

Valorización y aprovechamiento de los residuos del Cultivo del Maíz mediante el
proceso de Pirólisis Hidrotérmica

Nicole Rodríguez Uribe

Kevin Arley Porras Hernández

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Mecánico

Director

Yesid Javier Rueda Ordóñez
Ph.D Ingeniería química

Codirector

Elkin Andrés Silva Calderón
Msc Ingeniero Mecánico

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

2026

Dedicatoria

A Dios porque sin su presencia en mi vida nada de esto sería posible. Por darme la sabiduría y fortaleza para no rendirme en los momentos difíciles y permitirme alcanzar el sueño que tanto anhelé.

A mi papá por creer y sacar pecho por mis logros siempre, sin saber que cada uno de mis logros también son suyos. Por seguir caminando a mi lado, incluso en medio de las dificultades de salud, enseñándome con su ejemplo lo que significa la verdadera fortaleza.

A mi mamá por ser mi apoyo constante en cada etapa del camino. Por todas las veces en las que, aún en medio de las dificultades, encontramos la manera de salir adelante. Por ser mi mejor amiga, por escuchar mis historias y por creer en mí incluso cuando yo dudaba.

A Sofía por su alegría y sus ocurrencias que me hacían seguir adelante. Por ser una motivación constante para convertirme en el mejor ejemplo que pueda seguir.

A Andrés por no soltar mi mano en ningún momento. Por su infinito amor, su paciencia y por acompañarme día a día en este proceso, incluso cuando no fue fácil.

Nicole Rodríguez Uribe

Primeramente, a DIOS por todas sus bendiciones.

Al señor Heriberto Porrás y la señora Janeth Hernández, por todo su esfuerzo y dedicación, sin ellos nada de esto fuese posible, cada uno de mis logros son de ellos, a ellos que siempre serán mi pilar y mi ejemplo para seguir creciendo, que la vida me permita tenerlos siempre a mi lado y nunca me falten, los quiero mucho.

A mis hermanos por ser enseñarme cada día lo que es ser querido.

A Laura, por su carisma, amor, comprensión, respeto por mí, a ella por estar en los buenos y malos momentos, que su mano siempre camine junto a la mía.

A la tierra que me vio nacer, mi campo querido.

Kevin Arley Porrás Hernández

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander y a la escuela de ingeniería mecánica por brindarnos las herramientas académicas y personales necesarias para nuestra formación profesional.

A nuestro director Yesid Rueda, por generar ese amor por la termodinámica, por su orientación, acompañamiento y aportes durante la realización de esta investigación.

A nuestro codirector Elkin Silva, por su apoyo en cada una de las pruebas, por su paciencia y acompañamiento.

A Edinson Lizarazo y Pablo Nieto, por guiarnos y brindarnos todo su conocimiento para el desarrollo del proyecto.

A mi compañero de tesis, por su compromiso, dedicación y trabajo en equipo, que hicieron posible el desarrollo de este proyecto.

A nuestros amigos, por los momentos inolvidables, risas y llantos vividos durante estos años.

Tabla de contenido

Introducción.....	12
1.Justificación.....	14
2.Objetivos.....	15
2.1 Objetivo general	15
2.2 Objetivos específicos.....	15
3.Marco Teórico.....	16
3.1 Antecedentes.....	16
3.2 Referentes	17
3.2.1 Biomasa	17
3.2.2 Maíz.....	18
3.2.3 Pirólisis	18
3.2.4 Pirólisis hidrotérmica.....	20
3.2.5 Adsorción.....	21
4. Metodología.....	24
4.1 Fase 1: Caracterización integral de la materia prima	25
4.1.1 Preparación de muestras	25
4.1.2 Caracterización de la biomasa	27
4.2 Fase 2: Evaluación experimental de la pirólisis hidrotérmica.....	34
4.2.1 Diseño experimental.....	35

4.2.2 Ejecución del proceso de pirólisis	36
4.2.3 Separación y recuperación.....	40
4.2.4 Evaluación de la calidad del carbón hidrotérmico vs tradicional	41
4.3 Fase 3: Análisis técnico-económico comparativo	44
4.3.1 Estimación del CAPEX	44
4.3.2 Estimación del OPEX.....	45
4.3.3 Análisis de viabilidad financiera.....	46
5. Análisis de resultados	48
5.1 Fase 1: Caracterización integral de la materia prima	48
5.1.1 Caracterización de la biomasa	48
5.2 Fase 2: Evaluación experimental de la pirólisis hidrotérmica	54
5.2.1 Diseño experimental	55
5.2.2 Ejecución del proceso de pirólisis	55
5.2.3 Evaluación de la calidad del carbón hidrotérmico vs tradicional	65
5.3 Fase 3: Análisis técnico- económico comparativo	69
5.3.1 Estimación del CAPEX	71
5.3.2 Estimación del OPEX.....	73
5.3.3 Análisis de viabilidad financiera.....	75
6. Conclusiones.....	79
7. Recomendaciones	81

Referencias 82

Apéndices 91

Lista de tablas

Tabla 1. Variables del proceso	24
Tabla 2. Análisis realizados	27
Tabla 3. Matriz experimental diseño factorial 1	35
Tabla 4. Resultados obtenidos a partir del análisis próximo (db:dry base, ar:as received) 48	
Tabla 5. Comparación del análisis próximo con la literatura	50
Tabla 6. Resultados de PCS para porciones de biomasa de maíz	51
Tabla 7. Ajuste del poder calorífico superior para fracciones de maíz (MJ/kg)	52
Tabla 8. Comparativa del poder calorífico superior	53
Tabla 9. Humedad de equilibrio de las fracciones de maíz.	54
Tabla 10. Poder calorífico inferior para fracciones de maíz	54
Tabla 11. Parámetros del proceso para HTL de cañas de maíz y rendimiento del carbón húmedo obtenido	55
Tabla 12. Rendimiento del biocarbón seco	56
Tabla 13. Análisis próximo y energético para productos obtenidos en HTL.....	57
Tabla 14. Comparativa del análisis próximo de hidro-carbón mediante HTL.....	58
Tabla 15. Parámetros y rendimientos de la pirólisis tradicional	62
Tabla 16. Análisis próximo y energético para pirólisis tradicional.....	63
Tabla 17. Comparativa de analisis próximo y energético de pirólisis tradicional	64
Tabla 18. Parámetros técnicos de planta HTL industrial	70
Tabla 19. Estimación de la inversión de capital (CAPEX).....	72
Tabla 20. Estimación de costos de operación (OPEX)	73
Tabla 21. Ingresos anuales para planta HTC de un reactor	76
Tabla 22 Análisis de viabilidad para planta HTC con un reactor	77

Lista de figuras

Figura 1. Biomasa: (a) Tusa (b) Tallo (c) Capotes (d) Hojas	25
Figura 2. Horno tipo mufla (Terrigeno D8 Serie 2254).....	26
Figura 3. Biomasa posterior a su preparación: (a) Capotes (b) Tusa (c) Cañas (d) Hojas	26
Figura 4. (a) Controlador digital de la bomba Parr 6200 (b) Bomba calorimétrica con muestra encapsulada.....	32
Figura 5. Reactor hidrotérmico Parr 4848.....	36
Figura 6. Valores de HHV de productos en fase sólida después del HTL.....	38
Figura 7. Reactor de pirólisis tradicional utilizado	40
Figura 8. Productos obtenidos tras la separación por filtración al vacío: (a) Fase líquida; (b) Carbón recuperado en fase sólida.	40
Figura 9. Espectrofotómetro utilizado para la prueba de adsorción.....	42
Figura 10. Curva de calibración obtenida en el espectrofotómetro utilizado.....	42
Figura 11. Muestras de biocarbón en agitación	43
Figura 12. Análisis próximo: (a) Cañas de maíz después de la prueba de humedad (b) Cañas de maíz después de la prueba de volátiles (c) Cañas de maíz después de la prueba de cenizas	49
Figura 13. Modelo empírico P(T) para reactor Parr 4848.....	60
Figura 14. Modelo empírico T(t) para reactor Parr 4848	61
Figura 15. Intervalos de confianza calculados para PCS	66
Figura 16. Adsorción de azul de metileno para muestras de biocarbones.....	67
Figura 17. Capacidad de adsorción en equilibrio para todas las muestras de biocarbón	68
Figura 18. Intervalos de confianza calculados para qe.....	69

Lista de apéndices

Apéndice A Código de Matlab utilizado para corrección del poder calorífico superior..... 91

Resumen

Título: Valorización y aprovechamiento de los residuos del Cultivo del Maíz mediante el proceso de Pirólisis Hidrotérmica*

Autor: Nicole Rodríguez Uribe, Kevin Arley Porras Hernández**

Palabras Clave: Pirólisis, hidrotérmica, maíz, hidro carbón, poder calorífico, adsorción

Descripción: Los residuos de maíz (hojas, cañas, capotes, tusas) fueron caracterizados mediante análisis próximo y análisis energético, con el fin de identificar el componente más adecuado para someterse a un proceso de pirólisis hidrotérmica. A partir de esta caracterización, se seleccionaron las cañas de maíz, las cuales se procesaron mediante pirólisis hidrotérmica a diferentes temperaturas (200, 250, 300°C) y mediante pirólisis tradicional a 450°C. Los resultados mostraron que, a la temperatura de 300°C, la biomasa de maíz presentó el mayor rendimiento en fases líquidas y gaseosas, mientras que a menores temperaturas se obtuvo un mayor rendimiento de biocarbón en fase sólida. Posteriormente, cada una de las muestras obtenidas a cada temperatura fueron sometidas nuevamente a análisis próximo y energético. Se encontró que a la temperatura de 200°C se obtienen valores inferiores en términos de poder calorífico superior con respecto a las temperaturas superiores, las cuales alcanzaron valores de hasta 29,856 +/- 0,045 MJ/kg. Finalmente, se realizó un estudio de adsorción de azul de metileno con el propósito de determinar la muestra de biocarbón con mayor capacidad de adsorción. En la cual se encontró que, a menores temperaturas, se adsorbe mayor contenido de azul de metileno debido a la mayor presencia de grupos funcionales oxigenados en la superficie del material. En general, el presente proyecto demuestra que la temperatura del proceso influye en el rendimiento de productos, propiedades energéticas y la capacidad de adsorción del biocarbón.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería mecánica. Director: PhD. Yesid Javier Rueda Ordoñez. Codirector: MSc Elkin Andrés Silva Calderón.

ABSTRACT

Title: Valorization and Utilization of Corn Crop Waste through the Hydrothermal Pyrolysis Process*

Author: Nicole Rodríguez Uribe, Kevin Arley Porras Hernández**

Key Words: Pyrolysis, hydrothermal, corn, hydrocarbons, calorific value, adsorption

Description: Corn residues (leaves, stalks, husks, and cobs) were characterized using proximate analysis and energy analysis to identify the most suitable component for hydrothermal pyrolysis. Based on this characterization, corn stalks were selected and processed via hydrothermal pyrolysis at different temperatures (200, 250, 300°C) and via conventional pyrolysis at 450°C. The results showed that, at a temperature of 300°C, the corn biomass exhibited the highest yield in liquid and gaseous phases, while at lower temperatures a higher yield of biochar was obtained in the solid phase. Subsequently, each of the samples obtained at each temperature was subjected to proximate and energy analysis. It was found that at 200°C, lower values were obtained in terms of gross calorific value compared to higher temperatures, which reached values of up to $29,856 \pm 0.045$ MJ/kg. Finally, a methylene blue adsorption study was conducted to determine the biochar sample with the highest adsorption capacity. It was found that, at lower temperatures, a higher content of methylene blue is adsorbed due to the greater presence of oxygen-containing functional groups on the material's surface. Overall, this project demonstrates that the process temperature influences the yield of products, the energy properties, and the adsorption capacity of biochar.

* Bachelor's Thesis

** Faculty of Physico-Mechanical Engineering. Department of Mechanical Engineering. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez, Ph.D. Co-director: Elkin Andrés Silva Calderón, M.S.

Introducción

El manejo y aprovechamiento sostenible de los residuos agrícolas ha cobrado gran importancia debido a la necesidad urgente de mitigar los impactos ambientales generados por la disposición inadecuada de estos residuos. En Colombia, la producción de maíz genera anualmente aproximadamente 2.4 millones de toneladas de residuos, que en gran parte son eliminados mediante quema descontrolada, provocando emisiones significativas de gases contaminantes que afectan la calidad del aire y la salud pública, además de contribuir al cambio climático y la degradación del suelo. (Gonzalez, 2017)

La pirólisis hidrotérmica representa una alternativa tecnológica prometedora frente a la pirólisis tradicional, principalmente por su capacidad para procesar biomasa con alto contenido de humedad sin etapas costosas de secado. (Pérez et al., 2022) (Aguilar Suffo, 2015)

Esta tecnología optimiza la conversión de residuos agrícolas en biocarbón de alta calidad, con un mejor rendimiento energético y potencial para producir precursores de carbón activado, materiales de alta demanda en la purificación de agua, tratamiento de gases y procesos farmacéuticos (Jaramillo & Cardona, 2006). Sin embargo, en Colombia la investigación sobre la aplicación comparativa de estas tecnologías en residuos de maíz es limitada, por lo que esta investigación contribuirá al desarrollo científico y tecnológico nacional adaptado al contexto colombiano. (Calpa & Muñoz, 2011)

Este proyecto contribuirá a reducir el impacto ambiental de la quema de residuos agrícolas, mejorar la calidad de vida en comunidades rurales mediante la mitigación de la contaminación atmosférica y promover la economía circular conforme a las políticas ambientales del país. (Santos, 2016)

Además, responde a una necesidad económica concreta, dado que el mercado nacional de carbón activado depende mayoritariamente de importaciones y presenta un alto potencial para la sustitución por productos locales generados mediante procesos sostenibles. (expertos, 2025) (Intelligence, 2024) (Jaramillo & Cardona, 2006)

Proponemos una metodología integral que evalúa sistemáticamente el impacto de la pirólisis hidrotérmica frente a la tradicional sobre la calidad del carbón obtenido y un análisis técnico-económico adaptado a la realidad nacional, que considera la disponibilidad local de biomasa, infraestructura, marco normativo y mercado objetivo. Esto permitirá generar soluciones tecnológicas viables, escalables y con impacto social positivo, fortaleciendo la gestión sostenible de recursos y fomentando un desarrollo económico rural sostenible. (Olarte, 2023)

Este estudio convierte un problema ambiental crítico en una oportunidad de desarrollo tecnológico, económico y social, en línea con las prioridades de sostenibilidad de Colombia, enfocándose particularmente en los residuos del cultivo de maíz, debido a que son de los más abundantes y representativos en este país. De esta manera, convierte un problema ambiental crítico en una oportunidad de desarrollo para las familias productoras de maíz y mejora la calidad ambiental del país.

Por consiguiente, la pregunta problema del proyecto es: ¿Cómo influye la pirolisis hidrotérmica en la calidad de carbón obtenido en comparación con métodos tradicionales como la pirólisis tradicional, con el fin de utilizarlos como precursores del carbón activado?

4. Justificación

Colombia enfrenta un contexto energético marcado por una alta dependencia de los combustibles fósiles y una cobertura eléctrica insuficiente en zonas rurales, lo que limita el desarrollo social y económico de estas regiones. (Ministerio de Minas y Energía, 2025).

Paralelamente, la producción agrícola genera grandes volúmenes de residuos orgánicos que, en muchos casos, son dispuestos de manera inadecuada, contribuyendo a la contaminación ambiental mediante la quema o el abandono in situ. (Power, 2025)

Por lo anterior, el aprovechamiento energético de los residuos de maíz (cañas, tusa, hojas y capotes) es relevante por los siguientes motivos: primero, esta biomasa ha demostrado presentar propiedades fisicoquímicas óptimas para su conversión energética, con bajos contenidos de cenizas (2%) y humedad (12%), y altos valores de compuestos volátiles (82.38%) y poder calorífico. Segundo, la utilización de estos residuos para la producción de biocombustibles sólidos, como los pellets, ofrece una alternativa viable a combustibles tradicionales como el carbón, permitiendo su sustitución en procesos industriales y domésticos sin requerir grandes modificaciones en la infraestructura existente. Además, el manejo adecuado de la biomasa residual de maíz contribuye a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mitiga los impactos ambientales derivados de la disposición incontrolada de residuos. (Kiprop, 2024)

En este sentido, la presente investigación se justifica en la necesidad de caracterizar y evaluar el potencial energético de los residuos de maíz, como base fundamental para el desarrollo de procesos sustentables de valorización y para la consolidación de modelos energéticos rurales descentralizados.

5. Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la influencia de la pirólisis hidrotérmica en comparación con la pirólisis tradicional en la calidad del carbón obtenido a partir de los residuos del cultivo del maíz, con la obtención de un precursor de carbón activado.

2.2 Objetivos específicos

Establecer el potencial energético de los residuos del maíz, a través de la determinación y análisis de sus propiedades fisicoquímicas: análisis próximo (humedad, materia volátil, cenizas, carbono fijo), poder calorífico superior e inferior.

Evaluar el impacto en la calidad del carbón obtenido mediante la pirólisis hidrotérmica debido a la variación de los parámetros funcionales tales como la presión y temperatura de proceso.

Determinar el potencial comercial del carbón obtenido mediante pirólisis hidrotérmica, aplicando un estudio técnico-económico que lo evalúe como posible precursor del carbón activado.

6. Marco Teórico

3.1 Antecedentes

Los residuos de biomasa agrícolas de cultivos clave como la papa, el maíz, la caña de azúcar, los tallos de tabaco, la cáscara de coco, la cáscara de arroz y otros, tienen un potencial energético aprovechable como biocombustibles renovables (Mejía, 2013). Sin embargo, su uso sin tratamientos térmicos adecuados es limitado debido a la alta humedad, composición variable y la baja densidad energética. Por otro lado, estudios exhaustivos sobre diversos tipos de biomasa (mazorca de maíz, arroz, cascarilla de coco, tallos de tabaco, residuos de papa y maíz) demuestran que la pirólisis hidrotérmica (HTL) aumenta la densidad energética en aproximadamente 1,3 y 1,8 veces, dependiendo de la materia prima y las condiciones. (Vallejo, 2018)

En el contexto práctico, los residuos de biomasa de maíz compuestos principalmente por hojas, tusa y tallos generados tras la cosecha representan un recurso subutilizado pero valioso para la generación de energía alternativa, la calidad de la biomasa de maíz es alta desde el punto de vista energético, por su bajo contenido de cenizas y alto porcentaje de compuestos volátiles. Por esta razón, en un análisis realizado a la biomasa del maíz se identificó que a pesar de que es uno de los residuos que tiene menor contribución en términos de potencial energético comparados con otros residuos como papa y tomate de árbol, se destaca en la calidad energético/química de su biomasa, lo que hace a este tipo de residuos aptos para la pirólisis hidrotérmica. (Castro, 2021)

La investigación sobre residuos del cultivo de maíz tiene relevancia en Colombia, donde anualmente se generan aproximadamente 2.4 millones de toneladas de estos materiales, que tradicionalmente son eliminados mediante quema descontrolada, generando

impactos ambientales negativos. La pirólisis hidrotérmica ofrece una oportunidad única para convertir estos residuos en productos de valor agregado, específicamente en precursores de carbón activado, material de alta demanda en aplicaciones de purificación y tratamiento ambiental. (Fierro, 2012)

El potencial energético calculado depende de la cantidad de biomasa, el área cultivada y el proceso de conversión energética. Una evaluación en Ecuador reportó un aporte de 0.02 GWh/ha·año para los residuos de maíz, inferior a otros cultivos como papa o tomate de árbol, pero relevante cuando se agrupan grandes extensiones de cultivo para aplicaciones energéticas. (Kiprop, 2024)

En general, al recopilar los principales aportes realizados en el contexto de aprovechamiento de la biomasa se señala que la biomasa residual agrícola de maíz es un recurso desaprovechado que puede tener alto valor en aprovechamiento de energía cuando se implementan tecnologías adecuadas para su recolección, caracterización y conversión. Retos técnicos como el secado, molienda, homogeneización y clasificación de la biomasa son claves para optimizar su uso energético y la eficiencia de los procesos de conversión termoquímica.

3.2 Referentes

3.2.1 Biomasa

La biomasa es materia orgánica (vegetal o animal) usada como fuente de energía renovable. Las plantas capturan energía solar y esa energía se libera al transformar o quemar el material orgánico. (Repsol, 2025)

Sus principales fuentes son residuos forestales, agrícolas y orgánicos (como estiércol o desechos de comida). Con ellos se genera calor, electricidad y biocombustibles como el bioetanol. Sus ventajas clave son que es renovable, más barata que los fósiles y aprovecha residuos, aunque sí produce algunas emisiones al quemarse. En ecología, el término también designa la masa total de seres vivos en un ecosistema. (BBVA, 2025) (Concepto.d, 2019)

3.2.2 Maíz

El maíz (*Zea mays*) es una planta gramínea originaria de América, domesticada en Mesoamérica hace miles de años a partir de una planta silvestre llamada teocintle, y hoy es uno de los cereales más producidos y consumidos del mundo (Bon Viveur, 2024). Sus tallos son macizos y pueden alcanzar hasta 4 metros de altura. Produce dos flores: la espiga (masculina, en la cima) y la mazorca (femenina, a media altura), que contiene entre 300 y 1.000 granos dispuestos en hileras de colores variados: blanco, amarillo, rojo o violáceo.

Además de la alimentación humana y animal, el maíz es materia prima clave en la industria: de él se extraen almidón, aceite, glucosa y biocombustibles como el bioetanol. Es un cultivo de gran relevancia económica en países de América Latina, África y Asia, siendo México uno de los centros de mayor diversidad genética de la planta. (Humanidades.com, 2025) (Bon Viveur, 2024)

3.2.3 Pirólisis

La pirólisis es el proceso de degradación térmica incompleta de biomasa en ausencia de oxígeno o aire, que transforma el material original en tres fracciones: sólida, líquida y gaseosa. Este proceso termoquímico ha ganado gran importancia no solo como

tecnología independiente, sino también porque constituye la primera etapa en los procesos de combustión y gasificación de materiales orgánicos. (Babu, 2008) (Pardeiro, 2024)

El proceso opera típicamente entre 380 °C y 530 °C para la pirólisis lenta de biomasa, aunque las condiciones varían según el tipo de proceso. Las variables clave que determinan el rendimiento y la composición de los productos son la temperatura, la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia. La pirólisis se lleva a cabo bajo atmósfera inerte, generalmente nitrógeno, para garantizar la ausencia de oxígeno. (Vuppaladadiyam et al., 2022)

Los tres productos obtenidos son: Biochar (fracción sólida), residuo carbonoso con propiedades adsorbentes y potencial energético; Bio-oil (fracción líquida), mezcla orgánica utilizada como combustible y como materia prima química; producto principal de la pirólisis rápida; Syngas (fracción gaseosa): mezcla de gases como CO, CO₂, CH₄ e H₂, aprovechable como combustible. (Babu, 2008) (Mohamed et al., 2019)

La pirólisis es considerada una de las tecnologías termoquímicas más prometedoras para convertir biomasa lignocelulósica —compuesta por celulosa (35–50%), hemicelulosa (20–40%) y lignina (20–35%)— en combustibles de mayor valor. La pirólisis rápida es actualmente la ruta preferida por su mayor rendimiento de bio-oil y la velocidad de reacción. Investigaciones recientes también han explorado la co-pirólisis de biomasa con otros materiales (plásticos, carbón, lodos) para mejorar las propiedades fisicoquímicas de los productos. (Hu & Gholizadeh, 2019)

3.2.4 Pirólisis hidrotérmica

La pirólisis hidrotérmica —también denominada licuefacción hidrotérmica (HTL, por sus siglas en inglés) o hydrous pyrolysis— es un proceso termoquímico no oxidativo que convierte biomasa húmeda en bio-crudo (biocrude oil), utilizando agua líquida a alta temperatura y presión como medio de reacción en lugar de calor seco en ausencia total de oxígeno. (Abbott & W, 1999)

A diferencia de la pirólisis convencional, que requiere biomasa seca, la pirólisis hidrotérmica aprovecha el agua como disolvente y reactivo a condiciones subcríticas o supercríticas, lo que elimina la necesidad de secar previamente la materia prima. El agua a alta temperatura y presión rompe los enlaces macromoleculares de la biomasa (celulosa, hemicelulosa y lignina), generando compuestos de menor peso molecular con alta densidad energética. Las condiciones varían según la modalidad del proceso:

- Carbonización hidrotérmica (HTC): temperatura de 180–250 °C, presión de 2–10 MPa, produce principalmente sólido (hydrochar)
- Licuefacción hidrotérmica (HTL): temperatura de 250–374 °C, presiones superiores, produce principalmente bio-crudo líquido
- Gasificación hidrotérmica: temperaturas superiores a 374 °C (condiciones supercríticas del agua), favorece la producción de gas

A medida que aumenta la severidad del proceso (temperatura y tiempo de residencia), los productos pasan progresivamente de la fase sólida a la líquida y luego a la gaseosa (Ischia et al., 2024)

La HTL es preferida para biomasa con alto contenido de humedad (>30%), como microalgas, lodos o residuos de alimentos, ya que evita el costoso proceso de secado previo. Además, el bio-crudo producido tiene generalmente un menor contenido de oxígeno que el bio-oil de la pirólisis convencional, lo que lo hace más estable y fácil de refinar como combustible. Estudios recientes han explorado la pirólisis hidrotérmica acoplada (pretratamiento hidrotérmico + pirólisis) para mejorar las propiedades del biochar, inmovilizar metales pesados y reducir las emisiones de dióxido de nitrógeno (NO₂). (Abbott & W, 1999) (F & C, 2025)

3.2.5 Adsorción

La adsorción es el proceso mediante el cual moléculas presentes en una fase fluida (líquida o gaseosa), denominadas adsorbato, se acumulan sobre la superficie de un sólido poroso, denominado adsorbente, como resultado de fuerzas de atracción interfaciales. Desde el punto de vista termodinámico, la adsorción es un proceso espontáneo en el que la energía libre de Gibbs disminuye, y su extensión depende de la concentración del adsorbato, la temperatura, el pH del medio y las características fisicoquímicas de la superficie adsorbente. A diferencia de la absorción, en la que la especie penetra en el volumen del sólido, la adsorción ocurre exclusivamente en la interfaz sólido-fluido, formando una capa molecular que puede describirse como una monocapa o multicapa según la intensidad de las interacciones. (Estrada et al., 2015)

El proceso puede clasificarse en dos tipos principales según la naturaleza de las fuerzas involucradas. La fisisorción (adsorción física) se produce por fuerzas de Van der Waals de baja energía (~5–40 kJ/mol), es reversible y conduce a la formación de capas múltiples; la quimisorción implica la formación de enlaces químicos entre el adsorbato y

sitios activos de la superficie, con energías más elevadas (~40–400 kJ/mol) y es generalmente irreversible. En los materiales carbonosos no activados, la adsorción ocurre predominantemente por fisisorción, mediada por interacciones electrostáticas y fuerzas de dispersión entre la superficie carbonosa y las moléculas del colorante catiónico. (Hassaan et al., 2023)

Aunque el carbón activado es el adsorbente convencional de referencia por su elevada área superficial (500–2000 m²/g), su alto costo de producción ha impulsado la búsqueda de materiales carbonosos alternativos de bajo costo. A diferencia del carbón activado, el bio-carbón no requiere etapas de activación fisicoquímica posteriores a la pirólisis, lo que reduce considerablemente su costo de producción y su huella ambiental. (Mendonça et al., 2025) (Hassaan et al., 2023) (Estrada et al., 2015)

La capacidad de adsorción del biochar depende de factores como la temperatura de pirólisis, el tipo de biomasa precursora, el tamaño de partícula y la presencia de grupos funcionales oxigenados en la superficie. Estudios comparativos han demostrado que materiales lignocelulósicos como el aserrín de pino, empleados directamente como adsorbentes sin activar, pueden alcanzar eficiencias de remoción de azul de metileno de hasta 95.43%, comparables al 96.17% reportado para carbón activado convencional bajo las mismas condiciones. Este desempeño sugiere su potencial como precursor de carbón activado, en la medida en que una elevada afinidad por el azul de metileno refleja una estructura carbonosa con sitios activos y características fisicoquímicas favorables, susceptibles de ser potenciadas mediante procesos de activación física o química. Por su parte, bio-carbones comerciales no activados producidos a partir de distintos tipos de biomasa (mezcla de astillas de madera y cáscara de cebada) han mostrado eficiencias de

remoción de azul de metileno superiores al 96% en tiempos de contacto de 2 horas, con capacidades máximas de adsorción de 26.6 y 39.7 mg/g respectivamente según el modelo de Langmuir. (Hassaan et al., 2023)

La estructura del azul de metileno (AM) es aromática planar, su carga positiva en solución acuosa y su alta solubilidad en agua lo convierten en una molécula estándar para evaluar la capacidad de adsorción de materiales carbonosos, ya que su concentración puede monitorearse fácilmente por espectrofotometría a la longitud de onda de máxima absorción de 665 nm. En la prueba estándar de adsorción por lote se pone en contacto una masa conocida de adsorbente con un volumen fijo de solución acuosa de AM de concentración conocida, se agita a velocidad y temperatura controladas durante un tiempo de contacto determinado, y al alcanzar el equilibrio se mide la concentración residual de colorante para cuantificar la cantidad adsorbida por unidad de masa de sólido. (Mendonça et al., 2025)

La cantidad de AM adsorbida en el equilibrio por gramo de adsorbente (q_e) se calcula mediante la ecuación:

$$q_e = \frac{V}{m} (C_0 - C_e) \quad (1)$$

donde:

V es el volumen de la solución (L),

m la masa de adsorbente (g),

C_0, C_e la concentración inicial y en el equilibrio de AM (mg/L)

7. Metodología

La presente investigación se clasifica como un estudio de alcance explicativo, la cual se fundamenta en responder las causas de los fenómenos físicos que ocurren durante la pirólisis hidrotérmica y explicar por qué se relacionan las variables temperatura y presión con la calidad del carbón obtenido. A su vez, se enfoca en explicar por qué ocurre el fenómeno de mejoramiento de propiedades del carbón bajo condiciones específicas de HTL y en qué condiciones se manifiestan estos efectos.

El componente correlacional permite conocer la relación o grado de asociación que existe entre los parámetros operacionales del proceso (variables independientes) y las propiedades fisicoquímicas del carbón producido (variables dependientes).

Por lo tanto, se realizará un diseño experimental puro, donde se manipularán intencionalmente las variables independientes para analizar sus efectos sobre las variables dependientes. Por consiguiente, las variables se presentan a continuación:

Tabla 1.

Variables del proceso

Variables independientes		Variables dependientes	
Temperatura del proceso	200-250-300°C	Rendimiento del carbón	%
Tiempo de residencia	1 hora	Poder calorífico superior	MJ/Kg
Tipo de proceso	HTL-Pirólisis tradicional	Contenido de cenizas en base seca	%
Relación agua-biomasa	1:15	Contenido de materia volátil	%

Siguiendo con este razonamiento, la metodología del proyecto de investigación se llevará a cabo por medio de tres fases presentadas a continuación:

4.1 Fase 1: Caracterización integral de la materia prima

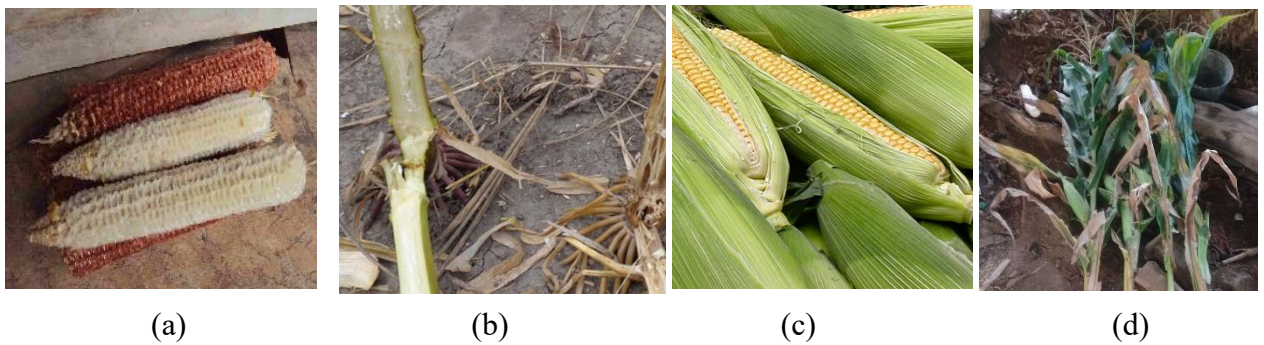
En esta primera fase se busca establecer el potencial energético de los residuos del maíz mediante la determinación de sus propiedades fisicoquímicas.

4.1.1 Preparación de muestras

La biomasa recolectada (tusa, tallos, capotes y hojas) es proveniente del municipio del Valle de San José, Santander, zona agropecuaria caracterizada por su significativa actividad agrícola. Esta localidad fue seleccionada por su representatividad en la producción maicera regional y su alta generación de residuos agrícolas. En la Figura 1, se puede observar los residuos de maíz que fueron recolectados para el desarrollo de la presente investigación.

Figura 1.

Biomasa: (a) Tusa (b) Tallo (c) Capotes (d) Hojas



Posteriormente se realiza la preparación iniciando con un triturado mecánico hasta tamaño <2 mm usando un molino de cuchillas, garantizando el cumplimiento de las normativas y reduciendo variabilidad en las muestras.

Una vez triturada la biomasa, se realiza un tamizado utilizando malla N°40, homogenización, un secado final en estufa a 105°C y se garantiza un correcto almacenamiento en recipientes herméticos con control de humedad.

Figura 2.

Horno tipo mufla (Terrigeno D8 Serie 2254)



Figura 3.

Biomasa posterior a su preparación: (a) Capotes (b) Tusa (c) Cañas (d) Hojas



(a)

(b)

(c)

(d)

4.1.2 Caracterización de la biomasa

Para realizar una adecuada caracterización de la biomasa, se realizan el análisis próximo y el análisis energético para cada una de las muestras utilizando la normativa que se muestra en la **Tabla 2**.

Tabla 2.

Análisis realizados

Análisis	Parámetro	Norma Técnica	Método
Proximal	Humedad	ISO 18134-1:2022	Gravimétrico
	Cenizas	ISO 18122:2022	Calcinación 550°C
	Material Volátil	ISO 18123:2023	Pérdida por calentamiento
	Carbono Fijo	Cálculo	Por diferencia
Energético	PCS	ISO 18125:2017	Bomba calorimétrica
	PCI		Ecuación

4.1.2.1 Análisis próximo. Para la realización del análisis próximo de las muestras de biomasa obtenidas se realizan pruebas de humedad, cenizas, material volátil y carbono fijo.

4.1.2.1.1 Determinación de humedad. Las muestras de ensayo para la determinación del contenido de humedad fueron introducidas a la estufa a 105°C por un tiempo de 2 horas, para garantizar que la biomasa contenga una humedad del 0%, una vez secas fueron pesadas inicialmente en una bandeja refractaria con una masa mínima de 300 g. Posteriormente, se coloca la bandeja con la porción de ensayo en una estufa a temperatura controlada de (105±2) °C y se calientan las bandejas hasta que se alcance una masa constante (la masa constante se define como una variación en la masa que no exceda el 0,2% absoluto de la masa inicial de la porción de ensayo durante un periodo de calentamiento de 60 min).

Finalmente, se retiran las dos bandejas de la estufa y se pesa cada una cuando aún están calientes con una aproximación de 0,1 g, en un intervalo de 10 s a 15 s para evitar absorción de humedad.

La determinación del contenido de humedad expresada como porcentaje en masa debe calcularse utilizando la fórmula 2

$$\%Humedad = \frac{(m_2 - m_3) - (m_4 - m_5)}{m_2 - m_1} * 100 \quad (2)$$

En donde:

m_1 es la masa de la bandeja vacía usada para la porción de ensayo, en gramos

m_2 es la masa de la bandeja y de la porción de ensayo antes del secado (peso a temperatura ambiente), en gramos

m_3 es la masa de la bandeja y de la porción de ensayo después del secado (peso cuando aún está caliente), en gramos

m_4 es la masa de la bandeja de referencia antes del secado (peso a temperatura ambiente), en gramos

m_5 es la masa de la bandeja de referencia después del secado (peso cuando aún está caliente), en gramos

4.1.2.1.2 Determinación de cenizas. Para la determinación del contenido de cenizas presente en la muestra se introduce mínimo un 1g de porción de ensayo en un crisol registrando las masas del crisol con su tapa antes y después del calentamiento. Dicha porción de ensayo se calienta según el siguiente programa de temperaturas: Se eleva la temperatura hasta 250°C durante 50 minutos (es decir, con una velocidad de calentamiento de 5°C/min). Se mantiene a esta temperatura durante 60 min para permitir que se evaporen los volátiles. Se sigue elevando la temperatura hasta 550°C durante un periodo de 30 min (es decir, con una velocidad de calentamiento de 10°C/min). Finalmente, se mantiene esta temperatura durante 120 min.

El contenido de cenizas en base seca se realizó por triplicado y se calculó con la fórmula 3.

$$\%Cenizas = \frac{(m_3 - m_1) * 100}{m_2 - m_1} * \frac{100}{100 - M_{ad}} \quad (3)$$

En donde:

m_1 es la masa en gramos del crisol vacío y su tapa

m_2 es la masa en gramos del crisol vacío, su tapa y la porción de ensayo antes del calentamiento

m_3 es la masa en gramos del crisol vacío, su tapa y el residuo después del calentamiento

M_{ad} es la humedad, en porcentaje de la porción de ensayo según se determina.

4.1.2.1.3 Determinación de materia volátil. Para realizar la prueba, la muestra seca se coloca en un crisol con tapa evitando el contacto de la muestra con el oxígeno. Esta muestra es introducida en un horno precalentado a $900^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ durante 7 min, es importante que el horno cuente con chimenea y que la puerta de este selle bien sin permitir la entrada de aire para evitar la combustión. Posteriormente, se deja enfriar a temperatura ambiente y se almacenan los crisoles en el desecador para determinar la pérdida de peso asociado al material volátil. El porcentaje de materia volátil se calculó en quintuplo ($n=5$) para cada porción de biomasa, utilizando la fórmula 4.

$$\%Materia\ Volátil = \frac{(m_2 - m_3) * 100}{m_2 - m_1} - M_{ad} \quad (4)$$

En donde

m_1 es la masa en gramos del crisol vacío y su tapa

m_2 es la masa en gramos del crisol vacío, su tapa y la porción de ensayo antes del calentamiento

m_3 es la masa en gramos del crisol vacío, su tapa y el residuo después del calentamiento

M_{ad} es la humedad, como fracción másica, de la porción de ensayo determinada según la norma ISO 18134-3

Para el análisis de materia volátil se emplearon cinco réplicas por muestra (n=5), siguiendo recomendaciones de la normativa para materiales heterogéneos y considerando la alta variabilidad natural de residuos lignocelulósicos de maíz.

4.1.2.1.4 Prueba de carbono fijo. El contenido de carbono fijo mide el residuo sólido combustible que queda en la biomasa después de eliminar humedad, volátiles y cenizas, por lo que no se mide directamente. Se calcula utilizando la ecuación 5.

$$\% \text{Carbono fijo} = 100\% - (\text{Humedad} - \text{Cenizas} - \text{Volátiles}) \quad (5)$$

4.1.2.2 Análisis energético

4.1.2.2.1 Poder calorífico superior. Para la determinación del poder calorífico superior se utilizó una bomba calorimétrica Parr 6200 ubicada en el laboratorio 305 del parque tecnológico Guatigará de la Universidad Industrial de Santander, mostrada en la Figura 4.

El poder calorífico determinado en estas condiciones se calcula basándose en el aumento de temperatura observado, considerando la pérdida de calor y el calor latente de vaporización del agua siguiendo el método estándar de la norma ISO 18125:2017.

Figura 4.

(a) Controlador digital de la bomba Parr 6200 (b) Bomba calorimétrica con muestra encapsulada



(a)

(b)

Para garantizar los resultados de las pruebas, la bomba es calibrada por combustión de pellets de ácido benzoico certificado, al iniciar y al finalizar cada ronda de pruebas, los cuales tienen un valor de poder calorífico de referencia presentado en la ecuación 6.

$$PCS_{ref_{ácido_benzoico}} = 26,454 \text{ MJ/Kg} \quad (6)$$

Para realizar el procedimiento de calibración se pesa la pastilla prefabricada de ácido benzoico que se dispone. Posterior a esto, se pone la pastilla en el crisol, se sujeta el cable de encendido y se curva para tocar la pastilla. De la misma manera, se añade una cantidad definida de agua destilada a la bomba. La cantidad debe ser siempre exactamente la misma para la calibración y para los ensayos.

Una vez realizado el proceso de calibración, se utiliza una prensa hidráulica en la cual se compacta la biomasa a analizar en pellets uniformes y similares a los pellets de ácido benzoico utilizados en la calibración.

El cálculo de sesgo, desviación y factores de corrección resulta esencial para compensar pérdidas térmicas presentes, garantizando trazabilidad y comparabilidad con literatura. Por esta razón, se utilizan las ecuaciones que se presentan a continuación.

Utilizando Matlab se introducen todos los valores medidos por la bomba con la calibración correspondiente y se calculan la desviación absoluta y relativa de la siguiente forma:

$$Desv_{abs} = PCS_{bomba_{benzoico}} - PCS_{ref_{benzoico}} \left[\% \frac{MJ}{Kg} \right] \quad (7)$$

$$Desv_{rel} = \frac{100 * Desv_{abs}}{PCS_{ref_{benzoico}}} [\%] \quad (8)$$

Para calcular el sesgo absoluto y relativo, buscando identificar que tanto se aleja en promedio la bomba del valor real se utilizan las ecuaciones 9 y 10.

$$Sesgo_{abs} = PCS_{benzoico_{mean}} - PCS_{ref_{acido_{benzoico}}} \quad (9)$$

$$Sesgo_{rel} = \frac{100 * Sesgo_{abs}}{PCS_{ref_{acido_{benzoico}}}} \quad (10)$$

En donde:

$PCS_{benzoico_{mean}}$, corresponde al promedio de las pruebas tomadas

Por último, para calcular el factor de corrección tanto multiplicativo como aditivo, se utilizaron las siguientes ecuaciones 11 y 12

$$Factor_{mult} = \frac{PCS_{ref_{acido_{benzoico}}}}{PCS_{benzoico_{mean}}} \quad (11)$$

$$Factor_{adit} = PCS_{ref_{acido_{benzoico}}} - PCS_{benzoico_{mean}} \quad (12)$$

Sin embargo, se utiliza el factor de corrección multiplicativo debido a que el error de la bomba calorimétrica se comporta como un factor de escala, no como un desplazamiento fijo en MJ/kg, porque las pérdidas térmicas son proporcionales a la energía liberada.

4.1.2.2 Poder calorífico inferior. El poder calorífico inferior se obtuvo restando al PCS el calor de vaporización del agua formada durante la combustión completa, considerando condiciones de salida como vapor a 25°C.

Según (Yunus & Boles, 2011) la ecuación para calcular el PCI es:

$$PCI_{b,s} = PCS_{b,s} - ((m_{pellet} * \%HE) * h_{fg@25^{\circ}C})_{H_2O} \left[\frac{kJ}{kg} \text{ combustible} \right] \quad (13)$$

En donde:

m_{pellet} , es la masa de biomasa compactada para realizar la prueba de poder calorífico superior

$\%HE$, es el porcentaje de humedad de equilibrio de la biomasa

h_{fg} , es la entalpía de vaporización del agua a temperatura ambiente correspondiente a 2,4417 MJ/Kg (Yunus & Boles, 2011)

4.2 Fase 2: Evaluación experimental de la pirólisis hidrotérmica

En la segunda fase se busca evaluar el impacto de los parámetros funcionales en la calidad del carbón hidrotermal (HTL) obtenido.

4.2.1 *Diseño experimental*

Con el fin de analizar la influencia de la temperatura del proceso se implementó un diseño factorial 3^1 , permitiendo la manipulación intencional de las variables independientes para analizar sus efectos sobre las variables dependientes.

4.2.1.1 Diseño experimental con variación de temperaturas. Para el diseño factorial, se mantuvo una relación de proporción de agua-biomasa 1,15 (900 g de agua-60 g de biomasa) y se evaluó el efecto de la temperatura con un tiempo constante en el reactor. La notación utilizada para el nombramiento y el desarrollo de los tratamientos se basa en la notación de Yates como se muestra en la Tabla 3.

Por esta razón, los factores y niveles del experimento son:

- Factor A (Temperatura): 3 niveles (200°C, 250°C, 300°C)
- Factor B (Tiempo): 1 hora
- 2 repeticiones de cada una de las temperaturas
- Grupo control: Carbón obtenido por pirólisis tradicional (450°C, 1h, N₂)

Teniendo en cuenta lo anterior, se obtiene la siguiente matriz experimental:

Tabla 3.

Matriz experimental diseño factorial 1

Tratamiento	A	B	Repeticiones	Relación
T1	200	1	2	1:15
T2	250	1	2	
T3	300	1	2	
TC	Control	Tradicional	2	

De acuerdo con el diseño factorial propuesto, los experimentos realizados son 4. Sin embargo, para obtener resultados consistentes cada una de las pruebas se realizó por duplicado garantizando repetibilidad y precisión en los resultados.

De la misma manera, la biomasa seleccionada se estableció con base en la prueba de análisis proximal y energético, priorizando residuos con características favorables en términos de carbono fijo teniendo así un mayor potencial de conversión.

4.2.2 Ejecución del proceso de pirólisis

4.2.2.1 Proceso de pirólisis hidrotérmica. Para llevar a cabo el análisis del diseño experimental mencionado, se utiliza un reactor hidrotérmico Parr 4848 fabricado en acero inoxidable AISI 316, un volumen: 1 gal, presión máxima de operación 140 bar, control de temperatura tipo PID $\pm 2^{\circ}\text{C}$ y un sistema de agitación (0-1750 rpm).

Figura 5.

Reactor hidrotérmico Parr 4848



Para la pirólisis hidrotérmica se utilizó una relación agua-biomasa de 1:15 (900 g H_2O : 60 g biomasa seca), esta relación se estableció teniendo en cuenta que (Machado N.

et al., 2016) realizó un estudio en el que sometía biomasa de residuos de maíz a temperaturas de 200, 225 y 250°C con una velocidad de calentamiento del reactor de 2°C/min y relaciones de 1:8 a 1:10, mostrando que incrementos moderados en la dilución favorecen la conversión y aumento del poder calorífico del hidrocarbón.

El rendimiento del proceso se evalúa calculando el rendimiento de los productos de reacción en estado gaseoso (determinado por diferencia con la masa con la que se realiza la prueba), líquido y sólido definidos por las ecuaciones 14, 15, 16 y 17.

$$\text{Masa de la fase gaseosa} = m_{\text{reactor}} - m_{\text{productos(sólido+líquido)}} \text{ [g]} \quad (14)$$

$$\text{Rendimiento}_{\text{líquido}} = \frac{m_{\text{líquido}}}{m_{\text{biomasa}} + m_{\text{agua}}} * 100 \text{ [%]} \quad (15)$$

$$\text{Rendimiento}_{\text{sólido}} = \frac{m_{\text{sólido}}}{m_{\text{biomasa}} + m_{\text{agua}}} * 100 \text{ [%]} \quad (16)$$

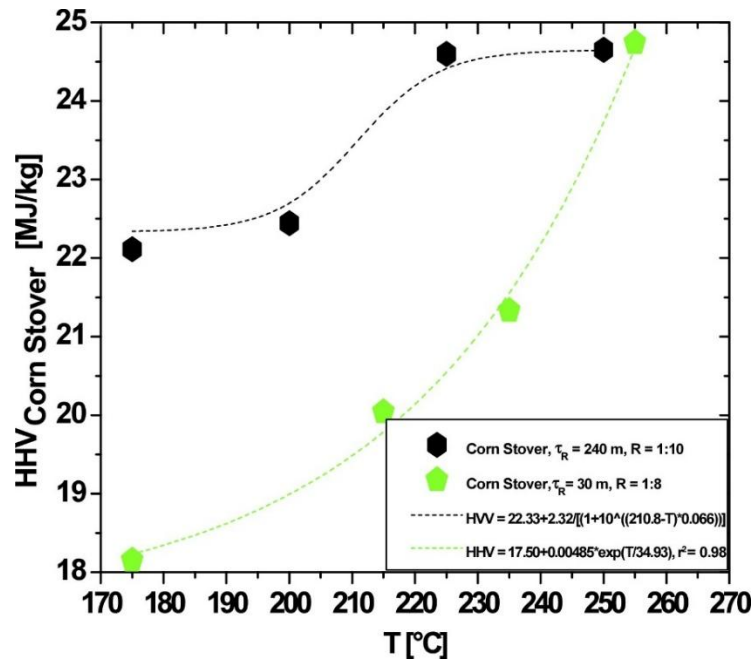
$$\text{Rendimiento}_{\text{gaseoso}} = \frac{m_{\text{fase gaseosa}}}{m_{\text{biomasa}} + m_{\text{agua}}} * 100 \text{ [%]} \quad (17)$$

Por otro lado, (M et al., 2011) quienes afirmaron que en temperaturas entre 300 y 350°C predominan los productos líquidos se establece un máximo de temperatura del experimento de 300°C.

A su vez, (Machado N. et al., 2017) presentan en la Figura 6 altos valores de PCS de productos en fase sólida después del HTL del rastrojo de maíz con agua subcrítica a 175, 200, 225, 250°C con una relación de biomasa-agua de 1:10 comparándolo con relaciones de biomasa-agua de 1:8, mostrando un mejor rendimiento en términos de poder calorífico para relaciones de 1:10.

Figura 6.

Valores de HHV de productos en fase sólida después del HTL



Nota: Adaptado de (Machado N. et al., 2016)

Para el montaje de los 6 experimentos del diseño experimental, el procedimiento realizado consta de:

1. Limpiar y secar adecuadamente el reactor
2. Cargar el reactor con 900 g de agua y 60 g de biomasa.
3. Realizar el montaje del agitador y accesorios de medición (manómetros y termopares) del reactor y tornillos de sujeción.
4. Verificar que las válvulas de seguridad se encuentren cerradas
5. Configurar el reactor con las condiciones de operación correspondientes al experimento a realizar e iniciar el proceso.

6. Una vez alcanzada la temperatura de la prueba, mantener la biomasa en el reactor por una hora.

4.2.2.2 Proceso de pirólisis tradicional. Como grupo de control comparativo, se produjo carbón mediante pirólisis tradicional, con el fin de evaluar las ventajas que aporta la licuefacción hidrotérmica sobre el método convencional.

Para llevar a cabo el proceso se utilizó el reactor tradicional ubicado en el laboratorio 314 de combustión de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Para el montaje de los 2 experimentos realizados se contó con una capacidad de muestra de biomasa de maíz de 10 gramos, teniendo en cuenta las condiciones de operación del equipo de pirólisis.

El procedimiento realizado para llevar a cabo la pirólisis tradicional se da de la siguiente manera:

1. Tomar la muestra de biomasa e introducirla en el reactor
2. Abrir paso de flujo de nitrógeno de 150 ml/min, a una presión de 1 bar por aproximadamente 15 minutos para crear una atmosfera inerte dentro del reactor.
3. Ubicar los instrumentos de condensación y recolección del bioaceite en la plataforma del reactor. El condensador utilizado fue un condensador de tubos concéntricos a contra flujo, el fluido de enfriamiento fue agua a temperatura ambiente, la cual, fue impulsada por un sistema de bombeo.
4. Configurar el reactor con las condiciones de operación.

Figura 7.

Reactor de pirólisis tradicional utilizado

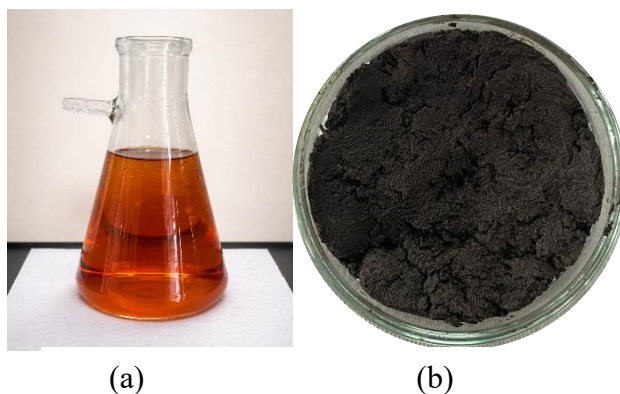
**4.2.3 Separación y recuperación**

Al finalizar cada ensayo, se realizó el desmontaje del reactor, retirando el contenido de este y realizando la separación de fases. La separación de la fase sólida de la líquida fue realizada por medio de filtración al vacío utilizando una bomba Vacuum Pump Vp-125

Figura 8.

Productos obtenidos tras la separación por filtración al vacío: (a) Fase líquida; (b)

Carbón recuperado en fase sólida.



Posteriormente, el carbón obtenido se seca en estufa a 105 °C durante 24 h, o hasta alcanzar masa constante, para garantizar la eliminación de la humedad libre. Una vez seco,

el material se almacena en recipientes herméticos, protegidos de la luz y en ambiente controlado, a fin de evitar la reabsorción de humedad y cambios en sus propiedades antes de los análisis posteriores.

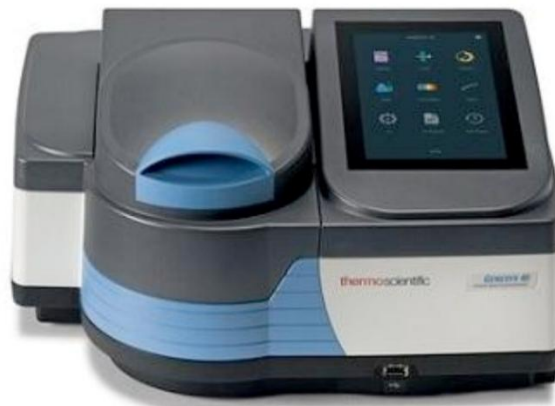
4.2.4 Evaluación de la calidad del carbón hidrotérmico vs tradicional

Para evaluar la calidad del carbón hidrotérmico obtenido, se realizó el análisis proximal y energético completo tanto del carbón tradicional como del carbón hidrotérmico producido por HTL, determinando humedad, cenizas, materia volátil, carbono fijo, poder calorífico superior e inferior, siguiendo las metodologías descritas en secciones 5.1.2.1.1 Análisis próximo y 5.1.2.1.2 Análisis energético. Con los valores obtenidos, se realizó un análisis de experimentos ANOVA de una vía utilizando el software Minitab entre las variables temperatura y poder calorífico superior.

Adicionalmente, se determinó la capacidad de adsorción del carbón del hydrochar mediante la prueba estándar con azul de metileno, en comparación con el carbón obtenido en la pirólisis tradicional, lo que permite determinar su potencial para aplicaciones posteriores como precursor del carbón activado. Por lo anterior, para determinar la capacidad de adsorción del carbón obtenido se utilizó un espectrofotómetro ubicado en el laboratorio 305 del del parque tecnológico Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander.

Figura 9.

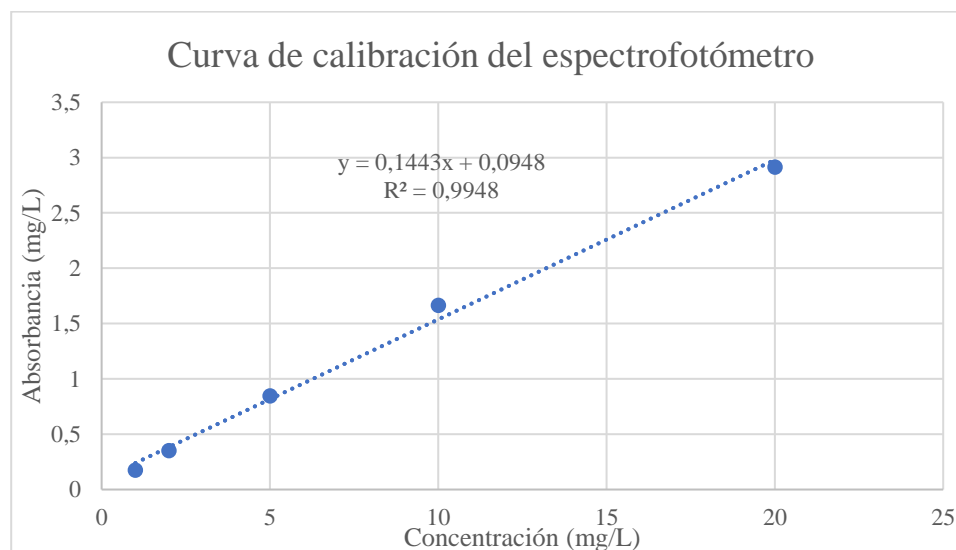
Espectrofotómetro utilizado para la prueba de adsorción



Para garantizar la correcta medición en el equipo se realiza una calibración, la cual consiste en introducir agua destilada con 5 concentraciones diferentes de azul de metileno (20, 10, 5, 2,1 mg/L) al equipo. Con los valores obtenidos, se realiza una curva de calibración lineal mostrada en la **Figura 10**.

Figura 10.

Curva de calibración obtenida en el espectrofotómetro utilizado



Una vez realizada la curva de calibración, se inician los experimentos de adsorción con 50 mg de biocarbón (previamente molido y tamizado) agitado con 50 ml de solución de azul de metileno con una concentración de 20 mg/L. Esta concentración se detuvo cada hora con un tiempo de estabilización de un minuto y se determinó su concentración parcial utilizando el espectrofotómetro por 6 horas para cada una de las temperaturas del HTL y pirólisis tradicional por duplicado.

Figura 11.

Muestras de biocarbón en agitación



Finalmente, para determinar la cantidad de azul de metileno que fue adsorbido por cada una de las muestras se utiliza la Ecuación 18.

$$q_e = \frac{(C_o - C_e) * V}{M} \left[\frac{mg}{g} \right] \quad (18)$$

En donde

C_o es la concentración inicial de la solución de azul de metileno en mg/L,

C_e es la concentración de la solución de azul de metileno en el tiempo de equilibrio en mg/L,

V es el volumen en L de la solución

M es la masa en g del adsorbente. (Puccini et al., 2017)

4.3 Fase 3: Análisis técnico-económico comparativo

Esta fase aborda el Objetivo Específico 3: "Determinar el potencial comercial mediante estudio técnico-económico". Para ello, se realiza el escalamiento del proceso teniendo en cuenta la escala de laboratorio (60 g biomasa/experimento) hasta una escala industrial.

Para la escala industrial se tiene en cuenta una planta de HTC similar a la propuesta por (Ciceri et al., 2021) compuesta por 10 reactores con una capacidad de tratamiento de 78000 toneladas de biorresiduos húmedos al año. Sin embargo, para el análisis de la presente fase del proyecto la evaluación técnico-económica se llevará a cabo teniendo en cuenta un único reactor.

Los límites del sistema corresponden a un análisis que incluye la extracción de la biomasa

4.3.1 Estimación del CAPEX

La inversión de capital (CAPEX) se estimó a partir del dato reportado en el artículo de referencia para el caso de diez reactores: 27343800 euros. Para escalar esta cifra a una planta de un solo reactor, se aplica la regla de economía de escala estándar en ingeniería de procesos, conocida como regla de los seis décimos o relación potencial, expresada en la ecuación

$$CAPEX_1 = CAPEX_{10} * \left(\frac{Q_1}{Q_{10}}\right)^{0,7} \quad (19)$$

Donde $Q_1=7800$ ton/año (1 reactor) y $Q_{10}=78000$ ton/año. El exponente n de esta relación fue introducido empíricamente por Chilton (1950), quien derivó un valor de aproximadamente 0,6 para instalaciones químicas en general, dando origen al nombre histórico de la regla. Sin embargo, el exponente varía entre 0,3 y 1,0 según el tipo de equipo, y entre 0,5 y 1,0 para plantas completas (Peters et al., 2003). Para plantas de procesamiento de sólidos húmedos como la planta HTC, se adoptó el valor de $n = 0,7$, que es el valor convencional recomendado para este tipo de instalaciones (Peters et al., 2003).

Cabe señalar que el valor obtenido para el $CAPEX_{10}$ corresponde al valor de la planta en el 2021. Por esta razón, se actualizó considerando la inflación hasta el año en curso mediante la ecuación (20) que permite ajustar los costos a precios actuales.

$$CAPEX_{10_{2026}} = CAPEX_{10_{2021}} * \left(\frac{IPC_{2026}}{IPC_{2021}}\right) \quad (20)$$

Los valores del IPC (111,41 para el 2021 y 155,73 para el 2026) se obtuvieron de la serie histórica oficial del DANE (DANE, 2026).

4.3.2 Estimación del OPEX

Los costos operativos (OPEX) se estimaron teniendo en cuenta datos técnicos específicos del proceso HTC del artículo de referencia con precios locales colombianos de insumos para el año en curso (2026), siguiendo las directrices de estimación de costos de (Peters et al., 2003).

Para la estimación del consumo térmico específico se utilizaron las ecuaciones (21) y (22).

$$\text{Energía térmica (KWh)} = \text{Energía térmica} \left(\frac{\text{KWh}}{\text{tonSS}} \right) * \text{Masa seca procesada} \quad (21)$$

$$\text{Costo térmico (COP)} = \frac{\text{Costo térmico} \left(\frac{\text{COP}}{\text{m}^3} \right)}{\text{PCS}_{\text{gas natural}} \left(\frac{\text{KWh}}{\text{m}^3} \right) * \eta} * \text{Energía térmica (KWh)} \quad (22)$$

Por otro lado, para determinar los costos asociados al consumo eléctrico se utilizaron las ecuaciones (23) y (24)

$$\text{Energía eléctrica (KWh)} = \text{Energía eléctrica} \left(\frac{\text{KWh}}{\text{tonSS}} \right) * \text{Masa seca procesada} \quad (23)$$

$$\text{Costo eléctrico (COP)} = \text{Energía eléctrica}_{\text{EPM}} (\text{KWh}) * \text{Costo eléctrico} \left(\frac{\text{COP}}{\text{KWh}} \right) \quad (24)$$

4.3.3 Análisis de viabilidad financiera

El análisis de viabilidad financiera se evaluó mediante indicadores de ingeniería económica siguiendo los lineamientos de (Peters et al., 2003): flujo operativo anual, periodo de recuperación (payback), flujo acumulado a 20 años y retorno de inversión (ROI).

Para determinar el flujo operativo anual (EBITDA) se utilizó la ecuación (25).

$$\text{Flujo operativo anual} = \text{Ingresos} - \text{OPEX} \quad (25)$$

El periodo de recuperación (payback) se determinó dividiendo la inversión de capital entre el flujo operativo anual como se presenta en la ecuación (26).

$$\text{Payback} = \frac{\text{CAPEX}}{\text{Flujo operativo anual}} \quad (26)$$

Para evaluar la rentabilidad a largo plazo, se calculó el flujo acumulado bruto en 20 años y el excedente neto después de recuperar el CAPEX mediante las ecuaciones (27) y (28).

$$Flujo\ acumulado_{20} = Flujo\ operativo\ anual * 20 \quad (27)$$

$$Excedente\ neto = Flujo\ acumulado_{20} - CAPEX \quad (28)$$

Finalmente, el retorno de inversión (ROI) se calcula utilizando la ecuación (29).

$$ROI(\%) = \left(\frac{Excedente\ neto}{CAPEX} \right) * 100 \quad (29)$$

Con estos indicadores se obtiene una aproximación a la rentabilidad del proyecto.

Sin embargo, para una evaluación más precisa se calcularon valor actual neto (VAN) y tasa interna de retorno (TIR), de gran importancia para la evaluación de plantas industriales.

Para determinar el valor actual neto (VAN) con flujo constante, se utilizó la ecuación (30).

$$VAN = Flujo\ operativo\ anual * \left(\frac{1 - (1 + i)^{-n}}{i} \right) - CAPEX \quad (30)$$

Por último, la TIR se define como la tasa que anula el valor actual neto, satisfaciendo la ecuación (31).

$$0 = \sum \frac{Flujo\ operativo\ anual}{(1 + TIR)^t} - CAPEX \quad (31)$$

8. Análisis de resultados

5.1 Fase 1: Caracterización integral de la materia prima

5.1.1 Caracterización de la biomasa

Los resultados obtenidos para la caracterización de la biomasa en términos de análisis próximo (Humedad, cenizas, volátiles y carbono fijo) y en términos de análisis energético (PCS y PCI) se presentan en la sección 6.1.1.1 y 6.1.1.2.

5.1.1.1 Análisis próximo. Con base en los residuos de maíz caracterizados en la sección 5.1.1 (tusa, tallos, capotes y hojas) se realizó análisis proximal completo para cada fracción, contemplando humedad, cenizas, volátiles y carbono fijo, con el objetivo de identificar el residuo óptimo como materia prima para el proceso de pirólisis hidrotérmica como se muestra en la Tabla 4

Tabla 4.

Resultados obtenidos a partir del análisis próximo (db:dry base, ar:as received)

Análisis próximo de la biomasa de maíz				
	Cenizas (% db)	Volátiles (% db)	Carbono fijo (% db)	Humedad (% ar)
Tusa	2,08±0,29%	80,27±0,76%	17,66%	53,57%
Cañas	4,66±0,54%	75,15±0,69%	20,19%	66,2%
Hojas	7,13±0,37%	74,31±0,52%	18,56%	10,76%
Capotes	2,89±0,14%	79,61±1,45%	17,50%	20,4%

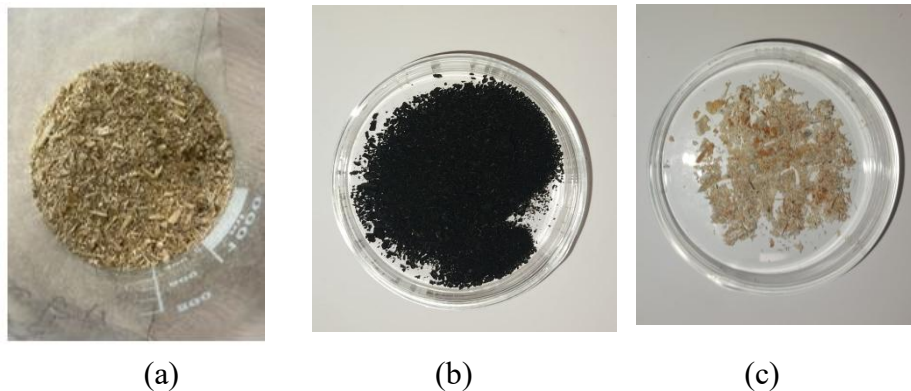
El análisis próximo revela diferencias significativas entre las porciones de biomasa: La tusa presenta menor contenido de cenizas y mayor contenido de materia volátil, mientras que las cañas presentan mayor contenido de carbono fijo.

Por lo anterior, se priorizaron las cañas por su alto contenido de carbono fijo, perfil ideal para HTL ya que maximiza la estabilidad térmica del carbón obtenido. Estudios afirman que el porcentaje de carbono es el principal indicador del nivel de carbonización; por lo tanto, su valor se relaciona directamente con la calidad del hidrocarbón o combustible sólido. (Mohamed et al., 2019)

A continuación, la Figura 12 ilustra el análisis próximo de las cañas de maíz seleccionada.

Figura 12.

Análisis próximo: (a) Cañas de maíz después de la prueba de humedad (b) Cañas de maíz después de la prueba de volátiles (c) Cañas de maíz después de la prueba de cenizas



La Tabla 5 presenta una comparativa del análisis próximo de diferentes fracciones de la biomasa de maíz obtenidos en el presente estudio frente a resultados reportados en la literatura. Se evalúan valores de contenido de cenizas, volátiles, carbono fijo y contenido de humedad, con el fin de identificar posibles tendencias, similitudes o variaciones en la composición de estos residuos. Los estudios utilizados para realizar la comparativa fueron: (Ochoa, Montoya, et al, 2025) y (Chen, et al, 2024)

Tabla 5.*Comparación del análisis próximo con la literatura*

Análisis próximo de la biomasa de maíz				
Este estudio				
	Cenizas (% db)	Volátiles (% db)	Carbono fijo (% db)	Humedad (% wb)
Tusa	2,08%	80,27%	17,66%	9,56%
Cañas	4,66%	75,15%	20,19%	9,41%
Hojas	7,13%	74,31%	18,56%	9,36%
Capotes	2,89%	79,61%	17,50%	8,98%
(Ochoa, Montoya, et al, 2025)				
	Cenizas (% db)	Volátiles (% db)	Carbono fijo (% db)	Humedad (% wb)
Tusa	2,00%	74,0 - 88,0 %	10,0 - 18,0 %	6,0 - 7,0%
Cañas	2,0 - 6,0 %	73,0 - 85,0 %	8,0 - 21,0 %	4,0 - 10,0 %
Hojas	15,0 - 18,0 %	75,00%	11,00%	6,0 - 7,0 %
Capotes	8,0 - 18,0 %	75,00%	14,00%	7,0 - 9,0 %
(Chen, et al, 2024)				
	Cenizas (% db)	Volátiles (% db)	Carbono fijo (% db)	Humedad (% wb)
Tusa	2,14%	74,10%	17,86%	5,90%
Cañas	2,32%	85,34%	7,79%	4,55%
Hojas	8,52%	74,74%	10,62%	6,12%
Capotes	3,72%	75,34%	13,81%	7,12%

Nota: db: dry base; wb: wet base

En general, los resultados obtenidos en este estudio muestran una concordancia con los valores reportados en la literatura, especialmente en el contenido de volátiles y porcentaje de humedad. Sin embargo, se encuentran algunas diferencias en ciertas fracciones de maíz como las hojas y los capotes, lo cual puede atribuirse a diferencias en las condiciones de cultivo o métodos de análisis. Ochoa hizo una revisión de literatura y recopiló de diferentes autores el análisis proximal de las diferentes fracciones de la planta de maíz. El presente estudio evidencia que las cañas de maíz presentan el mayor contenido de carbono fijo, tendencia que también ha sido reportada por Ochoa, Montoya, et al, (2025)

artículo en el cual se analizan distintos estudios para biomasa de maíz, lo que sugiere un mayor potencial para la formación de residuos carbonosos.

5.1.1.2 Análisis energético

5.1.1.2.1 Poder calorífico superior. Para el análisis energético utilizando la bomba calorimétrica, se realizó una calibración del equipo al iniciar y al finalizar las pruebas, obteniendo los valores que se presentan a continuación

$$PCS_{ref\ acido\ benzoico\ inicio} = 27,991\ MJ/Kg$$

$$PCS_{ref\ acido\ benzoico\ final} = 27,6246\ MJ/Kg$$

La Tabla 6 muestra los valores obtenidos experimentalmente para el poder calorífico superior (MJ/kg) para cada una de las porciones de maíz y el peso del pellet utilizado para la medición (g).

Tabla 6.

Resultados de PCS para porciones de biomasa de maíz

Determinación del poder calorífico de la biomasa		
	Peso (g)	Poder calorífico superior experimental (MJ/Kg)
Prueba calibración inicial	1,0027	27,7722
Tusa	1,1569	18,1648
Cañas	1,1398	18,3803
Hojas	1,1943	18,1847
Capotes	1,1144	17,8012
Prueba calibración final	1,0153	27,7797

Los resultados de poder calorífico para tusa, cañas, hojas y capotes de maíz son uniformes indicando que este último es indiferente en el proceso de selección de la porción a utilizar en el proceso de pirólisis hidrotérmica. Adicionalmente, estudios confirman homogeneidad energética de fracciones de maíz independientemente de cosecha o porción de la biomasa. Esto indica que en lo que respecta a procesos de combustión en términos de poder calorífico que es indiferente la parte de la planta de maíz que se utilice o el momento de cosecha del material.

Los valores de poder calorífico superior (PCS) se ajustaron por sesgo y desviación del equipo mediante código MATLAB (Anexo 1), obteniendo los resultados presentados en la Tabla 7.

Tabla 7.

Ajuste del poder calorífico superior para fracciones de maíz (MJ/kg)

Ajuste del poder calorífico superior		
Prueba	Método	PCS (MJ/Kg)
Tusa	Multiplicativo	17,300 +/- 0,003
Cañas	Multiplicativo	17,506 +/- 0,003
Hojas	Multiplicativo	17,319 +/- 0,003
Capotes	Multiplicativo	16,954 +/- 0,003

Los ajustes multiplicativos refinan los valores experimentales obtenidos, manteniendo homogeneidad energética entre fracciones y alineados con la literatura (16,7-20,9 MJ/kg). (Pordesimo et al., 2005)

La Tabla 8 presenta una comparativa del poder calorífico superior obtenido para cada una de las fracciones de maíz en el presente estudio frente a estudios como:

(Pordesimo et al., 2005) y (Lizotte et al., 2015). Este parámetro es fundamental para evaluar el potencial energético de la biomasa, ya que indica la cantidad de energía liberada en combustión completa.

Tabla 8.

Comparativa del poder calorífico superior

	Poder calorífico superior (MJ/Kg)		
	Este estudio	(Pordesimo, et al, 2005)	(Lizotte et al., 2015)
Tusa	17,300 +/- 0,003	23,446	17,62 - 17,80
Cañas	17,506 +/- 0,003	13,607	17,685 -17,465
Hojas	17,319 +/- 0,003	23,446	17,47 - 16,26
Capotes	16,954 +/- 0,003	21,771	17,49 -17,36

Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran que el poder calorífico superior de todas las fracciones de maíz analizadas se encuentra dentro de rangos comparables con la literatura, especialmente con los datos reportados por (Lizotte et al., 2015). Por otro lado, se encuentran diferencias con los datos reportados por (Pordesimo et al., 2005) principalmente en fracciones como tusa y hojas, donde se reportan valores más elevados, estas variaciones pueden atribuirse a cambios en el contenido de humedad, condiciones ambientales o experimentales. En general, las cañas presentan el valor más alto dentro del estudio, lo que sugiere un mayor potencial energético.

5.1.1.2.2 Poder calorífico inferior. Para determinar el poder calorífico inferior se determinó la humedad de equilibrio para cada una de las porciones de biomasa, reportada en la Tabla 9.

Tabla 9.

Humedad de equilibrio de las fracciones de maíz.

Porción de biomasa	%Humedad de equilibrio
Tusas	9,56%
Cañas	9,41%
Hojas	9,36%
Capotes	8,98%

Nota: El contenido de humedad está expresado en base húmeda.

A partir de los valores de humedad de equilibrio determinados para cada fracción de biomasa y aplicando la ecuación 13, se calculó el poder calorífico inferior correspondiente mostrado en la **Tabla 10**.

Tabla 10.

Poder calorífico inferior para fracciones de maíz

Prueba	Poder calorífico inferior (MJ/kg)
Tusa	17,03±0,003
Cañas	17,24±0,003
Hojas	17,046±0,003
Capotes	16,69±0,003

5.2 Fase 2: Evaluación experimental de la pirólisis hidrotérmica

La Fase 2 evaluó el impacto de la temperatura (200, 250 y 300 °C) en los rendimientos y la calidad del biocarbón obtenido por pirólisis hidrotérmica (HTL) de cañas

de maíz, comparado con pirólisis tradicional, teniendo en cuenta análisis próximo, energético y adsorción del biocarbón.

5.2.1 Diseño experimental

El diseño factorial 3^1 (Tabla 3.) se ejecutó exitosamente con 6 corridas HTL (T1-T3, n=2 cada una) y control tradicional (TC). La desviación entre duplicados fue consistente, validando la reproducibilidad bajo condiciones controladas.

5.2.2 Ejecución del proceso de pirólisis

5.2.2.1 Proceso de pirólisis hidrotérmica. Las condiciones del proceso, balances de masa y los rendimientos de los productos en las tres fases principales de la reacción (biocarbón sólido, líquido y gas equivalente por diferencia) una vez retirado del reactor se ilustran en la Tabla 11.

Tabla 11.

Parámetros del proceso para HTL de cañas de maíz y rendimiento del carbón húmedo obtenido

Parámetros del proceso	Temperatura (°C)					
	200	200	250	250	300	300
Masa de cañas de maíz (g)			60			
Masa de H ₂ O (g)			900			
Velocidad del agitador mecánico (rpm)			700			
Velocidad de calentamiento (°C/min)			2			
Tiempo de proceso (min)			60			
Masa de biocarbón húmedo (g)	271,7	261,13	166,94	109,39	111,96	59,35
Rendimiento del biocarbón húmedo (%)	28,30	27,20	17,39	11,39	11,66	6,18
Masa de líquido (g)	632,97	641,31	745,39	818,18	757,76	802
Rendimiento en estado líquido (%)	65,93	66,80	77,64	85,23	78,93	83,54

Masa de fase gaseosa (g)	55,33	57,56	47,67	32,43	90,28	98,65
Rendimiento en estado gaseoso (%)	5,76	6,00	4,97	3,38	9,40	10,28

Los datos experimentales muestran rendimientos del biocarbón húmedo que oscilan entre 6,18% y 28,3% (fase sólida), 65,93% y 85,23% (fase líquida) y 3,38% y 10,28% (fase gaseosa). El rendimiento de la fase sólida disminuye linealmente con la temperatura, favoreciendo fases líquidas y gaseosas a medida que aumenta la temperatura, mientras que a medida que disminuye la temperatura se favorece la fase sólida de biocarbón.

De la misma manera el rendimiento del biocarbón en base seca, se presenta en la

Tabla 12.

Tabla 12.

Rendimiento del biocarbón seco

Parámetros del proceso	Temperatura (°C)					
	200	200	250	250	300	300
Masa de biocarbón (g)	46,19	36,52	27,26	32,03	18,441	21,202
Rendimiento del biocarbón seco (% en peso)	76,98%	60,87%	45,43%	53,38%	30,74%	35,34%

El rendimiento experimental del biocarbón seco con respecto a los 60 g de biomasa cargados en el reactor arroja valores entre 30,74% y 76,98% conservando la tendencia decreciente del rendimiento con respecto a la temperatura. Esta disminución de alrededor de 50% (de 200 a 300°C) se atribuye a mayor conversión a fases líquida y gaseosa, consistente con la literatura. De la misma manera, los rendimientos obtenidos se encuentran dentro del rango reportado por (Machado N. et al., 2016).

Los resultados de análisis próximo y energético obtenidos de los carbones obtenidos se presentan en la Tabla 13. A partir de los valores de humedad de equilibrio determinados para cada muestra de carbón y mediante la ecuación 13, se calculó el poder calorífico inferior. Así mismo, los valores de poder calorífico superior se ajustaron siguiendo lo descrito en el apartado 4.1.2.2.1 Poder calorífico superior.

Tabla 13.

Análisis próximo y energético para productos obtenidos en HTL.

Parámetros del proceso	Temperatura (°C)					
	200	200	250	250	300	300
Volátiles (wt %)	75,02 ± 0,74	74,42± 0,39	50,47 ± 0,28	56,27 ± 0,46	46,21 ± 0,35	48,91 ± 0,35
Cenizas (wt %)	2,82 ± 0,32	2,7 ± 0,12	3,04 ± 0,13	2,25 ± 0,37	2,82 ± 0,12	2,66 ± 0,01
Carbono fijo (wt %)	22,06 ± 1,06	22,88 ± 0,74	46,5 ± 0,15	41,48 ± 0,50	50,97 ± 0,14	48,43 ± 0,33
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	21,551	20,969	27,550	27,128	28,418	29,772
Poder calorífico superior (MJ/kg)	21,712 ± 0,202	21,111± 0,197	27,669 ± 0,042	27,232 ± 0,254	28,505 ± 0,266	29,856 ± 0,045
Humedad de equilibrio (wt%)	5,56	4,91	4,09	3,58	2,99	2,89

El análisis próximo mostró que el proceso de HTL genera disminución de contenido de volátiles y aumento de porcentaje de carbono fijo, indicando mayor carbonización a medida que aumenta la temperatura. En términos de PCS la muestra de biocarbón más

adecuada es la de 300°C, mostrando valores superiores a los obtenidos para la biomasa cruda (18,3803 MJ/kg).

La Tabla 14 presenta los valores obtenidos para el análisis próximo en la literatura para temperaturas cercanas a las del presente estudio. Dentro del análisis próximo se permite determinar la evolución de las propiedades físicoquímicas del material en función de la temperatura del proceso.

Tabla 14.

Comparativa del análisis próximo de hidro-carbón mediante HTL.

	(Mohammed et al., 2020) db:dry base			(Islam et al., 2021) wt:wet base		
	215,9	250	300	200	230	260
Temperatura (°C)	215,9	250	300	200	230	260
Volátiles (wt %)	57,28	60,72	54,47	75,5±0,7	69,2±0,8	55,9±0,5
Cenizas (wt %)	24,72	19,75	18,95	4,7±0,4	7,6	11,3±1,6
Carbono fijo (wt %)	18,00	19,52	26,58	17,9±0,7	21,8±1,0	31,6±0,4
Poder calorífico superior (MJ/kg)	20,86	23,2	26,03	19,7±0,2	20,7±0,2	22,1±0,2
Humedad de equilibrio (wt%)	-	-	-	1,8±0,0	1,4±0,3	1,2±0,1

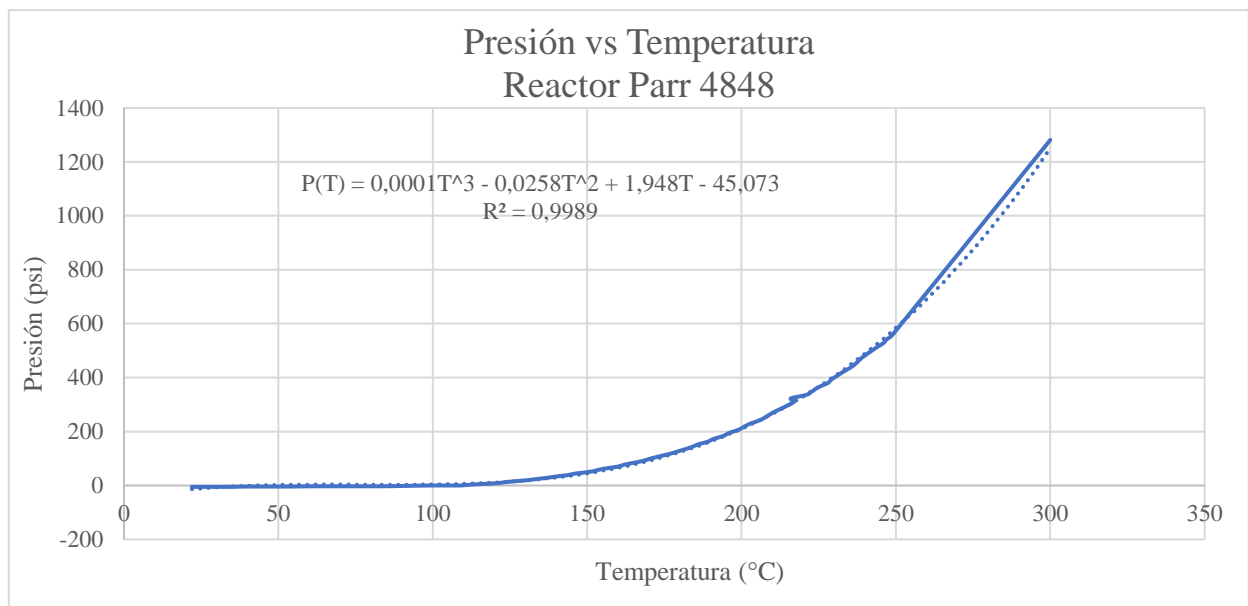
En general, los resultados reportados por la literatura evidencian el mismo comportamiento reportado por el presente estudio, especialmente en la disminución de

volátiles, aumento de carbono fijo e incremento de poder calorífico con el aumento de la temperatura del proceso. No obstante, se presentan diferencias en el comportamiento de las cenizas. Así mismo, los valores del poder calorífico obtenidos en el presente estudio son comparables e incluso superiores en algunos casos, lo que incrementa el potencial del proceso HTL. Las variaciones observadas pueden atribuirse a la ubicación geográfica y a diferentes tipo de cultivo.

5.2.2.1.1 Modelado de Presión y Temperatura en el reactor. Para analizar el impacto de parámetros como la temperatura y presión en la calidad del carbón obtenido, se generó una ecuación de la presión en el reactor Parr 4848 durante la pirólisis hidrotérmica en función de la temperatura. Por lo anterior, se desarrolló un modelo empírico $P(T)$ ajustado a datos experimentales/medidos utilizando los sensores con los que cuenta el reactor.

Figura 13.

Modelo empírico $P(T)$ para reactor Parr 4848

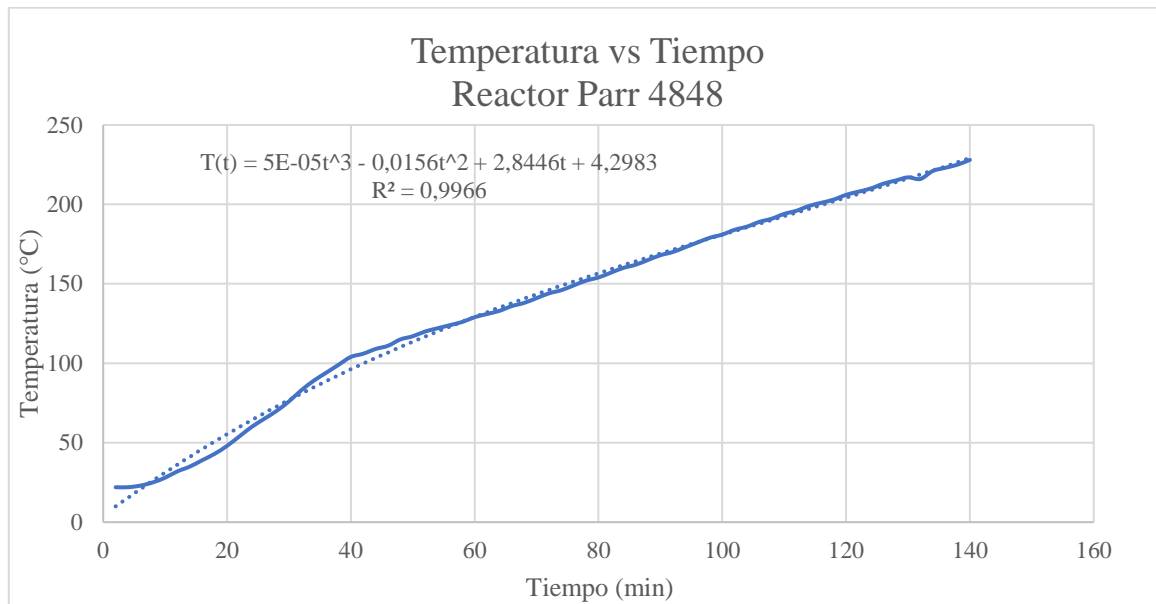


La **Figura 13.** muestra la relación entre la presión y la temperatura en el reactor Parr 4848. La presión aumenta de forma no lineal, ajustándose a la siguiente ecuación $P(T) = 0,0001T^3 - 0,0258T^2 + 1,948T - 45,073$, con un coeficiente $R^2 = 0,9989$ garantizando un buen ajuste de los datos experimentales. Esta ecuación permite predecir la presión interna en función de la temperatura de operación, facilitando la selección de condiciones seguras de HTL dentro del límite de diseño del reactor.

A su vez, se realizó un modelo de la temperatura en función del tiempo para determinar la velocidad de calentamiento a la que opera el reactor.

Figura 14.

Modelo empírico $T(t)$ para reactor Parr 4848



La **Figura 14** presenta el perfil de calentamiento del reactor Parr 4848, modelado por la siguiente ecuación cúbica $T(t) = 5x10^{-5}t^3 - 0,0156t^2 - 2,8446t + 4,2983$ con un coeficiente $R^2 = 0,9966$ garantizando un buen ajuste de los datos experimentales. El modelo $T(t)$ permite estimar tiempos de rampa de calentamiento para optimizar ciclos experimentales y determinar la velocidad de calentamiento del reactor ($2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$).

5.2.2.2 Proceso de pirólisis tradicional. Una vez realizado el proceso de pirólisis hidrotérmica, se lleva a cabo el proceso de pirólisis tradicional con el objetivo de establecer una comparativa, de la pirolisis tradicional se realizaron dos muestras. En la se muestran los rendimientos de los productos en las tres fases principales de la reacción (líquido, sólido y gaseoso).

Tabla 15.*Parámetros y rendimientos de la pirólisis tradicional*

Parámetros del proceso	Temperatura (°C)	
	450 (1)	450 (2)
Masa de cañas de maíz (g)	10,4273	10,6515
Tiempo de proceso (min)	60	60
Masa de biocarbón (g)	3,2111	3,0438
Rendimiento del biocarbón (%)	30,80	28,58
Masa de líquido (g)	3,9718	5,5024
Rendimiento en estado líquido (%)	38,09	51,66
Masa de fase gaseosa (g)	3,24	2,11
Rendimiento en estado gaseoso (%)	31,11	19,77

El rendimiento del biocarbón obtenido a partir de la pirólisis tradicional se sitúa por debajo de los rendimientos del biocarbón en base seca obtenidos mediante HTL. En la HTL, los rendimientos muestran una clara disminución con el aumento de la temperatura de reacción, pasando de valores altos a 200 °C a valores más bajos a 300 °C. En contraste, la pirólisis tradicional, al operar a temperaturas más elevadas y en ausencia de agua, produce biocarbones con menores rendimientos sólidos, reflejando un mayor grado de volatilización del material original.

Los resultados de análisis próximo y energético obtenidos de los carbones obtenidos se presentan en la Tabla 16 . A partir de los valores de humedad de equilibrio determinados para cada muestra de carbón y mediante la ecuación 13 , se calculó el poder calorífico

inferior. Así mismo, los valores de poder calorífico superior se ajustaron siguiendo lo descrito en el apartado 4.1.2.2.1 *Poder calorífico superior*.

Tabla 16.

Análisis próximo y energético para pirólisis tradicional

Análisis próximo y energético	Temperatura (°C)
	450
Volátiles (%)	24,30±0,47
Cenizas (%)	17,46±0,82
Carbono fijo (%)	58,25±0,94
Humedad de equilibrio (%)	5,01
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	26,1009
Poder calorífico superior (MJ/kg)	26,188 +/- 0,039

El contenido de cenizas para la pirólisis tradicional a 450°C (17,46%) es considerablemente mayor con respecto a los valores de cenizas obtenidos en las porciones de biocarbón de la pirólisis hidrotérmica (2-3%). Por lo contrario, el contenido de volátiles (24,3%) es menor en la pirólisis tradicional en comparación con HTL (46-75%). Finalmente, en términos de carbono fijo, en el proceso de pirólisis tradicional se obtienen valores mayores (58,25%) en comparación con la pirólisis hidrotérmica (22-50%).

En términos del análisis energético, se evidencia que los valores de poder calorífico superior obtenidos (26,188 MJ/kg) se sitúan por encima del poder calorífico promedio

obtenido en HTL a 200°C (21,4115 MJ/kg) y por debajo de los valores de PCS obtenidos para 250°C y 300°C (27,4505-29,1805 MJ/kg).

La Tabla 17 presenta una comparación del análisis próximo y las propiedades energéticas del carbón obtenido mediante pirólisis tradicional, contrastando los resultados del presente estudio con los reportados por (Xing et al., 2018) el cual realiza pirólisis tradicional para todos las porciones de residuos de maíz mezcladas y (Soka & Oyekola, 2020), el cual somete a pirólisis tradicional los tallos del maíz, lo cual explica las variaciones entre los datos.

Tabla 17.

Comparativa de analisis próximo y energético de pirólisis tradicional

Análisis próximo y energético	Este estudio	(Xing et al., 2018)	(Soka & Oyekola, 2020)
	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
	450	450	400
Volátiles (wt %)	24,30	18,3	32,76
Cenizas (wt %)	17,46	24,39	16,22
Carbono fijo (wt %)	58,25	52,44	51,02
Humedad de equilibrio (wt %)	5,01	4,84	-
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	26,1009	-	-
Poder calorífico superior (MJ/kg)	26,188 +/- 0,039	23,76	23,79

Los resultados del presente estudio evidencian un mayor contenido de carbono fijo. Así mismo, el poder calorífico superior es superior al reportado por la literatura, lo que sugiere una mejora en la calidad energética del biocarbón producido. En general, los

resultados confirman que la pirólisis tradicional a 450°C favorece la obtención de un biocombustible con alto contenido energético.

5.2.3 Evaluación de la calidad del carbón hidrotérmico vs tradicional

5.2.3.1 Análisis de la influencia de la temperatura en el PCS. Para la evaluación de la calidad del carbón hidrotérmico frente al carbón obtenido en la pirólisis tradicional se analizó en primera instancia, la influencia de la temperatura en parámetros el proceso como el poder calorífico superior (PCS) mediante modelos de regresión en Minitab, lo que permitió cuantificar el efecto de la temperatura sobre las propiedades energéticas de cada tipo de biocarbón.

En este análisis se utilizó el método estadístico ANOVA de una vía en el cual se encontró que la temperatura de proceso tiene un efecto estadísticamente significativo sobre el PCS del carbón obtenido ($p=0,005$; $R^2=94,82\%$; $R_{ajustado}^2=90,93\%$). Este modelo explica la variabilidad del poder calorífico superior con respecto a la temperatura y valida el uso de la temperatura como variable de control clave en la mejora del biocarbón obtenido.

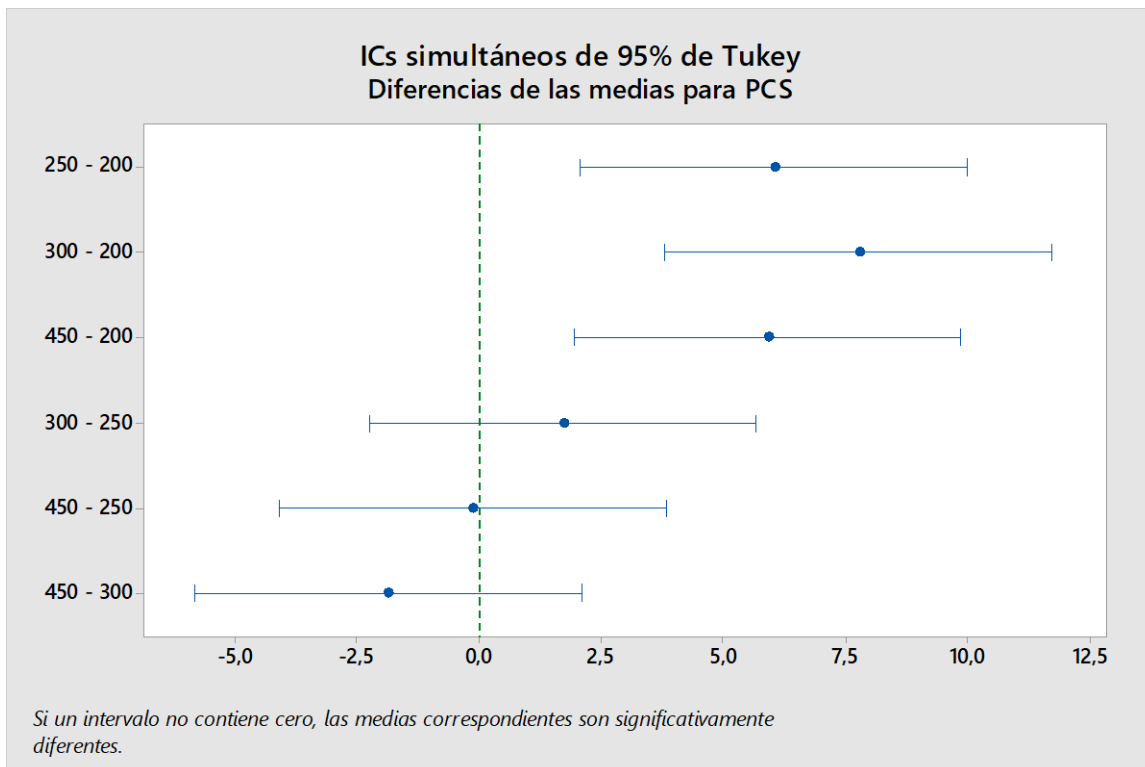
La prueba de Tukey mostró que las temperaturas de 250,400 y 450°C forman un mismo grupo estadístico (grupo A), mientras que la temperatura de 200°C forma parte de otro grupo estadístico (grupo B), evidenciándose que el grupo A presenta valores mayores de PCS con respecto a los valores presentados en el grupo B correspondientes a 200°C.

De la misma manera, las gráficas de intervalos de confianza de Tukey para las diferencias de medias de PCS muestran que las comparaciones 250–200, 300–200 y 450–200 se encuentran alejadas del cero, indicando que las medias de cada par de temperaturas

son estadísticamente diferentes. Por el contrario, las diferencias entre 250–300, 250–450 y 300–450 presentan intervalos que sí contienen el cero, lo que confirma la equivalencia estadística del PCS entre cada par de temperatura

Figura 15.

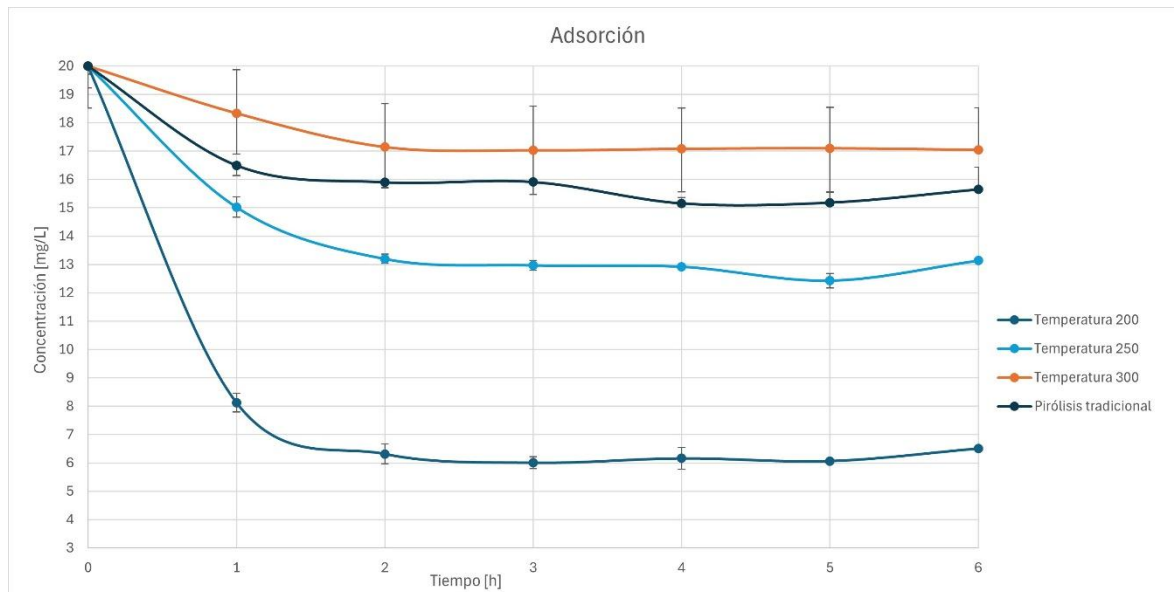
Intervalos de confianza calculados para PCS



5.2.3.2 Adsorción de azul de metileno en el biocarbón obtenido. Adicionalmente, se evaluó la calidad superficial de los materiales a partir de ensayos de adsorción de azul de metileno, empleando las capacidades de adsorción obtenidas como indicador indirecto del desarrollo de área superficial y sitios activos en el biocarbón. Las concentraciones parciales para cada muestra de biocarbón por hora se presentan en la **Figura 16**.

Figura 16.

Adsorción de azul de metileno para muestras de biocarbones



La prueba de adsorción revela que todos los biocarbones alcanzan el equilibrio en un rango de 3-4 horas, con el biocarbón de 200°C mostrando la mayor capacidad de adsorción en la primera hora seguida por 250°C. Esto posiciona al hydrochar 200 °C como óptimo precursor de carbón activado. Sin embargo, el biocarbón de 200°C tarda en estabilizarse a pesar de su notoria adsorción en la primera hora.

La tendencia decreciente con mayor temperatura refleja mayor porosidad en hidrocarbones de baja temperatura, favoreciendo la adsorción del colorante, algunos estudios de adsorción utilizando azul de metileno, afirman que las partículas de biocarbón reducen su tamaño a medida que aumenta la temperatura del proceso pirólítico. (Weisheng et al., 2022).

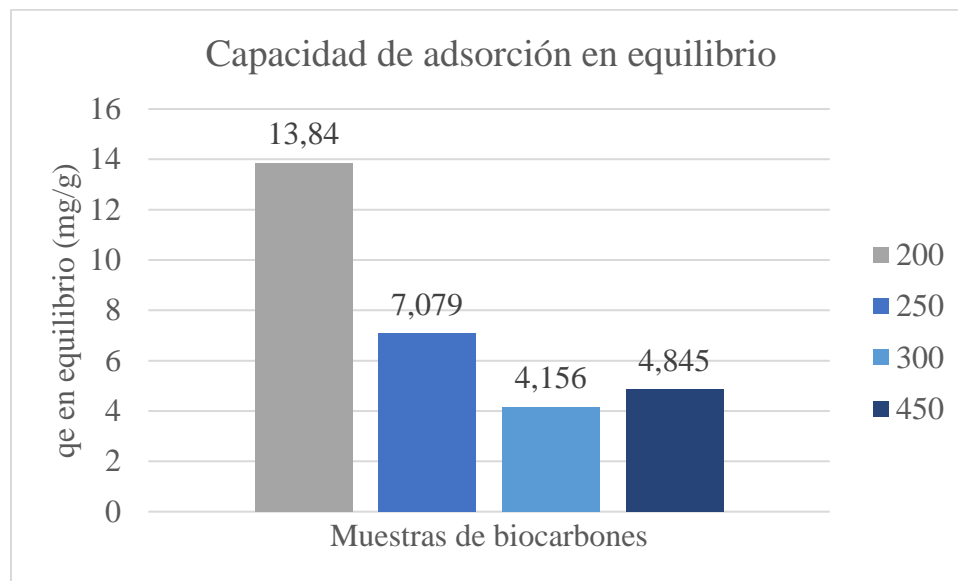
Teniendo en cuenta que un proceso de pirólisis hidrotérmica a temperaturas altas implica un mayor coste energético y observando los resultados obtenidos, no es

recomendable aumentar la temperatura, ya que el biocarbón a baja temperatura presenta una mayor capacidad de adsorción.

De la misma manera, la capacidad de adsorción en equilibrio q_e para cada uno de los carbones obtenidos tanto en pirólisis hidrotérmica como en pirólisis tradicional se presenta en la Figura 17.

Figura 17.

Capacidad de adsorción en equilibrio para todas las muestras de biocarbón

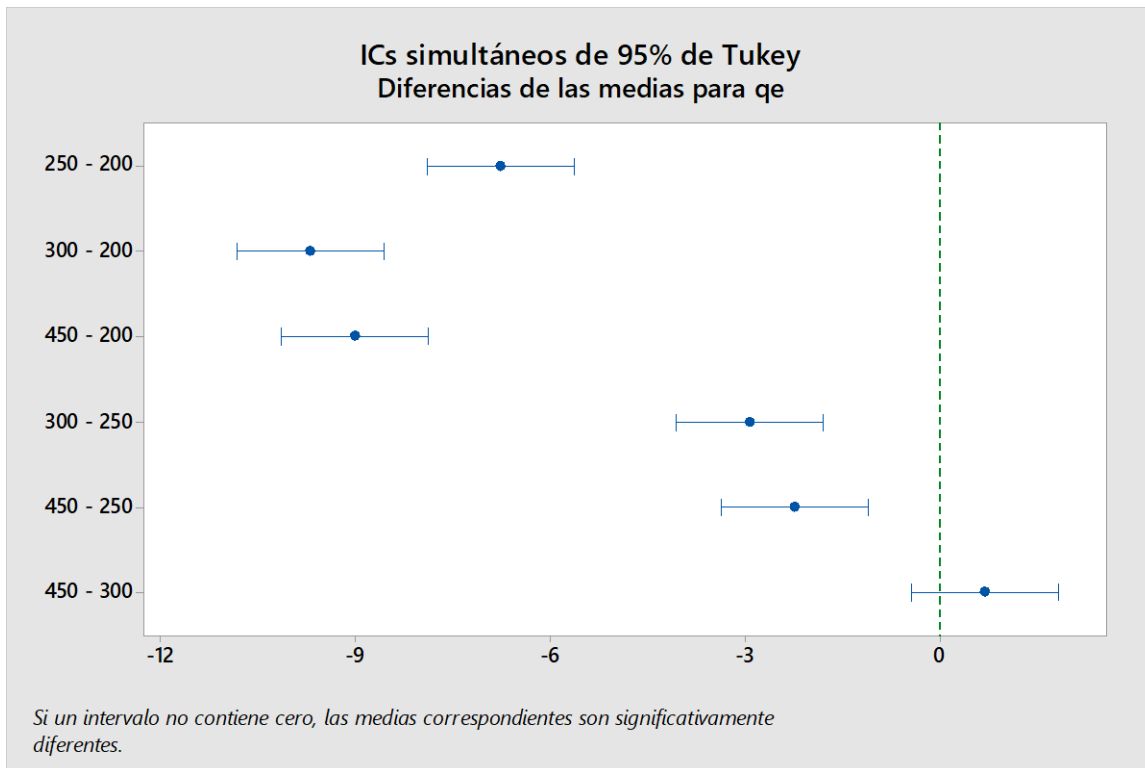


La tendencia presentada en la **Figura 17** indica que a bajas temperaturas de HTL se preserva mayor porosidad responsable de la adsorción del azul de metileno. Comparado con la pirólisis tradicional, el HTL muestra superioridad como precursor de carbón activado, debido a mayores q_e .

Finalmente, para determinar el efecto de la temperatura sobre la capacidad de adsorción en el equilibrio, se realizó un ANOVA de una vía en Minitab. El análisis muestra un efecto significativo ($p=0,000$; $R^2=99,74\%$; $R^2_{ajustado}=99,54\%$).

Figura 18.

Intervalos de confianza calculados para q_e



La prueba de Tukey revela que 200°C es superior en términos de capacidad de adsorción en el equilibrio. Por otro lado, los intervalos 250-200, 300-200 y 450-200 no contienen cero, mostrando diferencias estadísticamente significativas. Sin embargo, las comparaciones entre 300-250, 450-250 y 450-300 sí abarcan cero, indicando similitudes estadísticas en este rango.

5.3 Fase 3: Análisis técnico- económico comparativo

El análisis técnico-económico evalúa la viabilidad comercial del carbón hidrotermal (hydrochar) obtenido mediante pirólisis hidrotermal (HTL) de residuos de maíz, comparado con el proceso tradicional de pirólisis, considerando su potencial como precursor de carbón activado. La evaluación del desempeño económico se basó en la contribución del costo de

inversión de capital (CAPEX) y los costos operativos fijos y variables (OPEX) para una planta de HTL a escala industrial. Para la conversión de los valores económicos de moneda local a moneda estadounidense, se empleó una tasa de cambio promedio de 3690 COP/USD, correspondiente al periodo de análisis.

Por otro lado, la temperatura óptima desde la perspectiva comercial no es necesariamente la que posee mayor PCS (300°C), sino la que maximiza la relación costo-beneficio. Por lo anterior, el análisis de adsorción muestra que 200°C da mayor capacidad de adsorción, lo que posiciona al hydrochar de 200°C como el candidato comercial más interesante con menor consumo energético y mejor desempeño como precursor del carbón activado. Por esta razón, la planta HTL a escala industrial opera con las especificaciones técnicas mostradas en la Tabla 18.

Tabla 18.

Parámetros técnicos de planta HTL industrial

Parámetros técnicos	Valor	Unidad
Número de reactores	1	-
Materia prima húmeda procesada	7800	ton húmedas/año
Humedad de la biomasa	70	%
Masa seca procesada	2340	ton sólidos secos/año
Temperatura de operación	200-230	°C
Presión de operación	20-30	bar
Tamaño máximo de partícula admitida	≤8	cm
Área de la planta	560	m ²
Rendimiento del hidrocarbón	0,28	ton hydrochar/ton sólidos secos
Hidrocarbón producido	1537,8	ton/año
Biofertilizante producido	4772	m ³ /año

5.3.1 Estimación del CAPEX

La Tabla 19 presenta la estimación de la inversión de capital (CAPEX) estimado para una planta HTL de un reactor con biomasa de maíz como materia prima. Para el costo de adquisición correspondiente a la planta lista para operar (llave en mano) se escaló el valor reportado por (Ciceri et al., 2021) aplicando las ecuaciones (19) y (20). Este valor fue interpretado como el costo del equipo entregado por el proveedor, incluyendo reactor, junto a su postratamiento, el cual comprende sistema de bombeo, un sistema de separación sólido-líquido (filtroprensa), secado térmico y peletizadora, es decir toda la planta con su postratamiento, de modo que el costo estimado es de \$32.571.407.069 COP (equivalente a \$8.838.916 USD) Teniendo en cuenta el valor de la planta HTC se estimaron los costos directos adicionales del sitio y los costos indirectos asociados al proyecto, siguiendo los factores de relación para estimar los costos de inversión de la Tabla 6.9 de (Peters et al., 2003) para plantas de procesamiento de sólido y líquido. El pre-tratamiento comprende el molino de trituración (garantizando partículas <8 cm), un separador de metales con el fin de remover impurezas metálicas presentes en la biomasa residual y un trommel rotatorio para evitar el paso de partículas grandes hacia el reactor, todos estos son requeridos para el proceso, pero no incluidos en el valor de la planta, por lo que este valor se estimó en un 10% del costo de adquisición, coherente con el rango de “Service facilities (installed)”. La obra civil e infraestructura incluye las cimentaciones, adecuaciones del terreno, estructuras de soporte, bodegas de almacenamiento, cuarto de control e instalaciones de servicio eléctrico se estimó en un 15% del costo base de adquisición de la planta, coherente con el rango combinado de “Buildings (including services)” y “Yard improvements” reportados

por Peters, Timmerhaus y West (2003), teniendo en cuenta que el área de la planta es de 560 m².

Por otro lado, los costos indirectos del proyecto comprenden tres ítems. La ingeniería y supervisión local, la cual contiene los gastos requeridos para adaptar el diseño del reactor al terreno (Diseño de tuberías y planos, diseño eléctrico, cálculo estructural...), trámites legales de construcción, supervisión de construcción y montaje, la cual se estimó en un 10% del valor base. Los gastos legales, de importación y permisos se estimaron en 15%, reflejando los costos asociados a un proyecto de importación en Colombia, incluyendo aranceles y los trámites ambientales. Finalmente, las contingencias adoptaron un valor del 5% costo asociado a posibles cambios en el diseño, variaciones en el precio del mercado y posibles imprevistos durante la construcción y montaje.

Tabla 19.

Estimación de la inversión de capital (CAPEX)

CAPEX: Costo de inversión			
Costos directos			
Parámetro	%Base	COP	USD
Planta HTC (1 reactor) +post-tratamiento incluido	100%	\$32.571.407.069	\$8.826.940
Pre-tratamiento (Molino de trituración, separador de metales)	10%	\$3.257.140.707	\$882.694
Obra civil e infraestructura	15%	\$4.885.711.060	\$ 1.324.041
Costos indirectos			
Ingeniería y supervisión local	10%	\$3.257.140.707	\$882.694
Gastos legales, importación y permisos	15%	\$4.885.711.060	\$1.324.041
Contingencias (Imprevistos de construcción)	5%	\$1.628.570.353	\$441.347
CAPEX total	155%	\$50.485.680.957	\$13.681.756

El CAPEX total resultante es de \$50.485.680.957 equivalente a \$6.472.523 por tonelada de residuo al año.

5.3.2 *Estimación del OPEX*

El valor correspondiente al OPEX fue estimado desde cero para cada uno de los ítems teniendo en cuenta los precios unitarios correspondientes al contexto colombiano en 2025-2026 utilizando rastrojo de maíz como residuo a tratar en la planta y teniendo en cuenta los consumos específicos del inventario de ciclo de vida de la tabla 6 de (Ciceri et al., 2021).

Dado que los factores de (Ciceri et al., 2021) se expresan en base a materia seca, la masa seca procesada al año se calcula utilizando la ecuación (23), considerando un 70% de humedad se obtienen 2340 ton sólidos secos/año. Con un rendimiento de hidro-carbón de 28% se obtienen aproximadamente 1540 ton hidro-carbón/año.

El OPEX total resultante es de \$2.527.304 estructurado en dos secciones correspondientes a costos fijos de manufactura y costos variables de producción como se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20.

Estimación de costos de operación (OPEX)

OPEX: Costos de operación		
Parámetro	COP/año	USD/año
Costos fijos de manufactura		
Adquisición de rastrojo de maíz	\$ -	\$ -
Recolección y transporte de materia prima	\$780.000.000	\$ 211.382

Mano de obra directa (2 operadores)	\$ 72.000.000	\$ 19.512
Servicio técnico especializado	\$ 92.789.375	\$ 25.146
Mantenimiento de equipos (3% FCI/año)	\$ 977.142.212	\$ 264.808
Costos variables de producción		
Energía térmica	\$ 486.191.160	\$ 131.759
Energía eléctrica (bombeo+secado)	\$ 97.063.200	\$ 26.304
Gastos generales administrativos	\$22.118.193	\$ 5.994
OPEX total	\$2.527.304.140	\$684.906

Para el cálculo de los costos fijos de manufactura se consideró la adquisición de 7800 toneladas anuales de rastrojo de maíz con un precio base de \$0/ton. Este supuesto se fundamenta en que el rastrojo de maíz en muchas zonas de Colombia es un pasivo ambiental, en donde los agricultores lo queman, sin generar un aprovechamiento de este. Un proyecto HTC posicionado como solución a esta problemática genera beneficios ambientales significativos al país mediante la valorización de esta biomasa subutilizada. No obstante, se incluyó el costo de recolección y transporte de la materia prima, estimado en 100.000 COP/tonelada de residuo húmedo, según lo reportado por (Jaramillo & Vásquez, 2021). Por otro lado, se consideró necesario 2 personas para mano de obra directa para la operación de la planta con salarios de \$3.000.000 mensuales por trabajador, valor que supera el SMMLV establecido por el decreto 0159 del 19 de febrero de 2026, el cual incluye de manera global la remuneración y costos asociados a la vinculación laboral, tales como prestaciones sociales y aportes a seguridad social. En cuanto a la operación de la planta, se asumió que la planta funciona bajo un solo turno de trabajo, equivalente a 8 horas diarias. Bajo estas condiciones, los dos operarios se encargan de la supervisión y operación del proceso.

Para el costo de servicio técnico especializado se tuvo en cuenta el valor reportado por (Ciceri et al., 2021) y fue escalado a la planta con un único reactor. Por último, el mantenimiento se estimó aplicando el 3% anual sobre el valor de la planta HTL reportado por \$32.571.407.069, metodología estándar para plantas de procesamiento de sólidos. (Peters et al., 2003)

Los costos variables de producción se calcularon según lo reportado por (Ciceri et al., 2021): 611,1 KWh/ton sólidos secos de energía térmica y 40 KWh/ton sólidos secos de electricidad, correspondientes a 1.429.974 KWh/año y 93.600 KWh/año respectivamente, para 2340 ton sólidos secos/año procesadas.

El costo de la energía térmica se determinó convirtiendo el precio volumétrico (COP/m³) a una unidad energética (COP/KWh), utilizando el poder calorífico del gas teniendo en cuenta las ecuaciones (21) y (22). Para este cálculo se consideró un costo de energía térmica de $3.009 \frac{COP}{m^3}$, un poder calorífico promedio de $10,5 \frac{KWh}{m^3}$ y una eficiencia térmica del 85%, lo cual resulta en un costo aproximado de 340 COP/KWh y \$486.191.160/año. Por otro lado, el costo de la energía térmica se obtiene de lo reportado por EPM en marzo de 2026, lo cual reemplazándose en las ecuaciones (23) y (24) representa \$97.063.200/año.

Por último, los gastos generales administrativos fueron escalados desde (Ciceri et al., 2021) en proporción de 10:1, lo que representa \$22.118.193/ año.

5.3.3 Análisis de viabilidad financiera

Con base en la estimación del CAPEX total de \$50.485.680.957 (13.681.756 USD) presentada en la Tabla 19.

Estimación de la inversión de capital (CAPEX) Estimación de la inversión de capital (CAPEX) y el OPEX anual de \$ 2.527.304 (684.906 USD) detallado en la Tabla 20, se realiza un análisis de viabilidad económica para la planta HTC de un reactor con ingresos considerados por tasa de vertido y venta de hidro carbón como se muestra en la Tabla 21.

Para el ingreso por tasa de vertido, se consideró el valor reportado por (Ciceri et al., 2021) y escalado al año actual (2026) obteniendo un valor de \$600.000/ton residuo, generando ingresos de \$4.680.000.000/año. A su vez, los ingresos por la venta de hidro carbón se estimaron en \$4.000.000/ton, teniendo en cuenta el artículo de referencia (433€/ton) escalado al año actual (2026), para 1540 ton hidrocarbón.

Tabla 21.

Ingresos anuales para planta HTC de un reactor

Ingresos anuales	COP/año	USD/año
Ingreso por tasa de vertido	\$4.680.000.000	\$ 1.268.293
Ingreso por venta de hidrocarbón	\$6.160.000.000	\$1.669.377
Ingresos totales	\$10.840.000.000	\$2.937.669

Teniendo en cuenta los ingresos anuales, se realiza el análisis de viabilidad económica de la planta, la cual cuenta con un flujo operativo anual de \$8.312.695.860, los cuales contribuyen a recuperar la inversión de capital. A su vez, la planta cuenta con un margen operativo del 76,7%, considerado un margen alto con buenos ingresos y costos controlados. El periodo de recuperación de la inversión es de aproximadamente 6 años, lo cual sugiere una rápida recuperación del capital invertido. Para un proyecto con horizonte

de 20 años, es un buen resultado, dejando 14 años adicionales de operación una vez recuperado el capital.

A 20 años, el proyecto genera un flujo acumulado de \$166.253.917.199, traduciéndose en un excedente neto de \$115.768.236.242 y un ROI del 229,31%, lo que indica que el proyecto generaría una ganancia equivalente a 2,29 veces la inversión inicial. El proyecto cuenta con un VAN de \$11.605.532.135, con una tasa de descuento del 12%, generando valor económico y mostrando una inversión aceptable. Por último, la tasa interna de retorno es de 16%, superior a la tasa de descuento utilizada, lo que indica que el proyecto cumple con el criterio de viabilidad financiera.

Tabla 22

Análisis de viabilidad para planta HTC con un reactor

Análisis de viabilidad	COP	USD
Flujo operativo anual	\$8.312.695.860	\$ 2.252.763
Margen operativo		76,7%
Periodo de recuperación		6,073
Retorno acumulado a 20 años	\$166.253.917.199	\$45.055.262
Excedente neto a 20 años	\$115.768.236.242	\$31.373.506
ROI a 20 años		229,31%
VAN	\$ 11.605.532.135	\$3.145.131
TIR		16%

La Tabla 22 muestra que la planta HTC de un reactor es viable y rentable en el escenario evaluado en Colombia. Los indicadores económicos evaluados apuntan en la misma dirección con un flujo operativo alto, VAN positivo y TIR superior a la tasa de

descuento. Sin embargo, esta suposición solo es válida si los ingresos asociados a la venta de hidrocarbón se mantienen y si a futuro se considera el tratamiento del biofertilizante líquido para su comercialización.

Finalmente, el hidrocarbón obtenido en este estudio presenta un costo estimado de aproximadamente 4.000 COP/kg, lo cual resulta inferior al precio de carbones comerciales disponibles en el mercado. De acuerdo con referencias comerciales en Colombia, el carbón activado puede alcanzar valores cercanos a 15.000 COP/kg, dependiendo del proveedor.

9. Conclusiones

El presente trabajo de investigación logró evaluar de manera integral la influencia de la pirolisis hidrotérmica sobre la calidad del carbón obtenido a partir de los residuos del cultivo del maíz, en comparación con la pirólisis tradicional, demostrando que la HTL constituye una alternativa técnica y económicamente viable a escala industrial para la valorización de la biomasa residual agrícola.

La caracterización fisicoquímica de las cuatro fracciones de biomasa de maíz (tusa, caña capotes y hojas) mediante un análisis próximo y energético permitió establecer el potencial energético de los residuos. Los resultados evidencian que las cañas de maíz presentan el mayor contenido de carbono fijo (20.19% en base seca), este resultado posiciona a las cañas como la materia prima más adecuada para la pirolisis hidrotérmica, al maximizar la estabilidad térmica del producto sólido resultante. De la misma manera, los valores de poder calorífico superior oscilan entre 16.95 y 17.51 [MJ/kg] para las distintas fracciones de la biomasa, cifras consistentes con los reportes de la literatura especializada para biomasa lignocelulósica de origen agrícola.

La evaluación experimental a tres temperaturas (200, 250 y 300 °C) demostró que la temperatura es la variable de proceso con mayor incidencia en el rendimiento y la calidad del bio-carbón obtenido. A 300°C se obtuvo el mayor poder calorífico superior (29.856 +/- 0.045 [MJ/Kg]), mientras que a temperaturas menores predominó la producción de biocarbón con mayor rendimiento másico y mayor capacidad de adsorción. De la misma manera, el análisis estadístico ANOVA y las pruebas de Tukey confirmaron las diferencias estadísticamente significativas entre 200 °C y las demás temperaturas en términos de capacidad de adsorción de azul de metileno, siendo el hydrochar de 200 °C el candidato

más prometedor como precursor de carbón activado, debido a mayor presencia de grupos funcionales oxigenados en su superficie que favorecen la fisisorción del colorante.

El análisis técnico económico a escala industrial para una planta con un reactor procesando 7800 toneladas de biomasa húmeda al año arrojó indicadores financieros sólidos: un CAPEX total de \$50.485.680.957 (13.681.756 USD), un OPEX de \$ 2.527.304 COP (684.906 USD), un flujo operativo anual de 2,25 millones de USD, un período de recuperación de 6 años, un VAN positivo de 11.605 millones de COP con tasa de descuento del 12% y una TIR del 16%, superior a la tasa de descuento, lo que confirma la viabilidad financiera del proyecto.

10. Recomendaciones

Entre las limitaciones identificadas durante el desarrollo del trabajo se destaca la escala de laboratorio empleada, que restringe la extrapolación directa de los rendimientos experimentales al contexto industrial sin considerar pérdidas de proceso propias del escalamiento. Asimismo, el análisis económico no contempla la valorización del subproducto líquido generado en el proceso HTL, el cual puede contener compuestos orgánicos con potencial como biofertilizante, lo que subestimaría los ingresos totales del sistema.

Como trabajo futuro, se recomienda explorar el tratamiento y comercialización de la fase líquida residual del proceso, así como realizar la activación química o física del hydrochar obtenido a 200 °C para verificar su transformación en carbón activado de grado comercial y cuantificar la mejora en su capacidad de adsorción. A su vez, sería valioso ampliar el estudio a otras fracciones de la biomasa de maíz descartadas en esta investigación y evaluar su comportamiento bajo condiciones hidrotérmicas, con el objetivo de optimizar el aprovechamiento integral de todos los residuos generados en el cultivo.

Referencias

- Abbott, G., & W, S. A. (1999). *Biomarker Reaction Kinetics during Kerogen Microscale Pyrolysis. Advances in BioChirality*. <https://doi.org/10.1016/b978-008043404-9/50015-2>
- Aguilar Suffo, J. J. (2015). *Estado del arte de la integración del aceite de pirólisis en refinerías petrolíferas convencionales*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
- Asociación Española de normalización. (2018). *UNE- EN ISO 18125*. Génova, Madrid. <https://plataforma-aenormas-aenor-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/>
- Asociación Española de Normalización. (2023). *UNE-EN ISO 18122*. Génova, Madrid. <https://plataforma-aenormas-aenor-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/>
- Asociación Española de normalización. (2023). *UNE-EN ISO 18134-1*. Génova, Madrid. <https://plataforma-aenormas-aenor-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/>
- Asociación Española de normalización. (2024). *UNE-EN ISO 18123*. Génova, Madrid . <https://plataforma-aenormas-aenor-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/>
- Babu, B. V. (2008). *Biomass pyrolysis: A state of the art review. Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 2(5), 393-414. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/bbb.92>
- BBVA. (2025). *¿Qué es la biomasa y para qué sirve? El aprovechamiento de lo orgánico*. BBVA Sostenibilidad: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-biomasa-el-aprovechamiento-de-lo-organico/>

Bon Viveur. (2024, enero 29). *Maíz: qué es, tipos y beneficios*. Bon Viveur:

<https://bonviveur.com/es/gastroteca/maiz>

Calpa, N., & Muñoz, J. (2011). *ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE OBTENCIÓN DE CARBÓN ACTIVADO A PARTIR DE CÁSCARA DE COCO*. Pasto: Universidad de Nariño.

Castellar, G., Angulo, E., Zambrano, A., & Charris, D. (2013). EQUILIBRIO DE ADSORCIÓN DEL COLORANTE AZUL DE METILENO SOBRE CARBÓN ACTIVADO. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 271.

Castro, R. H. (2021). *Evaluación del proceso de pirólisis con residuos de maíz y coco en atmósfera de CO₂*.

Chen, B., Xie, D., Jiang, Y., Wang, Y., Su, C., Yao, Z., . . . Chen, B. (2024). *Co-pyrolysis of corn stalk and high-density polyethylene with emphasis on the fibrous tissue difference on thermal behavior and kinetics*. *Science of The Total Environment*, 957, 177847. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.177847>

Chilton, C. (1950). *Six-tenths factor applies to complete plant costs*. *Chemical Engineering*.

Ciceri, G., Hernandez, M., Kumar, M., & Murphy, F. (2021). *Hydrothermal Carbonization (HTC): Valorisation of organic waste and sludges for biofertilizers*.

https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/10/HTC-Valorisation-of-organic-wastes-and-sludges-for-hydrochar-production-and-biofertilizers-Full-Report.pdf?utm_source=chatgpt.com

Concepto.d. (2019, julio 23). *Biomasa- Concepto, tipos, ventajas y desventajas*.

Concepto.d: <https://concepto.de/biomasa/>

- DANE. (2026). *Índice de precios al consumidor-IPC. Departamento Administrativo Nacional de Estadística, Colombia*. Retrieved 25 de Marzo de 2026, from <https://www.dane.gov.co/>
- Diego, M., & Keren, M. (2025). *Análisis de los parámetros que inciden en la descomposición y Degradación Termoquímica de Biomasa Residual Proveniente de la Piña Evaluando el Impacto que Generan en la Producción de Bioaceites*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- DOEstadistics. (2017, febrero 19). *Estadística, análisis y diseño de experimentos: Introducción al Diseño de Experimentos (DDE)*. Estadística, análisis y diseño de experimentos: <https://doestadistics.blogspot.com/2017/02/introduccion-al-diseno-de-experimentos.html>
- Estrada, V. B., Villasana Herrera, K., & Mejía, A. R. (2015). Estudio fisicoquímico de la adsorción de azul de metileno en aserrín de pino. *QUÍMICA HOY CHEMISTRY SCIENCES*, 1-6.
- expertos, I. d. (2025). *Mercado Global de Carbón Activado – Por Tipo (Carbón Activado en Polvo (PAC), Carbón Activado Granular (CAG), Otros); Por Aplicación (Tratamiento del Agua, del Aire, del Oro, Respiradores, Recuperación de Solvencia); Por Materia Prima (Cáscara de Coco, Ma)*. Informe de expertos: <https://www.informesdeexpertos.com/informes/mercado-de-carbon-activado>
- F, A. O., & C, E. (2025). *Hydrothermal liquefaction vs fast/flash pyrolysis for biomass- to biofuel conversion: new insights and comparative review of liquid biofuel yield*,

composition and properties. Green Chemistry, 27 (24) 7009-7041.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1039/d5gc01314c>

FasterCapital. (2026). *Cómo funciona la licuefacción hidrotermal*. FasterCapital:

<https://fastercapital.com/es/tema/c%C3%B3mo-funciona-la-licuefacci%C3%B3n-hidrotermal.html/1>

Fierro, M. S. (2012). *Aspectos técnicos de la producción de maíz en Colombia*.

Gonzalez, G. &. (2017). *Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia*.

Revista de Investigación Agraria y Ambiental.

Hassaan, M. A., Yilmaz, M., Helal, M., El-Nemr, M. A., Ragab, S., & Nemr, A. E. (2023).

Improved methylene blue adsorption from an aqueous medium by ozone-triethylenetetramine modification of sawdust-based biochar. *Scientific Reports, 20*.

Hu, X., & Gholizadeh, M. (2019). *Biomass pyrolysis: A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation stage. Journal of Energy Chemistry, 39(3), 109–143.*

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jechem.2019.01.024>

Humanidades.com. (2025). *Maíz: historia, cultivo, variedades, usos y características*.

Humanidades.com: <https://humanidades.com/maiz/>

Intelligence, M. (2024). *Tamaño del Mercado de Carbón Activado - Informe de la Industria sobre Participación, Tendencias de Crecimiento y Análisis de Pronósticos (2025 - 2030) Source: https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/activated-carbon-market*. Tamaño del Mercado de Carbón Activado - Informe de la Industria sobre Participación, Tendencias de Crecimiento y Análisis de Pronósticos (2025 -

2030) Source: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/activated-carbon-market>: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/activated-carbon-market>

Ischia, G., Sudiby, H., Miotello, A., Tester, J. W., Fiori, L., & Goldfarb, J. L. (2024).

Identifying the Transition from Hydrothermal Carbonization to Liquefaction of Biomass in a Batch System. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 12(11), 4539–4550.

Islam, M. T., Saha, N., Hernandez, S., Klinger, J., & Reza, M. T. (2021). *Integration of Air Classification and Hydrothermal Carbonization to Enhance Energy Recovery of Corn Stover*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/EN14051397>

Jaramillo, A., & Vásquez, F. (2021). *Solid Waste Management in Pereira*. VNG International. [https://www.vng-international.nl/sites/default/files/VNG%20Solid%20Waste%20Management%20in%20Pereira%20\(EN\)_compressed%20\(1\).pdf](https://www.vng-international.nl/sites/default/files/VNG%20Solid%20Waste%20Management%20in%20Pereira%20(EN)_compressed%20(1).pdf)

Jaramillo, J., & Cardona, J. (2006). *ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA CREACIÓN DE UNA EMPRESA*. Medellín: Universidad EAFIT.

Kiprop, M. O. (2024). *Caracterización de rastrojo de maíz y aserrín de eucalipto para la producción de pellets*.

Lizotte, P. L., Savoie, P., & De Champlain, A. (2015). *Ash Content and Calorific Energy of Corn Stover Components in Eastern Canada. Energies 2015, Vol. 8, Pages 4827-4838, 8(6), 4827–4838*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/EN8064827>

M, M., P, N., F, H., & U, S. (2011). *El agua subcrítica como entorno de reacción.*

Fundamentos de la transformación hidrotérmica de la biomasa.

<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1002/cssc.201000341>

Machado, N., Castro, D. d., Santos, M., Araújo, M., Lüder, U., Herklotz, L., . . . Hoffmann,

T. (2017). *Análisis del proceso de carbonización hidrotermal de rastrojo de maíz*

con H₂O subcrítico.

Machado, N., Castro, D., Queiroz, L., Santos, M., & C.E.F, C. d. (2016). *Production and*

Characterization of Energy Materials with Adsorbent Properties by Hydrothermal

Processing of Corn Stover with Subcritical H₂O. Journal of Applied Solution

Chemistry and Modeling.

Mejía, R. (2013). *Caracterización fisicoquímica de biomasa agrícola representativa en*

Santander. Universidad Industrial de Santander.

Mendonça, I. S., Letterie, B., & Martens, M. (2025). Adsorption of methylene blue on

biochar, evaluation of substrate adsorption performance within the acuatuur project.

HZ University of Applied Sciences, 18.

Ministerio de Minas y Energía. (2025). *Hoja de Ruta para la Transición.*

https://minenergia.gov.co/documents/13272/Hoja_de_ruta_transicion_energetica_ju

[sta_TEJ_2025.pdf](https://minenergia.gov.co/documents/13272/Hoja_de_ruta_transicion_energetica_ju)

Mohamed, H., Omid, N., Shakirudeen, S., Bishnu, A., & Animesh, D. (2019). *Predicción*

de la carbonización hidrotermal con respecto a los componentes de la biomasa y el

factor de severidad. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.9b02291>

- Mohammed, I. S., Na, R., Kushima, K., & Shimizu, N. (2020). *Investigating the effect of processing parameters on the products of hydrothermal carbonization of corn stover. Sustainability (Switzerland)*, 12(12).
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su12125100>
- Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). *Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. Energy and Fuels*, 20(3), 848–889.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1021/ef0502397>
- Ochoa, M., Montoya, N., Velásquez-Cock, J. A., & Gómez-Hoyos, C. (2025). *Corn Stover for Food Applications: Approaches, Advances and Insights. Molecules* 2026, Vol. 31, Page 27, 31(1), 27.
<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/MOLECULES31010027>
- Olarte, J. (2023). *Análisis del producto Maíz*. Gerencia Corporativa de Analítica e Inteligencia de Negocios.
- Pardeiro, R. (2024). *¿Qué es la investigación experimental? (n.d.)*. Retrieved February 19, 2026. <https://www.questionpro.com/blog/es/investigacion-experimental/>
- Pennington, D. (2013). *Corn Stover: What is its worth?* Michigan State University.
https://www.canr.msu.edu/news/corn_stover_what_is_its_worth
- Pérez, Lopez, Hernández, & Tejacal. (2022). *Beneficios potenciales del biocarbón en la productividad de cultivos agrícolas*. Revista mexicana de ciencias agrícolas.
- Peters, M., Timmerhaus, K., & West, R. E. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*.

- Pordesimo, L., Hames, B., S, S., & WC, E. (2005). *Variación en la composición del rastrojo de maíz y el contenido energético con la madurez del cultivo*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953404001795>
- Power, L. C. (2025). *Electricity in Colombia in 2024/2025*.
<https://lowcarbonpower.org/region/Colombia>
- Puccini, M., Stefanelli, E., Hiltz, M., Seggiani, M., & Vitolo, S. (2017). *Activated Carbon from Hydrochar Produced by Hydrothermal*. Chemical Engineering Transactions.
<https://doi.org/10.3303/CET1757029>
- Repsol. (2025). *¿Qué es la biomasa? Definición, ventajas y tipos*. REpsol Energía:
<https://www.repsol.com/es/energia-avanzar/movilidad/biomasa/index.cshtm>
- SafetyCulture. (2026). *Diseño experimental o de experimentos (DoE) | SafetyCulture*.
(n.d.). Retrieved February 19, 2026. <https://safetyculture.com/es/temas/disenio-de-experimentos>
- Santos, J. M. (2016). *Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos*.
Departamento nacional de planeación.
- Soka, O., & Oyekola, O. (2020). A feasibility assessment of the production of char using the slow pyrolysis process. *Heliyon*, 6(7).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2020.E04346>
- Vallejo, B. C. (2018). *Estudio del rendimiento energético de mezclas de biomásas sometidas a carbonización hidrotérmica*. Universidad Nacional de Cuyo.

- Vuppaladadiyam, A. K., Vuppaladadiyam, S. S., Awasthi, A., Sahoo, A., Rehman, S. P., Murugavelh, S., . . . Leu, S. Y. (2022). *Biomass pyrolysis: A review on recent advancements and green hydrogen production*. *Bioresource Technology*, 364. [https://doi.org/ https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128087](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128087)
- Weisheng, C., Zhongfang, Z., Hengjia, K., Yujie, G., Tannaz, P., & Gutoing, L. (2022). *On the role of surface functional groups in enhancing Methylene blue adsorption by low-temperature biochar derived from Platanus orientalis bark*. *Desalination and Water Treatment*. <https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28376>
- Xing, X., Fan, F., & Jiang, W. (2018). *Characteristics of biochar pellets from corn straw under different pyrolysis temperatures*. *Royal Society Open Science*, 5(8). <https://doi.org/https://doi.org/10.1098/rsos.172346>
- Yunus, C., & Boles, M. (2011). *Termodinámica Séptima Edición*.

Apéndices

Apéndice A

Código de Matlab utilizado para corrección del poder calorífico superior

```
% Calibración de una bomba calorimétrica Parr 6200 usando ácido benzoico
% - Usa corrección MULTIPLICATIVA o ADITIVA
% - Calcula sesgo, desviación estándar, factores de corrección
% - Genera gráficas de la calibración
% - Reporta PCS corregidos de muestras con +/- incertidumbre
%
% NOTA IMPORTANTE:
% Físicamente se recomienda usar la CORRECCION MULTIPLICATIVA,
% porque el error de la bomba se comporta como un factor de escala
% (ganancia en la energía medida) y no como un offset constante en MJ/kg.

clear; clc; close all;

%% 1. Datos de referencia y lecturas de la bomba
% Poder calorífico superior de referencia del ácido benzoico (MJ/kg)
PCS_ref_benzoico = 26.454;      % MJ/kg

% Valores MEDIDOS por la bomba para el ácido benzoico (MJ/kg)
PCS_bomba_benzoico = [27.7722, 27.7797]; % corridas de calibración

n_corridas = numel(PCS_bomba_benzoico);
idx = 1:n_corridas;

%% 2. Desviaciones individuales
desv_abs = PCS_bomba_benzoico - PCS_ref_benzoico; % MJ/kg
desv_rel = 100 * desv_abs / PCS_ref_benzoico; % %

%% 3. Estadísticos de la calibración
PCS_benzoico_mean = mean(PCS_bomba_benzoico);
PCS_benzoico_std = std(PCS_bomba_benzoico); % desviación estándar
(MJ/kg)

% Sesgo: cuánto se aleja en promedio la bomba del valor real
sesgo_abs = PCS_benzoico_mean - PCS_ref_benzoico; % MJ/kg
sesgo_rel = 100 * sesgo_abs / PCS_ref_benzoico; % %

%% 4. Factores de corrección
% 4.1 Corrección multiplicativa (recomendada)
factor_mult = PCS_ref_benzoico / PCS_benzoico_mean;

% 4.2 Corrección aditiva (opcional, menos física)
% PCS_corregido = PCS_medido + delta_offset
delta_offset = PCS_ref_benzoico - PCS_benzoico_mean; % MJ/kg

%% 5. Mostrar resultados de calibración
fprintf('=== CALIBRACIÓN DE LA BOMBA CON ÁCIDO BENZOICO ===\n\n');
fprintf('Valor de referencia benzoico           : %.3f MJ/kg\n',
PCS_ref_benzoico);
```

```

fprintf('Lecturas de la bomba                               : %s MJ/kg\n',
mat2str(PCS_bomba_benzoico, 4));
fprintf('Media de las lecturas                             : %.4f MJ/kg\n',
PCS_benzoico_mean);
fprintf('Desviacion estandar de las lecturas               : %.4f MJ/kg\n\n',
PCS_benzoico_std);

fprintf('Desviaciones individuales (MJ/kg)                 : %s\n', mat2str(desv_abs,
4));
fprintf('Desviaciones individuales (%)                       : %s\n\n', mat2str(desv_rel,
4));

fprintf('Sesgo medio (abs)                                     : %.4f MJ/kg\n', sesgo_abs);
fprintf('Sesgo medio (rel)                                     : %.3f %%\n\n', sesgo_rel);

fprintf('Factor de correccion MULTIPLICATIVO                 : %.6f\n', factor_mult);
fprintf('Delta de correccion ADITIVA (MJ/kg)                 : %.4f\n\n', delta_offset);
fprintf('*** Se recomienda usar la correccion MULTIPLICATIVA por el modelo
fisico del error. ***\n\n');

%% 6. Aplicar la calibración a tus muestras
% Valores que reporta la bomba para mis muestras (MJ/kg)
PCS_bomba_muestras = [18.1648, 18.3803, 18.1847, 17.8012]; % MJ/kg

% PCS corregidos con el factor multiplicativo
PCS_corr_mult_muestras = PCS_bomba_muestras * factor_mult;

% PCS corregidos con la corrección aditiva
PCS_corr_add_muestras = PCS_bomba_muestras + delta_offset;

%% 7. Estimación sencilla de la incertidumbre (±) para cada muestra
% Usamos la desviación estándar relativa de la calibración
rel_std_cal = PCS_benzoico_std / PCS_benzoico_mean; % fracción

% Incertidumbre absoluta en MJ/kg para cada muestra (asociada a la calibración)
incertid_abs_mult_muestras = PCS_corr_mult_muestras * rel_std_cal; % MJ/kg
incertid_abs_add_muestras = PCS_corr_add_muestras * rel_std_cal; % MJ/kg

%% 8. Reporte de PCS corregidos con +/- incertidumbre
fprintf('=== REPORTE DE MUESTRAS (PCS CORREGIDO) ===\n\n');
for i = 1:numel(PCS_bomba_muestras)
    fprintf('Muestra %d:\n', i);
    fprintf(' PCS medido por la bomba           : %.3f MJ/kg\n',
PCS_bomba_muestras(i));
    fprintf(' PCS corregido (MULT)                   : %.3f +/- %.3f MJ/kg\n', ...
PCS_corr_mult_muestras(i), incertid_abs_mult_muestras(i));
    fprintf(' PCS corregido (ADITIVO)                : %.3f +/- %.3f MJ/kg\n\n', ...
PCS_corr_add_muestras(i), incertid_abs_add_muestras(i));
end

fprintf(['(La incertidumbre +/- se basa en la desviacion estandar relativa de la
', ...
'calibracion con benzoico.)\n']);
fprintf('En el analisis y reporte final, usar normalmente los valores corregidos
con el METODO MULTIPLICATIVO.\n\n');

```

```
fprintf(['Nota: la desviacion estandar de las corridas de benzoico indica que  
tan repetible es la bomba; ', ...  
      'no se usa para corregir el valor, sino para cuantificar la  
incertidumbre. ', ...  
      'Por ejemplo, si el sesgo medio es pequeño (p.ej. +0.3 %), pero la  
desviacion estandar es muy baja ', ...  
      '(p.ej. 0.1 %), el equipo puede considerarse preciso.\n']);
```

% 9. Gráficas de la calibración

```
figure('Name','Calibracion con acido benzoico');  
  
% (a) PCS medidos vs valor de referencia  
subplot(2,1,1);  
plot(idx, PCS_bomba_benzoico, 'o-', 'LineWidth',1.5, 'MarkerSize',8);  
hold on;  
yline(PCS_ref_benzoico, '--', 'Valor de referencia','LineWidth',1.5);  
grid on;  
xlabel('Corrida de benzoico');  
ylabel('PCS (MJ/kg)');  
title('PCS medidos vs. valor de referencia');  
legend('PCS medidos','PCS referencia','Location','best');  
  
% (b) Desviación relativa porcentual  
subplot(2,1,2);  
stem(idx, desv_rel, 'filled','LineWidth',1.5);  
hold on;  
yline(0, '--k','LineWidth',1.5);  
grid on;  
xlabel('Corrida de benzoico');  
ylabel('Desviacion relativa (%)');  
title('Desviacion relativa de cada corrida');
```