

Análisis energético de biomasa residual vegetal mediante pirólisis y caracterización por
espectroscopía infrarroja FTIR-ATR

Quevin Sneider Robles Vera

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Adan Yovani León Bermúdez

Doctor en Ingeniería Química

Codirector

Emiliano Ariza León

Doctor en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingeniería Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería de Petróleos
Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A Dios, fuente de sabiduría y fortaleza, por guiarme en cada paso, darme claridad en los momentos de duda y ser mi sustento en este camino. Sin Tu amor y gracia, nada de esto sería posible.

A mi querida madre, cuyo amor incondicional, sacrificio y apoyo han sido mi mayor inspiración. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Este logro es también tuyo.

Al Dr. Adán Yovani León, mi director de tesis, por su paciencia, sabias enseñanzas y valiosa orientación. Su conocimiento y dedicación fueron fundamentales para culminar este trabajo.

A mis hermanas, por ser mi soporte emocional, mi motivación y mi alegría en los días más difíciles. Su cariño me impulsó a seguir adelante.

A mis amigos en especial a Jaime Medrano, compañeros de risas, desvelos y cafés infinitos. Gracias por estar ahí, por los ánimos y por hacer este camino más llevadero.

A todos los que, de una u otra forma, contribuyeron a que este sueño se hiciera realidad:
¡GRACIAS!

Quevin Sneider Robles Vera.

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Adán Yovani León, mi director de tesis, por su invaluable guía, paciencia y apoyo constante durante todo este proceso. Su conocimiento, dedicación y consejos fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de esta investigación.

A la Universidad Industrial de Santander UIS, por brindarme las herramientas académicas, los recursos y las oportunidades que hicieron posible mi formación profesional. Esta tesis de investigación se enmarca en los proyectos 4241 y 4616 de la Universidad Industrial de Santander. Gracias también a todos los profesores que, a lo largo de mi carrera, contribuyeron con su enseñanza y motivación.

Al Grupo de Laboratorio GIC, especialmente a mis compañeros y colegas, por su colaboración, discusiones enriquecedoras y el ambiente de trabajo que facilitó el avance de este proyecto. Cada sugerencia, ayuda técnica y momento compartido fue clave para el éxito de esta investigación.

A todas las personas que directa o indirectamente contribuyeron a la realización de esta tesis: familiares, amigos, compañeros de estudio y aquellos que, con sus palabras de aliento o pequeños gestos, me impulsaron a no rendirme.

Finalmente, a Dios, por darme la fuerza, sabiduría y perseverancia para alcanzar esta meta. Sin Su bendición, nada de esto habría sido posible.

Tabla de Contenido

Introducción	10
1 Planteamiento del problema.....	12
2 Alcance	13
3 Objetivos.....	15
3.1 Objetivo General.....	15
3.2 Objetivos Específicos.....	15
4 Justificación	16
5 Marco teórico	17
5.1 Pirolisis.....	17
5.2 Cuesco de Palma.....	18
5.3 Cascara de Arroz.....	20
5.4 Cascara de Mazorca	21
5.5 Cromatografía de gases	24
5.6 Espectroscopía infrarroja FTIR-ATR	25
5.7 Análisis Termogravimétrico (TGA)	25
5.8 Poder Calorífico.....	26
5.9 Composición lignocelulósica de la biomasa vegetal	27
5.9.1 Celulosa.....	27
5.9.2 Hemicelulosa.....	28
5.9.3 Lignina.....	28
6 Metodología	30
6.1 Tratamiento de la Biomasa.....	31
6.2 Procedimientos para la realización de la Pirólisis.....	33
6.3 Caracterización	35
6.3.1 Termogravimetría por TGA.....	35
6.3.2 Espectroscopía infrarroja FTIR-ATR.....	37
6.3.3 Cromatografía de gases	38
6.3.4 Poder Calorífico	40
7 Resultados	42
7.1 Características de los Subproductos del proceso de pirolisis	42
7.2 Rendimiento sub-Productos	42
7.3 Espectroscopía infrarroja	45
7.4 Análisis Termogravimétrico (TGA).....	55
7.5 Cromatografía de los gases.....	72
7.6 Poder Calorífico.....	78
7.7 Viabilidad económica del uso del gas de pirólisis.....	80
8 Conclusiones	84
9 Recomendaciones	85
Referencias Bibliográficas	86

Lista de Tablas

Tabla 1 Condiciones experimentales y resultados de pirólisis reportados en la literatura	18
Tabla 2 Condiciones experimentales y resultados de pirólisis reportados en la literatura	19
Tabla 3 Condiciones experimentales y resultados de pirólisis reportados en la literatura con cascara de arroz	21
Tabla 4 Condiciones experimentales y resultados de pirólisis reportados en la literatura con cascara de mazorca	23
Tabla 5 Datos de las tres Biomosas	43
Tabla 6 Rendimiento Biomasa	43
Tabla 7 Espectroscopía infrarroja FTIR-ATR	48
Tabla 8 Intervalos de degradación térmica de la cascarilla de arroz mediante TGA	58
Tabla 9 Intervalos de degradación térmica del cuesco de palma mediante TGA	60
Tabla 10 Intervalos de degradación térmica de la biomasa de maíz mediante TGA	61
Tabla 11 Intervalos de degradación térmica de los líquidos de la cascarilla de arroz mediante TGA	63
Tabla 12 Intervalos de degradación térmica de los líquidos del cuesco de palma mediante TGA	65
Tabla 13 Intervalos de degradación térmica de los líquidos de la biomasa de maíz mediante TGA	66
Tabla 14 Intervalos de degradación térmica del alquitrán de la cascarilla de arroz mediante TGA	68
Tabla 15 Intervalos de degradación térmica del alquitrán del cuesco de palma mediante TG	70

Tabla 16 Intervalos de degradación térmica del alquitrán de biomasa de maíz mediante TGA	71
Tabla 17 Análisis composicional por cromatografía de los gases.....	73
Tabla 18 Poder calorífico de la mezcla de gases (PCImezcla) del Cuesco de Palma	75
Tabla 19 Poder calorífico de la mezcla de gases (PCImezcla) de la biomasa de maíz	75
Tabla 20 Poder calorífico de la mezcla de gases (PCImezcla) de la cascarilla de Arroz	76
Tabla 21 Resumen general de resultados del PCI	76
Tabla 22 Energía química en el gas por kg de biomasa.....	77
Tabla 23 Energía eléctrica por kg de biomasa	77
Tabla 24 Electricidad anual generada y su potencia.....	77
Tabla 25 Valores de poder calorífico.....	78
Tabla 26 Inversión de CAPEX.....	80
Tabla 27 Beneficio fiscal total NETO	81
Tabla 28 CAPEX neto desembolsado (año 0).....	81
Tabla 29 Ingresos, costos y margen operativo del proceso de pirolisis de biomasa residual vegetal.....	82
Tabla 30 Indicadores financieros.....	82

Lista de Figuras

Figura 1 Molécula modelo representativa de la Celulosa.....	27
Figura 2 Molécula modelo representativa de la Hemicelulosa	28
Figura 3 Molécula modelo representativa de la Lignina	29
Figura 4 Diagrama de la metodología para la realización del proyecto	30
Figura 5 Cuesco de Palma usado en la Pirolisis.....	32
Figura 6 Cascara de Arroz usado en la Pirolisis	32
Figura 7 Cascara de Mazorca usado en la Pirolisis	33
Figura 8 Equipo Carbolite para el proceso de pirolisis	35
Figura 9 Equipo de termogravimetría TGA.....	37
Figura 10 Espectrómetro de Infrarrojo (nicolet summit x ftir spectrometer)	38
Figura 11 Cromatógrafo de gases (Agilent 8890).....	40
Figura 12 Bomba calorimétrica.....	41
Figura 13 Espectro de infrarrojo FTIR-ATR de Cuesco de Palma y sus productos	46
Figura 14 Espectro de infrarrojo FTIR-ATR de biomasa de maíz y sus productos.....	46
Figura 15 Espectro de infrarrojo FTIR-ATR de cascarilla de Arroz y sus productos.....	47
Figura 16 TGA de la cascarilla de arroz y sus productos	55
Figura 17 TGA de la biomasa del cuesco de palma y sus productos	56
Figura 18 TGA de la biomasa de maíz y sus productos	57

Resumen

Título: Análisis energético de biomasa residual vegetal mediante pirólisis y caracterización por espectroscopía infrarroja FTIR-ATR*

Autor: Quevin Sneider Robles Vera**

Palabras Clave: Cuesco de palma, cascara de arroz, cascara de mazorca, pirólisis, poder calorífico, cromatografía de gases y espectroscopía infrarroja FTIR-ATR.

Descripción: La presente investigación evalúa el aprovechamiento energético de biomasa residual vegetal de cuesco de palma, biomasa de maíz y cascarilla de arroz, mediante procesos termoquímicos de pirólisis en condiciones controladas de laboratorio. El objetivo principal fue analizar la conversión de estas materias primas en productos con valor energético: fracciones gaseosas, líquidas (bioaceite o alquitrán) y sólidas (biocarbón), con potencial aplicación en el sector energético e industrial. La metodología consistió en la selección de las biomasas a partir de revisión bibliográfica y su posterior procesamiento mediante pirólisis a escala experimental, alcanzando temperaturas máximas de 750 °C. Se evaluaron las condiciones operativas del proceso con el fin de determinar los rendimientos relativos de cada fracción.

Los productos obtenidos fueron caracterizados mediante técnicas analíticas como análisis termogravimétrico (TGA), cromatografía de gases (GC), espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y determinación del poder calorífico.

Los resultados evidenciaron diferencias en la distribución de productos según el tipo de biomasa, así como variaciones en la composición de los gases generados, los cuales presentaron contenidos relevantes de compuestos combustibles como metano y otros hidrocarburos ligeros. El análisis energético permitió estimar un adecuado poder calorífico en la fracción gaseosa, evidenciando una eficiencia de conversión favorable al proyectarse a escala industrial.

En conclusión, la pirólisis de cuesco de palma, biomasa de maíz, y cascarilla de arroz constituye una alternativa viable para la producción de combustibles alternativos, promoviendo la valorización de residuos agrícolas y el desarrollo de tecnologías limpias en el contexto energético colombiano.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos. Ingeniería de Petróleos. Director: Adan Yovani León Bermúdez, Ph.D. en Ingeniería Química. Codirector: Emiliano Ariza León, Ph.D. en Ingeniería Química.

Abstract

Title: Energetic Analysis of Residual Vegetable Biomass through Pyrolysis and Characterization by FTIR-ATR Spectroscopy*

Author: Quevin Sneider Robles Vera**

Key words: Palm kernel, rice husk, corn cob husk, pyrolysis, calorific value, gas chromatography, FTIR-ATR spectroscopy.

Description: The present research evaluates the energy valorization of residual plant biomass, specifically oil palm shell, corn cob husk, and rice husk, through thermochemical pyrolysis processes under controlled laboratory conditions. The main objective was to analyze the conversion of these raw materials into energy-rich products: gaseous, liquid (bio-oil or tar), and solid (biochar) fractions, with potential applications in the energy and industrial sectors.

The methodology involved selecting the biomass based on a literature review, followed by experimental-scale pyrolysis at temperatures up to 750 °C. Operating conditions were evaluated to determine the relative yields of each fraction. The obtained products were characterized using analytical techniques such as thermogravimetric analysis (TGA), gas chromatography (GC), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and calorific value determination.

The results showed differences in product distribution depending on the type of biomass, as well as variations in the composition of the generated gases, which contained significant amounts of combustible compounds such as methane and other light hydrocarbons.

The energy analysis indicated a suitable calorific value in the gaseous fraction, demonstrating favorable conversion efficiency when projected to an industrial scale. In conclusion, the pyrolysis of oil palm shell, corn cob husk, and rice husk represents a viable alternative for the production of alternative fuels, promoting the valorization of agricultural residues and the development of clean energy technologies within the Colombian context

* Degree Work

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos. Ingeniería de Petróleos. Director: Adan Yovani León Bermúdez, Ph.D. in Chemical Engineering. Codirector: Emiliano Ariza León, Ph.D. in Chemical Engineering.

Introducción

En las últimas décadas, la creciente preocupación por el impacto ambiental de las actividades humanas ha impulsado la búsqueda de alternativas sostenibles para la gestión de residuos y la producción de energía. En este contexto, los residuos agroindustriales han emergido como una fuente prometedora de materias primas para la síntesis de materiales y combustibles de alto valor agregado. Colombia, como país con una economía fuertemente ligada a la agricultura, genera grandes volúmenes de subproductos como el cuesco de palma, biomasa de maíz (biomasa lignocelulósica de tusa y hojas de la mazorca de maíz) y cascarilla de arroz, los cuales, si no son aprovechados adecuadamente, representan un desafío ambiental significativo. Sin embargo, estos residuos, debido a su composición rica en compuestos lignocelulósicos, tienen un potencial considerable para ser transformados en productos útiles, contribuyendo así a la economía circular y a la reducción del impacto ambiental.

El cuesco de palma, biomasa de maíz y la cascarilla de arroz son materiales abundantes en Colombia, dado el papel destacado del país en la producción de aceite de palma, maíz y arroz. Tradicionalmente, estos residuos han sido subutilizados o dispuestos de manera inadecuada, generando problemas como la contaminación del suelo, el agua y el aire, así como la emisión de gases de efecto invernadero. No obstante, su composición química, rica en celulosa, hemicelulosa y lignina, los convierte en candidatos ideales para procesos de conversión termoquímica, como la pirólisis, siendo un proceso que permite transformarlos en biocombustibles y otros productos de valor agregado.

La pirólisis, es un proceso térmico que se lleva a cabo en ausencia de oxígeno, ha ganado atención en los últimos años como una tecnología eficiente para la conversión de biomasa en

biocombustibles líquidos (bioaceite), gases combustibles y biochar. Este proceso no solo ofrece una solución para la gestión de residuos, sino que también contribuye a la diversificación de la matriz energética, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y promoviendo el uso de fuentes renovables. En el caso de Colombia, donde la demanda de energía continúa en aumento, el desarrollo de tecnologías locales para la producción de biocombustibles, a partir de residuos agroindustriales podría tener un impacto significativo en términos de sostenibilidad y autosuficiencia energética.

Este trabajo se enfoca en la síntesis de biocombustibles mediante la pirólisis de hueso de palma, biomasa de maíz y cascarilla de arroz en condiciones de laboratorio. El objetivo principal es evaluar el potencial de estos residuos como materias primas para la producción de biocombustibles, optimizando los parámetros del proceso de pirólisis (como la temperatura, el tiempo de residencia y la composición de los residuos) para maximizar la producción de bioaceite y otros productos útiles. Además, se busca caracterizar los productos obtenidos (bioaceite, gas útil y biochar) para determinar su viabilidad como combustibles alternativos y su posible aplicación en diferentes sectores industriales.

La relevancia de este estudio radica en su contribución al desarrollo de soluciones innovadoras y sostenibles para dos problemáticas clave en Colombia: la gestión inadecuada de residuos agroindustriales y la necesidad de diversificar las fuentes de energía. Al aprovechar estos residuos, no solo se mitiga su impacto ambiental, sino que también se generan nuevas oportunidades económicas y tecnológicas para el país. Además, este trabajo sienta las bases para futuras investigaciones que exploren la escalabilidad del proceso y su viabilidad económica y ambiental a nivel industrial.

1 Planteamiento del problema

En Colombia, las actividades agrícolas generan más de 71 millones de toneladas de residuos lignocelulósicos al año, provenientes principalmente de cultivos como palma de aceite, maíz y arroz (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2017). A pesar de que estos subproductos tienen un alto potencial energético debido a su composición abundante en compuestos lignocelulósicos, su manejo y aprovechamiento son limitados, lo que resulta en un desperdicio de recursos y en impactos ambientales negativos, como la contaminación del suelo, el agua y el aire, así como la emisión de gases de efecto invernadero. Frente a esta problemática, surge la necesidad de explorar alternativas tecnológicas que permitan transformar estos residuos en productos de valor agregado, como biocombustibles, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental y energética del país.

Sin embargo, persisten varias dudas y contradicciones que dificultan el avance en esta dirección. Por un lado, no está claro cuál es el potencial real de estos residuos para la producción de biocombustibles mediante procesos como la pirólisis, ya que existen vacíos en la literatura sobre las condiciones óptimas de operación (temperatura, tiempo de residencia, composición de los residuos) que maximicen la obtención de bioaceite, gas de síntesis y biochar. Por otro lado, se desconoce cómo varía la eficiencia del proceso de pirólisis según el tipo de residuo utilizado, lo que plantea la necesidad de comparar el rendimiento de cada material y determinar cuál es el más adecuado para su conversión en biocombustibles. Además, no se ha evaluado suficientemente la viabilidad técnica y económica de implementar esta tecnología a escala piloto o industrial en el contexto colombiano, lo que genera incertidumbre sobre su aplicabilidad real.

Estas dudas y contradicciones llevan a formular la siguiente pregunta central de investigación: ¿Es posible aprovechar eficientemente los residuos de cuesco de palma, biomasa de maíz (biomasa lignocelulósica de tusa y hojas de la mazorca de maíz) y cascarilla de arroz mediante el proceso de pirólisis para la producción de biocombustibles, y su viabilidad como alternativa sobre la matriz energética en Colombia? Responder a esta pregunta no solo permitirá despejar las incógnitas existentes sobre el potencial de estos residuos, sino que también proporcionará información valiosa para el desarrollo de tecnologías sostenibles que contribuyan a la gestión adecuada de residuos agroindustriales y a la diversificación de energía alternativas para el país.

2 Alcance

La presente investigación se orienta a la evaluación integral del aprovechamiento de biomasa residual vegetal, específicamente cuesco de palma, cascarilla de arroz y biomasa de maíz, como materias primas para la producción de combustibles alternativos mediante procesos termoquímicos de pirólisis en condiciones controladas de laboratorio. El trabajo se desarrolla a escala experimental, con el propósito de valorar la conversión de la biomasa hacia productos líquidos (bioaceite o alquitrán), gaseosos y sólidos (biocarbón), todos ellos con potencial de aplicación en el sector energético e industrial.

El alcance comprende el diseño y ejecución de pruebas de pirólisis a diferentes condiciones operativas, con el fin de determinar rendimientos relativos de cada fracción y establecer correlaciones entre el tipo de biomasa, su composición y el perfil de productos generados.

Adicionalmente, los productos obtenidos serán sometidos a una caracterización fisicoquímica y energética, empleando un conjunto de técnicas analíticas de referencia, entre ellas:

- Determinación del poder calorífico, para cuantificar el potencial energético de los combustibles de los productos.
- Análisis termogravimétrico (TGA), para evaluar la estabilidad térmica, comportamiento de degradación y cinética de descomposición de la biomasa.
- Cromatografía de gases (GC), orientada a la identificación y cuantificación de compuestos en las fracciones gaseosas.

Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), utilizada para la identificación de grupos funcionales presentes en los productos y su relación con la conversión de los precursores lignocelulósicos.

El proyecto no se limita únicamente a la caracterización individual de cada fracción, sino que busca integrar los resultados con el fin de establecer el desempeño energético global de cada biomasa residual, aportando información científica que permita su posible escalamiento a nivel piloto o industrial. Asimismo, se pretende generar una base de conocimiento que contribuya a la valorización de residuos agrícolas en Colombia y a la promoción de tecnologías limpias de aprovechamiento energético.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Realizar el análisis energético de biomasa residual vegetal mediante pirólisis y caracterización por espectroscopía infrarroja FTIR-ATR

3.2 Objetivos Específicos

1. Evaluar el proceso de pirólisis sobre la transformación de biomasa residual vegetal a escala laboratorio para su valoración energética.
2. Caracterizar las propiedades fisicoquímicas de productos pirolíticos de biomasa residual vegetal usando técnicas contempladas como cromatografía de gases y espectroscopia de infrarrojo.
3. Analizar el potencial de aprovechamiento de los gases generados durante el proceso de pirólisis de biomasa residual vegetal como recurso energético dentro de la matriz energética.

4 Justificación

La investigación sobre pirólisis de residuos agroindustriales como cuesco de palma, cascarilla de arroz y biomasa de maíz se justifica por su capacidad para abordar desafíos ambientales y energéticos críticos en el contexto colombiano. Estos subproductos agrícolas, disponibles en grandes volúmenes debido a la fuerte base agroindustrial del país, representan actualmente un problema de gestión que genera impactos ambientales significativos cuando son dispuestos inadecuadamente. Su composición rica en compuestos lignocelulósicos los convierte en materias primas ideales para procesos de conversión termoquímica, particularmente para la producción de biocombustibles mediante pirólisis.

El estudio de estos materiales responde a la necesidad de desarrollar alternativas tecnológicas que permitan transformar pasivos ambientales en recursos energéticos valiosos. La investigación busca superar los vacíos existentes en el conocimiento sobre las condiciones óptimas de procesamiento para cada tipo de residuo, así como establecer comparaciones técnicas entre ellos. Esto permitiría determinar cuáles presentan mayor potencial para su aprovechamiento energético en las condiciones específicas de Colombia.

El trabajo adquiere relevancia por su enfoque práctico y aplicado, orientado a generar soluciones concretas para dos problemáticas nacionales prioritarias: la gestión sostenible de residuos agroindustriales y la diversificación de la matriz energética con fuentes renovables. Los resultados esperados aportarían bases científicas para el desarrollo de tecnologías locales de conversión de biomasa, contribuyendo a la transición hacia una economía circular en el sector agrícola. Además, el conocimiento generado podría ser utilizado por tomadores de decisiones en

la formulación de políticas públicas y por actores del sector productivo interesados en implementar sistemas de valorización energética de residuos.

La investigación se justifica igualmente por su potencial para crear nuevas oportunidades económicas en regiones agrícolas, donde estos residuos podrían convertirse en fuentes de ingresos adicionales mediante su transformación en productos con valor comercial. Desde la perspectiva ambiental, el estudio contribuiría a reducir la huella de carbono del sector agroindustrial colombiano al ofrecer alternativas sostenibles para el manejo de sus subproductos. Finalmente, el trabajo sentaría las bases para futuras investigaciones sobre escalamiento industrial y optimización económica del proceso, cerrando así el ciclo entre la investigación básica y la aplicación práctica de sus resultados.

5 Marco teórico

5.1 Pirolisis

La pirólisis se define como el proceso de degradación térmica de la biomasa que ocurre en ausencia de un agente oxidante (Klug, 2012). En este sentido, el pirólisis del carbón activado surge a partir de la descomposición de la biomasa con mecanismos y velocidades de reacción variantes a altas temperaturas. Este proceso consta de tres etapas: dosificación y alimentación de la biomasa, transformación de la masa orgánica y, finalmente, la obtención y separación de los productos. En la tabla 1 se reportan algunas investigaciones sobre la pirolisis y sus condiciones establecidas para el tratamiento de diferentes materiales.

Tabla 1*Condiciones experimentales y resultados de pirólisis reportados en la literatura*

Referencia	Condiciones	Resultados
Zhou, L., Chen, J., & Zhang, X. (2022). Pyrolysis characteristics and bio-oil production from pine wood using a fixed-bed reactor. <i>Renewable Energy</i> , 187, 1145–1155.	Material: Biomasa de pino. Reactor: Pirólisis reactor de lecho fijo. Temperatura: 500 °C. Catalizador: Sin catalizador.	Alto rendimiento de bioaceite (~60%) con baja humedad. El bioaceite mostró buena estabilidad térmica y composición rica en compuestos fenólicos. El proceso dependió principalmente de la temperatura y la velocidad de calentamiento.
García, R., Martínez, L., & Santos, P. (2024). Co-pyrolysis of biomass and plastics: Synergistic effects on product yield and quality. <i>Bioresource Technology</i> , 391, 129952.	Material: Mezcla de residuos forestales polietileno. Reactor: Lecho fluidizado. Temperatura: 600 °C.	de y Efecto sinérgico: aumento del ~15% en el rendimiento de aceite. Mejor calidad del bio-aceite (menor viscosidad y oxígeno). Técnica prometedora para valorizar residuos mixtos.
Kwon, D., Park, S., & Lee, J. (2025). Sustainable carbon nanomaterial production from algal biomass via catalytic pyrolysis. <i>Carbon</i> , 218, 118721.	Material: Biomasa de microalgas. Reactor: Pirólisis catalítica. Temperatura: 800 °C. Catalizador: Ni/CeO ₂ .	de Producción eficiente de nanotubos de carbono (CNTs). El gas de síntesis (H ₂) se produce como coproducto valioso. Enfoque sostenible para materiales de carbono avanzados.

5.2 Cuesco de Palma

El cuesco de palma (también conocido como endocarpio o hueso de la palma) es un residuo lignocelulósico generado durante el proceso de extracción del aceite de palma. Se obtiene después

de separar la fibra del fruto de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*) en las plantas extractoras. Composición: Rico en lignina ($\approx 40\text{-}55\%$), celulosa ($\approx 20\text{-}30\%$) y hemicelulosa ($\approx 15\text{-}25\%$), lo que lo hace ideal para procesos termoquímicos como pirólisis, gasificación o combustión (Susanto et al., 2022; Zhou et al., 2023). Propiedades físicas: Alta densidad energética ($\sim 18\text{-}22\text{ MJ/kg}$) (Acevedo et al., 2019), bajo contenido de humedad ($<15\%$) y estructura dura y fibrosa. En la tabla 2 se reportan algunas investigaciones sobre la conversión del cuesco de palma mediante el proceso de pirólisis.

Tabla 2

Condiciones experimentales y resultados de pirólisis reportados en la literatura

Artículo	Condiciones del Experimento	Resultados Principales
Santos et al. (2023). <i>J. Anal. Appl. Pyrolysis</i> .	Material: Cuesco de palma (PKS). Reactor: Lecho fluidizado. Temperatura: 500 °C. Tipo: Pirólisis rápida.	Máximo rendimiento de bio-aceite ($\sim 65\%$). Alto valor calorífico ($\sim 28\text{ MJ/kg}$). Ideal para producción de combustible líquido.
Lee & Zhang (2024). <i>Fuel Process. Technol.</i>	Material: Cuesco de palma (PKS). Reactor: Pirólisis catalítica. Temperatura: 700 °C. Catalizador: CaO.	Alto rendimiento de syngas ($\sim 55\text{ vol}\%$). Mejóro la calidad del gas (mayor H_2/CO). Reducción de compuestos oxigenados.
Ibrahim & Patel (2025). <i>Bioresour. Technol.</i>	Material: Cuesco de palma (PKS). Temperatura: 350°C + 600°C.	Biochar de alta calidad ($\sim 85\%$ C fijo). Ideal para aplicación en suelos.

5.3 Cascara de Arroz

La cascarilla de arroz (también denominada paja o *husk*) es un subproducto agroindustrial generado durante el proceso de trillado del arroz (*Oryza sativa*), representando aproximadamente entre el 20 y el 25 % del peso total del grano en cáscara (Bakar et al., 2016; Della et al., 2002). Este residuo está constituido principalmente por material lignocelulósico, compuesto de celulosa, hemicelulosa y lignina, y se caracteriza por su alto contenido de sílice (SiO_2), lo que le confiere propiedades particulares para aplicaciones energéticas, catalíticas y de materiales (Mansaray & Ghaly, 1998; Yang et al., 2007). Composición Química. Condiciones experimentales y resultados de pirólisis reportados en la literatura con cascara de arroz en la tabla 3.

- ✓ Celulosa: 28-40%
- ✓ Hemicelulosa: 15-25%
- ✓ Lignina: 15-20%
- ✓ Sílice (SiO_2): 15-22% (único entre los residuos agrícolas)
- ✓ Poder calorífico: 13-16 MJ/kg (menor que otros residuos debido a la sílice)

Propiedades Físicas:

- ✓ Textura: Dura y abrasiva por la presencia de sílice.
- ✓ Baja densidad aparente: $\sim 100\text{-}150 \text{ kg/m}^3$ (requiere compactación para transporte eficiente).
- ✓ Alta resistencia térmica: Debido a la sílice, soporta altas temperaturas sin fundirse.

Producción en Colombia

- ✓ Generación anual: $\sim 600,000$ toneladas (Fedearroz, 2023).
- ✓ Principales zonas productoras: Tolima, Meta, Casanare y Huila.
- ✓ Disponibilidad: Colombia produce aproximadamente 500,000 toneladas anuales de cuesco de palma (Fedepalma, 2022), siendo un subproducto abundante pero subutilizado.

Tabla 3

Condiciones experimentales y resultados de pirólisis reportados en la literatura con cascara de arroz

Artículo	Condiciones del Experimento	Resultados Principales
Zhou, X., & Li, W. (2023). <i>Energy Convers. Manag.</i>	Material: Cáscara de arroz. Reactor: Lecho fluidizado. Temperatura: 500 °C. Tipo: Pirólisis rápida.	Alto rendimiento de bio-aceite (~60 wt%). El bio-aceite mostró un valor calorífico prometedor. Proceso eficiente para valorización energética.
Fernández, A., & Rossi, G. (2024). <i>Sci. Total Environ.</i>	Material: Cáscara de arroz. Reactor: Pirólisis lenta. Temperatura: 700 °C. Enfoque: Secuestro de carbono.	Producción de biochar con alta estabilidad carbono. Eficaz en la inmovilización de metales pesados en suelos. Aplicación óptima para secuestro de carbono.
Tanaka, K., & Davis, M. (2025). <i>J. Anal. Appl. Pyrolysis.</i>	Material: Cáscara de arroz. Reactor: Pirólisis catalítica. Temperatura: 650 °C.	Mejoramiento significativo de la producción de hidrógeno (~45 vol%). Reducción de alquitranes y compuestos oxigenados. Proceso efectivo para generación de H ₂ renovable.

5.4 Cascara de Mazorca

La cáscara de mazorca de maíz (también denominada tusa, olote o coronta) es un residuo agrícola lignocelulósico generado tras el proceso de desgranado del maíz (*Zea mays*). Este subproducto representa aproximadamente entre el 25 y el 30 % del peso total de la mazorca,

constituyendo una fuente abundante de biomasa en regiones con alta producción de maíz (Mullen et al., 2010; García et al., 2017).

La cáscara está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina, además de pequeñas cantidades de extractivos y cenizas minerales (Ioannidou et al., 2009). Debido a su alta disponibilidad, bajo costo y composición orgánica rica en carbono, este residuo ha sido ampliamente estudiado para su aprovechamiento en procesos termoquímicos, tales como pirólisis, gasificación y combustión, así como en la producción de biochar y biocombustibles (Demirbas, 2004; Nanda et al., 2016). Algunas Condiciones experimentales y resultados de pirólisis reportados en la literatura con cascara de mazorca se pueden visualizar en la tabla 4.

Composición Química:

- ✓ Celulosa: 35-45%
- ✓ Hemicelulosa: 25-35%
- ✓ Lignina: 15-20%
- ✓ Cenizas: 1-5% (mucho menor que en la cascarilla de arroz)
- ✓ Poder calorífico: 16-18 MJ/kg (superior al de otros residuos agrícolas como la cascarilla de arroz)

Propiedades Físicas:

- ✓ Estructura fibrosa y porosa, lo que facilita su procesamiento termoquímico.
- ✓ Baja densidad aparente ($\sim 80-120 \text{ kg/m}^3$), lo que dificulta su transporte y almacenamiento sin compactación.
- ✓ Alta resistencia mecánica debido a su estructura lignocelulósica.

Producción en Colombia:

- ✓ Generación anual: ~ 1.2 millones de toneladas (ICA, 2023).

- ✓ Principales zonas productoras: Córdoba, Antioquia, Cundinamarca y Valle del Cauca.

Tabla 4

Condiciones experimentales y resultados de pirólisis reportados en la literatura con cascara de mazorca

<i>Artículo</i>	<i>Condiciones del Experimento</i>	<i>Resultados Principales</i>
Chen, L., & Wang, Y. (2023). <i>Bioresour. Technol.</i>	Material: Cáscara de mazorca.	de Alto rendimiento de bio-aceite (~50 wt%).
	Reactor: Lecho fijo.	El bio-aceite presentó propiedades adecuadas para refinación.
	Temperatura: 550 °C. Tipo: Pirólisis intermedia.	El biochar mostró alta porosidad.
González, M., & Silva, R. (2024). <i>J. Clean. Prod.</i>	Material: Cáscara de mazorca.	Producción de mejorada de aromáticos en el bio-aceite.
	Reactor: Pirólisis rápida.	Reducción significativa de alquitranes.
	Temperatura: 600 °C. Catalizador: Zeolita ZSM-5.	Proceso eficiente para obtención de químicos verdes.
Kumar, S., & Li, H. (2025). <i>Renew. Energy.</i>	Material: Cáscara de mazorca.	de Máxima eficiencia de carbonización a 600°C.
	Reactor: Horno Tubular.	Biochar con alta capacidad de retención hídrica.
	Temperatura: 450-650 °C. Enfoque: Producción de biochar.	Aplicación potencial como mejorador de suelos.

5.5 Cromatografía de gases

La cromatografía de gases aplicada al estudio de la pirólisis representa una herramienta analítica fundamental para la caracterización detallada de los productos gaseosos obtenidos en este proceso termoquímico. Esta técnica permite separar, identificar y cuantificar los diversos compuestos volátiles y semivolátiles presentes en las fracciones líquidas y gaseosas resultantes de la pirólisis de biomasa (McNair & Miller, 2011; Poerschmann et al., 2005). El análisis de los bioaceites mediante cromatografía de gases revela su compleja composición química, identificando componentes clave como ácidos carboxílicos, compuestos fenólicos, cetonas y diversos hidrocarburos que determinan las propiedades y calidad del biocombustible obtenido (Demirbaş, 2000). Para el estudio de los gases de pirólisis, la cromatografía proporciona información precisa sobre la concentración de componentes combustibles como hidrógeno, monóxido de carbono, metano y dióxido de carbono, así como de otros compuestos menores que pueden afectar el potencial energético de esta fracción (Li et al., 2019).

La aplicación de esta técnica analítica requiere una cuidadosa preparación de muestras, donde los bioaceites suelen diluirse en solventes apropiados como metanol o acetona para facilitar su inyección en el sistema cromatográfico. La selección de la columna capilar y el programa de temperatura se optimizan según la naturaleza de los compuestos objetivo, empleando comúnmente columnas no polares como DB-5 para análisis generales o columnas polares como DB-WAX cuando se requiere mayor resolución de compuestos oxigenados (Sjöström, 2013). La combinación con detectores específicos, particularmente el detector de ionización de llama para cuantificación y el espectrómetro de masas para identificación molecular, proporciona una caracterización exhaustiva de los productos pirolíticos (McNair & Miller, 2011).

Los resultados obtenidos mediante cromatografía de gases son esenciales para evaluar la eficiencia del proceso de pirólisis, permitiendo correlacionar las condiciones operativas con la distribución y calidad de los productos obtenidos. Esta información resulta invaluable para optimizar parámetros como temperatura, tiempo de residencia y tasa de calentamiento, con el objetivo de maximizar el rendimiento de compuestos deseables o minimizar la formación de subproductos no deseados (Bridgwater, 2012). Además, la caracterización detallada de los productos mediante esta técnica analítica proporciona datos cruciales para evaluar la viabilidad técnica y económica de implementar procesos de pirólisis a mayor escala, contribuyendo significativamente al desarrollo de biorrefinerías basadas en residuos agroindustriales (Mohan et al., 2006). En la figura 11 se muestra el cromatógrafo de gases Agilent 8890 utilizado en esta investigación.

5.6 Espectroscopía infrarroja FTIR-ATR

La espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) es una técnica analítica que permite identificar grupos funcionales y enlaces químicos en materiales orgánicos e inorgánicos mediante la absorción de radiación infrarroja. Cuando se aplica al estudio de productos de pirólisis, el FTIR proporciona información valiosa sobre la composición molecular de los bioaceites, gases y biochar generados. Esta técnica se basa en el principio de que los enlaces químicos vibran a frecuencias características cuando son irradiados con luz infrarroja, produciendo un espectro único que actúa como "huella digital" molecular (Stuart, 2004; Smith, 2011; Griffiths & de Haseth, 2007).

5.7 Análisis Termogravimétrico (TGA)

El Análisis Termogravimétrico (TGA) es una técnica de caracterización térmica ampliamente utilizada en investigación y control de calidad para estudiar el comportamiento de

materiales frente a cambios de temperatura. Su principio básico consiste en medir la variación de masa de una muestra mientras es sometida a un programa de calentamiento controlado (o enfriamiento) en una atmósfera específica (aire, nitrógeno, argón, etc.) (Wendlandt, 1986; Thermogravimetric analysis, 2024).

5.8 Poder Calorífico.

El poder calorífico es una propiedad fundamental de los materiales combustibles que expresa la cantidad de energía térmica liberada durante su combustión completa en presencia de oxígeno. Se define como la energía disponible por unidad de masa (sólidos y líquidos) o por unidad de volumen (gases), y constituye un parámetro esencial para evaluar el potencial energético de los biocombustibles y su viabilidad en aplicaciones industriales, térmicas o de generación eléctrica (Demirbas, 2017).

Existen dos formas de expresar este parámetro: el Poder Calorífico Superior (PCS) y el Poder Calorífico Inferior (PCI). El PCS incluye la energía asociada a la condensación del vapor de agua producido durante la combustión, mientras que el PCI excluye esta fracción energética, resultando un valor menor, pero más representativo de la energía efectivamente aprovechable en la mayoría de los sistemas de combustión (Sheng & Azevedo, 2005).

En el caso de las biomásas residuales, el poder calorífico se encuentra influenciado por su composición elemental (carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre), así como por el contenido de humedad y cenizas. Un mayor contenido de carbono e hidrógeno favorece un mayor poder calorífico, mientras que un elevado porcentaje de oxígeno, humedad o cenizas tiende a reducirlo (Parikh et al., 2005).

Debido a su relevancia, el poder calorífico es uno de los parámetros más utilizados en estudios de caracterización de biomasa y productos de pirólisis, ya que permite establecer comparaciones energéticas entre diferentes materiales y procesos de conversión termoquímica.

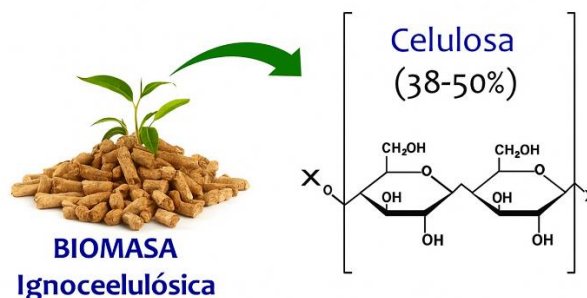
5.9 Composición lignocelulósica de la biomasa vegetal

5.9.1 Celulosa.

La celulosa es un biopolímero lineal y cristalino compuesto por unidades de glucosa unidas por enlaces β -1,4-glucosídicos, como se puede observar en la Figura 1. Es el principal polisacárido estructural de la pared celular de las plantas y el compuesto orgánico más abundante en la naturaleza (Rowell et al., 2012). Su estructura lineal y la capacidad de formar puentes de hidrógeno entre cadenas le confieren una alta resistencia a la tracción e insolubilidad en la mayoría de los solventes, lo que la convierte en la principal responsable de la resistencia mecánica de las fibras vegetales (Hon & Shiraishi, 2001; Sjöström, 1993). Y se puede observar en la figura 1 un modelo representativo de la Celulosa.

Figura 1

Molécula modelo representativa de la Celulosa

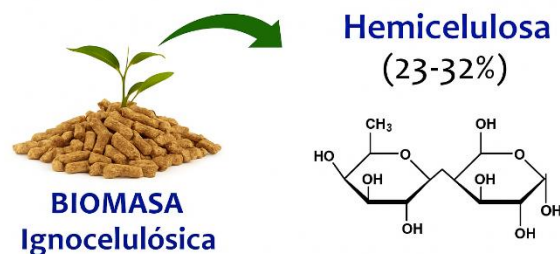


5.9.2 Hemicelulosa.

La hemicelulosa corresponde a un grupo heterogéneo de polisacáridos ramificados de bajo peso molecular presentes en la pared celular de las plantas, como se puede observar en la figura 2. A diferencia de la celulosa, está compuesta por una mezcla de diferentes azúcares, como xilosa, manosa, galactosa, glucosa y ácidos urónicos, lo que le confiere una estructura amorfa y menos ordenada (Sjöström, 1993; Fengel & Wegener, 1989). Su función principal consiste en actuar como un agente de unión entre las microfibrillas de celulosa y la lignina, contribuyendo a la formación de una matriz compleja que proporciona cohesión, flexibilidad e integridad estructural a la pared celular vegetal (Rowell et al., 2012; Hon & Shiraishi, 2001). Y se puede observar en la figura 2 un modelo representativo de la Hemicelulosa.

Figura 2

Molécula modelo representativa de la Hemicelulosa



5.9.3 Lignina.

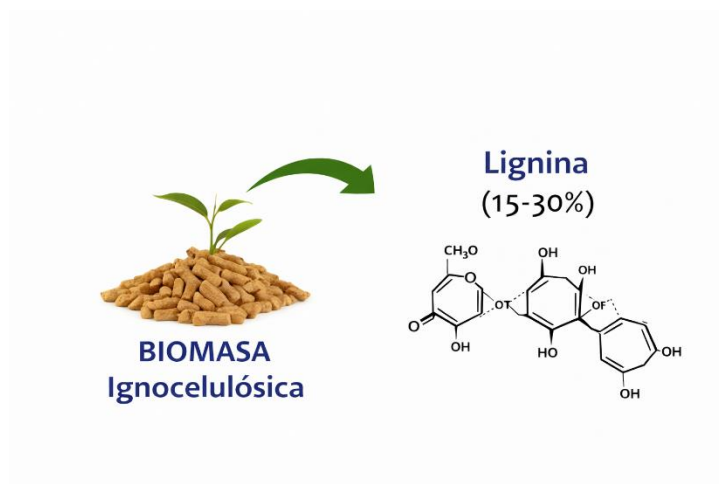
La lignina es un polímero aromático tridimensional, amorfo y altamente complejo, formado por la polimerización oxidativa de alcoholes fenilpropílicos (monolignoles), principalmente

alcohol coniferílico, sinapílico y p-cumárico (Fengel & Wegener, 1989; Boerjan, Ralph & Baucher, 2003). Este biopolímero se deposita principalmente en la pared celular secundaria de las plantas vasculares, donde actúa como un agente cementante que impregna la matriz de carbohidratos compuesta por celulosa y hemicelulosa, confiriéndole cohesión e integridad estructural (Sjöström, 1993; Rowell et al., 2012).

La lignina desempeña un papel fundamental al proporcionar rigidez, impermeabilidad y resistencia mecánica a las células vegetales, además de contribuir a la protección frente a agentes biológicos (como hongos y bacterias) y a condiciones de estrés abiótico tales como sequía o radiación ultravioleta (Hon & Shiraishi, 2001). Su compleja naturaleza química y su alta resistencia a la degradación la convierten en un componente clave de la biomasa lignocelulósica, influyendo de manera significativa en los procesos termoquímicos como la pirólisis o la gasificación. Y se puede observar en la figura 3 un modelo representativo de la Lignina.

Figura 3

Molécula modelo representativa de la Lignina

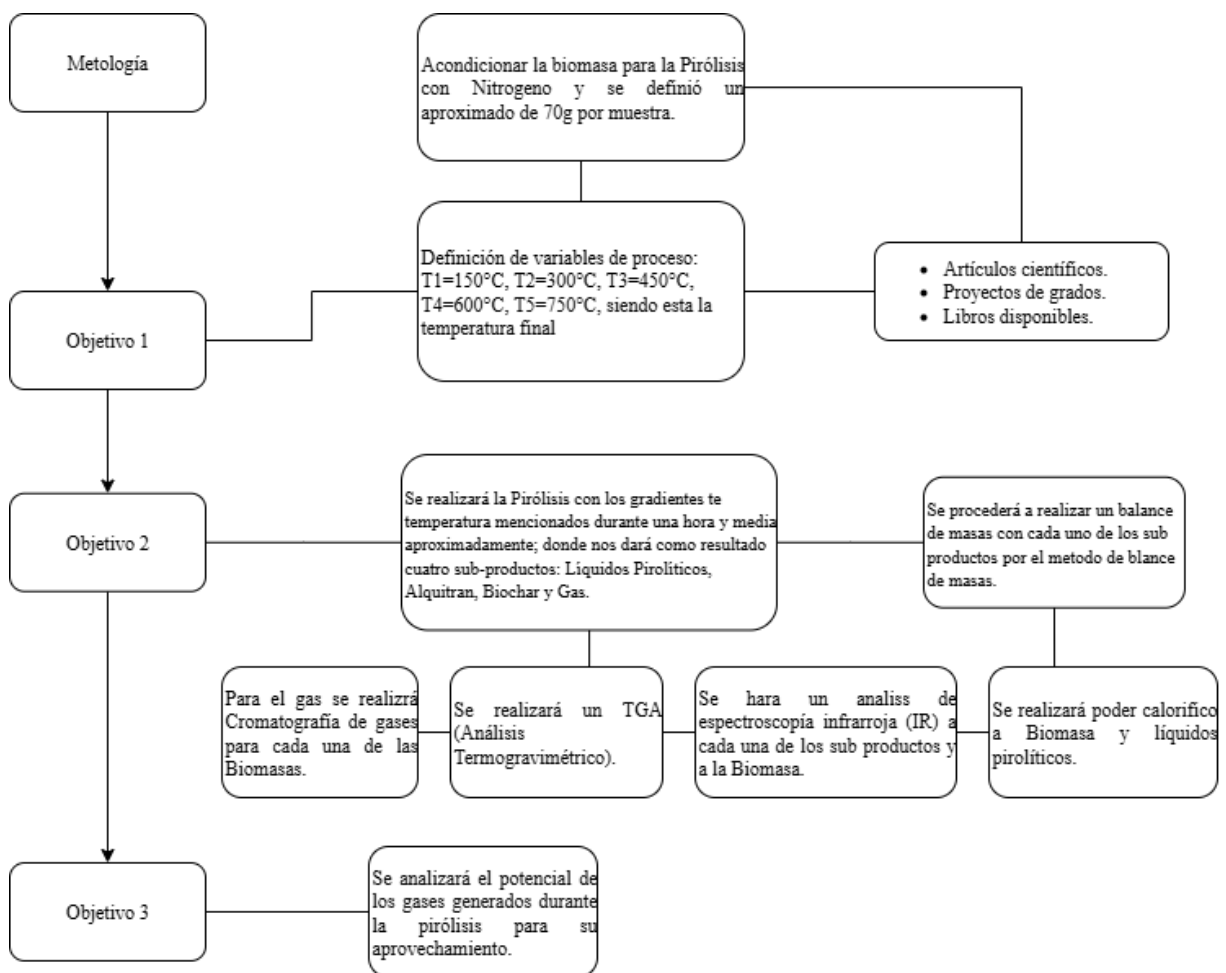


6 Metodología

En esta sección se presentan los procedimientos y actividades consideradas para el desarrollo experimental de la presente investigación que se puede observar en la figura 4.

Figura 4

Diagrama de la metodología para la realización del proyecto



6.1 Tratamiento de la Biomasa

Para el desarrollo experimental del presente estudio, se seleccionaron tres tipos de biomásas residuales de origen vegetal mediante un análisis bibliográfico orientado a identificar materiales con alto potencial energético y disponibilidad en el contexto agroindustrial colombiano. Las biomásas seleccionadas fueron: cuesco de palma, cáscara de arroz y biomasa de maíz (tusa y hojas de mazorca de maíz) como se observan en las Figuras 5, 6 y 7, las cuales representan subproductos lignocelulósicos generados en grandes volúmenes y que, comúnmente, no son aprovechados de manera eficiente.

Cada una de las biomásas fue sometida a un proceso de preparación previa al tratamiento térmico. Inicialmente, se realizó una limpieza manual para eliminar impurezas, restos de tierra o materiales ajenos. Posteriormente, las muestras fueron secadas a temperatura ambiente hasta alcanzar una humedad constante, con el fin de evitar interferencias por contenido de agua durante el proceso de pirólisis. Una vez secas, las biomásas fueron trituradas y molidas para reducir el tamaño de partícula, lo cual favorece la homogeneidad térmica y mejora el contacto del material con la fuente de calor dentro del reactor.

El material pulverizado se almacenó en recipientes herméticos, debidamente rotulados, para prevenir la absorción de humedad ambiental. Luego, se procedió a la etapa de pesaje, donde se determinó la masa necesaria para cada corrida experimental. En promedio, se utilizaron 70 gramos de biomasa por prueba, cantidad suficiente para garantizar una producción representativa de los diferentes productos de pirólisis (biochar, bio-oil y gases no condensables) y asegurar la estabilidad térmica dentro del equipo Carbolite, utilizado como reactor principal para la degradación térmica controlada.

Este procedimiento de acondicionamiento y selección permitió obtener muestras con características físicas uniformes y representativas, garantizando la reproducibilidad de los ensayos y la fiabilidad de los resultados obtenidos durante las pruebas de pirólisis.

Figura 5

Cuesco de Palma usado en la Pirolisis



Figura 6

Cascara de Arroz usado en la Pirolisis

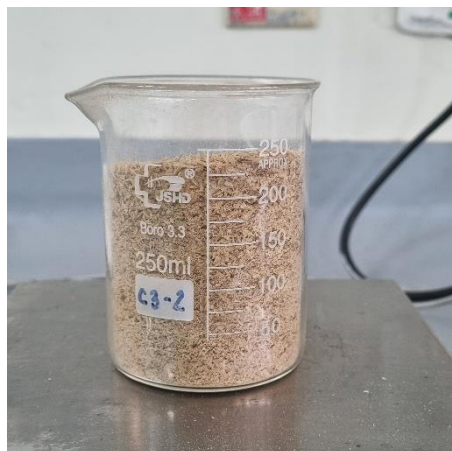


Figura 7

Cascara de Mazorca usado en la Pirolisis

**6.2 Procedimientos para la realización de la Pirólisis.**

Una vez se completó la preparación de las muestras, se procedió con el alistamiento y puesta en marcha del equipo Carbolite que se puede observar en la figura 8, empleado como reactor principal para el proceso de pirólisis térmica. Este equipo está diseñado para realizar tratamientos térmicos controlados bajo atmósferas inertes, garantizando la descomposición térmica de la biomasa sin la presencia de oxígeno.

El sistema experimental se compone principalmente de un reactor tubular rotatorio, un cilindro de gas nitrógeno (N_2), un controlador de temperatura programable, y un conjunto de balines metálicos ubicados dentro del reactor. Estos balines tienen la función de favorecer la homogeneidad térmica y física de la muestra durante el calentamiento, evitando la formación de zonas frías o puntos de sobrecalentamiento, lo cual contribuye a una degradación más uniforme del material lignocelulósico.

Previo al inicio de cada ensayo, se verificó la hermeticidad del sistema y el flujo continuo de nitrógeno, el cual se utilizó como gas inerte para desplazar el oxígeno presente en la cámara de reacción y prevenir la combustión de la biomasa. Posteriormente, el reactor fue programado para alcanzar una temperatura final de 750 °C, manteniendo esta condición durante una hora para cada tipo de biomasa. La velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia fueron seleccionados con base en estudios previos que indican que estos parámetros promueven una pirólisis eficiente y una adecuada separación de los productos generados.

Durante el proceso, la biomasa sufre una serie de reacciones termoquímicas —como desvolatilización, craqueo y condensación secundaria— que dan origen a tres fracciones principales:

- Gas pirolítico, constituido principalmente por CO, CO₂, H₂, CH₄ y otros hidrocarburos ligeros.
- Biochar o carbón sólido, que corresponde al residuo carbonoso resultante de la descomposición térmica de los compuestos lignocelulósicos.
- Líquidos pirolíticos (bio-oil o alquitranes), obtenidos a partir de la condensación de los vapores orgánicos liberados durante la reacción.

Finalizado el ciclo térmico, los productos obtenidos fueron recogidos y almacenados de manera individual para su posterior caracterización físico-química. Cada fracción fue sometida a diferentes análisis con el fin de determinar sus propiedades y potencial de aprovechamiento energético.

Figura 8

Equipo Carbolite para el proceso de pirólisis

**6.3 Caracterización**

Una vez finalizado el proceso de pirólisis, se procedió a realizar los análisis físico-químicos correspondientes a cada uno de los subproductos obtenidos: biochar, líquidos pirolíticos (bio-oil) y gases no condensables. Estos análisis tuvieron como propósito determinar las propiedades estructurales, elementales y energéticas de cada fracción, con el fin de evaluar su potencial de aprovechamiento y comparar el comportamiento térmico de las distintas biomásas procesadas.

6.3.1 Termogravimetría por TGA

El análisis termogravimétrico (TGA) de las muestras se llevó a cabo siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM E1131, empleando un equipo TA-Instruments, modelo Discovery 5500 que se observa en la figura 9, con el propósito de evaluar el comportamiento térmico y la estabilidad de las biomásas seleccionadas. Esta técnica permite determinar las pérdidas de masa en función de la temperatura y del tiempo, proporcionando

información detallada sobre los procesos de descomposición térmica de los componentes lignocelulósicos.

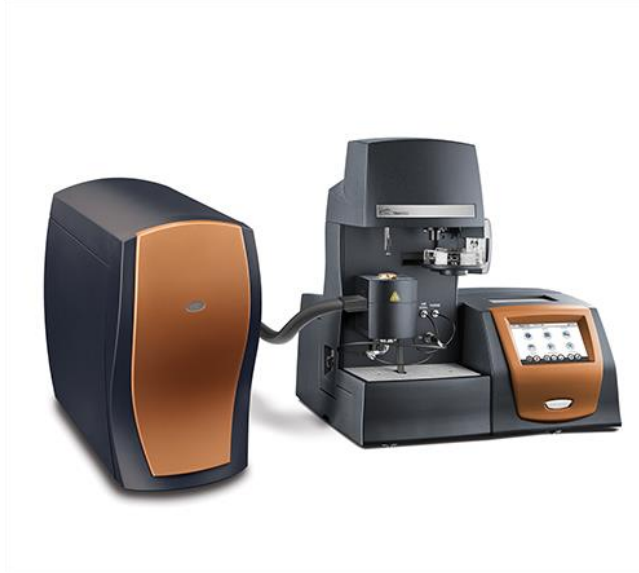
Para el desarrollo del ensayo, se utilizó una masa aproximada de 10 a 15 mg de cada muestra, depositada cuidadosamente en un crisol de platino previamente tarado. El análisis se efectuó en una atmósfera inerte de nitrógeno (N_2) con un flujo constante, a fin de evitar reacciones de oxidación y garantizar que los cambios observados correspondieran exclusivamente a la degradación térmica del material.

El programa térmico consistió en un calentamiento inicial desde 25 °C hasta 800 °C, aplicando una rampa controlada de 10 °C por minuto. Durante todo el proceso, el sistema registró continuamente la variación de masa, generando la curva termogravimétrica (TG) y su derivada (DTG), que permiten identificar las etapas de pérdida de masa y las temperaturas características de degradación.

Al finalizar la fase de calentamiento, el sistema se equilibró a 30 °C para completar el ciclo térmico y asegurar la estabilidad de la señal antes del cierre del ensayo. Los resultados obtenidos permitieron determinar las etapas de descomposición térmica asociadas a la eliminación de humedad, la volatilización de compuestos orgánicos y la formación del residuo carbonoso (biochar). Asimismo, el análisis TGA proporcionó información esencial para comprender el comportamiento térmico de las biomásas y su relación con la eficiencia del proceso de pirólisis.

Figura 9

Equipo de termogravimetría TGA

**6.3.2 Espectroscopía infrarroja FTIR-ATR**

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier con reflectancia total atenuada (FTIR-ATR) se utilizó para identificar los grupos funcionales presentes en los productos obtenidos de la pirólisis, en el equipo que se observa en la figura 10. Para el desarrollo de la técnica, las muestras sólidas (biochar) y líquidas (bio-oil) fueron colocadas directamente sobre el cristal del accesorio ATR, generalmente fabricado en diamante o germanio, el cual permite una adecuada transmisión de la radiación infrarroja. Una vez posicionada la muestra, se aplicó una ligera presión para garantizar el contacto íntimo entre la superficie del material y el cristal, asegurando una buena calidad de señal.

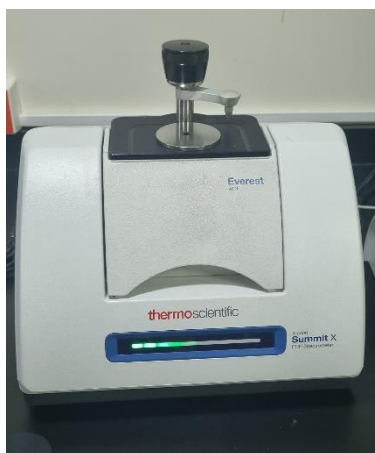
Durante el análisis, el equipo emite un haz de radiación infrarroja que incide sobre el cristal ATR y se refleja internamente múltiples veces. En cada reflexión, una pequeña porción de la radiación (onda evanescente) penetra algunos micrómetros en la superficie de la muestra y es

absorbida selectivamente por los enlaces químicos presentes en el material. La radiación transmitida se detecta y transforma matemáticamente mediante la transformada de Fourier, generando un espectro de absorbancia en función del número de onda (cm^{-1}).

El espectro obtenido muestra picos característicos que corresponden a diferentes tipos de enlaces moleculares, como C–H, O–H, C=O, C–O o C=C, lo que permite identificar los grupos funcionales predominantes en la muestra. En el caso del biochar y los líquidos pirolíticos, esta información fue fundamental para evaluar la presencia de compuestos oxigenados, fenólicos, ácidos, cetonas y otros derivados orgánicos formados durante la descomposición térmica de la biomasa.

Figura 10

Espectrómetro de Infrarrojo (nicolet summit x ftir spectrometer)



6.3.3 Cromatografía de gases

El análisis cromatográfico de los gases producto del proceso de pirólisis se realizó empleando un cromatógrafo de gases marca Agilent, modelo 8890, configurado con un sistema multicolumna y detectores específicos para la identificación y cuantificación de los componentes gaseosos. Este equipo cuenta con tres columnas empacadas y una columna capilar, que permiten

una separación eficiente de los diferentes compuestos generados durante la degradación térmica de las biomásas.

En primer lugar, la columna empacada HayeSep O de 3 ft está conectada al detector de conductividad térmica (TCD) y cumple la función de retener y ventear los hidrocarburos ligeros, mediante la aplicación de la técnica de retrolavado (Backflush), que optimiza la purga de componentes de alta volatilidad y evita su acumulación en el sistema.

Posteriormente, la columna empacada HayeSep O de 6 ft, también asociada al detector TCD, se encarga de la separación de gases permanentes y compuestos livianos, tales como dióxido de carbono (CO_2), etano (C_2H_6) y propano (C_3H_8), garantizando una adecuada resolución cromatográfica de estos componentes.

Por su parte, la columna empacada Molecular Sieve 13X permite la separación de gases inorgánicos ligeros, incluyendo nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2) y metano (CH_4), y también se encuentra acoplada al detector TCD, el cual ofrece alta sensibilidad para compuestos que no responden de manera eficiente al detector de ionización de llama.

Finalmente, después de la separación se analizan los hidrocarburos en el rango de C_4 a C_6 , en un detector de ionización de llama (FID). Este sistema permite identificar y cuantificar los hidrocarburos ligeros y aromáticos presentes en la fracción gaseosa, aportando información detallada sobre la composición y calidad del gas pirolítico.

En conjunto, esta configuración del cromatógrafo Agilent 8890 el cual se puede visualizar en la figura 11, posibilita un análisis integral de los productos gaseosos generados durante la pirólisis de biomasa, permitiendo correlacionar la distribución de gases con las condiciones de operación y la naturaleza de la materia prima utilizada.

Figura 11

Cromatógrafo de gases (Agilent 8890)

**6.3.4 Poder Calorífico**

La determinación del poder calorífico de las biomasas y de los productos sólidos obtenidos tras el proceso de pirólisis se realizó con el propósito de evaluar su potencial energético y su viabilidad como fuentes alternativas de combustible. El ensayo se efectuó de acuerdo con los lineamientos de la norma ASTM D5865, utilizando un calorímetro tipo bomba adiabática marca Parr el cual se puede observar en la figura 12, diseñado para medir con alta precisión la cantidad de energía liberada durante la combustión completa de una muestra en un ambiente controlado de oxígeno.

Para el desarrollo del análisis, se pesó aproximadamente 1 g de muestra previamente seca y molida, la cual fue prensada en forma de pastilla y colocada en el crisol del equipo. La cámara del calorímetro se presurizó con oxígeno puro (≈ 30 atm) y posteriormente se inició la ignición mediante un filamento eléctrico. Durante la combustión, el sistema registró el incremento de

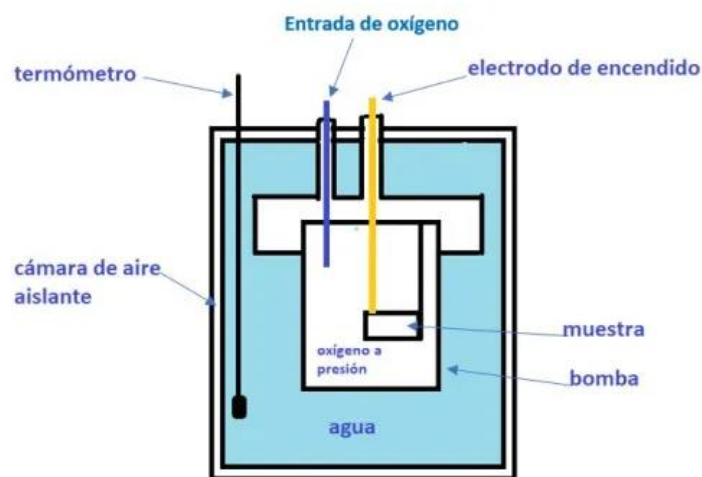
temperatura del agua circundante, a partir del cual se calculó el poder calorífico superior (PCS) mediante la relación entre la energía liberada y la masa de la muestra analizada.

Adicionalmente, se determinó el poder calorífico inferior (PCI) considerando la corrección por la energía de vaporización del agua generada durante la combustión, de acuerdo con las ecuaciones termodinámicas establecidas en la norma. Los valores obtenidos permitieron comparar el contenido energético entre las biomásas de origen (cuesco de palma, cáscara de arroz y cáscara de maíz) y los residuos carbonosos (biochar), evidenciando el incremento en el poder calorífico producto de la concentración de carbono tras la degradación térmica de los componentes volátiles.

En general, este análisis permitió establecer la calidad energética de los materiales estudiados, proporcionando una base cuantitativa para evaluar su potencial como biocombustibles sólidos o para otros fines termo energéticos.

Figura 12

Bomba calorimétrica



7 Resultados

7.1 Características de los Subproductos del proceso de pirólisis

Durante la prueba de pirólisis del cuesco de palma se obtuvieron cuatro subproductos principales: líquido pirolítico, biochar, alquitrán y gases. El líquido pirolítico se presentó como un fluido de color café y con un olor característico, indicativo de la presencia de compuestos orgánicos volátiles. Tanto el líquido como el alquitrán mostraron características propias de los productos condensables derivados de la descomposición térmica de la biomasa. El biochar obtenido evidenció una estructura uniforme y de buena calidad, lo que sugiere una conversión térmica eficiente durante el proceso.

De manera similar, las biomásas de cáscara de arroz y maíz produjeron similares tipos de subproductos bajo condiciones de pirólisis controladas. A cada uno de estos productos (líquido pirolítico, alquitrán, biochar y gases) se les realizaron pruebas de rendimiento, así como análisis de FTIR, cromatografía de gases, poder calorífico y TGA, con el fin de evaluar sus propiedades fisicoquímicas y su potencial energético.

7.2 Rendimiento sub-Productos

El estudio de la pirólisis de cuesco de palma, cascarilla de arroz y biomasa de maíz permitió determinar el rendimiento y las características clave de los subproductos generados (biochar, bioaceite y gas de síntesis), evidenciando su potencial para aplicaciones energéticas e industriales. En la tabla 5 se verán reflejados los valores de las Biomásas y en la tabla 6 se pueden observar los rendimientos calculados para las tres Biomásas.

Para el cálculo de la eficiencia de la pirolisis fueron consideradas las ecuaciones (1) y (2):

$$\eta = \left(\frac{m_{\text{productos}}}{m_{\text{inicial}}} \right) * 100 \quad (1)$$

$$m_{\text{gas}} = m_{\text{inicial de biomasa}} - (m_{\text{Líquidos}} + m_{\text{Biochar}}) \quad (2)$$

Tabla 5*Datos de las tres Biomosas*

	<i>Cuesco de Palma</i>	<i>Biomasa de Maíz</i>	<i>Cascara de Arroz</i>
Masa inicial de Biomasa=	70,45	70,45	70,45
Masa de Líquido =	22,75	22,75	22,75
Masa de Biochar =	19,77	19,77	19,77
Masa de productos líquidos y sólidos=	42,52	42,52	42,52
eficiencia, n=	60,30%	60,3%	60,30%
Masa de gas esperado=	39,71%	39,7%	39,71%

Tabla 6*Rendimiento Biomasa*

Biomasa	Líquido (%)	Biochar (%)	(%) Gas	Eficiencia (η. %)
Cuesco de palma	41.5	28.1	30.4	69.6
Biomasa de maíz	39.5	24.3	36.2	63.8
Cascarilla de arroz	32.9	34.6	32.5	67.5

La distribución de productos obtenida durante la pirólisis de las biomosas evaluadas cuesco de palma, biomasa de maíz y cascarilla de arroz está directamente influenciada por su composición

lignocelulósica, particularmente por las proporciones de celulosa, hemicelulosa y lignina, así como por su contenido de materia inorgánica. Estos componentes presentan diferentes comportamientos de degradación térmica, lo que determina la formación relativa de fracciones líquidas, sólidas (biochar) y gaseosas. En el caso del cuesco de palma, se obtuvo el mayor rendimiento de fracción líquida (41,5%) y una eficiencia del proceso de 69,6%, acompañado de valores intermedios de biochar (28,1%) y gas (30,4%). Este comportamiento se asocia principalmente a su alto contenido de lignina, la cual se descompone en un amplio rango de temperaturas (200–500 °C), generando compuestos aromáticos complejos que favorecen la formación de bioaceite. La estructura altamente ramificada de la lignina también contribuye a una degradación térmica más progresiva, limitando la formación excesiva de gases y promoviendo un equilibrio en la distribución de productos. Por su parte, la biomasa de maíz presentó un rendimiento líquido de 39,5%, una producción de biochar de 24,3% y la mayor fracción gaseosa (36,2%), junto con la menor eficiencia (63,8%), comportamiento asociado a un mayor contenido de celulosa y hemicelulosa, las cuales se degradan a temperaturas más bajas (200–350 °C) y generan compuestos volátiles de bajo peso molecular susceptibles a reacciones secundarias de craqueo térmico, incrementando la formación de gases no condensables. En contraste, la cascarilla de arroz mostró el mayor rendimiento de biochar (34,6%), una fracción líquida de 32,9% y una producción de gas de 32,5%, con una eficiencia de 67,5%, lo cual se atribuye a su alto contenido de cenizas, especialmente sílice (SiO_2), que limita la volatilización de compuestos orgánicos y favorece la formación de residuos sólidos, además de promover reacciones catalíticas secundarias. Adicionalmente, el alquitrán, identificado como una de las fracciones líquidas condensables generadas durante el proceso de pirólisis, presentó un rendimiento promedio de 2,72% en base a la masa inicial de biomasa procesada. Este valor corresponde a los ensayos realizados con cuesco de palma, biomasa de maíz

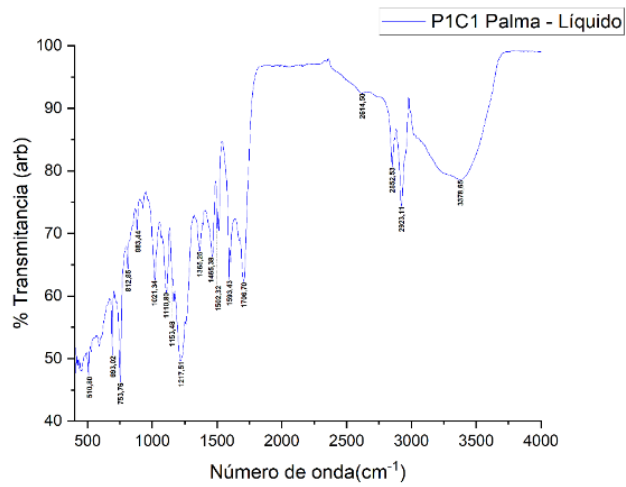
y cascarilla de arroz, evidenciando la formación de compuestos orgánicos de alto peso molecular producto de la descomposición termoquímica de los materiales lignocelulósicos. En términos comparativos, el cuesco de palma presenta el mejor desempeño para la producción de bioaceite y eficiencia del proceso, la biomasa de maíz muestra una mayor tendencia hacia la formación de gases, y la cascarilla de arroz favorece la generación de biochar, confirmando que la composición lignocelulósica y el contenido de cenizas son factores determinantes en la distribución de productos de pirólisis y en la orientación del proceso hacia productos específicos.

7.3 Espectroscopía infrarroja

Se realizaron los análisis de espectroscopia de infrarrojo FTIR-ATR para determinar los grupos funcionales de cada uno de los subproductos obtenidos durante las pruebas de pirolisis en presencia de nitrógeno (N_2) y la cual arrojaron espectros que pueden ser observados en la figura 13, figura 14 y figura 15.

Figura 13

Espectro de infrarrojo FTIR-ATR de Cuesco de Palma y sus productos

**Figura 14**

Espectro de infrarrojo FTIR-ATR de biomasa de maíz y sus productos

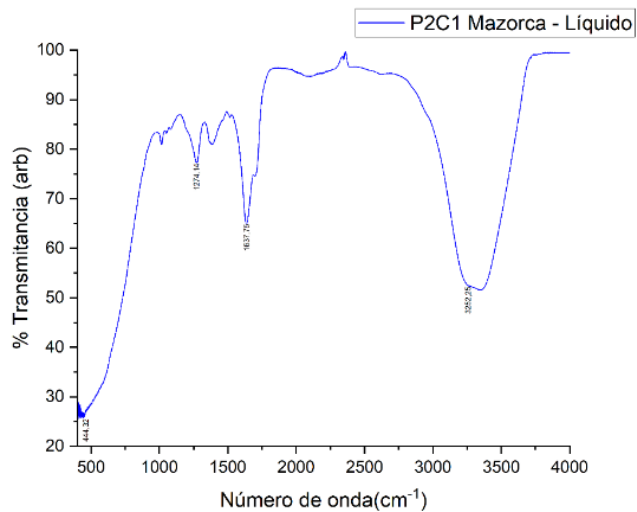
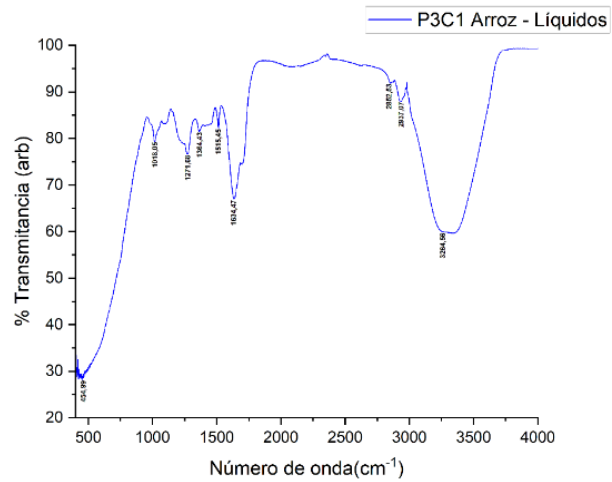


Figura 15

Espectro de infrarrojo FTIR-ATR de cascarilla de Arroz y sus productos



Para complementar los resultados de caracterización, en la tabla 7 se muestran las asignaciones de las intensidades por longitud de onda (cm⁻¹) asociados por grupo funcional.

Tabla 7*Espectroscopía infrarroja FTIR-ATR*

Rango (cm ⁻¹)	Grupo funcional típico	Tipo de vibración	Interpretación esperada en pirólisis
3300–3500	–OH (alcoholes o fenoles)	Estiramiento O–H (ancho)	Presencia de grupos hidroxilo, sobre todo en fracciones líquidas
3000–3100	=C–H (alquenos o aromáticos)	Estiramiento C–H	Indica estructuras insaturadas o aromáticas
2850–2950	–CH ₂ /CH ₃ (alcanos)	Estiramiento simétrico/asimétrico	Indica presencia de compuestos alifáticos
1700–1750	C=O (cetonas, ácidos, ésteres)	Estiramiento carbonilo	Muy común en líquidos pirolíticos y alquitranes
1600–1650	C=C (aromáticos o alquenos)	Estiramiento C=C	Asociado a lignina y compuestos aromáticos derivados
1450–1500	C–H de CH ₂ /CH ₃	Flexión	Característico de cadenas alifáticas
1000–1300	C–O (alcoholes, éteres, ácidos)	Estiramiento C–O	Presencia de compuestos oxigenados livianos
700–900	Aromáticos (C–H)	Deformación fuera del plano	Estructuras aromáticas, residuos lignocelulósicos

El espectro obtenido del alquitrán de cuesco de palma (figura x) muestra la presencia de varias bandas características que confirman una mezcla compleja de compuestos orgánicos.

La banda ancha alrededor de 3398 cm⁻¹ se asocia al estiramiento de los enlaces O–H, típicos de alcoholes, fenoles o ácidos carboxílicos. Las bandas fuertes a 2921 y 2854 cm⁻¹ corresponden a vibraciones de estiramiento del grupo C–H en cadenas alifáticas largas, lo cual indica la presencia de hidrocarburos saturados, coherentes con los ácidos grasos presentes en el aceite de palma.

La señal intensa a 1711 cm^{-1} evidencia la presencia de un grupo carbonilo ($\text{C}=\text{O}$), atribuible a ésteres, cetonas o ácidos, los cuales son comunes en productos de pirolisis o transesterificación de triglicéridos.

Las bandas en el rango de $1250\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ se relacionan con vibraciones de estiramiento $\text{C}-\text{O}$, lo cual refuerza la hipótesis de la formación de ésteres o alcoholes secundarios. Finalmente, las señales débiles entre 900 y 700 cm^{-1} sugieren la existencia de estructuras aromáticas provenientes del componente de alquitrán, típicas de hidrocarburos policíclicos.

En conjunto, el espectro revela que la muestra está compuesta principalmente por hidrocarburos alifáticos y aromáticos oxigenados, indicando una mezcla orgánica compleja que podría asociarse a un precursor de biocombustible o material resinoso, dependiendo del proceso de obtención.

El espectro infrarrojo FTIR-ATR de los productos líquidos del cuesco de palma (figura x) presenta una banda ancha alrededor de 3378 cm^{-1} , correspondiente al estiramiento $\text{O}-\text{H}$, lo que indica la presencia de alcoholes, fenoles o ácidos carboxílicos. Las bandas intensas en 2922 y 2854 cm^{-1} se asocian con los estiramientos $\text{C}-\text{H}$ alifáticos de grupos CH_2 y CH_3 , característicos de cadenas hidrocarbonadas largas.

La banda fuerte situada en torno a 1700 cm^{-1} evidencia la presencia de grupos carbonilo ($\text{C}=\text{O}$), típicos de ésteres o cetonas, mientras que las señales entre 1270 y 1150 cm^{-1} corresponden a vibraciones $\text{C}-\text{O}$, confirmando la existencia de compuestos oxigenados. Además, las señales débiles entre 900 y 700 cm^{-1} indican la presencia de estructuras aromáticas..

En conjunto, el espectro revela que la muestra contiene principalmente hidrocarburos alifáticos y compuestos oxigenados con pequeñas proporciones de componentes aromáticos, lo

que sugiere una mezcla orgánica compleja producto de procesos térmicos o de oxidación parcial del aceite de palma.

El espectro infrarrojo FTIR-ATR del producto sólido o Biochar del cuesco de palma (figura x) muestra una notable disminución en el número e intensidad de las bandas en comparación con las muestras líquidas, lo que indica una mayor carbonización del material. Se observa una banda ancha de baja intensidad alrededor de 3400 cm^{-1} , asociada al estiramiento O–H, posiblemente de grupos hidroxilo residuales o humedad superficial.

Las bandas en 2924 y 2852 cm^{-1} , correspondientes a estiramientos C–H alifáticos, aparecen muy débiles o casi ausentes, lo que sugiere la degradación de las cadenas hidrocarbonadas durante la pirólisis. La señal en torno a 1600 cm^{-1} se asocia al estiramiento C=C de anillos aromáticos o a enlaces C=O conjugados, indicando la formación de estructuras carbonosas aromáticas típicas del biochar.

Una banda notoria en $1000\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ corresponde a vibraciones C–O de éteres, alcoholes o restos de polisacáridos parcialmente carbonizados. La baja intensidad general y la reducción del número de picos reflejan un material altamente aromático y condensado, resultado de la descomposición térmica de los componentes orgánicos originales.

En conjunto, el espectro FTIR-ATR confirma que la muestra presenta una estructura principalmente carbonosa, con pocos grupos funcionales oxigenados residuales. Esto es característico de materiales pirolizados con alto grado de aromatización, lo que sugiere una mayor estabilidad térmica y química en comparación con las muestras líquidas o semisólidas.

El espectro de infrarrojo FTIR-ATR del alquitrán de biomasa de maíz (figura y) presenta una banda ancha centrada alrededor de 3370 cm^{-1} , atribuida al estiramiento O–H de alcoholes,

fenoles o ácidos carboxílicos, lo que indica la presencia de compuestos oxigenados en la mezcla. Las bandas intensas en 2920 y 2850 cm^{-1} corresponden a estiramientos C–H alifáticos de grupos CH_2 y CH_3 , característicos de hidrocarburos de cadena larga.

Se observa una banda fuerte en torno a 1710 cm^{-1} asociada al estiramiento del grupo carbonilo (C=O), propio de ésteres, cetonas o ácidos. En la región comprendida entre 1460 y 1370 cm^{-1} se aprecian señales correspondientes a las deformaciones de los enlaces C–H, mientras que las absorciones entre 1250 y 1100 cm^{-1} se atribuyen a estiramientos C–O de alcoholes o ésteres.

Por último, las bandas débiles registradas entre 900 y 700 cm^{-1} indican la presencia de enlaces C–H fuera del plano, característicos de compuestos aromáticos. Este comportamiento sugiere la coexistencia de fracciones alifáticas y aromáticas, con una proporción significativa de grupos oxigenados.

En conjunto, el espectro evidencia que la muestra de alquitrán está compuesta por una mezcla orgánica compleja, con presencia de hidrocarburos alifáticos, compuestos oxigenados y estructuras aromáticas, lo que concuerda con la naturaleza del material proveniente de la interacción entre la biomasa de mazorca y el alquitrán durante un proceso térmico.

El espectro de infrarrojo FTIR de los líquidos pirolíticos de la biomasa de maíz muestra una banda ancha e intensa alrededor de 3390 cm^{-1} , correspondiente al estiramiento O–H, indicativo de la presencia de grupos hidroxilo en alcoholes, fenoles o ácidos carboxílicos. Las bandas cercanas a 2920 y 2850 cm^{-1} , aunque menos marcadas, se asocian a estiramientos C–H de grupos alifáticos CH_2 y CH_3 , evidenciando la existencia de compuestos hidrocarbonados.

Se observa una señal destacada cerca de 1637 cm^{-1} atribuida al estiramiento de enlaces C=O o C=C, relacionada con carbonilos o dobles enlaces conjugados. En la región comprendida

entre 1200 y 1000 cm^{-1} aparecen bandas asociadas a vibraciones C–O, propias de alcoholes, ésteres o éteres presentes en la matriz orgánica.

En conjunto, el espectro revela una composición dominada por compuestos oxigenados y fracciones alifáticas, con menor presencia de componentes aromáticos. Estas características son coherentes con una mezcla líquida derivada de la degradación térmica de biomasa, donde los grupos O–H y C=O representan los productos intermedios formados durante el proceso de conversión de la mazorca en fracciones líquidas.

El espectro de infrarrojo FTIR-ATR del Biochar de la biomasa de maíz presenta una notable disminución en la intensidad y número de bandas en comparación con las fracciones de líquidos y alquitran, lo cual indica una fuerte carbonización y la pérdida de grupos funcionales oxigenados durante el proceso térmico.

Se observa una banda débil alrededor de 3410 cm^{-1} atribuida al estiramiento O–H residual, lo que sugiere una baja presencia de grupos hidroxilo. La señal cercana a 2910 cm^{-1} corresponde al estiramiento C–H alifático, aunque su baja intensidad refleja la degradación de las cadenas hidrocarbonadas. En la región de 1600 cm^{-1} se presenta una banda leve asociada al estiramiento C=C de anillos aromáticos condensados, característicos de la estructura grafitica parcial del biochar.

Las señales entre 875 y 590 cm^{-1} pueden relacionarse con vibraciones fuera del plano de enlaces C–H aromáticos, lo que confirma la presencia de estructuras policíclicas formadas durante la pirolización. En general, el espectro evidencia que el biochar obtenido de la biomasa de maíz está compuesto principalmente por una matriz carbonosa aromatizada con escasos grupos funcionales oxigenados, resultado típico de la descomposición térmica avanzada de la biomasa.

El espectro de infrarrojo FTIR-ATR del alquitrán de la cascarilla de arroz presenta una banda ancha alrededor de 3390 cm^{-1} , atribuida al estiramiento O–H de grupos hidroxilo presentes en alcoholes, fenoles o ácidos carboxílicos, característicos de compuestos oxigenados formados durante la pirolización. Las señales observadas cerca de 2920 y 2850 cm^{-1} corresponden al estiramiento C–H alifático, evidenciando la presencia de cadenas hidrocarbonadas saturadas.

En la región media, la banda en torno a 1630 cm^{-1} puede asociarse al estiramiento C=O de carbonilos o al C=C de compuestos aromáticos y olefinicos. Entre 1200 y 1000 cm^{-1} se identifican múltiples bandas vinculadas a vibraciones C–O, indicativas de éteres, ésteres y alcoholes secundarios. Finalmente, las bandas entre 800 y 700 cm^{-1} se relacionan con deformaciones fuera del plano de enlaces C–H aromáticos, lo que sugiere la presencia de estructuras condensadas producto de la descomposición térmica de la biomasa.

En conjunto, el espectro evidencia que el alquitrán obtenido a partir de la cascarilla de arroz contiene una alta proporción de compuestos oxigenados y aromáticos, reflejando la naturaleza compleja de los productos intermedios generados durante el proceso de pirólisis.

El espectro de infrarrojo FTIR-ATR de los líquidos de la cascarilla de arroz presenta una banda ancha e intensa centrada en torno a 3340 cm^{-1} , correspondiente al estiramiento O–H de grupos hidroxilo asociados a alcoholes, fenoles o ácidos carboxílicos, reflejando una composición rica en compuestos oxigenados. Las señales ubicadas cerca de 2920 y 2850 cm^{-1} se atribuyen a los estiramientos C–H de grupos metileno y metilo, indicando la presencia de cadenas alifáticas.

La banda observada en 1636 cm^{-1} se relaciona con el estiramiento de enlaces C=O o C=C, asociados a carbonilos y dobles enlaces conjugados típicos de productos derivados de la pirólisis. En la región comprendida entre 1200 y 1000 cm^{-1} se aprecian bandas correspondientes a

vibraciones C–O, propias de ésteres, éteres y alcoholes secundarios. Además, las señales en torno a 870 y 750 cm^{-1} están vinculadas a deformaciones fuera del plano de enlaces C–H aromáticos, indicando la presencia de compuestos con estructuras aromáticas ligeras.

En conjunto, el espectro revela una mezcla compleja de compuestos oxigenados y alifáticos, con presencia moderada de componentes aromáticos, características que corresponden a los líquidos orgánicos producidos durante la degradación térmica de la cascarilla de arroz.

El espectro de infrarrojo FTIR-ATR del biochar procedente de la cascarilla de arroz muestra una marcada reducción en la cantidad e intensidad de las bandas, reflejando una fuerte carbonización y la pérdida de grupos funcionales oxigenados durante el proceso de pirólisis. Se observa una banda débil cerca de 3430 cm^{-1} asociada al estiramiento O–H residual, lo que indica una baja presencia de grupos hidroxilo.

Las señales localizadas alrededor de 2920 y 2850 cm^{-1} corresponden a los estiramientos C–H de grupos alifáticos, aunque su intensidad reducida evidencia la degradación de las cadenas hidrocarbonadas. En la región de 1600 cm^{-1} aparece una banda atribuida al estiramiento C=C de estructuras aromáticas condensadas, indicando la formación de anillos policíclicos característicos de materiales carbonosos.

Las señales entre 870 y 590 cm^{-1} se relacionan con vibraciones fuera del plano de enlaces C–H aromáticos, lo que confirma la presencia de estructuras grafiticas o aromáticas extendidas. En conjunto, el espectro revela que el biochar obtenido de la cascarilla de arroz está constituido principalmente por una matriz carbonosa aromatizada, con escasa presencia de oxígeno, lo que demuestra la transformación avanzada de la biomasa hacia un material altamente carbonizado y estable.

7.4 Análisis Termogravimétrico (TGA).

Permite analizar la pérdida de masa de la muestra en función de la temperatura y/o el tiempo bajo condiciones controladas. En las figuras 16 a 18 se muestran los termogramas para las tres biomásas bajo estudio y sus productos.

Figura 16

TGA de la cascarilla de arroz y sus productos

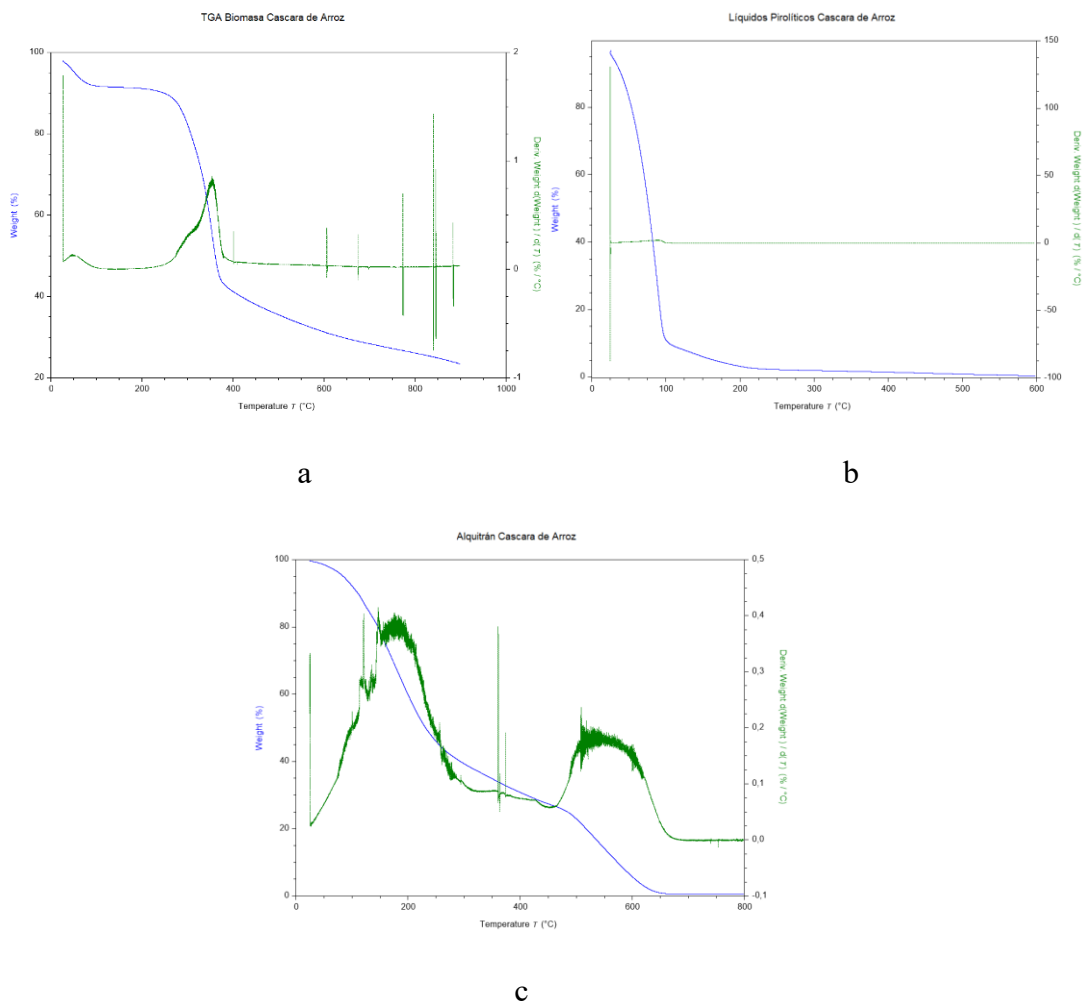
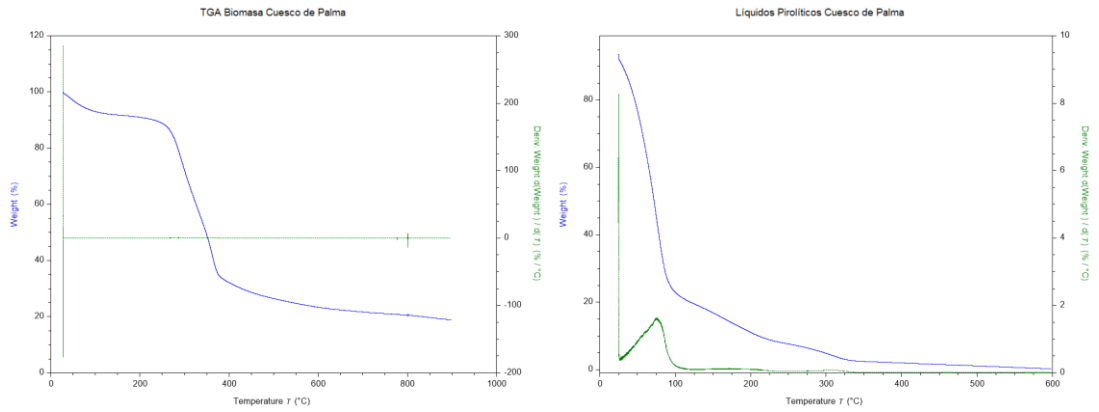


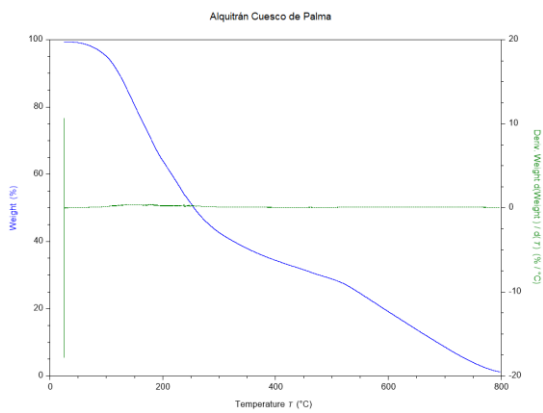
Figura 17

TGA de la biomasa del cuesco de palma y sus productos

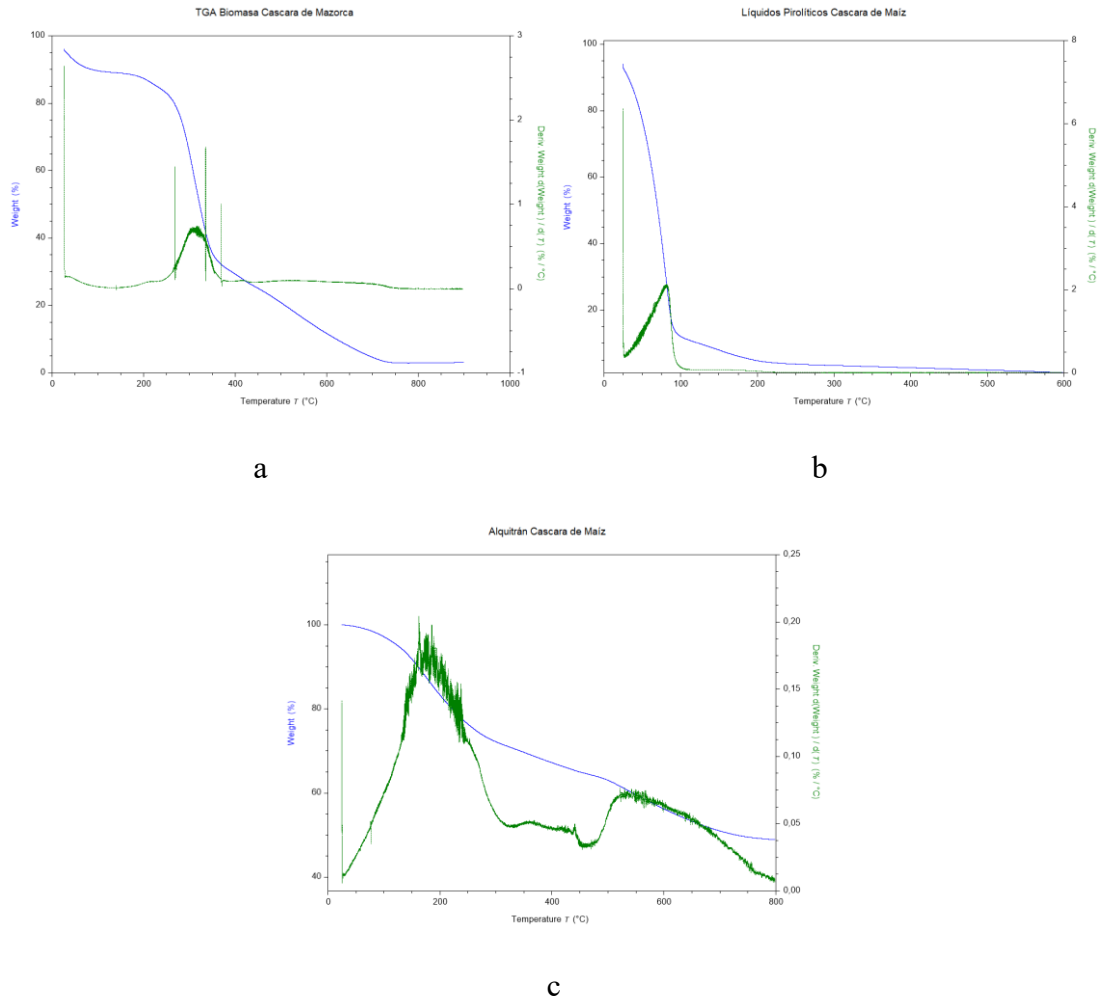


a

b



b

Figura 18*TGA de la biomasa de maíz y sus productos*

El análisis termogravimétrico (TGA) de la cascara de arroz evidencia un comportamiento térmico característico de biomasa lignocelulósicas, con cuatro etapas principales de degradación. En la primera etapa, comprendida entre aproximadamente 30 y 150 °C, se observa una leve pérdida de masa cercana al 5–10 %, atribuida a la eliminación de humedad libre y agua físicamente adsorbida en la estructura vegetal (Yang et al., 2007; Poletto et al., 2014). Posteriormente, entre 200 y 400 °C, se presenta la fase de pirólisis activa, donde ocurre la mayor pérdida de masa (30–40 %), asociada a la descomposición de los principales polímeros estructurales de la biomasa:

hemicelulosa y celulosa (Chen et al., 2021; López-González et al., 2023). Esta etapa se caracteriza por un pico máximo en la curva derivada (DTG) alrededor de los 350–370 °C, lo cual concuerda con los rangos de degradación reportados para estos componentes, donde la celulosa presenta máximos de degradación cercanos a 340–370 °C bajo atmósferas inertes (Yang et al., 2007; Balasundram et al., 2017). En la tercera etapa, entre 400 y 600 °C, la velocidad de pérdida de masa disminuye, indicando la descomposición progresiva de la lignina y la formación de un residuo carbonoso estable. Finalmente, por encima de los 600 °C, la curva de peso se estabiliza y el residuo final alcanza aproximadamente un 30–35 % de la masa inicial, reflejando el elevado contenido inorgánico de la cáscara de arroz, principalmente compuesto por sílice (SiO₂). Este alto contenido de cenizas confiere a la biomasa una notable estabilidad térmica residual, aunque reduce su potencial para la producción de bioaceite, orientando su aprovechamiento hacia la obtención de materiales silíceos, carbón activado o biochar con propiedades adsorbentes. En la tabla 8 se pueden observar los intervalos de degradación térmica.

Tabla 8

Intervalos de degradación térmica de la cascarilla de arroz mediante TGA

Etapa	Rango de temperatura (°C)	Proceso	Pérdida de masa (%)	Componente principal
1	30–150	Deshidratación	5–10	Humedad
2	200–400	Pirólisis activa	30–40	Hemicelulosa, celulosa
3	400–600	Carbonización	10–15	Lignina
4	>600	Estabilidad térmica / ceniza	—	Sílice, cenizas minerales

El análisis termogravimétrico (TGA) del cuesco de palma muestra un comportamiento térmico típico de biomasa lignocelulósicas con alto contenido de lignina y baja humedad inicial. En la primera etapa, entre 30 y 150 °C, se observa una ligera pérdida de masa (alrededor del 5 %), atribuida principalmente a la eliminación de humedad superficial y agua físicamente adsorbida. Posteriormente, entre 200 y 400 °C, se presenta la etapa principal de degradación térmica, donde ocurre la mayor pérdida de masa (aproximadamente 40–50 %), relacionada con la descomposición de la hemicelulosa y la celulosa presentes en la biomasa. Este rango de degradación coincide con los procesos de pirólisis activa descritos por Yang et al. (2007), en los que se liberan gases volátiles y compuestos orgánicos que constituyen la fracción líquida del proceso.

En la tercera etapa, comprendida entre 400 y 600 °C, se lleva a cabo la descomposición de la lignina, cuya estructura aromática le confiere mayor resistencia térmica y una degradación más prolongada. Esta fase se caracteriza por una disminución gradual en la pendiente de la curva de peso, indicando la formación de un residuo carbonoso estable. Por encima de los 600 °C, la curva tiende a estabilizarse, con un residuo final cercano al 20 % del peso inicial. Este valor sugiere un contenido moderado de materia inorgánica (cenizas), típico del cuesco de palma, lo cual contrasta con biomasa como la cáscara de arroz, que presentan valores residuales más altos por su contenido en sílice. En general, el cuesco de palma presenta una alta reactividad térmica y una degradación más completa que otras biomasa agrícolas las cuales podremos observar en la tabla 9, lo que lo convierte en un material adecuado para la producción de biocombustibles sólidos y líquidos mediante procesos de pirólisis o gasificación.

Tabla 9*Intervalos de degradación térmica del cuesco de palma mediante TGA*

Etapa	Rango de temperatura (°C)	Proceso	Pérdida de masa (%)	Componente principal
1	30–150	Deshidratación	~5	Humedad superficial y agua adsorbida
2	200–400	Pirólisis activa	40–50	Hemicelulosa y celulosa
3	400–600	Degradación lenta / carbonización	10–15	Lignina
4	>600	Estabilidad térmica / cenizas	—	Materia inorgánica (cenizas)

El análisis termogravimétrico (TGA) de la cáscara de mazorca muestra un perfil típico de biomasa lignocelulósica con una degradación térmica distribuida en tres etapas principales. En la primera etapa, comprendida entre 30 y 150 °C, se observa una ligera pérdida de masa (aproximadamente 5–8 %), asociada a la eliminación de humedad superficial y agua físicamente retenida. En la segunda etapa, entre 200 y 400 °C, ocurre la degradación más significativa de la biomasa, con una pérdida de masa de aproximadamente 40–50 %. Este proceso corresponde a la descomposición de los principales componentes orgánicos: hemicelulosa y celulosa, siendo la región de mayor liberación de compuestos volátiles y gases. En la curva DTG se evidencia un pico principal alrededor de los 340–370 °C, característico de la pirólisis activa, donde se concentra la mayor velocidad de degradación.

La tercera etapa, que se extiende entre 400 y 600 °C, representa la descomposición progresiva de la lignina, la cual ocurre de manera más lenta debido a su estructura aromática compleja. Finalmente, por encima de los 600 °C, la curva de peso se estabiliza, dejando un residuo

cercano al 10–15 % de la masa inicial y se puede observar en la tabla 10. Este bajo contenido residual indica una baja proporción de compuestos inorgánicos en la biomasa de cáscara de mazorca, lo cual la convierte en una fuente favorable para la obtención de biocombustibles mediante procesos termoquímicos, ya que genera menor cantidad de cenizas.

En conjunto, la cáscara de mazorca presenta una alta fracción orgánica y baja cantidad de minerales, con un rango de degradación térmica centrado en la etapa de pirólisis activa, lo que la hace una biomasa con buen potencial energético y buena respuesta en procesos de pirólisis para la producción de bioaceite y biogás.

Tabla 10

Intervalos de degradación térmica de la biomasa de maíz mediante TGA

Etapas	Rango de temperatura (°C)	Proceso	Pérdida de masa (%)	Componente principal
1	30–150	Deshidratación	5–8	Humedad y agua adsorbida
2	200–400	Pirólisis activa	40–50	Hemicelulosa y celulosa
3	400–600	Degradación lenta / carbonización	10–15	Lignina
4	>600	Estabilidad térmica / cenizas	—	Cenizas residuales bajas

El análisis termogravimétrico (TGA) de los líquidos pirolíticos derivados de la cáscara de arroz evidencia un comportamiento característico de materiales altamente volátiles y con bajo contenido de residuos no volátiles. La curva de pérdida de masa muestra una disminución pronunciada entre los 30 y 120 °C, atribuida principalmente a la evaporación de agua libre y

compuestos orgánicos ligeros presentes en la mezcla, tales como alcoholes, cetonas, aldehídos y pequeñas fracciones hidrocarbonadas. Este evento representa la etapa más significativa del proceso, con una pérdida estimada cercana al 90 % de la masa inicial, indicando que la mayor parte del líquido pirolítico está compuesta por componentes de baja estabilidad térmica.

Entre los 120 y 300 °C, se observa una segunda etapa de degradación leve asociada a la descomposición o craqueo térmico de fracciones más pesadas como fenoles, ácidos carboxílicos y oligómeros derivados de la lignina. Esta región térmica sugiere la presencia de moléculas más complejas con mayor punto de ebullición, cuya fragmentación produce volátiles secundarios y contribuye en menor medida a la pérdida total de masa (alrededor del 5 – 8 %).

Finalmente, por encima de los 300 °C, la curva se estabiliza, indicando la formación de una fracción residual mínima (≈ 2 %), compuesta por carbono no volátil y trazas de cenizas inorgánicas. Este bajo contenido de residuo sugiere que los líquidos pirolíticos poseen alta pureza en compuestos orgánicos volátiles y mínima tendencia a generar char o material carbonoso bajo condiciones de calentamiento controlado y se puede observar en la tabla 11.

En conjunto, el comportamiento térmico obtenido confirma que los líquidos pirolíticos de cáscara de arroz presentan alta volatilidad, bajo contenido de sólidos residuales y una composición dominada por compuestos oxigenados de baja masa molecular, lo cual concuerda con lo reportado por autores como Demirbaş (2017) y Bridgwater (2012), quienes describen este tipo de productos como mezclas complejas con propiedades termodinámicas similares a fracciones ligeras del petróleo. Estas características los convierten en materias primas potenciales para la obtención de biocombustibles líquidos o insumos químicos, aunque su alta proporción de oxígeno y humedad puede afectar la estabilidad y el poder calorífico, requiriendo procesos de mejora o upgrading posteriores.

Tabla 11*Intervalos de degradación térmica de los líquidos de la cascarilla de arroz mediante TGA*

Etapa	Rango de temperatura (°C)	Proceso	Pérdida de masa (%)	Componente principal
1	30–120	Evaporación y volatilización rápida	~85–95	Agua libre, fracciones volátiles ligeras (compuestos C ₅ –C ₁₂ , agua, ligeros oxigenados)
2	120–300	Destilación / cracking térmico secundario (degradación de fracciones pesadas)	~3–8	Fracciones medianas-pesadas (fenoles, azúcares caramelizados, oligómeros)
3	>300	Carbonización / formación de residuo no volátil	~0–2	Carbono no volátil y pequeños contenidos inorgánicos (residuo fijo)

El análisis termogravimétrico de los líquidos pirolíticos derivados del cuesco de palma revela una pérdida de masa predominante en el rango de 30 a 150 °C, atribuida principalmente a la evaporación del agua residual y de compuestos orgánicos volátiles ligeros. Esta etapa representa el proceso más pronunciado de degradación térmica, evidenciado por una fuerte pendiente en la curva TGA y un máximo en la señal derivada (DTG) alrededor de los 60–90 °C, lo cual indica una alta proporción de fracciones de bajo peso molecular como alcoholes, aldehídos, ácidos y cetonas.

Posteriormente, entre 150 y 300 °C, se identifica una segunda etapa de pérdida más moderada, asociada a la descomposición térmica de moléculas de mayor complejidad, tales como fenoles, ésteres, y oligómeros derivados de la lignina. Este rango térmico refleja el craqueo

progresivo de las fracciones pesadas del bioaceite, que generan nuevos volátiles y reducen lentamente la masa residual.

Por encima de 300 °C, la curva de peso tiende a estabilizarse, con una pérdida total cercana al 95 %, lo que deja un residuo inferior al 5 %. Este remanente puede corresponder a carbono no volátil y trazas inorgánicas derivadas de impurezas minerales presentes en el bioaceite y se puede ver en la tabla 12. El bajo contenido de residuos confirma que los líquidos pirolíticos del cuesco de palma poseen una composición predominantemente orgánica y volátil, con poca tendencia a la formación de coque bajo calentamiento controlado.

En términos comparativos, el comportamiento térmico de estos líquidos coincide con lo reportado para biocombustibles líquidos de origen lignocelulósico, los cuales presentan una volatilización temprana y una degradación casi completa por debajo de los 300 °C. Esto sugiere que el bioaceite del cuesco de palma tiene una alta proporción de compuestos oxigenados ligeros y un bajo contenido de residuos carbonosos, características favorables para su uso como materia prima en la síntesis de biocombustibles líquidos o mezclas de combustible renovable. Sin embargo, su estabilidad térmica limitada y la presencia de oxígeno en su estructura química podrían requerir tratamientos de upgrading o hidrogenación para mejorar su calidad energética.

Tabla 12*Intervalos de degradación térmica de los líquidos del cuesco de palma mediante TGA*

Etapa	Rango de temperatura (°C)	Proceso	Pérdida de masa (%)	Componente principal
1	30–150	Evaporación y volatilización rápida	~80–85	Agua libre y compuestos orgánicos ligeros (alcoholes, aldehídos, cetonas, ácidos ligeros)
2	150–300	Destilación / craqueo térmico de fracciones medianas	~10–13	Fracciones medianas (fenoles, ésteres, oligómeros lignínicos)
3	>300	Carbonización / formación de residuo no volátil	~1–5	Carbono no volátil y trazas inorgánicas (residuo fijo)

El análisis termogravimétrico de los líquidos pirolíticos provenientes de la cáscara de maíz evidencia una marcada pérdida de masa en el rango de 30 a 150 °C, correspondiente principalmente a la evaporación del agua residual y de compuestos orgánicos volátiles ligeros generados durante la pirólisis. Este comportamiento es típico de los bioaceites crudos, cuya fracción más volátil contiene moléculas de bajo peso molecular como metanol, acetona, aldehídos, cetonas y ácidos carboxílicos ligeros. La señal derivada (DTG) presenta un pico máximo pronunciado en este rango, lo cual confirma una intensa actividad de volatilización inicial.

En una segunda etapa, comprendida entre 150 y 250 °C, se observa una degradación más lenta, asociada a la descomposición de fracciones orgánicas medianas, tales como fenoles, ésteres, y compuestos aromáticos oxigenados derivados de la lignina y de oligómeros formados durante la

pirólisis. Esta fase representa el craqueo térmico de las moléculas más pesadas del bioaceite, contribuyendo a una pérdida de masa adicional del orden del 15–20 %.

A temperaturas superiores a 250 °C, la curva de masa tiende a estabilizarse, alcanzando una pérdida total de aproximadamente 95–97 %, lo que indica que el líquido pirolítico posee una composición altamente volátil y orgánica, con un residuo final inferior al 5 %, en la tabla 13 podemos observar esto. Este residuo corresponde a carbono no volátil y trazas inorgánicas provenientes de la biomasa original o del proceso de condensación.

Tabla 13

Intervalos de degradación térmica de los líquidos de la biomasa de maíz mediante TGA

Etapa	Rango de temperatura (°C)	Proceso	Pérdida de masa (%)	Componente principal
1	30–150	Evaporación inicial y volatilización rápida	~70–80	Agua libre, metanol, aldehídos y compuestos oxigenados ligeros
2	150–250	Descomposición térmica de fracciones medianas	~15–20	Fenoles, ácidos y ésteres derivados de lignina y hemicelulosa
3	>250	Formación de residuos no volátiles	~3–5	Carbono fijo, residuos minerales y trazas de compuestos pesados

En términos comparativos, el comportamiento térmico de los líquidos pirolíticos de cáscara de maíz es semejante al reportado para otros bioaceites lignocelulósicos, los cuales presentan volatilización completa por debajo de los 300 °C y bajo contenido de cenizas o residuos carbonosos. Estos resultados reflejan un material con alta reactividad térmica y baja estabilidad, características deseables para procesos de reformado o upgrading, pero limitantes para su uso

directo como combustible líquido debido a la presencia de compuestos oxigenados e inestabilidad química.

El análisis termogravimétrico del alquitrán obtenido a partir de la cáscara de arroz muestra un perfil de descomposición complejo, caracterizado por múltiples etapas de pérdida de masa. En la primera etapa, comprendida entre los 30 y 150 °C, se observa una disminución aproximada del 10–15 %, atribuida a la evaporación de agua residual y a la pérdida de compuestos volátiles ligeros presentes en el bioalquitrán, tales como alcoholes, aldehídos y cetonas. Esta fase refleja la naturaleza higroscópica del material y su contenido de fracciones de baja estabilidad térmica.

La segunda etapa, entre 150 y 350 °C, evidencia una pérdida de masa significativa, cercana al 40 %, asociada con la degradación de fracciones orgánicas medianas, incluyendo ácidos orgánicos, ésteres, fenoles y fragmentos de lignina parcialmente condensados. La pendiente pronunciada de la curva DTG en este intervalo indica una fuerte actividad de descomposición térmica, correspondiente al craqueo de moléculas oxigenadas derivadas de la biomasa.

Posteriormente, entre 350 y 550 °C, se presenta una nueva pérdida de masa del 25–30 %, atribuible al craqueo térmico y despolimerización de compuestos aromáticos pesados y al inicio de la formación de estructuras carbonosas. Esta etapa refleja la transformación de los compuestos más recalcitrantes del alquitrán en residuos carbonosos, lo cual es característico de materiales orgánicos con alto grado de condensación.

Finalmente, por encima de los 550 °C, el proceso tiende a estabilizarse con una pérdida adicional del 10–15 %, relacionada con la oxidación parcial de residuos carbonosos y la formación de cenizas inorgánicas. El residuo final, inferior al 20 %, representa la fracción no volátil del

alquitrán, compuesta principalmente por carbono fijo y sílice, esta última característica de la cáscara de arroz.

El comportamiento térmico del alquitrán de cáscara de arroz confirma su alta reactividad térmica y su composición predominantemente orgánica, con una amplia gama de compuestos volátiles. La presencia de varias etapas de descomposición indica una mezcla compleja de componentes de diferente estabilidad térmica las cuales podemos visualizar en la tabla 14, lo cual es coherente con la naturaleza heterogénea de los productos líquidos condensables obtenidos durante la pirólisis de biomasa lignocelulósica.

Tabla 14

Intervalos de degradación térmica del alquitrán de la cascarilla de arroz mediante TGA

Etapas	Rango de temperatura (°C)	Pérdida de masa (%)	Fenómeno asociado
1	30 – 150	10 – 15	Eliminación de humedad y compuestos volátiles ligeros (agua, alcoholes, cetonas)
2	150 – 350	35 – 40	Descomposición de fracciones orgánicas medianas (ácidos, fenoles, ésteres, aldehídos)
3	350 – 550	25 – 30	Craqueo térmico de compuestos pesados y aromáticos condensados
4	>550	10 – 15	Oxidación parcial y carbonización residual (formación de carbón y cenizas)

El análisis termogravimétrico del alquitrán derivado del cuesco de palma muestra un perfil de descomposición típico de materiales orgánicos complejos con alto contenido de volátiles. En la primera etapa, entre los 30 y 150 °C, se observa una pérdida de masa cercana al 10 %,

correspondiente a la evaporación de humedad adsorbida y la liberación de compuestos volátiles ligeros, principalmente agua, metanol, acetona y pequeñas fracciones de hidrocarburos de bajo peso molecular. La segunda etapa, comprendida entre 150 y 400 °C, representa la fase más intensa de degradación térmica, con una pérdida de masa del orden del 50 %, asociada a la descomposición de fracciones orgánicas intermedias. En este rango ocurre el craqueo de ácidos grasos, ésteres, alcoholes y fenoles, derivados de la lignina y los compuestos oxigenados del aceite residual contenido en el alquitrán. La pendiente pronunciada de la curva TGA refleja una alta reactividad térmica del material, evidenciando que gran parte de sus componentes son termolábiles.

Posteriormente, entre 400 y 600 °C, se produce una pérdida de masa adicional cercana al 25–30 %, atribuida al craqueo térmico de fracciones pesadas, incluyendo compuestos aromáticos condensados y estructuras policíclicas presentes en el alquitrán. En esta etapa se forman residuos carbonosos estables debido a la polimerización y condensación de las moléculas más refractarias.

Finalmente, por encima de los 600 °C, la curva tiende a estabilizarse, con una pérdida adicional del 10–15 %. Esta fase corresponde a la oxidación parcial del carbono residual y a la formación de cenizas minerales. El residuo final es bajo, lo que indica que el alquitrán del cuesco de palma posee una alta fracción orgánica volátil y un contenido reducido de componentes inorgánicos.

El comportamiento térmico obtenido revela que el alquitrán de cuesco de palma tiene una composición rica en compuestos volátiles y semivolátiles que podemos visualizar en la tabla 15, con una descomposición predominante en el rango medio de temperaturas, lo que sugiere su potencial como fuente de precursores para combustibles líquidos y compuestos aromáticos en procesos de refinamiento o upgrading.

Tabla 15*Intervalos de degradación térmica del alquitrán del cuesco de palma mediante TGA*

Etapa	Rango de temperatura (°C)	Pérdida de masa (%)	Fenómeno asociado
1	30 – 150	8 – 10	Eliminación de humedad y compuestos volátiles ligeros
2	150 – 400	45 – 50	Descomposición de compuestos orgánicos medianos (ácidos, alcoholes, cetonas, ésteres)
3	400 – 600	25 – 30	Craqueo térmico de fracciones aromáticas pesadas y compuestos alquitranosos
4	>600	10 – 15	Oxidación parcial y formación de carbón residual estable

El análisis termogravimétrico (TGA) del alquitrán obtenido a partir de biomasa de maíz muestra un comportamiento térmico multietapa, típico de materiales lignocelulósicos con alto contenido de compuestos orgánicos condensados. En la Figura X se observa una primera pérdida de peso en el rango de 25 a 150 °C, atribuida principalmente a la eliminación de humedad física y compuestos volátiles ligeros. A continuación, entre 150 y 350 °C se presenta la etapa de degradación más significativa, asociada con la descomposición térmica de la hemicelulosa, la celulosa y parte de los extractivos presentes en la matriz orgánica del alquitrán. Esta zona se caracteriza por un pico máximo en la curva DTG alrededor de los 250 °C, que indica una liberación intensa de gases y vapores orgánicos volátiles.

Entre 350 y 550 °C ocurre una segunda fase de degradación más gradual, correspondiente a la ruptura térmica de estructuras aromáticas complejas y lignina residual. En esta etapa, la velocidad de pérdida de masa disminuye, lo que evidencia la presencia de compuestos más estables

térmicamente. Finalmente, a temperaturas superiores a los 550 °C, la curva de peso se estabiliza, conservando aproximadamente entre un 35 y 40 % del peso inicial y se puede observar en la tabla 16. Este residuo corresponde a la fracción carbonosa o carbono fijo del material, indicando una alta estabilidad térmica y una red aromática condensada, característica de materiales con potencial para la producción de biochar o carbón activado.

Tabla 16

Intervalos de degradación térmica del alquitrán de biomasa de maíz mediante TGA

Etapa	Rango de temperatura (°C)	Pérdida de masa (%)	Fenómeno asociado
1	30 – 180	5 – 8	Eliminación de humedad residual y liberación de compuestos volátiles ligeros atrapados en la matriz orgánica.
2	180 – 350	30 – 35	Descomposición principal de componentes oxigenados (hemicelulosa, celulosa y compuestos orgánicos medianos del alquitrán), con intensa liberación de gases y vapores.
3	350 – 550	15 – 20	Ruptura térmica y craqueo progresivo de compuestos aromáticos pesados y fracciones alquitránicas de alto peso molecular.
4	>550	35 – 40 (residuo)	Formación de fracción carbonosa estable (biochar o carbono fijo) y carbonización final del material.

En conjunto, el perfil termogravimétrico del alquitrán de cáscara de maíz revela un material con buena resistencia térmica y un proceso de degradación escalonado. La mayor pérdida de masa ocurre antes de los 400 °C, seguida de una etapa de carbonización progresiva. Este

comportamiento confirma la complejidad composicional del alquitrán derivado de residuos lignocelulósicos y su viabilidad para aplicaciones energéticas y de obtención de materiales carbonosos.

7.5 Cromatografía de los gases.

Se realizó el análisis por cromatografía de gases para cada uno de los productos gaseosos obtenidos de las tres muestras de biomasa: cáscara de arroz, cuesco de palma y biomasa de maíz. En la Tabla 17 se muestra la composición de los gases en porcentaje molar.

La cromatografía de gases permite identificar y cuantificar los compuestos presentes en el gas pirolítico, lo que facilita comprender la composición química de los gases generados durante la pirólisis. Esta información es fundamental para evaluar su potencial energético y sus posibles aplicaciones.

El aprovechamiento de residuos agrícolas mediante procesos termoquímicos como la pirólisis permite transformar la biomasa en productos energéticos valiosos, entre ellos el gas pirolítico. Este gas contiene mezclas de hidrógeno, metano y otros hidrocarburos livianos que pueden emplearse como combustible o en generación eléctrica. Por lo tanto, el análisis cromatográfico permite determinar la calidad del gas producido a partir de biomásas como la cáscara de arroz, el cuesco de palma y la cáscara de mazorca, contribuyendo a evaluar su viabilidad para el aprovechamiento energético de estos residuos agrícolas.

Tabla 17*Análisis composicional por cromatografía de los gases*

Componente	Cuesco de Palma (% mol)	Mazorca de Maíz (% mol)	Cascarilla de Arroz (% mol)
Metano (CH ₄)	19.05	13.04	17.20
Dióxido de carbono (CO)	19.52	41.78	35.60
Etano (C ₂ H ₆)	6.76	20	3.78
Propano (C ₂ H ₆)	3.78	3.04	1.26
Compuesto C ₄₊	4.22	4.36	10.83
Hidrógeno (H ₂)	46.67	17.78	31.34

El poder calorífico inferior (PCI) de cada mezcla gaseosa se calculó mediante la suma ponderada por la fracción molar de cada componente, según la siguiente ecuación (3):

$$PCI_{mezcla} = \sum (x_i * PCI_{mezcla}) \quad (3)$$

Donde x_i es la fracción molar del componente i , y PCI_i es el poder calorífico inferior individual (MJ/kg). Para estimar el poder calorífico se aplicaron las ecuaciones 3 a 12, como se describe a continuación:

- Eficiencia eléctrica se toma este valor con referencia a Abouemara et al., *Fuel* 2024

$$(\eta_{el}) = 40 \%$$

- Contribución de masa por mol del componente: $x_i \cdot M_i(\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$. (4)

- Masa molar promedio de la mezcla: $\bar{M} = \sum_i x_i \cdot M_i(\text{g} \cdot \text{mol}^{-1})$. (5)

- Fracción másica: $w_i = \frac{x_i \cdot M_i}{\bar{M}}$. (6)

- PCI mezcla ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$): $PCI_{mezcla} = \sum_i w_i \cdot PCI_i$. (7)

- Energía del gas producido $E_{gas} = \eta_{gas} \times PCI_{gas}(\text{MJ})$. (8)

- Energía por kg biomasa: $E_{kg} = PCI_{mezcla} \times R_g(\text{MJ/kg})$, donde R_g es kg gas/kg biomasa. (9)

- Conversión a kWh: $1 \text{ kWh} = 3600 \text{ KJ}$.

- Ecuación para el cálculo de Energía eléctrica: $E_{elec} = \frac{PCI_{gas} \cdot \eta_{gas} \cdot \eta_{elc}}{3600}$ (kWh/kg) (10)

- Biomasa anual para el estudio 66.000.000kg/año. (11)

- Electricidad anual generada: $E_{elc,anual} = E_{el} \times 66.000.000(\text{Kg/año})$. (12)

Los poderes caloríficos inferiores individuales (PCI_i) de los principales componentes gaseosos (H_2 , CH_4 , C_2H_6 , etc.) se tomaron de tablas termodinámicas reportadas en Perry & Green (2008) y Moran & Shapiro (2010), los cuales corresponden a valores estándar a 25°C y 1 atm. Estos datos se emplearon para el cálculo del poder calorífico inferior del gas pirolítico mediante ponderación según la composición molar obtenida experimentalmente como se muestran en las tablas 18 a 20, los rendimientos de gas se pueden encontrar en la tabla 6.

Tabla 18*Poder calorífico de la mezcla de gases (PCI_{mezcla}) del Cuesco de Palma*

Componentes	Y_i	Mi (g/mol)	$Y_i * M_i$	w_i	PCI _i (MJ/kg)	$w_i * PCI_i$ (kJ/kg gas)
Metano (CH ₄)	0,1905	16,04	3,056	0,359	50,01	17,982
Monóxido de Carbono (CO)	0,1905	28,01	2,667	0,313	10,112	3,173
Etano (C ₂ H ₆)	0,0676	30,07	1,431	0,168	47,794	8,050
Propano(C ₃ H ₈)	0,0378	44,10	1,6670	0,1067	46,36	4,95
Compuesto C ₄ +	0,0422	58,12	2,4527	0,1571	45,75	7,19
Hidrógeno (H ₂)	0,4667	2	1,344	0,158	120,971	19,134
Total	1.000		15,617	1,000		38,92

Tabla 19*Poder calorífico de la mezcla de gases (PCI_{mezcla}) de la biomasa de maíz*

Componentes	Y_i	Mi (g/mol)	$Y_i * M_i$	w_i	PCI _i (MJ/kg)	$w_i * PCI_i$ (kJ/kg gas)
Metano (CH ₄)	0,130	16,040	2,092	0,087	50,010	4,351
Monóxido de Carbono (CO)	0,418	28,010	11,703	0,487	10,112	4,922
Etano (C ₂ H ₆)	0,200	30,070	6,014	0,250	47,794	11,956
Propano(C ₃ H ₈)	0,030	44,100	1,341	0,056	46,360	2,585
Compuesto C ₄ +	0,044	58,120	2,534	0,105	45,750	4,822
Hidrógeno (H ₂)	0,178	2,020	0,359	0,015	120,971	1,807
Total	1		24,0413	1		29,62

Tabla 20

Poder calorífico de la mezcla de gases (PCI_{mezcla}) de la cascarilla de Arroz

Componentes	Y_i	M_i (g/mol)	$Y_i * M_i$	w_i	PCI_i (MJ/kg)	$w_i * PCI_i$ (kJ/kg gas)
Metano (CH ₄)	0,172	16,04	2,7589	0,0767	50,01	3,84
Monóxido de Carbono (CO)	0,356	28,01	9,9716	0,2773	10,11	2,8
Etano (C ₂ H ₆)	0,0378	30,07	1,1366	0,0316	47,79	1,51
Propano(C ₃ H ₈)	0,0126	44,1	0,5557	0,0155	46,36	0,72
Compuesto C4+	0,1083	58,12	6,2944	0,1751	45,75	8,01
Hidrógeno (H ₂)	0,3134	2,02	0,6319	0,0176	120	2,11
Total	1		19,3491	1		18,99

En la tabla 21 se muestra el resumen de los poderes caloríficos obtenidos para los productos gaseosos del proceso de pirolisis de las biomásas en estudio.

Tabla 21

Resumen general de resultados del PCI

Biomasa	PCI del gas (KJ/kg)
Cuesco de palma	38,92
Cascarilla de arroz	18,99
Biomasa de maíz	29,62

La energía total generada por la fracción gaseosa en esta sección se determinó a partir del poder calorífico y la masa de gas obtenida de 70 g de biomasa, y luego se lleva a escalamiento industrial según Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME 2023), el cual se utilizará una base de cálculo de 200 ton/día de biomasa para que exista viabilidad económica. En la tabla 22 los valores de energía estimados y normalizados a KJ/Kg.

Tabla 22*Energía química en el gas por kg de biomasa*

Biomasa	PCI del gas (KJ/kg)	Rendimiento gas (%)	E_{gas} (kJ/kg biomasa)
Cuesco palma	38,92	30,4	11,832
Cascarilla de arroz	18,99	36,2	6,874
Biomasa de maíz	29,62	32,5	9,627

Adicionalmente, en la tabla 23 se reportan los resultados de la energía eléctrica producida por kilogramo de biomasa residual vegetal.

Tabla 23*Energía eléctrica por kg de biomasa*

Biomasa	PCI del gas (KJ/kg)	Rendimiento gas (%)	E_{elec} (kWh/kg biomasa)
Cuesco palma	48,340	31.7	1,316
Cascarilla de arroz	40,195	31.7	1,192
Biomasa de mazorca	29,586	31.7	0,686

En la tabla 24 se realiza los calculos de la electricidad anual con la ecuacion (12), y se calcula la potencia instalada en la escala industrial de 200 ton/día.

Tabla 24*Electricidad anual generada y su potencia*

Biomasa	Electricidad anual(kWh)	Potencia Instalada(kw)
Cuesco palma	86.856.000	10.967
Biomasa de maíz	78.672.000	9.933
Cascarilla de arroz	45.276.000	5.717

7.6 Poder Calorífico

En la tabla 25 se muestran los resultados del poder calorífico promedio de biomasa y productos de pirólisis de cuesco de palma, cascarilla de arroz y biomasa de maíz.

Tabla 25

Valores de poder calorífico

Material / Producto	Rango típico HHV (MJ/kg)	Promedio aproximado (MJ/kg)
Cuesco de palma – biomasa cruda	17.5 – 19.5	18.5
Cuesco de palma – biochar	22 – 28	24–25
Cuesco de palma – bio- oil	20 – 30	25
Cascarilla de arroz – biomasa cruda	13 – 16.5	15
Cascarilla de arroz – biochar	20 – 30	24
Cascarilla de arroz – bio- oil	18 – 25	21
Biomasa de maíz – biomasa cruda	14 – 18.8	16
Biomasa de maíz – biochar	20 – 26	22
biomasa de maíz – bio- oil	18 – 25	21

El poder calorífico representa un parámetro fundamental para evaluar el potencial energético de un material combustible, al expresar la cantidad de energía térmica liberada por unidad de masa durante su combustión completa. En el caso de la biomasa lignocelulósica, este

valor depende directamente de la composición química del material, del contenido de carbono fijo y volátiles, así como del porcentaje de cenizas presentes en su estructura.

Según los resultados obtenidos, el poder calorífico promedio de la biomasa cruda presenta valores entre 15 y 18,5 MJ/kg, siendo el cuesco de palma el residuo con mayor potencial energético (18,5 MJ/kg), seguido por la mazorca de maíz (16 MJ/kg) y la cáscara de arroz (15 MJ/kg). Estas diferencias se relacionan principalmente con la proporción de lignina y cenizas presentes en cada tipo de biomasa, donde un mayor contenido de lignina favorece una densidad energética superior.

Durante el proceso de pirólisis, la biomasa sufre una serie de transformaciones termoquímicas que incrementan la concentración de carbono en los productos sólidos y líquidos, lo que se traduce en un aumento significativo del poder calorífico respecto al material original. En este sentido, los valores promedio del biochar se encuentran entre 22 y 26 MJ/kg, mientras que los del bio-oil varían entre 21 y 25 MJ/kg.

El biochar obtenido del cuesco de palma presenta los valores más altos de poder calorífico, alcanzando entre 24 y 25 MJ/kg, lo que evidencia una mejora energética notable frente a la biomasa inicial. Este aumento se debe a la eliminación de compuestos volátiles y la carbonización progresiva del material durante la pirólisis, que concentran el carbono fijo en el sólido residual. Por su parte, el bio-oil también presenta un poder calorífico superior al de la biomasa original, aunque inferior al del biochar, debido a su mayor contenido de oxígeno, lo que limita ligeramente su densidad energética.

En general, los resultados permiten concluir que la pirólisis de biomasa residual vegetal constituye una alternativa eficiente para la obtención de combustibles con alto contenido energético. El incremento del poder calorífico en los productos obtenidos demuestra el potencial de valorización de residuos agrícolas como el cuesco de palma, la cáscara de arroz y la mazorca

de maíz, contribuyendo al desarrollo de procesos sostenibles orientados al aprovechamiento energético de desechos agroindustriales.

7.7 Viabilidad económica del uso del gas de pirólisis

A partir de la composición de los gases obtenidos por pirólisis de cuesco de palma, mazorca de maíz y cascarilla de arroz, se calcularon sus poderes caloríficos inferiores (PCI) mediante conversión de fracciones molares a máxicas. Con estos valores, las eficiencias de gasificación experimentales (30,4 %, 36,2 % y 32,5 %) y una eficiencia eléctrica del 40 % (Abouemara et al., 2024; Jia et al., 2015), se dimensionó una planta de 200 ton/día. Se incorporaron los beneficios fiscales de la Ley 1715 de 2014 y costos de referencia (Cunningham, 2025; GlobalPetrolPrices, 2025) para estimar el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el período de recuperación (payback), determinando así la viabilidad económica de cada biomasa.

Conversión del costo de inversión referencial: **4.000 USD/kW \approx 16.000.000 COP/kW** (tasa COP/USD = 4.000). En la tabla 26 se puede observar la inversión que se ruvo de CAPEX.

Tabla 26

Inversión de CAPEX

Biomasa	Potencia Instalada(kw)	CAPEX bruto (M COP)
Cuesco palma	10.967	175.472
Biomasa de maíz	9.933	158.928
Cascarilla de arroz	5.717	91.472

Se realiza un análisis financiero respecto a los beneficios fiscales por ser un proyecto de energías renovables para aumentar la viabilidad de este proyecto, así como sus márgenes de ganancias las cuales se pueden ver reflejadas con los siguientes datos en la tabla 27 y 28.

- Exclusión de IVA: 19 % del CAPEX \rightarrow ahorro directo.
- Deducción especial en renta: 50 % del CAPEX deducible \rightarrow ahorro efectivo del 17,5 %.
- Depreciación acelerada: beneficio valor presente \approx 12,2 % del CAPEX (tasa 12 %).
- Costo de certificación UPME: \$8.434.021 (igual para todos).

Tabla 27*Beneficio fiscal total NETO*

Biomasa	CAPEX bruto (M COP)	Ahorro IVA (19 %) (M COP)	Deducción renta (17,5 %) (M COP)	Dep. acelerada (12,2 %) (M COP)	Beneficio bruto (M COP)	Costo UPME (M COP)	Beneficio neto (M COP)
Cuesco palma	175.472	33.339	30.707	21.407	85.454	8,4	85.446
Biomasa de maíz	158.928	30.196	27.812	19.389	77.397	8,4	77.389
Cascarilla de arroz	91.472	17.379	16.007	11.159	44.546	8,4	44.538

Tabla 28*CAPEX neto desembolsado (año 0)*

Biomasa	CAPEX bruto (M COP)	Ahorro IVA (M COP)	CAPEX neto (M COP)
Cuesco palma	175.472	33.339	142.132
Biomasa de maíz	158.928	30.196	128.731
Cascarilla de arroz	91.472	17.379	74.092

Se realiza un análisis de los ingresos, costos y margen operativo anual con los siguientes datos para visualizarla en la tabla 29.

- Precio de energía: 800 COP/kWh
- Costo de biomasa: 200.000 COP/tonelada
- Biomasa anual: 66.000 toneladas
- Costo biomasa anual: $66.000 \times 200.000 = 13.200.000.000$ COP = 13.200 M COP
- OPEX (sin biomasa): 30 % de los ingresos brutos

Tabla 29*Ingresos, costos y margen operativo del proceso de pirolisis de biomasa residual vegetal*

Biomasa	Electricidad anual (MWh)	Ingresos brutos (M COP)	OPEX (30 %) (M COP)	Costo biomasa (M COP)	Margen operativo (M COP)
Cuesco de palma	86.856	69.484	20.845	13.200	35.439
Cascarilla de arroz	78.672	62.937	18.881	13.200	30.856
Biomasa de maíz	45.276	36.220	10.866	13.200	12.154

Rentabilidad después de impuestos incluyendo los beneficios fiscales por ser proyecto de energía renovable y se pueden observar los resultados en la tabla 30.

- Deducción especial anual: (50 % CAPEX bruto) / 15 años.
- Depreciación acelerada: 20 % anual del CAPEX bruto durante 5 años.
- Tarifa de renta: 35 %.
- Flujos proyectados a 20 años con tasa de descuento 12 %.

Tabla 30*Indicadores financieros*

Biomasa	CAPEX neto (M COP)	VAN (M COP)	TIR	Payback simple (años)
Cuesco de palma	142.132	29.946	15,8%	6,17
Mazorca de maíz	128.731	21.081	14,7%	6,42
Cascarilla de arroz	74.092	-15.076	9,5%	9,38

se realizó el análisis económico para una planta de 200 toneladas diarias (66.000 toneladas anuales). Primero se calcularon los poderes caloríficos inferiores (PCI) de los gases mediante conversión de fracciones molares a fracciones másicas, obteniendo 38,97 MJ/kg para cuesco de palma, 29,63 MJ/kg para mazorca de maíz y 19,01 MJ/kg para cascarilla de arroz. Con una eficiencia eléctrica del 40 % (respaldo bibliográfico), la energía eléctrica por kilogramo de biomasa resultó de 1,316 kWh/kg para cuesco, 1,192 kWh/kg para maíz y 0,686 kWh/kg para cascarilla. La electricidad anual generada alcanza 86.856 MWh (cuesco), 78.672 MWh (maíz) y

45.276 MWh (cascarilla), con potencias instaladas de 10.967 kW, 9.933 kW y 5.717 kW respectivamente. La inversión bruta (CAPEX) se estimó en \$175.472 millones para cuesco, \$158.928 millones para maíz y \$91.472 millones para cascarilla. Aplicando los beneficios fiscales de la Ley 1715 (exclusión de IVA del 19 %, deducción especial en renta del 17,5 % y depreciación acelerada del 12,2 %), se obtiene un ahorro neto de \$85.447 millones (cuesco), \$77.389 millones (maíz) y \$44.538 millones (cascarilla), reduciendo el CAPEX neto a \$142.132 millones, \$128.732 millones y \$74.092 millones respectivamente. Los ingresos brutos anuales por venta de electricidad (800 COP/kWh) son \$69.485 millones (cuesco), \$62.938 millones (maíz) y \$36.221 millones (cascarilla). Restando el costo de biomasa (\$13.200 millones anuales para cada una) y el OPEX (30 % de ingresos), los márgenes operativos anuales alcanzan \$35.439 millones (cuesco), \$30.856 millones (maíz) y \$12.155 millones (cascarilla). Después de impuestos (tarifa del 35 %), la utilidad neta anual es de \$23.036 millones, \$20.057 millones y \$7.901 millones respectivamente. Con una tasa de descuento del 12 % y un horizonte de 20 años, los valores actuales netos (VAN) son \$29.947 millones para cuesco de palma (TIR 15,8 %, payback 6,2 años), \$21.081 millones para mazorca de maíz (TIR 14,7 %, payback 6,4 años) y -\$15.076 millones para cascarilla de arroz (TIR 9,5 %, payback 9,4 años). En conclusión, el proyecto de gasificación para generación eléctrica es viable y rentable para el cuesco de palma y la mazorca de maíz a una escala de 200 ton/día, siempre que se aprovechen los beneficios fiscales de la Ley 1715. La cascarilla de arroz no resulta viable en estas condiciones debido a su bajo poder calorífico; se recomienda destinarla a aplicaciones térmicas directas o a co-gasificación con biomasa de mayor calidad. Se sugiere priorizar el cuesco de palma por sus mejores indicadores, realizar estudios de disponibilidad de biomasa en la región, negociar precios de suministro por debajo de \$200.000/ton y gestionar la certificación UPME para maximizar los incentivos tributarios.

8 Conclusiones

El estudio permitió analizar de manera integral la transformación termoquímica de tres biomásas lignocelulósicas como cuesco de palma, biomasa de maíz y cascarilla de arroz— mediante procesos de pirólisis, obteniendo fracciones líquidas, alquitranosas, sólidas (biochar) y gaseosas. Los resultados demostraron que la naturaleza de la biomasa y las condiciones de reacción influyen directamente en la composición y proporción de cada uno de estos productos.

Los análisis espectroscópicos por FTIR confirmaron la presencia de grupos funcionales característicos en las fracciones líquidas y sólidas. Las muestras líquidas mostraron predominancia de grupos oxigenados (O–H, C=O y C–O), evidenciando la formación de alcoholes, ésteres y ácidos carboxílicos, mientras que las fracciones de alquitrán presentaron tanto compuestos alifáticos como aromáticos, propios de la condensación térmica de volátiles.

El análisis de viabilidad económica, fundamentado en la caracterización de los gases mediante cromatografía, demostró que los residuos agroindustriales evaluados poseen un poder calorífico suficiente para su aprovechamiento energético. Al dimensionar una planta a escala industrial con base en referencias técnicas colombianas, y al incorporar los beneficios tributarios de la Ley 1715 de 2014, los indicadores financieros obtenidos —valor actual neto positivo, tasa interna de retorno superior a la tasa de descuento y período de recuperación de la inversión acorde con proyectos de infraestructura— confirman la viabilidad económica del proceso. La gasificación de estos residuos se consolida como una alternativa sostenible y rentable, alineada con los principios de economía circular y con potencial real de implementación en el contexto nacional.

9 Recomendaciones

Se recomienda realizar estudios complementarios orientados a optimizar los parámetros de pirólisis (temperatura, tiempo de residencia y atmósfera inerte) para maximizar la calidad y rendimiento de cada fracción. Asimismo, sería conveniente implementar técnicas analíticas avanzadas como cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (GC-MS), análisis elemental (CHNS-O) y calorimetría diferencial, con el fin de profundizar en la caracterización química y energética de los productos obtenidos.

Desde el punto de vista técnico-aplicado, se sugiere evaluar el uso del gas de síntesis generado como fuente energética interna del proceso, reduciendo la dependencia de combustibles externos. También se recomienda estudiar la estabilidad y composición de los líquidos pirolíticos para su posible empleo como precursores de biocombustibles o compuestos químicos de interés industrial. En el caso del biochar, se propone explorar su aplicación en la remediación de suelos, adsorción de contaminantes y almacenamiento de carbono.

Finalmente, se aconseja continuar con el desarrollo de investigaciones orientadas a la valorización de residuos lignocelulósicos bajo principios de sostenibilidad y economía circular, promoviendo la integración de procesos de conversión energética y química que contribuyan al aprovechamiento eficiente de recursos renovables y a la mitigación del impacto ambiental.

Referencias Bibliográficas

Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA). (2019). Biocombustibles para la transición energética: Perspectivas tecnológicas. <https://www.irena.org>.

García-Nuñez, J. A., et al. (2016). "Evolution of palm oil mills into bio-refineries: Technical and environmental assessment of pyrolysis of empty fruit bunches". *Biomass and Bioenergy*, *95*, 131–147. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.10.004>

Hernández, J. D., & Rodríguez, L. K. (2020). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia: Perspectivas para biocombustibles. Universidad Nacional de Colombia.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Colombia). (2021). Estrategia nacional para la gestión integral de residuos orgánicos. <https://www.minambiente.gov.co>

Bridgwater, A. V. (2012). "Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading". *Biomass and Bioenergy*, *38*, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>

Cardona, C. A., et al. (2010). "Production of bioethanol from agro-industrial residues as feedstocks". *Biofuels*, *1*(6), 861–870. <https://doi.org/10.4155/bfs.10.50>

Aguado, R., Olazar, M., & San José, M. J. (2002). "Pyrolysis of sawdust in a conical spouted-bed reactor with a HZSM-5 catalyst". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, *41*(18), 4557–4564. <https://doi.org/10.1021/ie0201261>

Cardona, C. A., & Sánchez, Ó. J. (2007). Fuel ethanol production: Process design trends and integration opportunities. *Bioresource Technology*, *98*(12), 2415–2457. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.002>

García-Nuñez, J. A., et al. (2016). Evolution of palm oil mills into bio-refineries: Technical and environmental assessment of pyrolysis of empty fruit bunches. *Biomass and Bioenergy*, *95*, 131–147. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.10.004>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Colombia). (2021). Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos. <https://www.minambiente.gov.co>

Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, *38*, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>

Hassan, N. S., et al. (2020). Agricultural waste as a source of bioenergy: A case study on palm oil empty fruit bunches (EFB) pyrolysis. *Renewable Energy*, *150*, 990–999. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.109>

Sánchez, Ó. J., & Cardona, C. A. (2008). Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresource Technology*, *99*(13), 5270–5295. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.11.013>

UPME (Unidad de Planeación Minero Energética). (2020). Plan de acción indicativo para la integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. <https://www1.upme.gov.co>

Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista de Química*, 26(1-2), 37- 40.

Fedepalma. (2022). Informe estadístico 2022: Sector palmero colombiano. Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite. <https://fedepalma.org>

García-Nuñez, J. A., Rodríguez, D. T., Fontanilla, C. A., & Ramírez, N. E. (2016). Evolution of palm oil mills into bio-refineries: Technical and environmental assessment of pyrolysis of empty fruit bunches. *Biomass and Bioenergy*, *95*, 131–147. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.10.004>

Sukiran, M. A., Abnisa, F., & Wan Daud, W. M. A. (2017). A review of torrefaction of oil palm solid wastes for biofuel production. *Energy Conversion and Management*, *149*, 101–120. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.011>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Colombia). (2021). Estrategia nacional para la gestión integral de biomasa residual. <https://www.minambiente.gov.co>

Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, *38*, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>

Fedearroz. (2023). Informe anual del sector arrocero colombiano. Federación Nacional de Arroceros. <https://fedearroz.com.co>

Mansaray, K. G., & Ghaly, A. E. (1998). Physical and thermochemical properties of rice husk. *Energy Sources*, *20*(9), 809-826. <https://doi.org/10.1080/00908319808970093>

Chandrasekhar, S., Pramada, P. N., & Praveen, L. (2005). Effect of calcination temperature and heating rate on the optical properties and reactivity of rice husk ash. *Journal of Materials Science*, *40*(15), 4085-4093. <https://doi.org/10.1007/s10853-005-2815-9>

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (Colombia). (2021). Cadena productiva del arroz: Diagnóstico y perspectivas. <https://www.minagricultura.gov.co>

Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, *38*, 68-94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>

Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, *86*(12-13), 1781-1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>

Faix, O. (1991). Classification of lignins from different botanical origins by FT-IR spectroscopy. *Holzforschung*, *45*(s1), 21-28. <https://doi.org/10.1515/hfsg.1991.45.s1.21>

Socrates, G. (2001). *Infrared and Raman characteristic group frequencies: tables and charts* (3rd ed.). Wiley.

Wang, S., Guo, X., Wang, K., & Luo, Z. (2011). Influence of the interaction of components on the pyrolysis behavior of biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *91*(1), 183-189. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.02.006>

Müller-Hagedorn, M., Bockhorn, H., Krebs, L., & Müller, U. (2003). A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *68-69*, 231-249. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(03\)00065-2](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(03)00065-2)

Li, S., Lyons-Hart, J., & Banyasz, J. (2001). Real-time evolved gas analysis by FTIR method: an experimental study of cellulose pyrolysis. *Fuel*, *80*(12), 1809-1817. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00064-3](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00064-3)

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2018). *E1252-98: Standard practice for general techniques for obtaining infrared spectra for qualitative analysis*. ASTM International.

Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, *38*, 68-94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>

García-Pérez, M., Chaala, A., & Roy, C. (2002). Vacuum pyrolysis of sugarcane bagasse. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *65*(2), 111-136. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(01\)00184-X](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(01)00184-X)

Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy & Fuels*, *20*(3), 848-889. <https://doi.org/10.1021/ef0502397>

Oasmaa, A., & Meier, D. (2005). Norms and standards for fast pyrolysis liquids: 1. Round robin test. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *73*(2), 323-334. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2005.03.003>

Pattiya, A. (2011). Fast pyrolysis. In *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes* (pp. 237-264). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385099-7.00011-8>

Scott, D. S., Piskorz, J., & Radlein, D. (1985). Liquid products from the continuous flash pyrolysis of biomass. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 24(3), 581-588. <https://doi.org/10.1021/i200030a019>

Socrates, G. (2004). *Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies: Tables and Charts* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Pandey, K. K. (1999). A study of chemical structure of soft and hardwood and wood polymers by FTIR spectroscopy. *Journal of Applied Polymer Science*, 71(12), 1969–1975. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19990321\)71:12<1969::AID-APP6>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19990321)71:12<1969::AID-APP6>3.0.CO;2-D)

Chen, W.-H., Lin, B.-J., & Huang, M.-Y. (2020). Thermochemical conversion of biomass into biofuels: A review focusing on FTIR analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110349. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110349>

Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12–13), 1781–1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>

Alen, R., Kuoppala, E., & Oesch, P. (1996). Formation of the main degradation compound groups from wood and its components during pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 36(2), 137–148. [https://doi.org/10.1016/0165-2370\(96\)00933-5](https://doi.org/10.1016/0165-2370(96)00933-5)

Ribeiro, D. M., Alves, A., Lourenço, A., & Gominho, J. (2015). FTIR-ATR spectroscopy as a tool for chemical characterization of cork. *BioResources*, 10(2), 3044–3053. <https://doi.org/10.15376/biores.10.2.3044-3053>

Hatakeyama, T., & Quinn, F. X. (1999). *Thermal analysis: Fundamentals and applications to polymer science* (2nd ed.). Wiley.

Sbirrazzuoli, N. (2013). Determination of activation energy in thermal analysis: A review. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *113*(3), 1527–1533. <https://doi.org/10.1007/s10973-012-2870-9>

PerkinElmer. (2020). *Thermogravimetric analysis (TGA): A beginner's guide*. <https://www.perkinelmer.com/library/tga-beginners-guide.html>

Vyazovkin, S., Burnham, A. K., Criado, J. M., Pérez-Maqueda, L. A., Popescu, C., & Sbirrazzuoli, N. (2011). ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data. *Thermochimica Acta*, *520*(1–2), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.03.034>

ASTM International. (2018). *ASTM E1131-20: Standard test method for compositional analysis by thermogravimetry*. <https://www.astm.org/standards/e1131>.

Perry, R. H., & Green, D. W. (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (8th ed.). McGraw-Hill.

Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2010). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* (7th ed.). John Wiley & Sons.

Turns, S. R. (2012). *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications* (3rd ed.). McGraw-Hill.

Ling, C. K., San, H. P., Kyin, E. H., Hua, L. S., Chen, L. W., & Yee, C. Y. (2015). Yield and calorific value of bio oil pyrolysed from oil palm biomass and its relation with solid residence time and process temperature. *Asian Journal of Scientific Research*, 8(3), 351-358. <https://doi.org/10.3923/ajsr.2015.351.358>

- Ioelovich, M. (2015). Biofuels energy potential. *BioResources*, 10(1), 1879-1914.
- Valdés, C., & Rincón, J. (2022). Evaluación energética y económica del aprovechamiento de biomasa residual agrícola en Colombia. *Revista Ingeniería y Ciencia*, 18(2), 45-59.
- Calderón, J. M., & Rojas, M. A. (2023). Techno-economic analysis of biomass pyrolysis plants in Latin America. *Renewable Energy*, 205, 236-249. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.03.077>
- Ministerio de Minas y Energía (2024). Reporte de precios promedio de energía eléctrica en Colombia. XM/CREEG.
- Akhtar, J., & Saidina Amin, N. A. (2012). A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5101–5109. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.05.033>.
- Kaliyan, N., & Morey, R. V. (2010). Densification characteristics of corn cobs. *Fuel Processing Technology*, 91(5), 559–565. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.01.001>
- Boerjan, W., Ralph, J., & Baucher, M. (2003). Lignin biosynthesis. *Annual Review of Plant Biology*, 54, 519-546. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.54.031902.134938>
- Ebringerová, A. (2005). Structural diversity and application potential of hemicelluloses. *Macromolecular Symposia*, 232(1), 1-12. <https://doi.org/10.1002/masy.200551401>
- Klemm, D., Heublein, B., Fink, H. P., & Bohn, A. (2005). Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material. *Angewandte Chemie International Edition*, 44(22), 3358-3393. <https://doi.org/10.1002/anie.200460587>
- Scheller, H. V., & Ulvskov, P. (2010). Hemicelluloses. *Annual Review of Plant Biology*, 61, 263-289. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112315>
- Sjöström, E. (1993). *Wood chemistry: Fundamentals and applications* (2nd ed.). Academic Press.

Vanholme, R., Demedts, B., Morreel, K., Ralph, J., & Boerjan, W. (2010). Lignin biosynthesis and structure. *Plant Physiology*, 153(3), 895-905. <https://doi.org/10.1104/pp.110.155119>

DICYT. (2022). Por su potencial médico, la cascarilla de arroz dejaría de ser solo un desperdicio. Agencia Iberoamericana para la Difusión de la Ciencia y la Tecnología. <https://www.dicyt.com>

Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite – Fedepalma. (2022). Subproductos de la palma y oportunidades de valor agregado. Conferencia Internacional de Palma de Aceite. <https://fedepalma.org>

Ramírez, A. T. O. (2016). Alternativas del uso de la cascarilla de arroz como fuente de energía y su aprovechamiento en Colombia. *Revista Fuentes: El reventón energético*, 14(1), 33–40.

Universidad Pontificia Bolivariana – UPB. (2015). Evaluación del potencial energético de la tusa de maíz en el departamento de Córdoba. <https://www.upb.edu.co>.

Varol, E. A., & Mutlu, Ü. (2023). TGA-FTIR analysis of biomass samples based on the thermal decomposition behaviour of hemicellulose, cellulose, and lignin. *Energies*, 16(9), 3674. <https://doi.org/10.3390/en16093674>.

Kan, A., et al. (2008). Application of FTIR Absorption Spectroscopy to Characterize Waste and Biofuels for Pyrolysis and Gasification. JRC Publications Repository.

Rettenmaier-et al. (2011). FTIR-ATR-based prediction and modelling of lignin and energy contents reveals independent intra-specific variation of these traits in bioenergy poplars. *Plant Methods*, 7, Article 9. <https://doi.org/10.1186/1746-4811-7-9>

Other study: Biochar from co-pyrolysis of urban organic wastes — investigation of carbon sink potential using ATR-FTIR and TGA. *Biomass Conversion and Biorefinery*.

TA Instruments. (s. f.). Discovery TGA 5500 – Thermogravimetric Analyzer. Recuperado de <https://www.tainstruments.com/tga-5500/>

Estudios Farmacéuticos. (s. f.). Calorímetro adiabático/termoquímica/fisicoquímica. Recuperado de <https://www.estudiosfarmaceuticos.com/calorimetro-adiabatico-termoquimica-fisicoquimica/>.

Chávez-Sifontes, M. C. (2019). La biomasa: fuente alternativa de combustibles y compuestos químicos. *Anales de Química de la RSEQ*, 5, 399-407. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7285186.pdf>

Abouemara, K., Shahbaz, M., Mckay, G., & Al-Ansari, T. (2024). The review of power generation from integrated biomass gasification and solid oxide fuel cells: Current status and future directions. *Fuel*, 360, 130511. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130511>

Alabi, O. O., Gbadeyan, O. J., Towoju, O. A., & Deenadayalu, N. (2024). Enhancing sustainable energy production through biomass gasification gas technology: A review (version 2). *F1000Research*, 13, 511. <https://doi.org/10.12688/f1000research.147958.2>

Jia, J., Abudula, A., Wei, L., Sun, B., & Shi, Y. (2015). Thermodynamic modeling of an integrated biomass gasification and solid oxide fuel cell system. *Renewable Energy*, 81, 400–410. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.030>

MASH Makes A/S & Technical University of Denmark. (2023). Sustainable and flexible production of maritime fuel from biomass (EUDP case No. 64019-0565). *Energiteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram*.

Martínez, L., Díaz, R., & Pineda, M. (2024). Valorization of agricultural residues in Colombia: A case study in Sucre department. *Waste and Biomass Valorization*, 15, 1123–1140. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02345-6>

Neves, F., Soares, A. A., & Rouboa, A. (2025). Systematic review of biomass supercritical water gasification for energy production. *Energies*, 18(20), 5374. <https://doi.org/10.3390/en18205374>

Rodríguez, J., Gómez, C., & Pérez, A. (2026). Techno-economic assessment of hydrogen production from oil palm biomass in Colombia. *Sustainability*, 18(3), 245–267. <https://doi.org/10.3390/su18030245>

Sivabalan, K., Hassan, S., Ya, H., & Pasupuleti, J. (2021). A review on the characteristic of biomass and classification of bioenergy through direct combustion and gasification as an alternative power supply. *Journal of Physics: Conference Series*, 1831, 012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1831/1/012033>

Taqvi, S. A. A., Kazmi, B., Naqvi, S. R., Juchelková, D., & Bokhari, A. (2024). State-of-the-art review of biomass gasification: Raw to energy generation. *ChemBioEng Reviews*. <https://doi.org/10.1002/cben.202400003>

Unidad de Planeación Minero Energética. (2023). Estudio técnico para la identificación de oportunidades de biorrefinerías en Colombia. Bogotá, Colombia: UPME.

Zapata, J., Velásquez, F., & Arango, L. (2018). Economic assessment of biomass gasification for electricity generation in Colombia. *International Journal of Renewable Energy Research*, 8(4), 2134–2145.

Abouemara, K., Shahbaz, M., Mckay, G., & Al-Ansari, T. (2024). The review of power generation from integrated biomass gasification and solid oxide fuel cells: Current status and future directions. *Fuel*, *360*, 130511.

Congreso de Colombia. (2014). Ley 1715 de 2014. Diario Oficial No. 49.150.

Cunningham, D. (2025, 4 de noviembre). New gas generation costs... [LinkedIn].

GlobalPetrolPrices. (2025, septiembre). Colombia electricity prices.

Jia, J., Abudula, A., Wei, L., Sun, B., & Shi, Y. (2015). Thermodynamic modeling of an integrated biomass gasification and solid oxide fuel cell system. *Renewable Energy*, *81*, 400–410.