña a 20°C/min, (b) corona de piña a 30°C/min, (c) corona de piña a 45°C/min, (d) corona de piña a 60°C/min*



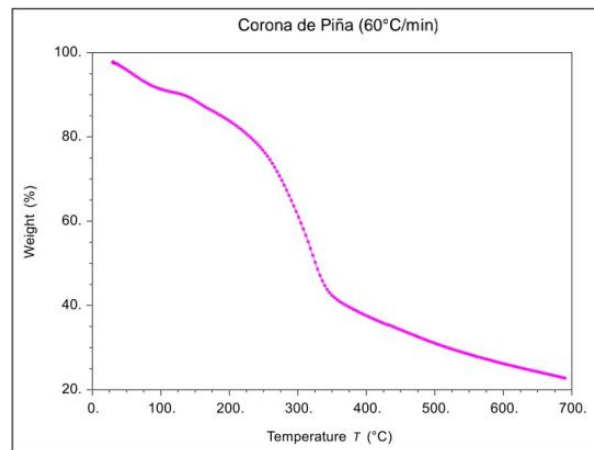
(a)



(c)



(b)



(d)

En general, las cuatro curvas presentan un comportamiento similar en la descomposición de la biomasa, evidenciándose tres fases en el proceso, las cuales se describen de la siguiente manera:

**Primera etapa:** En esta etapa se observa una ligera disminución del peso, lo cual indica la pérdida de masa debido a la evaporación y eliminación de la humedad y la liberación de los compuestos volátiles ligeros que contiene la corona de piña.

De acuerdo con las gráficas, esta fase comienza alrededor de los 30°C y termina cuando la temperatura es aproximadamente 150°C.

**Segunda etapa:** A diferencia de la primera etapa, en esta segunda se observa una pendiente negativa más pronunciada sin llegar a caer de manera abrupta inmediatamente después de los 150°C hasta aproximadamente los 250°C; en este rango se da la degradación de la hemicelulosa generando compuestos volátiles fáciles de condensar. Seguidamente, continúa la pérdida de masa a un ritmo más acelerado hasta los 350°C, siendo está la zona de mayor liberación de compuestos volátiles debido a que en esta zona de temperaturas se da la degradación de la celulosa, por lo cual, se observa una pendiente descendente muy pronunciada. Esta zona es clave para determinar las temperaturas del proceso debido a que es ahí donde se liberan la mayor cantidad de volátiles y se genera la descomposición de los componentes orgánicos de la muestra. (Manals et al., 2011)

**Tercera etapa:** En este proceso se puede observar un aplanamiento gradual de la curva, lo cual indica una pérdida de masa más lenta debido a que comienza la descomposición de la lignina la cual es más resistente a la degradación térmica y genera una gran cantidad de residuos sólidos (carbón fijo) y favorece a la formación de cenizas. (Manals et al., 2011)

De acuerdo con el análisis realizado y teniendo en cuenta que se busca priorizar la formación de bioaceite, las temperaturas a las cuales se realizaron las pruebas preliminares fueron: 450, 500 y 550°C; los valores de estas temperaturas se toman mayor a 350°C para aprovechar la totalidad de la liberación de los volátiles y no mayores a 550°C para evitar la descomposición de la lignina. Además, teniendo en cuenta el proceso de pirólisis rápida y las especificaciones operacionales del reactor, las velocidades de calentamiento con las que se realizaron las pruebas preliminares, son las velocidades establecidas en las pruebas de TGA: 30, 45 y 60 °C/min.

**Tabla 5***Valores seleccionados para realizar las pruebas preliminares*

Variable	Valor
Temperatura [°C]	450
	500
	550
Velocidad de calentamiento [°C/min]	30
	45
	60

**5.1.4. Pruebas preliminares**

Se realizaron nueve pruebas preliminares con valores de tasas de calentamiento y temperaturas seleccionadas de acuerdo con el análisis TGA y las especificaciones operacionales del reactor en operación, estas variables fueron evaluadas de forma aleatoria y combinada.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.

**Tabla 6***Resultados obtenidos de las pruebas preliminares*

Prueba	Temperatura [°C]	Velocidad de calentamiento [°C/min]	Masa [gr]	Bio-oil (%)	Carbón (%)	Gases (%)
1	450	30	10,0275	42,36%	28,28%	29,35%
2	500	30	10,041	47,84%	26,62%	25,54%
3	550	30	10,026	46,27%	24,51%	29,22%
4	450	45	10,0975	44,66%	26,02%	29,32%
5	500	45	10,0919	48,72%	21,25%	30,03%
6	550	45	10,053	49,32%	22,43%	28,25%
7	450	60	10,0434	44,76%	26,47%	28,77%
8	500	60	10,0573	52,20%	20,34%	27,46%
9	550	60	10,0478	51,94%	20,05%	28,01%

De acuerdo con la tabla 6, se observó que las pruebas realizadas con las combinaciones de temperatura a 500 y 550°C, junto con las tasas de calentamiento de 45 y 60°C/min, fueron los parámetros con los que se obtuvieron mejores resultados en cuanto a la fracción líquida. Por esto,

los cuatro parámetros anteriores son las variables operacionales que se evaluaron para el objetivo de este estudio.

**Tabla 7**

*Variables operaciones seleccionadas para realizar las pruebas de pirólisis*

Variable	Valor
Temperatura [°C]	500
	550
Velocidad de calentamiento [°C/min]	45
	60

## 5.2. Resultados segunda fase

### 5.2.1. Resultado experimental del proceso de pirólisis

El modelo a seguir para la realización de los experimentos con las combinaciones de las variables se realizó de manera aleatoria evitando sesgos y asegurando la validez de los resultados, ya que se minimiza el impacto de los factores no controlados (ruido experimental) como variaciones existentes en la composición de la biomasa, la humedad, temperatura ambiente del espacio utilizado para la realización de las pruebas y la posible existencia de fluctuaciones en el flujo de gas o de presión.

En la tabla 8 se muestran los resultados obtenidos en porcentaje de fracción líquida, sólida y gaseosa, resultado de la culminación de la fase de desarrollo de experimentos. Además, se muestra la cantidad de biomasa utilizada durante el proceso de pirólisis en cada experimento realizado, donde, según los datos obtenidos de fracción líquida las pruebas con mayor rendimiento para la obtención de bioaceite fueron las pruebas 1, 9 y 12 dado que el porcentaje de fracción líquida obtenido en estas pruebas en promedio es de 48,5533%.

Las fracciones líquidas obtenidas por las combinaciones de temperaturas y velocidad de calentamiento de 550°C a 45°C/min, 550°C a 60°C/min y 500°C a 45°C/min, fueron respectivamente: 46,62%, 46,45% y 45,60%.

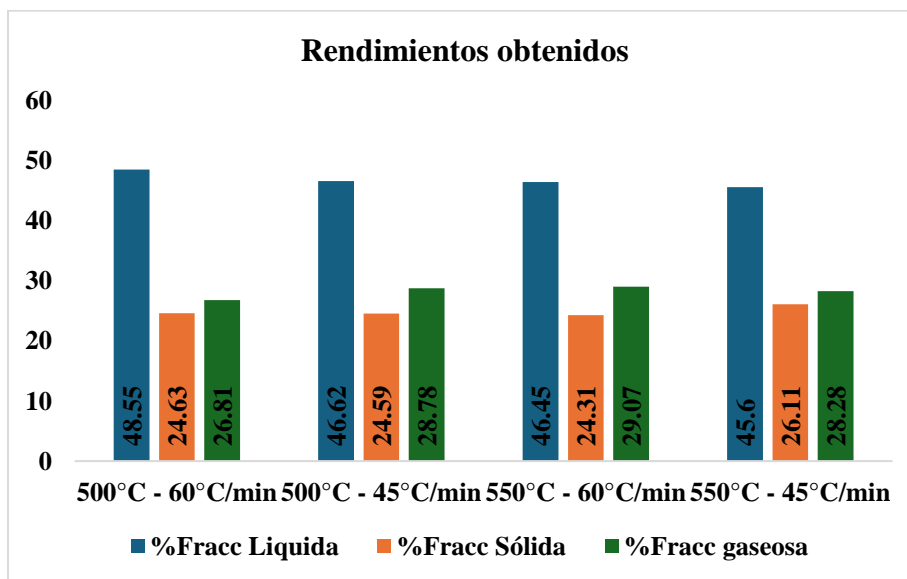
**Tabla 8**

*Resultados del proceso de pirólisis en términos del rendimiento obtenido*

Prueba	Temperatura [°C]	Velocidad de calentamiento [°C/min]	Masa [gr]	%Fracc. Líquida	%Fracc. Sólida	%Fracc. Gaseosa
1	500	60	10,0148	48,27%	23,74%	27,99%
2	550	45	10,0462	46,18%	23,59%	30,23%
3	550	60	10,0363	45,90%	23,61%	30,14%
4	550	60	10,0448	47,22%	24,63%	28,15%
5	550	60	10,0117	46,23%	24,69%	28,92%
6	550	45	10,0382	47,49%	25,03%	27,48%
7	550	45	10,0278	46,19%	25,16%	28,65%
8	500	45	10,0636	44,53%	26,36%	29,11%
9	500	60	10,0569	48,66%	24,58%	26,76%
10	500	45	10,0162	45,25%	25,96%	28,79%
11	500	45	10,0597	47,03%	26,02%	26,94%
12	500	60	10,0108	48,73%	25,59%	25,68%

**Figura 19**

*Rendimientos obtenidos*



Las condiciones de operación presentes en las pruebas con mayor rendimiento de la fracción líquida corresponden a una temperatura de 500°C y a una velocidad de calentamiento de 60°C/min. La inclinación hacia un mayor aprovechamiento de la biomasa de corona de piña en el proceso de pirólisis de acuerdo con el análisis de los resultados obtenidos netamente en el desarrollo de la fase experimental, muestra que este aprovechamiento se da cuando la tasa de velocidad de calentamiento es mayor, favoreciendo el proceso de pirólisis rápida y la descomposición de la biomasa asegurando una conversión rápida de ésta sin sobrecalentar los productos volátiles, aprovechando la obtención de bioaceite y la generación de un menor contenido de residuos sólidos en el proceso; el valor de temperatura a 500°C permite alcanzar un punto óptimo donde la celulosa, hemicelulosa y lignina generan una mayor cantidad de productos volátiles que por medio del proceso de descomposición dado en la pirólisis son convertidos en gases condensables, aprovechando la generación del producto en estudio.

### **5.3. Resultados tercera fase**

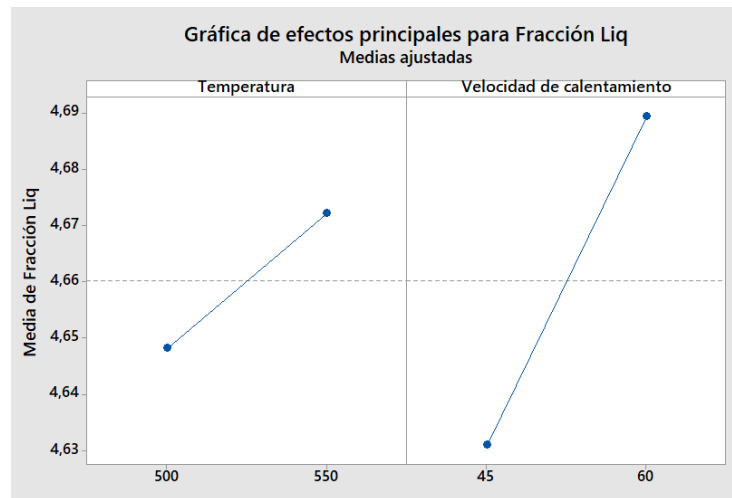
En base a la variable de respuesta obtenida durante el desarrollo del diseño de experimentos, se generan las siguientes gráficas y diagrama para el análisis de la incidencia e interacción de los factores en estudio de manera gráfica, para una mejor interpretación de los resultados.

#### ***5.3.1. Análisis gráfica de efectos principales para fracción líquida***

En la figura 20. Se observa la influencia que tiene cada una de las variables en sus dos niveles en la producción de bioaceite.

**Figura 20**

*Efectos principales para la fracción líquida*



De acuerdo con la gráfica, se puede observar que las dos variables evaluadas inciden positivamente, una mayor temperatura y velocidad de calentamiento favorecen la producción de bioaceite. Si se tiene en cuenta la influencia de cada variable por separado el valor de la temperatura que incentiva una mayor producción de bioaceite es la temperatura de 550°C, esto debido a que a mayores temperaturas los materiales orgánicos se descomponen de manera más efectiva generando una conversión más completa de los volátiles, mientras que en temperaturas más bajas la biomasa no se descompone completamente y se limita la liberación de compuestos volátiles.

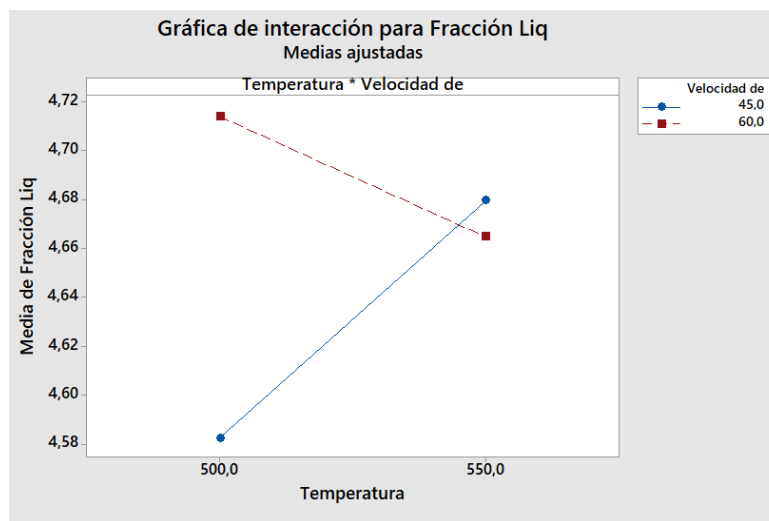
Para la otra variable evaluada en el proceso, se observa que cuanto mayor sea la tasa de calentamiento mejor será para el proceso cuando se quiere priorizar la producción de aceite, esto debido a que velocidades de calentamiento mayores garantizan que los compuestos volátiles tengan menos tiempo de convertirse en gases no condensables.

### 5.3.2. Análisis gráfica de interacción para fracción líquida

La figura 21 muestra la interacción entre las variables en cada uno de sus niveles para la obtención de fracción líquida.

#### Figura 21

*Interacción entre las variables en sus niveles altos y bajos*



La interacción de la temperatura en sus dos niveles a una velocidad de 45°C/min permite observar que la generación de fracción líquida aumenta, en contraste con la disminución de la producción de bioaceite cuando se analiza la pendiente de los dos niveles de temperatura a una velocidad de calentamiento de 60°C/min. Este resultado se presenta debido al comportamiento de degradación de la biomasa, ya que los rangos de temperatura de degradación permiten observar que la corona de paja presenta una liberación completa de sus volátiles alrededor de los 500°C, por tanto esta temperatura es fundamental en el análisis; cuando se presenta la relación de una temperatura a 500°C y una velocidad de 45°C/min la generación de fracción líquida es poca, dado el tiempo que la biomasa permanece en temperaturas intermedias debido a la velocidad de calentamiento; esta relación temperatura – velocidad favorece la generación de biocarbón, como se evidencia en los resultados obtenidos en el desarrollo de los experimentos .

Este comportamiento se relaciona con la combinación de una alta temperatura y velocidad de calentamiento ( $550^{\circ}\text{C} - 60^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ), ya que se superan los rangos de temperatura de liberación de los compuestos de interés y debido a la alta velocidad, se genera un aumento de la producción de gases reduciendo la cantidad de fracción líquida.

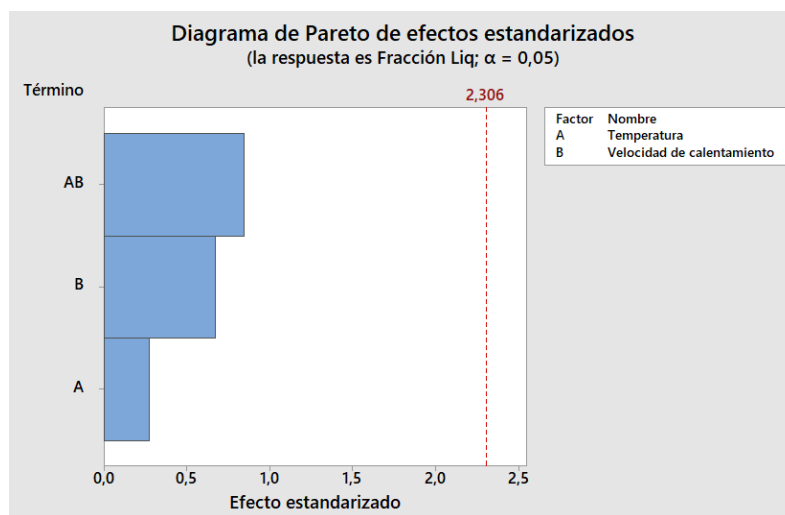
La representación no paralela entre las rectas de pendiente negativa y positiva generadas por los niveles altos y bajos de las variables, indica una alta interacción entre estos factores. De este resultado se interpreta que la manera en que la temperatura afecta la obtención de fracción líquida depende en gran medida de la velocidad de calentamiento (Support Minitab, 2024).

### 5.3.3. Análisis diagrama de Pareto de efectos estandarizados

La figura 22 muestra el diagrama de Pareto de efectos estandarizados evaluados en el diseño de experimentos, donde se puede evidenciar la incidencia de cada una de las variables, y la interacción sinérgica entre estas dos.

#### Figura 22

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados



De acuerdo con el análisis del diagrama de Pareto, la interacción del factor que más se acerca al umbral de significancia estadística es considerado como un influyente importante en los resultados de la variable de respuesta, para el análisis de la temperatura y la velocidad de calentamiento la incidencia de estos factores no superan el umbral de significancia estadística, entendiendo así que de acuerdo con las condiciones de desarrollo de los experimentos estos factores presentan un impacto estadísticamente bajo por sí solos en la obtención de fracción líquida. Sin embargo, de acuerdo con la interpretación de los resultados, la combinación de los factores, (Interacción AB: Temperatura-Velocidad de calentamiento) es el efecto más influyente en la producción de bioaceite, dado que ambos factores actúan de manera conjunta sobre la descomposición térmica de la biomasa, presentándose como un punto en equilibrio para maximizar la fracción líquida. La temperatura influye en la cantidad de compuestos volátiles generados mientras que la velocidad de calentamiento influye en si estos compuestos se convierten en bioaceite o se generan gases del proceso, relacionando así el punto de descomposición de biomasa y la velocidad de la descomposición.

Evaluando solamente el factor de velocidad de calentamiento, este influye en el control de la descomposición térmica de la biomasa, ya que esta permite que la biomasa alcance rápidamente la temperatura de reacción evitando que los compuestos permanezcan mucho tiempo en temperaturas intermedias; la temperatura es considerada el factor menos influyente dado que cuando el proceso de descomposición llega al rango de temperatura necesaria, aumentar más este factor no mejoraría significativamente la producción de bioaceite.

El efecto de la temperatura y la velocidad de calentamiento sobre la obtención de bioaceite presentan menor incidencia cuando estas son evaluadas en el proceso de manera independiente, es decir manteniendo el valor de un factor constante y solamente variando el valor el otro. sin

embargo, la interacción de estas dos variables representa una mayor significancia al momento de realizar un proceso de pirólisis para la obtención de un bioaceite, es decir que durante la realización de un proceso de pirólisis rápida es más conveniente utilizar una alta velocidad de calentamiento a un nivel de temperatura que no supere los rangos de temperatura de la descomposición de la biomasa.

#### ***5.3.4. Resultado del cálculo de la viscosidad cinemática***

La prueba fue realizada conforme a la norma, en un baño de aceite a 40°C. Se tomo registro del tiempo de flujo de la muestra y se calculó la viscosidad cinemática en (cST). La selección de 40°C como temperatura de trabajo es debido a que esta condición es utilizada para caracterizar aceites combustibles y/o lubricantes en condiciones de operación ambiente o moderada.

### **Figura 23**

#### *Prueba de viscosidad*



Los datos obtenidos de las tres pruebas se muestran en la tabla 9.

**Tabla 9***Datos de medición de viscosidad de las tres pruebas realizadas*

Prueba	Constante viscosímetro [cSt]	Tiempo [seg]	Viscosidad [cSt]	Promedio
1		301	1,281357	
2	0,004257	299	1,272843	1,279938
3		302	1,285614	

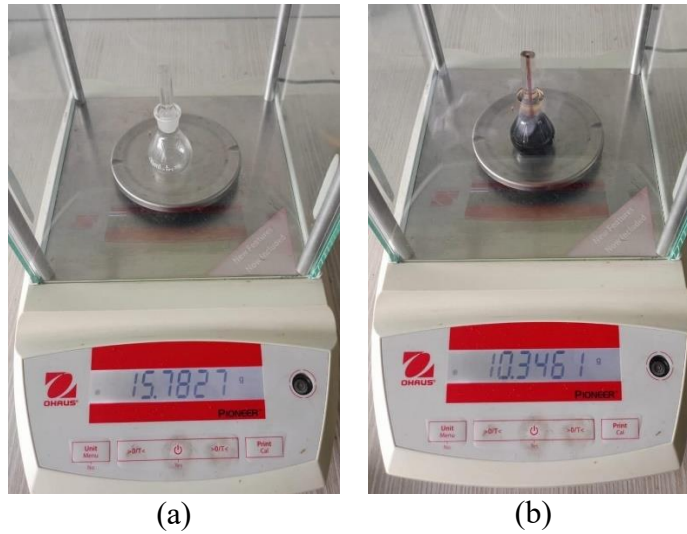
Una vez terminada la prueba se procede a realizar el cálculo que permite determinar el valor asociado a la viscosidad, para lo cual se obtuvo un valor de 1.279938 cST. Esta viscosidad es superior a la del agua, lo cual indica que es un fluido menos ligero o con menor facilidad para fluir. Este comportamiento tiene coherencia dado que, en la composición de los aceites dominan compuestos orgánicos con estructuras más complejas y de mayor peso molecular que ocasionan resistencia al flujo.

### 5.3.5. Resultado del cálculo de la densidad.

Para esta prueba, es necesario registrar el peso del picnómetro totalmente limpio y vacío para posteriormente depositar 10 ml de aceite y volver a registrar el peso, y por medio del cálculo de densidad obtener el valor correspondiente.

### Figura 24

*Prueba con el picnómetro: (a) peso en gramos del picnómetro, (b) masa en gramos de aceite depositado en el picnómetro*



El resultado de densidad obtenido fue:

$$\rho = \frac{10,3461 \text{ gr}}{10 \text{ ml}} = 1,03461 \frac{\text{gr}}{\text{ml}} = 1034.61 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

### 5.3.6. Resultado del cálculo del poder calorífico

En la tabla 10, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas de poder calorífico. Estas pruebas se realizaron con el objetivo de determinar el poder calorífico superior (PCS) para evaluar su aplicabilidad como combustible.

**Tabla 10**

*Poder calorífico del aceite*

Prueba	Poder calorífico [MJ/kg]
1	22,0234
2	22,1854
3	21,9017

De acuerdo con los resultados presentados, el poder calorífico del aceite obtenido es  $22 \pm 0.1423$  MJ/Kg. Este valor es consistente con los valores encontrados en la literatura para biocombustibles obtenidos de materiales lignocelulósicos.

Un estudio realizado por (Viltres & Alarcón, 2022) a la mezcla de Capín de Elefante con paja de caña de azúcar donde se caracterizó el bioaceite obtenido de la mezcla mediante pirólisis rápida, mostró el poder calorífico de dos biomásas sin procesar, del Capín de elefante (16,8 MJ/Kg), de la paja de caña de azúcar (17,35 MJ/Kg) y del aceite obtenido de esta mezcla, el cual arrojó un valor de 20,20MJ/Kg. La comparación de estos valores con el valor del poder calorífico obtenido de la corona de piña nos permite observar que el proceso de pirólisis incrementa el poder calorífico con respecto a las biomásas sin procesar, sin embargo, al comparar este valor energético con combustibles de origen fósiles como el diésel, el cual según (Viltres & Alarcón, 2022) es de aproximadamente 42 MJ/Kg, se evidencia que es casi la mitad del poder calórico de este combustible, por lo cual, no es ideal usarlo directamente como sustituto de los combustibles fósiles sin un procesamiento previo, dado que, su valor energético sigue siendo bajo en comparación con estos combustibles.

Como señala (Viltres & Alarcón, 2022), los aceites obtenidos por el proceso de pirólisis tienen oxígeno en su composición, lo cual disminuye la energía útil del aceite porque esta parcialmente oxidado, por esto, realizar un proceso de hidro desoxigenación y craqueo térmico contribuiría al aumento del potencial energético y lo convertiría en un combustible alternativo con potencial.

## 6. Conclusiones

- El análisis próximo realizado a la corona de piña arrojó un alto contenido de humedad del 75,2365%, desfavoreciendo la descomposición térmica de la biomasa en el proceso de pirólisis. Dado que la evaporación del agua consume calor latente, el proceso descomposición de la biomasa se ralentiza y se requiere de un mayor consumo energético para evaporar el contenido humedad reduciendo la eficiencia térmica del proceso y aumentando los costos operativos.
- Se evidenció que la prueba con mayor rendimiento líquido se dio a una temperatura de 500°C y una velocidad de calentamiento de 60 °C/min alcanzando un rendimiento del 48,5533%. Estas condiciones de operación indican que son favorables para la producción de bioaceite a base de corona de piña.
- La producción de bioaceite estuvo influenciada principalmente por la combinación de los factores A y B, destacando una interacción sinérgica entre la temperatura de pirólisis y la velocidad de calentamiento. Esta relación favoreció la descomposición térmica de los componentes orgánicos, favoreciendo así el proceso de conversión de biomasa en bioaceite.
- El valor energético de  $22 \pm 0.1423$  MJ/Kg del aceite obtenido es acorde a los resultados de la literatura en estudios similares, siendo este aproximadamente la mitad del poder calorífico del diésel. Este valor sugiere que, aunque presenta un poder calorífico inferior a los combustibles de origen fósil, puede ser aprovechado como una fuente de energía renovable.

**Referencias bibliográficas**

- Agricultura, M. d. (22 de Junio de 2018). *MinAgricultura*. Obtenido de <https://www.minagricultura.gov.co/noticias/Paginas/Producci%C3%B3n-de-pi%C3%B1a-llegar%C3%ADa-a-m%C3%A1s-950-mil-toneladas-en-2018,-calcula-MinAgricultura-.aspx#:~:text=La%20zona%20de%20Santander%20y,31%2C5%20toneladas%20por%20>
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasificacion and Pyrolysis - Practical Desing*. AP. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/book/9780123749888/biomass-gasification-and-pyrolysis#book-info>
- Big, A. (2021). *Atlas Big*. Obtenido de <https://www.atlasbig.com/es-es/paises-por-produccion-de-pina>
- córdoba Pérez, M., & Molina córdoba, M. (2014). DETERMINACIÓN DEL EFECTO DE LA CONCENTRACIÓN DE LA CELULOSA, CELOBIASA Y DE NaOH EN LA HIDRÓLISIS PARA LA PRODUCCIÓN DE ETANOL A PARTIR DEL RASTROJO DE LA PIÑA. 35. Obtenido de [https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/11767/pdf\\_30](https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/view/11767/pdf_30)
- Esquivel Alfaro, M., Araya chavarría , K., Rojas, R., Ramírez Amador, K., Rojas , O., Sáenz Arce, G., . . . Sulbarán Rangel, B. (Junio de 2024). Nanofibrilación de celulosa del rastrojo dela piña (Ananas comosus) con oxidación TEMPO y procesos mecánicos . 23. Obtenido de [https://www.researchgate.net/profile/Belkis-Sulbaran/publication/383522443\\_Nanofibrilacion\\_de\\_celulosa\\_del\\_rastrojo\\_de\\_la\\_pina\\_Ananas\\_comosus\\_con\\_oxidacion\\_TEMPO\\_y\\_procesos\\_mecanicos/links/66d376b12390e50b2c245881/Nanofibrilacion-de-celulosa-del-rastrojo-](https://www.researchgate.net/profile/Belkis-Sulbaran/publication/383522443_Nanofibrilacion_de_celulosa_del_rastrojo_de_la_pina_Ananas_comosus_con_oxidacion_TEMPO_y_procesos_mecanicos/links/66d376b12390e50b2c245881/Nanofibrilacion-de-celulosa-del-rastrojo-)
- Fonseca, F. V. (Septiembre de 2013). Pirólisis de los residuos lignocelulósicos del henequén para la obtencion de bioaceite. 115. Obtenido de [https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/680/1/PCER\\_M\\_Tesis\\_2013\\_Flor\\_Virginia\\_Fonseca\\_Prieto.pdf](https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/680/1/PCER_M_Tesis_2013_Flor_Virginia_Fonseca_Prieto.pdf)
- Fossore , A., Marengo , M., Santoro, V., Grillo, G., Oliaro, S., cravotto, G., . . . Adinolfi, S. (11 de Julio de 2023). Extracción y caracterización de bromelina del corazón de piña: una estrategia para la valorización de los residuos de piña. doi:<https://doi.org/10.3390/pr11072064>
- Granados Pérez , W., & Aguillón Mayorca, D. M. (Junio de 2019). cadena de la Piña. Obtenido de cadena de la piña: <https://sioc.minagricultura.gov.co/Pasifloras/Documentos/2019-06-30%20Cifras%20Sectoriales%20PI%C3%91A.pdf>

- Jaramillo, P. V. (2022). Aprovechamiento energético de la cascara de pilña como biomasa para la obtención de bioetanol y bromelina como subproducto con ayuda del simulador aspen plus . pág. 56. Obtenido de [https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/18473/2022\\_Tesis\\_Jaramillo\\_Sierra\\_Paula.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/18473/2022_Tesis_Jaramillo_Sierra_Paula.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Kintek. (2024). *Kindletech*. Obtenido de <https://es.kindle-tech.com/faqs/what-is-the-effect-of-pyrolysis-temperature-on-bio-oil>
- Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa . *Revista de Química Pucp*. Obtenido de <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/5547/5543>
- Manals Cutiño, E., Penedo Medina, M., & Giralt Ortega , G. (Abril de 2011). Análisis termogravimétrico y térmico diferencial de diferentes biomásas vegetales. 11. Obtenido de <http://www.scielo.sld.cu/pdf/rtq/v31n2/rtq05211.pdf>
- Melo, D. A. (2021). Obtención de Bioaceites a través de co-pirólisis rápida de biomasa de eucalipto y masa. pág. 48. Obtenido de <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/19807/TRABAJO%20DE%20GRADO%20DANIELA%20MELO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Parr Instrument Company. (2025). *Calorimétrico Isoperibólico 6200*. Obtenido de Parr Instrument Company: <https://www.parrinst.com/es/products/oxygen-bomb-calorimeters/6200-isoperibol-calorimeter/>
- Rojas chaves, F. (2019). Evaluación del potencial de gasificación térmica del rastrojo. 202. Obtenido de [https://cedi.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/1659/34/IQ-8467.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://cedi.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/1659/34/IQ-8467.pdf?utm_source=chatgpt.com)
- Sarangi, P., Singh, A., Strivastava, R., & Gupta, V. (15 de Febrero de 2023). Recent Progress and Future Perspectives for Zero Agriculture Waste Technologies: Pineapple Waste as a Case Study. Obtenido de <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/4/3575>
- Support Minitab*. (2024). Obtenido de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/anova/how-to/interaction-plot/interpret-the-results/key-results/>
- TA INSTRUMENTS. (2016). *Discovery TGA 5500 [Fotografía]*. Obtenido de TA INSTRUMENTS: <https://www.tainstruments.com/tga-5500/>
- Urien Pinedo, A. (Septiembre de 2013). OBTENCIÓN DE BIOCARBONES Y BIOCOMBUSTIBLES MEDIANTE PIRÓLISIS DE BIOMASA RESIDUAL. *consejo superior de investigaciones científicas*. Obtenido de [https://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES\\_CENIM\\_CSIC.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/80225/1/BIOCARBONES_CENIM_CSIC.pdf)
- Vargas Buitrago, A. (2016). Estudio Técnico para la Valorización de Residuos Sólidos Vegetales provenientes de la Plaza de Mercado San Francisco de Bucaramanga. 139. Obtenido de

<https://repository.usta.edu.co/server/api/core/bitstreams/bc197d81-bda4-48ff-8e57-538fec7da142/content>

Viltres Rodríguez, R. A., & Alarcón Zayas, A. (Abril de 2022). Caracterización química del bioaceite de pirólisis rápida de biomasa. *Revista Cubana de Química*, 28. Obtenido de <http://www.scielo.sld.cu/pdf/ind/v34n1/2224-5421-ind-34-01-131.pdf>