

**Evaluación de la Influencia del Carbón y Aceite Pírolítico en el Desempeño como
Combustible de Briquetas Elaboradas a partir de Cascara de Cacao**

Raúl Felipe Rosero Rodríguez

Julián Felipe Bayona Rojas

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director UIS

Yesid Javier Rueda Ordoñez

Dr. Ingeniería Química, Profesor

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A la familia Rodríguez Peña, sin su apoyo nada de esto hubiese sido posible.

A mi Abuela, Elsa Gladys Peña Plata, a mi abuelo Raúl Rodríguez Perilla, les dedico este trabajo y mi curso en la carrera, gracias a ustedes que fueron mi vida entera a lo largo de mi paso por el pre-grado, gracias por ser mis guías, faros y polos a tierra, brindándome el amor y vocación al estudio e investigación, les agradezco todo el conocimiento adquirido y por todo el apoyo y amor recibido.

A mis Tíos, Elsa Ximena Rodríguez Peña, Luis Carlos Rodríguez Peña, Raúl Rodríguez Peña y a mi hermano Jaime Andrés Rosero Rodríguez. Muchas gracias por ser mi fuente inagotable de inspiración, por ser las luces guías de mi camino, y las señales de precaución, ustedes me enseñaron sobre el trabajo duro y la honestidad, les dedico este trabajo y paso por la carrera como prueba de los valores que me enseñaron y como muestra de que apenas es el inicio.

A mi familia, el pilar fundamental de este logro.

A mi madre, Carmen Cecilia Rojas Ocampos, a mi padre, Guillermo Bayona Carreño, y a mi hermano, Carlos Andrés Bayona Rojas, les dedico este trabajo como muestra de profunda gratitud. Ustedes han sido mi sustento incondicional, brindándome el respaldo necesario a lo largo de toda mi trayectoria universitaria. Su esfuerzo y lealtad son la base sobre la cual se edifica este triunfo profesional.

A mi madrina, Diana Carolina Suárez Rojas, así como a mi pareja, Nicolle Julieth Saavedra Barrera. Gracias por ser mi apoyo emocional constante, alentándome a mantener la firmeza en los momentos de mayor dificultad, recordándome siempre el valor de la perseverancia frente a los obstáculos.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento. Este paso es solo el comienzo; espero seguir contando con su compañía, guía y aliento en los futuros proyectos que están por venir.

Agradecimientos

Extendemos nuestro más sincero agradecimiento a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander (UIS), por brindarnos el respaldo institucional, la formación académica y los espacios necesarios para el desarrollo de esta investigación.

A nuestro director de tesis, el profesor Yesid Javier Rueda Ordóñez, por su constante orientación, rigor académico y por guiarnos acertadamente a lo largo de cada etapa de este proyecto. Su experiencia fue fundamental para el enfoque de esta investigación.

Al ingeniero Pablo Nieto, cuyo apoyo en el laboratorio fue verdaderamente imprescindible. Sin su disposición, guía técnica y acompañamiento continuo durante la ejecución de las pruebas experimentales, la materialización de este trabajo simplemente no habría sido posible.

Finalmente, al ingeniero y gran amigo Duván Esteban Castro Bolívar, por su invaluable tiempo y asesoría en la estructuración del documento.

Tabla de Contenido

Introducción	11
1. Objetivos	12
1.1 Objetivo General	12
1.2 Objetivos Específicos	12
2. Marco Teórico	13
2.1 Theobroma cacao L. (Cacao)	13
2.2 Mazorca de cacao	14
2.3 Biomasa.....	15
2.4 Clasificación de la Biomasa.....	15
2.4.1 Biomasa de Origen Natural	16
2.4.2 Biomasa de Origen Agrícola	16
2.4.3 Biomasa de Origen Industrial	16
2.4.4 Según su uso energético	17
2.5 Procesos de conversión de la biomasa en energía	18
2.5.1 Procesos termoquímicos.....	18
2.5.2 Procesos Físicos	19
2.6 Biocombustibles sólidos	20
2.7 Briquetas de biomasa	21
2.7.1 Procesos de fabricación.....	21
2.8 Poder Calorífico	22
2.9 Aglutinantes en briquetas	23
2.9.1 Tipos de aglutinantes	23
3. Revisión Bibliográfica.....	24
4. Metodología	27
4.1 Preparación de la muestra.....	27
4.2 Análisis próximo	29

4.2.1	Contenido de humedad	29
4.2.2	Contenido de volátiles	30
4.2.3	Contenido de ceniza	31
4.2.4	Carbono fijo	32
4.2.5	Poder calorífico	33
4.3	Obtención de los aditivos	34
4.4	Diseño de muestreo y replicación	34
4.5	Construcción de las briquetas.....	36
4.5.1	Dimensiones de las briquetas	37
4.5.2	Selección del aglutinante	38
4.5.3	Diseño del molde para fabricar las briquetas	38
4.5.4	Selección del material para el molde	39
4.6	Prensado de la briqueta	39
4.6.1	Briqueta estándar	40
4.6.2	Briqueta con adición de 5 % de Aceite y 25 % de Carbón	41
4.6.3	Briqueta con adición de 10 % de Aceite y 20 % de Carbón.....	42
4.6.4	Briqueta con adición de 30 % de Carbón	42
4.7	Pruebas para medir el desempeño de las briquetas	43
4.7.1	Cantidad de humedad	43
4.7.2	Prueba de resistencia al impacto	44
4.7.3	Densidad	45
4.7.4	Resistencia a la compresión	46
5.	Análisis y Resultados	49
5.1	Análisis próximo.	49
5.2	Poder Calorífico	50
5.2.1	Poder Calorífico de la Cascara de Cacao	50
5.2.2	Poder Calorífico de los productos de pirólisis	51

5.2.3 Poder Calorífico de las briquetas	52
5.3 Humedad	53
5.4 Prueba de impacto	56
5.5 Densidad	58
5.6 Resistencia a la compresión	61
6. Conclusiones	63
Referencias Bibliográficas	65

Lista de Figuras

Figura 1. Subcapas de la mazorca del cacao	13
Figura 2. Área sembrada por cultivos provincia de Santander	14
Figura 3. Fabrica de briquetas (Valladolid).....	22
Figura 4. Variedad de cacao FSV-41	27
Figura 5. Muestra seca.....	28
Figura 6. Muestra tamizada.....	29
Figura 7. Prueba de Volátiles.....	31
Figura 8. Reactor de lecho fijo.....	35
Figura 9. Análisis Termo-gravimétrico (TGA) de la cáscara de cacao	36
Figura 10. Secciones transversales comunes en briquetas de biomasa.....	37
Figura 11. Almidón de yuca sin activar y activo	38
Figura 12. Prensa Hidráulica Manual	40
Figura 13. Briqueta estándar.....	41
Figura 14. Briqueta con 5 % aceite y 25 % de Carbón	41
Figura 15. Briqueta con 10 % aceite y 20 % de Carbón	42
Figura 16. 30 % de Carbón	43
Figura 17. Prueba de humedad en las briquetas	44
Figura 18. Toma de medidas de la briqueta	46
Figura 19. Desviación estándar de la Humedad	55
Figura 20. Desviación estándar de la integridad	57
Figura 21. Effects of mix ratios on durability index (%) of briquette	58
Figura 22. Desviación estándar de la Densidad	60
Figura 23. Resistencia a la compresión	62

Lista de Tablas

Tabla 1.	Tipos de biomasa.....	17
Tabla 2.	Componentes estructurales	18
Tabla 3.	Rendimiento típicos de los productos	19
Tabla 4.	Diseño completamente aleatorizado (CRD) para la elaboración de briquetas con aditivos piro líticos	35
Tabla 5.	Variables de estudio.....	36
Tabla 6.	Clasificación dimensional de bio combustibles densificados según la serie ISO 17225.	37
Tabla 7.	Análisis proximal de la Cascara de cacao	49
Tabla 8.	Análisis proximal de la Cascara de cacao según literatura	50
Tabla 9.	Poder Calorífico Cascara de Cacao	51
Tabla 10.	Poder Calorífico de productos de Pirólisis de la Cascara de Cacao	51
Tabla 11.	Poder Calorífico de las mezclas de Briquetas	53
Tabla 12.	Humedad briquetas	54
Tabla 13.	índice de resistencia al impacto	56
Tabla 14.	Densidad briquetas.....	59
Tabla 15.	Compresión briquetas.....	61

Resumen

Título: Evaluación de la influencia del carbón y aceite pirolítico en el desempeño como combustible de briquetas elaboradas a partir de cascara de cacao*

Autor: Julián Felipe Bayona Rojas y Raúl Felipe Rosero Rodríguez**

Palabras Clave: Pirólisis, Briqueta, Productos de pirólisis.

Descripción:

La tesis evalúa la influencia del carbón pirolítico (biocarbón) y el aceite pirolítico (bioaceite) en el rendimiento energético de briquetas fabricadas a partir de cáscara de cacao. El objetivo es determinar cómo la adición de estos productos de pirólisis mejora las propiedades energéticas de las briquetas, utilizando almidón de yuca como aglutinante. Se empleó un diseño experimental completamente aleatorizado con cuatro formulaciones de briquetas de cáscara de cacao, incorporando hasta 30 % de productos pirolíticos obtenidos por pirólisis a 450C, las cuales fueron caracterizadas mediante análisis energético y mecánico conforme a normas. El carbón y el aceite pirolítico presentaron poderes caloríficos superiores a la biomasa cruda, incrementando el poder calorífico de las briquetas ± 2 %. Sin embargo, la adición de estos componentes redujo las propiedades mecánicas, especialmente la resistencia al impacto y la densidad, mientras que altas concentraciones de aceite incrementaron la humedad y disminuyeron el rendimiento energético. La incorporación de productos pirolíticos mejora significativamente las propiedades termoquímicas de las briquetas de cáscara de cacao, siendo la formulación óptima la de 25 % carbón + 5 % aceite. Aunque los aditivos reducen las propiedades mecánicas, todas las formulaciones cumplieron con los estándares mínimos de resistencia a la compresión para su manipulación y transporte.

*Trabajo de Grado.

**Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Yesid Javier Rueda Ordoñez.

Abstract

Title: Evaluation of the influence of pyrolytic carbon and oil on the fuel performance of briquettes made from cocoa pod husks*

Author: Julián Felipe Bayona Rojas y Raúl Felipe Rosero Rodríguez**

Keywords: Pyrolysis, Briquette, Pyrolysis products

Description: This thesis evaluates the influence of pyrolytic char (biochar) and pyrolytic oil (bio-oil) on the energy performance of briquettes produced from cocoa shell biomass. The objective is to determine how the addition of these pyrolysis products enhances the energetic properties of the briquettes, using cassava starch as a binder. A completely randomized experimental design was employed with four cocoa shell briquette formulations, incorporating up to 30 % of pyrolytic products obtained through pyrolysis at 450°C. The briquettes were characterized through standardized energy and mechanical analyses. Pyrolytic char and pyrolytic oil exhibited higher calorific values than raw biomass, increasing the calorific value of the briquettes by ± 2 %, with the optimal formulation being 25 % char + 5 % oil. However, the incorporation of these components reduced mechanical properties, particularly impact resistance and density, while high oil concentrations increased moisture content and decreased energy performance. The incorporation of pyrolytic products significantly improves the thermochemical properties of cocoa shell briquettes, with the optimal formulation being 25 % char + 5 % oil. Although the additives reduced mechanical properties, all formulations met the minimum compressive strength standards required for handling and transportation.

*Bachelor Thesis.

**Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Yesid Javier Rueda Ordoñez.

Introducción

En Colombia aun existen dificultades con el acceso a combustibles convencionales para las zonas rurales, lo que comúnmente provoca el uso de leña como solución doméstica para cocina y calefacción. (Ministerio de Salud y Protección Social, 2017). Sin embargo, la combustión incompleta en fogones no convencionales genera una gran cantidad de material particulado (PM), monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles, los cuales están asociados a enfermedades respiratorias crónicas y mortales. (Ezzati y Kammen, 2002). En Colombia, investigaciones han demostrado que las personas expuestas al humo de leña desarrollan mayores síntomas de enfermedades respiratorias crónicas y limitación del flujo aéreo (Gómez-Peña et al., 2023), lo que expone la necesidad de usar alternativas energéticas sostenibles principalmente en zonas rurales.

Una alternativa es el aprovechamiento de residuos agroindustriales. El departamento de Santander es un gran productor de cacao en Colombia con 28.044 Toneladas para el año 2024, representando el 41 % de la participación nacional. (Guerrero Nossa, 2025). La cascara de este producto representa el 70 % de la masa total del fruto y aun hoy carece de un uso directo (Saavedra-Rodríguez et al., 2011). Se ha demostrado que la cascara de cacao puede ser implementada en la producción de briquetas de biomasa, presentando valores calóricos competitivos con otros residuos agrícolas (Asante et al., 2019).

Lo innovador que busca este proyecto es la implementación de subproductos de pirólisis: biochar y bio-oil en la formulación de briquetas de cascara de cacao, el biochar presenta unos poderes caloríficos en el rango de 24-30 MJ/Kg, mientras que el bio-oil cuenta con unos valores de entre 16-19 MJ/Kg (Tripathi et al., 2016). La hipótesis de investigación sugiere que la adición de estos productos mejoraran las propiedades termo-químicas de las briquetas, para esto se propone evaluar diferentes rangos de concentración de los aditivos hasta un 30 % de su masa total, y evaluar su comportamiento.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar el efecto de la adición de productos de la pirólisis (carbón y aceite pirolítico) en el desempeño energético de briquetas fabricadas de mazorca de cacao y como aglutinante almidón de yuca.

1.2 Objetivos Específicos

Evaluar las propiedades fisicoquímicas de la vaina de cacao a través del análisis inmediato siguiendo la norma ISO 18134 e ISO 18122 y su poder calorífico según la norma NTC 2060.

Determinar las proporciones de la mezcla de carbón y aceite obtenidos a partir del proceso de pirólisis de la cáscara de cacao variando entre un 30 % de su concentración sobre el peso total de la briqueta, en busca de mejorar las propiedades energéticas de las briquetas de biomasa.

Medir el desempeño de las briquetas de biomasa mediante los criterios de poder calorífico, cantidad de humedad, densidad, durabilidad, resistencia a la compresión.

2. Marco Teórico

2.1 *Theobroma cacao* L. (Cacao)

Comúnmente conocido como Cacao, es una especie originaria de la cuenca amazónica y cultivada principalmente en regiones tropicales. Su fruto, la mazorca, contiene en su interior el semillas las cuales son utilizadas para producción del chocolate y otros derivados.(Pence, 1977) La forma puede variar entre ovada,oblonga, oblata, esférica, aboyada o elíptica. La superficie de la mazorca es rugosa o lisa dependiendo del tipo de mazorca. El tamaño de la mazorca varia entre 10 a 24 cm de largo y ancho entre 7 y 10 cm. puede pesar entre 200 g y 1 kg. Puede contener entre 20 a 50 semillas de cacao y están rodeadas por un recubrimiento azucarado y mucilaginoso llamado pulpa y se encuentran protegidas por un recubrimiento llamado pericarpio.(LUIS, 2018)

Figura 1

Subcapas de la mazorca del cacao



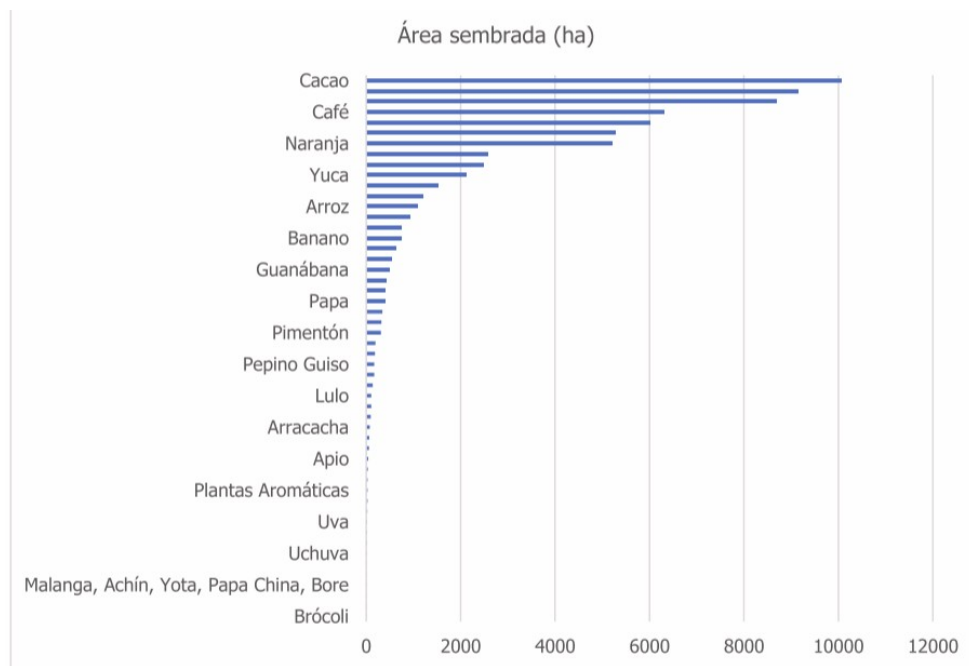
Nota. Tomado de Adjin-Tetteh et al., 2018.

En la producción del cacao el aprovechamiento de la semilla solo constituye el 10 % del peso del fruto seco, la cascara que abarca aproximadamente el 80 % del peso y a su vez representa el

principal desecho del fruto (Lisbeth, 2023), según el plan departamental de extensión agropecuaria (PDEA) de Santander informo que el cultivo mas representativo en hectáreas sembradas en el área metropolitana en el año 2024 fue el cacao, llevando una producción de 6484,45 toneladas(de Desarrollo Rural (ADR), 2024)

Figura 2

Área sembrada por cultivos provincia de Santander



Nota. Tomado de Adjin-Tetteh et al., 2018.

2.2 Mazorca de cacao

En la producción de la industria chocolatera el principal producto es la semilla del cacao, la cascara representa un 80 % de la mazorca, normalmente utilizada para compostaje en las áreas del cultivo, además representa una lenta degradación en condiciones naturales, debido a que contienen una sustancia alta en celulosa y otros compuestos carbonatados que requieren la expansión de fuentes de nitrógeno que permiten un ajuste ideal de la proporción C:N.(Lisbeth, 2023)

Las cascaras de cacao representan un peligro en los cultivos, debido a que las enfermedades que afectan el fruto se propagan a través de las cascaras. Entre las enfermedades más relevantes se encuentran la mazorca negra, la escoba de bruja y la moniliasis, las cuales pueden generar pérdidas que oscilan entre el 25 % y hasta la totalidad de la producción en casos severos. Aunque estas afectaciones representan un impacto significativo a nivel global, los agricultores suelen subestimarlas por desconocimiento de su verdadera magnitud (Johanna, 2013)

2.3 Biomasa

La biomasa es materia orgánica que se origina en compuestos de carbono formados por la fotosíntesis; de igual forma, pueden ser sustancias que hayan pasado por un proceso de transformación, sea natural o artificial. “La biomasa está compuesta principalmente por celulosa, hemicelulosa y lignina (compuestos estructurales). Como constituyentes minoritarios se encuentran la humedad, la materia inorgánica no extraíble y los extraíbles (no estructurales)” (Rodríguez et al., 2012)

2.4 Clasificación de la Biomasa

La Biomasa es considerada como una de las fuentes de energía renovables más estudiadas en el campo energético, y debido a su diversidad, es necesaria una clasificación la cual permita identificar sus características y aplicaciones. Según (Lisbeth, 2023), la biomasa se clasifica según su origen (natural, industrial o agrícola), su forma física (sólida, líquida o gaseosa) y su finalidad energética (biocombustibles).

2.4.1 Biomasa de Origen Natural

La Biomasa de origen natural es la materia orgánica generada por la naturaleza sin intervención humana, "La ventaja en la obtención de energía a partir de biomasa natural son su impacto en la reducción de emisiones de CO₂, su incidencia en la mejora en la matriz energética por mayor diversificación de combustibles y su efecto positivo en la calidad de vida en lugares remotos"(Santillán et al., 2021)

2.4.2 Biomasa de Origen Agrícola

Son los residuos generados por el sector agro industrial, como el bagazo de caña de azúcar, cascarilla de arroz, tusa de maíz y madera de caucho, como ejemplo. Estos subproductos son abundantes, lo que representa una fuente renovable para la generación de energía sostenible, como en Tailandia. Su aprovechamiento permite aprovechar los residuos en insumos de alto poder calorífico. No obstante, la biomasa agrícola representa limitaciones por su composición química humedad,etc. (Wiranarongkorn et al., 2021)

2.4.3 Biomasa de Origen Industrial

Proviene de residuos en la producción industrial, como ejemplo la industria textil, las instalaciones agropecuarias. En la industria agropecuaria, destacan como subproducto las heces y purines derivados de la cría intensiva de ganado, esta biomasa representa un volumen significativo, esta biomasa contienen un gran potencial energético usualmente utilizada en la generación de bigas a través de la digestión anaeróbica de la materia, la biomasa industrial se perfila como una fuente de energía renovable por su versatilidad y utilidad. (Martínez Lozano et al., 2009)

2.4.4 Según su uso energético

La biomasa puede llegar a ser un sustituto completo de los combustibles fósiles, según Vargas-García et al., 2021. En la última década el uso de biomasa creció significativamente destinándose a la producción de bioenergía. Las principales ventajas que tiene el uso de la biomasa como recurso energético en lugar del petróleo, carbón o gas, son la mejora de la situación socio-económica de las áreas rurales mediante el aprovechamiento de los residuos agrícolas y la reducción de las emisiones de azufre, partículas, CO, CH₄ y NO_x al medio ambiente. Además, la biomasa posee un ciclo neutro de CO₂ que no contribuye al efecto invernadero.

Tabla 1

Tipos de biomasa

Tipo	Descripción
Biomasa de residuos	Alude a los subproductos o residuos generados en las actividades agrícolas, silvícolas y ganaderas, así también como los residuos de la industria agroalimentaria y maderera.
Biomasa no utilizada	Alude a aquellos originados en la recolección de formas, servicio de guardaparques y agroindustria, fuertes subproductos no utilizados en las empresas agrarias, de guardaparques, agroalimentarias o madereras.
Biomasa húmeda	Alude a la biomasa que supera el 60 % de humedad y que necesita formas de secado o ser utilizado en formas húmedas (generación de biogás) o liberaciones biodegradables.
Biocombustible	Alude a las potencias de los fluidos o gases suministrados por la producción de cereales u otros cultivos de alto consumo energético.

Nota. Tomado de Lisbeth, 2023

Tabla 2*Componentes estructurales*

Tipo	Descripción
Biomasa lignocelulósica	Alude a la biomasa en la que prevalecen la celulosa, la hemicelulosa y la lignina como elementos más relevantes de la estructura vegetal.
Biomasa amilácea	Los carbohidratos están dentro del marco de los polisacáridos de reserva, como la insulina o el almidón.
Biomasa azucarada	El componente hidrocarburo trascendente comprende azúcares, como monosacáridos (glucosa o fructosa) o disacáridos (sacarosa).
Biomasa oleaginosa	El elemento distintivo para su utilización incluye los lípidos, como aceites y gomas.

Nota. Tomado de Lisbeth, 2023

2.5 Procesos de conversión de la biomasa en energía

Merino, 2019, menciona que existen diversos procesos para convertir la biomasa en formas aprovechables de energía, los cuales pueden ser calcificados en dos principales procesos: los procesos termoquímicos y los procesos físicos.

2.5.1 *Procesos termoquímicos*

Son aquellos que utilizan reacciones irreversibles, a altas temperaturas y en condiciones donde la oxidación esta presente, se usan cuando la biomasa esta seca y solida.(Navarro, 2018)

- **Combustión:** según Navarro, 2018 Es un proceso en el que el carbono y el hidrógeno contenidos en el combustible reaccionan con el exceso de oxígeno para formar CO₂, agua y liberar calor. Permite obtener energía térmica, ya sea para usos domésticos (cocción, calefacción)

o industriales (calor de proceso, vapor mediante una caldera, energía mecánica utilizando el vapor de una máquina).

- **Pirólisis:** Es un proceso de descomposición de la biomasa que ocurre en ausencia de oxígeno, en el cual los componentes orgánicos se transforman en productos sólidos (carbón vegetal), líquidos (aceites y alquitranes) y gaseosos. Este proceso permite obtener combustibles de distinta naturaleza dependiendo de las condiciones operativas, como la temperatura, el tiempo de residencia y la velocidad de calentamiento, lo que posibilita adaptar la conversión energética según los fines industriales. Tal como se observa en la tabla 3.

Tabla 3

Rendimiento típicos de los productos

Modo	Condiciones	Líquido	Carbón	Gas*
Gasificación	~ 800 °C	5 %	20 %	85 %
Flash/rápida	~ 500 °C, corto tiempo de residencia de vapor caliente ~ 1 s	75 %	12 %	13 %
Intermedio	~ 500 °C, tiempo de residencia del vapor caliente ~ 10 – 30 s	50 %	25 %	25 %
Carbonización lenta	~ 400 °C, largo tiempo de residencia del vapor ~ horas – días	30 %	35 %	35 %
Torrefacción lenta	~ 290 °C, tiempo de residencia de sólidos ~ 30 min	—	82 %	18 %

Nota. Tomado de Klug, 2012.

- **Licuefacción:** Según Merino, 2019 La licuefacción es la conversión de biomasa en un hidrocarburo líquido usando bajas temperaturas y altas presiones de hidrógeno.

2.5.2 Procesos Físicos

Los procesos físicos de la biomasa constituyen una etapa de pretratamiento esencial que permite adecuar el material para su posterior aprovechamiento en procesos termoquímicos. Estos

métodos no modifican la composición química de la biomasa, pero sí sus características físicas, facilitando su manipulación, transporte y eficiencia en la conversión energética.(Lisbeth, 2023)

Uno de los principales es la reducción de la granulometría, que consiste en fragmentar la biomasa en piezas más pequeñas (troncos, ramas, cáscaras, etc.), con el fin de mejorar la superficie de contacto y su aprovechamiento en procesos de combustión o transformación. De esta manera, se asegura una mayor uniformidad en el tamaño de las partículas, lo que facilita la operación en los sistemas de conversión.(Lisbeth, 2023)

La densificación es otro procedimiento clave, cuyo objetivo es compactar la biomasa para incrementar su densidad energética y mejorar sus propiedades como combustible alternativo. Este proceso se realiza mediante técnicas como la peletización, que produce pequeños cilindros compactos; la briquetización, que genera bloques de mayor tamaño y densidad; y la producción de astillas, más simples y de fácil manipulación. Finalmente, el secado se emplea para reducir la humedad de la biomasa, ya sea mediante métodos naturales (energía solar) o industriales (estufas o secadores), garantizando un mejor desempeño energético y una combustión más eficiente. (Lisbeth, 2023)

2.6 Biocombustibles sólidos

Los biocombustibles sólidos son materiales de origen biomásico que, tras un proceso de acondicionamiento o densificación, se emplean como fuente de energía térmica en sustitución de los combustibles fósiles. Entre los más representativos se encuentran la leña, los pellets, las briquetas y el carbón vegetal. La leña es el combustible más tradicional; los pellets son pequeños cilindros de biomasa densificada con humedad controlada; las briquetas son bloques compactados de residuos agrícolas o forestales; y el carbón vegetal se obtiene mediante carbonización lenta de la madera, alcanzando un mayor poder calorífico.(Torres, 2008)

- ***Ventajas y limitaciones a los combustibles fósiles:*** Los biocombustibles sólidos presentan ventajas como su carácter renovable, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, el aprovechamiento de residuos agroforestales y una mayor homogeneidad y facilidad de manipulación cuando se densifican. Además, su combustión puede alcanzar rendimientos energéticos superiores al 80 %. No obstante, también presentan limitaciones: requieren procesos de secado y acondicionamiento, poseen menor densidad energética que los combustibles fósiles y dependen de la consolidación de mercados y cadenas logísticas que permitan su aprovechamiento sostenible. (Torres, 2008)

2.7 Briquetas de biomasa

Las briquetas son biocombustibles densificados obtenidos a partir de residuos lignocelulósicos, como aserrín, astillas o cáscaras agrícolas. Durante el proceso de compactación, la presión y el calor provocan la plastificación de la lignina, que actúa como aglutinante natural. En algunos casos se incorporan aditivos para mejorar la cohesión y estabilidad del producto. (Torres, 2008)

2.7.1 Procesos de fabricación

El proceso de briquetado comprende varias etapas: (a) reducción granulométrica, para uniformar el tamaño de partículas; (b) secado, para ajustar la humedad entre 8 % y 15 %; (c) compactación, mediante prensado mecánico o extrusión, alcanzando temperaturas de 100–150 °C; y (d) en ocasiones, aglutinación con materiales como almidón o melaza. Existen distintas tecnologías de briquetado, como briquetadoras de pistón, de tornillo, hidráulicas o de rodillos, que difieren en calidad, costos y densidad final del producto. (Torres, 2008)

Las briquetas se caracterizan por su densidad aparente (0,7–1,3 g/cm³), un poder calorífico que puede superar las 4.000 kcal/kg, resistencia mecánica frente a la manipulación y transporte, y

Figura 3

Fabrica de briquetas (Valladolid)



Nota. Tomado de Torres, 2008.

durabilidad, entendida como la capacidad de conservar su integridad tras el almacenamiento o uso intensivo (Torres, 2008).

2.8 Poder Calorífico

El poder calorífico se define como la cantidad total de energía térmica liberada durante la combustión completa de una unidad de masa o volumen de combustible, y constituye uno de los indicadores más importantes para evaluar el desempeño energético de los biocombustibles. Este parámetro puede expresarse como poder calorífico superior (PCS), que incluye la energía del vapor de agua condensado, o poder calorífico inferior (PCI), que excluye dicha energía al considerar el vapor en estado gaseoso (Falcón Peña y Velarde Franco, 2022.). De acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC 2060, dependiendo de la naturaleza de la biomasa empleada y del contenido de humedad del material. Los residuos lignocelulósicos, por su alto contenido de lignina y carbono fijo, aportan los valores más elevados de poder calorífico, lo que los convierte en una materia prima eficiente para la producción de biocombustibles sólidos.

2.9 Aglutinantes en briquetas

Los aglutinantes son materiales capaces de unir partículas o fragmentos de diferentes sustancias, proporcionando cohesión y estabilidad al conjunto mediante mecanismos físicos o fisicoquímicos. En el contexto de los biocombustibles sólidos, su función principal es mejorar la integridad mecánica de las briquetas, reduciendo su fiabilidad y evitando la desintegración durante el transporte o la combustión. Estos materiales pueden formar enlaces por adhesión superficial o por interacción con los componentes lignocelulósica de la biomasa, dando lugar a una estructura más compacta y resistente(Marticorena, 2014).

2.9.1 Tipos de aglutinantes

- ***Aglutinantes naturales:*** se obtienen a partir de compuestos orgánicos presentes en plantas o animales, tales como almidones, gomas, resinas, aceites, ceras o lignina. Son biodegradables, económicos y no generan emisiones contaminantes durante la combustión, por lo que resultan ideales en aplicaciones energéticas sostenibles.
- ***Aglutinantes químicos o sintéticos:*** provienen de mezclas o reacciones químicas, como cementos, polímeros, resinas epoxi o alquídicas. Aunque proporcionan alta resistencia mecánica, suelen tener costos mayores y pueden liberar compuestos no deseados al quemarse, lo que limita su uso en briquetas destinadas a combustión doméstica o industrial limpia(Marticorena, 2014)

En el caso de las briquetas de biomasa, el uso de aglutinantes naturales como el almidón de yuca es especialmente relevante, ya que este polisacárido posee una estructura gelatinosa que mejora la cohesión entre partículas, sin alterar significativamente el poder calorífico del producto ni generar residuos tóxicos. Su empleo favorece además la sostenibilidad del proceso al provenir de una fuente renovable y de amplia disponibilidad local(Marticorena, 2014)

3. Revisión Bibliográfica

- Según A. Rojas et al., 2021 , el estudio analiza la cinética no isotérmica de degradación térmica de los principales componentes lignocelulósicos de la cáscara de cacao (*Theobroma cacao* L.), con el fin de entender su comportamiento durante la pirólisis. Utilizando análisis termogravimétrico (TGA) a diferentes velocidades de calentamiento, se determinaron energías de activación mediante los métodos de Friedman y Coats–Redfern. Los resultados evidenciaron que la hemicelulosa y la celulosa presentan los mayores picos de degradación entre 200–400 °C, mientras que la lignina mostró una descomposición más lenta hasta los 800 °C. El carbón pirolítico obtenido mostró alto contenido de carbono fijo, lo que sugiere su potencial como aditivo energético sólido para mejorar el desempeño térmico de bio combustibles densificados. Estos hallazgos respaldan la incorporación del carbón pirolítico como refuerzo energético en briquetas, tal como se plantea en el presente proyecto.
- Según Johanna, 2013, esta tesis tuvo como propósito evaluar el potencial energético de la biomasa residual agrícola del cacao en Ecuador, considerando las variedades Nacional y CCN-51. Se realizaron análisis inmediato y elemental, así como la estimación del poder calorífico y la proyección del potencial energético anual del residuo. La metodología consistió en caracterizar la biomasa a nivel químico y físico para determinar su viabilidad como combustible en sistemas de cogeneración tipo ciclo Rankine. Los resultados indicaron que el residuo de cáscara de cacao (BRAC) posee un poder calorífico inferior aproximado de 4.500 kcal/kg, con un potencial energético equivalente a 42.688 tep/año, capaz de generar 40 MW de potencia teórica. La autora concluye que la BRAC es un recurso energético económicamente viable que, al ser densificado o transformado en briquetas, puede contribuir significativamente a la matriz energética renovable del país. Este trabajo aporta una base técnica sólida para justificar el uso de la mazorca de cacao como biomasa principal en la producción de briquetas energéticas.

- Según Alejandro, 2017, el trabajo se centró en diseñar y fabricar briquetas de biomasa empleando cáscara de cacao como materia prima principal y colofonia como aglutinante natural. La metodología incluyó la trituration, tamizado, secado, mezcla, compactación y secado final de las briquetas. Se analizaron propiedades como la densidad, contenido de cenizas y poder calorífico, además de pruebas estadísticas para determinar la influencia del aglutinante sobre la calidad del producto. Los resultados evidenciaron que las briquetas con 10 % de colofonia presentaron mejor densidad (950 kg/m^3) y menor contenido de ceniza (3.5 %), alcanzando un poder calorífico de 4.800 kcal/kg. El autor concluye que la cáscara de cacao es una materia prima viable para biocombustibles sólidos y que la adición de un aglutinante natural mejora su cohesión y desempeño energético.
- Según Forero-Núñez et al., 2015, la investigación evaluó el efecto del tamaño de partícula y la adición de cáscara de cacao sobre las propiedades mecánicas y energéticas de pellets elaborados con mezclas de aserrín y carbón mineral. El estudio se enfocó en mejorar la resistencia, durabilidad y comportamiento térmico de biocombustibles densificados. Los autores emplearon un diseño experimental que combinó diferentes proporciones de materias primas y granulometrías, midiendo la resistencia a la compresión, durabilidad e índice de impacto. Los resultados mostraron que la incorporación de cáscara de cacao aumenta la resistencia mecánica y la durabilidad de los pellets, además de reducir el contenido de azufre y nitrógeno en comparación con el carbón solo. Se concluye que el residuo de cacao es un aditivo favorable tanto por su aporte energético como por su efecto ambiental positivo, lo que coincide con la lógica de incorporar carbón pirolítico y aceite pirolítico como aditivos energéticos limpios en briquetas de biomasa.
- Según Akam et al., 2024, este artículo tuvo como objetivo preparar y evaluar briquetas elaboradas a partir de la cáscara de cacao, utilizando almidón de yuca como aglutinante. El estudio siguió el proceso tradicional de secado, carbonización, molienda, mezclado, compactación y secado final, caracterizando el producto mediante análisis próximo, elemental,

espectroscopia infrarroja y análisis termo gravimétrico conforme a normas ASTM y CEN. Los resultados indicaron un poder calorífico superior de 17,94 MJ/kg , una humedad del 10,5 % y una resistencia al impacto de 125 %. Se observó además alta estabilidad térmica y bajo contenido de cenizas (6,5 %). El estudio concluye que las briquetas de cáscara de cacao con almidón de yuca son alternativas energéticas limpias y económicamente sostenibles.

- Según Sánchez y Benítez, 2022, el trabajo se orientó a la producción de briquetas de carbón ecológico utilizando residuos de la mazorca de cacao como materia prima. La metodología consistió en la carbonización de los residuos vegetales, seguida por la molienda y compactación con un aglutinante natural de tipo vegetal. Se determinaron parámetros como la humedad, densidad aparente, contenido de cenizas y poder calorífico. Los resultados mostraron un poder calorífico promedio de 4.200 kcal/kg, un bajo contenido de humedad (7 %) y una estructura compacta con buena resistencia mecánica. Los autores concluyen que la mazorca de cacao es un material de alto potencial energético, y que el carbón obtenido por pirólisis puede emplearse directamente o mezclarse con otros aditivos para optimizar el desempeño térmico de biocombustibles sólidos.

4. Metodología

4.1 Preparación de la muestra

Los residuos de la cascara de cacao (CMC), se recolectaron de una finca ubicada en el municipio de Rio negro, Colombia, y forman parte de una variedad de cacao denominado FSV-41, como se muestra en la Figura 4.

Figura 4

Variedad de cacao FSV-41



Primeramente, se sometieron 7 Kilogramos de la muestra a un secado natural durante 7 días, en la azotea del edificio de la escuela de Ingeniería Mecánica en la ciudad de Bucaramanga la cual, presenta una temperatura anual promedio de 23°C y una humedad que oscila entre 70 % y 80 % (Climate-Data.org, s.f.). Al cabo de este periodo, la masa se estabilizó en 1.504 kg, lo que representa una remoción de humedad del 78.51 % en base húmeda. Esta estabilidad de la masa

indica que la biomasa alcanzó su humedad de equilibrio higroscópico (HEH) con el ambiente, la cual, dadas las condiciones psicrométricas de la zona, se estima en un 14.3%; valor que será verificado posteriormente mediante el análisis inmediato bajo la norma ISO 18134.

Figura 5

Muestra seca.



Posteriormente, la biomasa se sometió a una primera reducción de tamaño mediante un molino manual. El material triturado se clasificó inicialmente a través de un tamiz de acero inoxidable con apertura de malla de 3 mm, con el fin de retirar las partículas de mayor tamaño y homogeneizar la muestra antes de la molienda fina. A continuación, se empleó un molino eléctrico de cuchillas para pulverizar el material retenido hasta reducir su granulometría. Finalmente, se realizó el tamizado definitivo utilizando un tamiz normalizado con apertura de 0.5 mm; la fracción pasante que cumplió con este criterio granulométrico se recolectó y almacenó para la realización del análisis inmediato, tal como se aprecia en la figura 8.

Figura 6

Muestra tamizada.

**4.2 Análisis próximo**

El análisis inmediato indica la cantidad de humedad, de carbono fijo, volátiles y cenizas, estos datos son importantes para determinar las condiciones de pirólisis aptas para el caso de estudio, el cual busca obtener ambos productos bio-char y bio-oil. Así, el análisis se realizó bajo la norma ISO 18134 para la humedad, ISO 18123 para el contenido de materia volátil, ISO 1822 para el contenido de cenizas y ISO 18125 para el poder calorífico. Es importante aclarar que este conjunto de pruebas se realiza con la muestra en base seca.

4.2.1 Contenido de humedad

La prueba de humedad se realizó bajo los lineamientos de la norma ISO 18134-1:2015. Para el ensayo se procedió a tomar una muestra de 2 gramos en un petri previamente tarado para registrar su masa inicial, después se llevó a la estufa de secado de modelo UN 30 SINGLE DISPLAY, la cual se encuentra en el laboratorio de combustión con una temperatura 105°C durante 16 horas. Una vez finalizado el secado, la muestra se dejó enfriar en un desecador para evitar la absorción de humedad y se registró su masa final. El contenido de humedad se calculó mediante la siguiente

expresión.

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

donde:

- m_i = Masa inicial del recipiente con muestra (g).
- m_f = Masa final del recipiente con muestra seca (g).
- m_c = Masa del recipiente vacío (g).

4.2.2 *Contenido de volátiles*

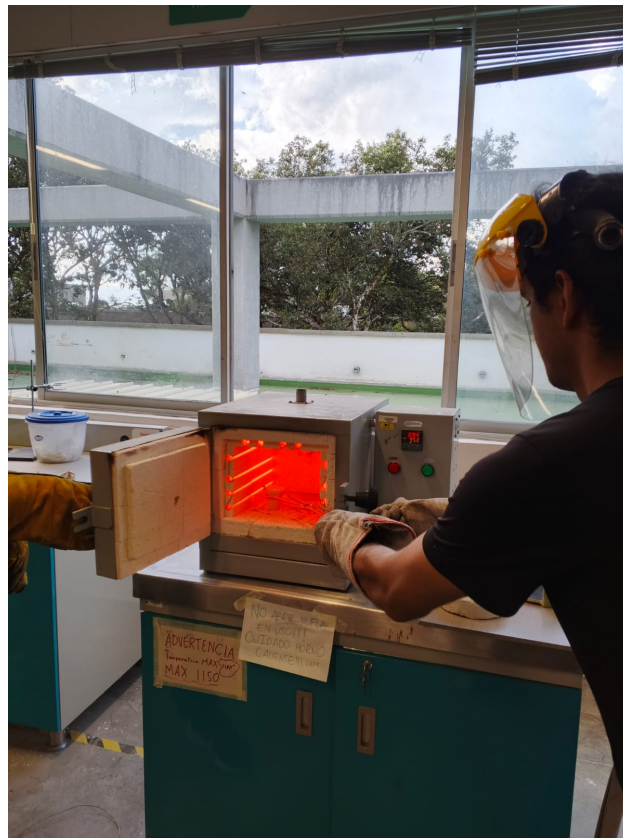
La prueba del contenido de materia volátil se realizó bajo los lineamientos de la norma ISO 18123:2015. Para el ensayo, se procedió a tomar una muestra aproximada de 1 gramo, colocarla en un crisol con tapa, previamente introducirla en la mufla modelo LM-E12 del laboratorio de combustión la cual se encontraba estabilizada en una temperatura de 900°C que se mantuvo durante 7 minutos. Después del calentamiento se retiró de la mufla, se puso a enfriar en un desecador y de esta manera evitar que absorbiera humedad del entorno, para finalmente medir su masa y determinar la diferencia de masa con respecto a la masa inicial. El contenido de materia volátil se calculó mediante la ecuación 2.

$$\text{Volatiles}(\%) = \frac{m_i - m_f}{m_i - m_c} * 100 \quad (2)$$

donde:

Figura 7

Prueba de Volátiles.



- m_i = Masa del crisol con muestra antes del ensayo (g).
- m_f = Masa del crisol con muestra después del ensayo (g).
- m_c = Masa del crisol vacío (g).

4.2.3 Contenido de ceniza

La prueba de contenido de cenizas se realizó bajo los lineamientos de la norma ISO 18122:2015. Para el ensayo, se procedió a tomar una muestra aproximada de 2 gramos, colocarla en un crisol con tapa previamente tarado e introducirla en la mufla del laboratorio de combustión, la cual sometió a un incremento gradual de temperatura de 30°C/min hasta alcanzar los 550°C,

temperatura que se mantuvo durante 3 horas.

Al finalizar el ensayo se retiro de la mufla y se dejo enfriar en un desecador para evitar la absorción de humedad y se registro la masa final.El contenido de cenizas se calculo mediante la siguiente expresión.

$$Cenizas(\%) = \frac{m_f - m_c}{m_i - m_c} * 100 \quad (3)$$

donde:

- m_i = Masa del crisol con muestra seca (g).
- m_f = Masa del crisol con residuo de ceniza (g).
- m_c = Masa del crisol vacío (g).

4.2.4 *Carbono fijo*

El contenido de carbono fijo se realizo bajo los lineamientos de la norma ISO 181238:2015 y la practica común de caracterización próxima de bio combustibles sólidos.El carbono fijo representa una fracción solida del material después de que se eliminara la humedad , su material volátil y sus cenizas.El contenido de carbono fijo se calculo mediante la siguiente expresión.

$$Carbonofijo(\%) = 100 - [Humedad(\%) + Volatiles(\%) + Cenizas(\%)] \quad (4)$$

4.2.5 Poder calorífico

La determinación del poder calorífico se realizó bajo los lineamientos de la norma ISO 18125:2017. El ensayo se efectuó en la bomba calorimétrica Parr 6200 en el laboratorio de la Universidad industrial de Santander Sede Guatiguara. Se empleó aproximadamente 1 gramo de las muestras molidas y secas, las cuales fueron prensadas en forma de pastillas para ingresar en el crisol de la bomba.

La bomba se cargó con oxígeno de una pureza de 99,5 % a una presión de 450Psi y posteriormente se sumergió en 2L cantidad de agua. Se registraron las variaciones de temperatura del sistema de combustión completa de la muestra, obteniéndose así el poder calorífico superior (PCS) mediante la ecuación de energía de la bomba:

$$PCS = \frac{(C_b * \Delta T) - e}{m} \quad (5)$$

donde:

- C_b = Capacidad calorífica efectiva del sistema (J/°C).
- ΔT = Cambio de temperatura del agua (°C).
- e = Correcciones por formación de ácido nítrico y sulfúrico (J).
- m = Masa de la muestra (g).

El poder calorífico superior inferior (PCI) se calcula a partir de PCS, considerando la pérdida de energía por la condensación del vapor de agua generado en la combustión y se calcula mediante la siguiente relación.

$$PCI = PCS - 2,447(9 * H) \quad (6)$$

donde :

- H = Es el contenido de Hidrógeno en la muestra de la masa (% en masa)

4.3 Obtención de los aditivos

La pirólisis de la muestra se realizó en el reactor de lecho fijo del Laboratorio de combustión, con el fin de obtener la fracción sólida (Carbón pirolítico) y líquida (Aceite pirolítico). Previamente, se ajustó la presión del nitrógeno a 1Bar y se efectuó el montaje del condensador de flujo cruzado para los vapores condensables. Se introdujeron 12 gramos de muestra en el reactor, se establecieron los parámetros de la pirólisis con una temperatura de 450°C , una tasa de calentamiento de 30°C/min y un tiempo de residencia de 40 minutos. La selección de estos parámetros se fundamenta en el análisis termo-gravimétrico (TGA) reportado por (M. Rojas et al., 2023), donde se observa que aproximadamente a los 450°C finaliza la principal etapa de degradación térmica de la cáscara de cacao, lo que permite obtener ambas fracciones (Véase la figura 8).

4.4 Diseño de muestreo y replicación

El diseño experimental seleccionado fue un diseño completamente aleatorizado (CRD), el cual permite evaluar el efecto de los tratamientos de manera independiente bajo las mismas condiciones experimentales. Se establecieron cuatro tratamientos con diferentes concentraciones de productos de pirólisis a la misma base, cada tratamiento se replicó tres veces, para un total de 12 unidades experimentales (briquetas), las cuales se repartieron de forma aleatoria para minimizar el sesgo y los factores externos no controlados.

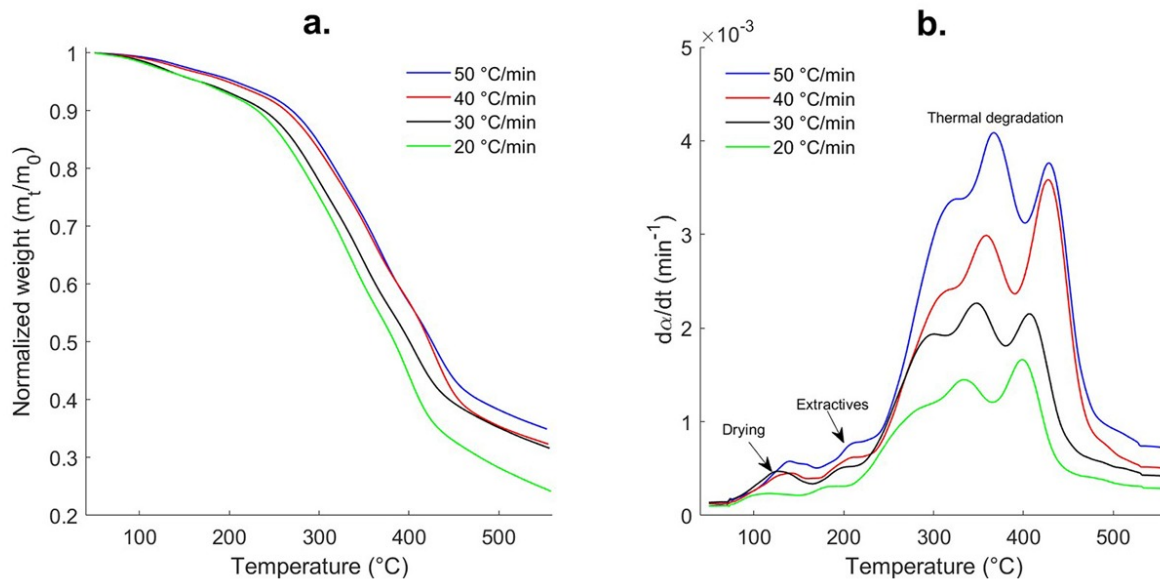
Figura 8*Reactor de lecho fijo.***Tabla 4***Diseño completamente aleatorizado (CRD) para la elaboración de briquetas con aditivos pirolíticos*

Tratamiento	Composición	Tipo de aditivo	Número de réplicas
A	Briqueta estándar (solo material base)	–	3
B	30 % carbón pirolítico	Carbón	3
C	25 % carbón + 5 % aceite pirolítico	Mixto (carbón + aceite)	3
D	20 % carbón + 10 % aceite pirolítico	Mixto (carbón + aceite)	3

Las variables de respuesta de respuesta consideradas fueron: (% pérdida de masa o índice de integridad), humedad (%), Resistencia a la compresión (N o Mpa). Las variables controladas incluyeron la presión de prensado, el volumen de la briqueta y el porcentaje de aglutinante.

Figura 9

Análisis Termo-gravimétrico (TGA) de la cáscara de cacao .



Nota. Tomado de M. Rojas et al. (2023)

Tabla 5

Variables de estudio

Tipo	Variable	Unidad / Comentario
Dependiente	Durabilidad (Indice de resistencia al impacto)	%
Dependiente	Humedad	%
Dependiente	Resistencia a la compresión	N ó MPa
Dependiente	Poder calorífico	kJ/kg
Controlada (fija)	Presión de prensado	13.78951 (MPa)
Controlada (fija)	Volumen de la briqueta	30.4 (cm^3)
Controlada (fija)	Porcentaje de aglutinante	10 % (fijo)

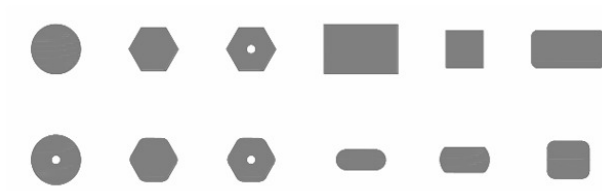
4.5 Construcción de las briquetas

En la actualidad existe una amplia variedad de formas para las briquetas elaboradas de biomasa, como se observa en la figura 12. Para este proyecto se escogió una geometría cilíndrica

maciza, debido a que representa la forma mas simple de construir y ademas es la mas común industrial mente.

Figura 10

Secciones transversales comunes en briquetas de biomasa.



Nota. Tomado de Michelena y Marcos (2008)

4.5.1 Dimensiones de las briquetas

Las dimensiones del bio combustible densificado se establecieron conforme a los lineamientos de la norma internacional ISO 17225-7. Debido a que el diámetro del producto final es de 25.4 mm, este supera el límite técnico de 25 mm que diferencia a los pellets de las briquetas, clasificándose así como una briketa no leñosa. En concordancia con esta clasificación, se estandarizó la producción con un diámetro de 25.4 mm y una longitud de 60 mm, cumpliendo con los requisitos de especificación geométrica para su posterior caracterización energética.

Tabla 6

Clasificación dimensional de bio combustibles densificados según la serie ISO 17225.

Tipo de bio combustible	Origen de la biomasa	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Norma aplicable
Pellet leñoso	Biomasa leñosa	≤ 25	3,15 – 40	ISO 17225-2:2021
Pellet no leñoso	Biomasa no leñosa	≤ 25	3,15 – 40	ISO 17225-6:2021
Briketa leñosa	Biomasa leñosa	> 25	Sin límite normativo	ISO 17225-3:2021
Briketa no leñosa	Biomasa no leñosa	> 25	Sin límite normativo	ISO 17225-7:2021

Nota. Tomado de International Organization for Standardization International Organization for Standardization, 2021b, 2021c.

4.5.2 Selección del aglutinante

Como agente aglutinante se utilizó almidón de yuca natural. Se estableció una concentración del 10 % respecto a la masa total de la mezcla, proporción que cumple con el límite máximo del 20 % estipulado para el uso de aditivos de prensado en la norma ISO 17225-7. La preparación del aglutinante consistió en una dispersión acuosa en relación 1:1 (agua/almidón), sometida a activación térmica controlada hasta obtener una fase viscosa homogénea. Este tratamiento térmico (Figura 13) induce la gelatinización del almidón, proceso mediante el cual la desestructuración irreversible de los gránulos de amilosa y amilopectina genera una matriz cohesiva capaz de unir eficazmente las partículas de cáscara de cacao durante la densificación.

Figura 11

Almidón de yuca sin activar y activo



a) Aglutinante sin activar



b) Aglutinante activo

4.5.3 Diseño del molde para fabricar las briquetas

Con el objetivo de garantizar la geometría y la repetibilidad de las briquetas fabricadas, se diseñó un molde que garantice las medidas planteadas en la sección 4.5.1. Este dispositivo confor-

mado por cuatro piezas fundamentales que encajan entre si: una camisa para contener y darle forma a la materia prima, una base, una tapa encargada de transmitir la carga de prensado y un sistema de desmolde que garantiza la extracción de la pieza sin comprometer su integridad mecánica.

4.5.4 Selección del material para el molde

Para la fabricación del molde se selecciono ACERO AISI 10140, ya que este acero presenta una buena resistencia mecánica, maquinabilidad y de fácil adquisición. Al ser expuesto a un gran esfuerzo e compresión se considero que es el material adecuado. Se adquirieron cuatro cilindros con las siguientes dimensiones:

- Dos cilindros de una pulgada de diámetro, con once centímetros de longitud para la fabricación de la camisa y la base del molde.
- Dos cilindros de una pulgada y media, con 6 y 11 centímetros para la fabricación de la tapa de prensado y el dispositivo de desmolde.

4.6 Prensado de la briqueta

El prensado del material se llevó a cabo utilizando el molde diseñado en la sección 4.5.3, accionado mediante una prensa hidráulica manual con capacidad operativa de 2000 psi, ubicada en el laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. El protocolo experimental se diseñó para maximizar la densidad aparente y mitigar el efecto de recuperación elástica (spring-back) característico de la biomasa agrícola Oladeji, 2015. El procedimiento inició con la disposición de la materia prima en la cámara de compactación, aplicando una pre-compresión manual mediante el émbolo superior para evacuar el aire ocluido entre las partículas y reducir la porosidad inicial. Posteriormente, se suministró la carga hidráulica de manera gradual y continua hasta alcanzar el punto de máxima compactación admisible por la geometría del molde. Una vez

alcanzada la presión pico, se estableció un tiempo de retención de carga (dwell time) de 30 segundos; esta etapa es crítica según la literatura especializada en densificación de biomasa Kebebew et al., 2025; Oladeji, 2015, ya que permite la relajación de tensiones internas y favorece la formación de enlaces interparticulares estables, garantizando la integridad estructural de la briqueta antes de la etapa de descompresión y expulsión.

Figura 12

Prensa Hidráulica Manual

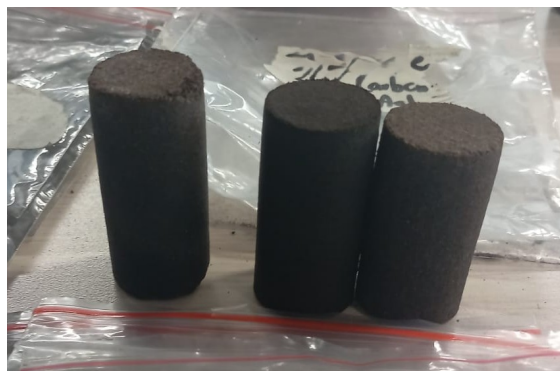


4.6.1 Briqueta estándar

La briqueta estándar se definió como la referencia para la evaluación de las propiedades térmicas y mecánicas bajo los aditivos de pirólisis. Este grupo se elaboró a partir de la materia prima base, correspondiente a cascara de cacao previamente molida y tamizada, a la cual se le adicionó un 10 % de aglutinante. Las briquetas fueron fabricadas bajo las condiciones planteadas anteriormente, con el fin de mantener consistencia experimental y permitir la comparación con los demás grupos.

Figura 13*Briqueta estándar***4.6.2 Briqueta con adición de 5 % de Aceite y 25 % de Carbón**

Para esta briqueta se estableció la concentración de aditivos de 5 % de aceite pirolítico y 25 % de carbón pirolítico, con las condiciones de pirólisis planteadas en la sección 4.3, el 70 % restante es de la mezcla estándar la cual esta conformada por materia prima base y 10 % de aglutinante. La elaboración de las briquetas se realizó siguiendo el mismo procedimiento de prensado de la briqueta estándar, con el fin de mantener consistencia experimental.

Figura 14*Briqueta con 5 % aceite y 25 % de Carbón*

4.6.3 Briqueta con adición de 10 % de Aceite y 20 % de Carbón

Para esta briqueta se estableció la concentración de aditivos de 10 % de aceite pirolítico y 20 % de carbón pirolítico, con las condiciones descritas en la sección 4.3. El 70 % restante de la composición corresponde a la mezcla estándar, constituida por materia prima base con un 10 % de aglutinante. La fabricación de las briquetas se realizó siguiendo el mismo procedimiento de prensado establecidas anteriormente, con el fin de analizar el efecto de una mayor proporción de aceite.

Figura 15

Briqueta con 10 % aceite y 20 % de Carbón



4.6.4 Briqueta con adición de 30 % de Carbón

Para esta briqueta se estableció una concentración de carbón como único aditivo al 30 % de su masa, obtenido mediante la pirólisis a condiciones descritas en la sección 4.3. El 70 % restante corresponde a la mezcla estándar, constituida por materia prima base con un 10 % de aglutinante. La fabricación se realizó siguiendo el mismo proceso de prensado, con el objetivo de analizar el efecto exclusivo del carbón en las briquetas.

Figura 16

30 % de Carbón

**4.7 Pruebas para medir el desempeño de las briquetas****4.7.1 Cantidad de humedad**

Con el fin de analizar la cantidad de humedad presente en las muestras con las cuales se fabricaron las briquetas y poder analizar la influencia de los aditivos, se realizó un ensayo para determinar la cantidad de humedad siguiendo el mismo procedimiento descrito en la sección 4.2.1. Para esto se recolectaron dos gramos de material sobrante por mezcla, asegurando una composición idéntica a la de las briquetas, después se introdujeron en la estufa con cajas petri a 105°C por un periodo de 16 horas..

El contenido de humedad de las muestras fue determinado en base seca, de acuerdo con la ecuación 1.

Figura 17

Prueba de humedad en las briquetas

**4.7.2 Prueba de resistencia al impacto**

Para las pruebas de durabilidad, debido a la ausencia de equipos normalizados para realizar la prueba de durabilidad mecánica estándar (Tumbling test), se implementó un método alternativo de evaluación basado en el procedimiento descrito por Obi et al., 2022b fundamentado en la norma British Standards Institution, 1992 para ensayos de fragmentación por caída. Este método es válido en la literatura científica para caracterizar la resistencia mecánica de briquetas de biomasa Adeleke et al., 2022 ya que simula el comportamiento de las briquetas en condiciones de transporte y almacenamiento.

El procedimiento consiste en medir la masa inicial de cada briqueta, someterla a una caída libre desde una altura de 2 metros sobre una superficie sólida de concreto, repitiendo esto tres veces. Después de esto se recolecta el fragmento de mayor tamaño y determinar su masa final. La resistencia al impacto se cuantifica mediante el Índice de Resistencia al Impacto (IRI) y se calcula mediante la siguiente expresión.

$$IRI(\%) = \left(\frac{m_f}{m_o} \right) * 100 \quad (7)$$

Donde :

- $IRI(\%)$ = Es el índice de resistencia al impacto.
- m_i = Es la masa inicial de la briqueta.
- m_f = Es la masa del fragmento de mayor tamaño.

4.7.3 Densidad

La determinación de la densidad de las briquetas se realizó siguiendo los lineamientos del método estereométrico descrito en la norma ISO 18847. Este procedimiento permite evaluar el efecto de los aditivos (carbón y aceite pirolítico) en el grado de compactación de la biomasa. Para el cálculo del volumen, se utilizó un calibrador pie de rey (precisión $\pm 0,05$ mm) para medir el diámetro y la longitud de cada muestra. Siguiendo la recomendación de la norma para minimizar el error por irregularidades superficiales, se tomaron tres medidas de diámetro en diferentes puntos de la briqueta y se promediaron. El volumen se determinó mediante la expresión para un cilindro geométrico:

$$V = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot L \quad (8)$$

Donde:

- V : Volumen de la briqueta (mm^3)
- D : Diámetro promedio (mm)
- L : Longitud de la briqueta (mm)

Posteriormente, se registró la masa de cada briqueta utilizando una balanza digital con sensibilidad de 0,001 g. Finalmente, la densidad de partícula se calculó mediante la relación masa-volumen

(Ecuación 9), expresando los resultados finales en g/cm^3 o kg/m^3 , de acuerdo con los estándares de caracterización de bio combustibles sólidos:

$$\rho_p = \frac{m_b}{V} \quad (9)$$

"

Donde:

- ρ : Densidad de la briqueta (Kg/m^3)
- m_b : Masa de la briqueta (Kg)
- V : Volumen de la briqueta (m^3)

Figura 18

Toma de medidas de la briqueta



4.7.4 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión de las briquetas se determinó mediante ensayos de compresión axial utilizando una prensa hidráulica manual con capacidad máxima de 2000 psi, la misma

empleada para el proceso de fabricación. Este método se emplea comúnmente en la caracterización mecánica de briquetas de biomasa (Himbane et al., 2022; Obi et al., 2022a). Utilizando el calibrador manual se determinó el diámetro promedio de cada muestra para calcular su área transversal mediante la siguiente expresión:

$$A_c = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (10)$$

Donde:

- A_c = Área transversal de la briketa (mm^2).
- D = Diámetro de la briketa (mm).

La carga se aplicó de forma gradual y continua hasta alcanzar el punto de falla, evidenciado por la fractura visible del material. Debido a que el manómetro de la prensa registra la presión hidráulica del fluido de trabajo, fue necesario calcular la carga axial real aplicada multiplicando la presión registrada en el momento de la falla por el área efectiva del émbolo del cilindro hidráulico, según la siguiente relación:

$$F = P_{man} \cdot A_{emb} \quad (11)$$

Donde:

- F = Carga axial aplicada (N o lbf).
- P_{man} = Presión registrada en el manómetro (MPa o psi).
- A_{emb} = Área del émbolo del cilindro de la prensa (mm^2 o in^2).

Una vez determinada la fuerza máxima soportada por la estructura, se calculó la resistencia a la compresión mediante la relación entre la carga y el área transversal de la muestra:

$$\sigma = \frac{F}{A_c} \quad (12)$$

Donde:

- σ = Resistencia a la compresión (MPa).
- F = Carga axial calculada (N).
- A_c = Área transversal de la briqueta (mm^2).

5. Análisis y Resultados

5.1 Análisis próximo.

Los resultados obtenidos del análisis próximo presentados en la tabla 7 nos muestran que la cascara de cacao presenta un contenido de humedad de 11,89 % el cual se determino mediante la ecuación 1, materia volátil de 61,59 % 2, cenizas de 8,93 % 3 y carbono fijo de 17,59 % 4. Estos valores se encuentran en un rango cercano y reportados por la tabla 8 para cascara de cacao: humedad (10.29 %-11.53 %), materia volátil (58.45 %-68.47 %), cenizas (10.81 %-16.24 %) y carbono fijo (10.43 %-16.8 %). El contenido de humedad y volátiles obtenidos es semejante al cacao de origen colombiano, mientras que el valor de cenizas resulto se inferior al rango de referencia. El contenido combustible total calculado fue 85.184 %, la cual es la suma de la materia volátil y el carbono fijo.

Tabla 7

Análisis proximal de la Cascara de cacao

Parámetro	Contenido (%)
Ceniza	8.93
Carbono Fijo	17,59
Humedad	11,89
Material Volátil	61.59

Tabla 8*Análisis proximal de la Cascara de cacao según literatura*

Origen	Humedad	Materia volátil	Ceniza	Carbón fijo
Cacao origen colombiano	11.07	61.73	16.24	10.96
Cacao origen nigeriano	10.29	68.47	10.81	10.43
Cacao origen ghanés	11.53	58.46	13.21	16.8

Nota. Tomado de Adjin-Tetteh et al., 2018

En los resultados presentados por Adjin-Tetteh et al., 2018 se caracterizaron mediante el análisis próximo tres variedades de cacao provenientes de Colombia, Nigeria y Ghanés, los cuales muestran concordancia con nuestros valores expuestos. El contenido de cenizas obtenido 8.93 % resulta inferior al reportado por la literatura el cual es 10.81 %-16.24 %. Esta variación pueden ser directamente asociadas a factores como son el tipo de suelo, condiciones ambientales, fertilización y variedad del cultivo Saikia y Baruah, 2013.

5.2 Poder Calorífico

5.2.1 Poder Calorífico de la Cascara de Cacao

Después del procesamiento de la materia prima para las pruebas del análisis proximal, se procede a hacer el poder calorífico, la tabla 8 muestra el poder calorífico superior de la cascara de cacao, esta mostrando un poder calorífico de tres formas distintas debido a lo mencionado en la metodología, estos 3 valores corresponden al ajuste estadístico de la prueba.

Tabla 9*Poder Calorífico Cascara de Cacao*

Muestra	PCS medido [MJ/kg]	PCS corregido MULT [MJ/kg]	PCS corregido ADD [MJ/kg]
Cascara de Cacao	15	14.466 ± 0.416	13.990 ± 0.402

tomando el valor de poder calorífico superior corregido a través del ajuste aditivo, el cual es 13.990 ± 0.416 [MJ/kg] esta entre los valores reportados por LUIS, 2018 el cual analiza su propia cascara de cacao el cual fue de 18.2 ± 0.6 [MJ/kg] además mencionado diferentes trabajos los cuales varían entre ± 1.6 [MJ/kg] cada valor, lo cual la cascara analizada en este trabajo se encuentra entre los valores que se esperarían de materia de residuos agrícolas(LUIS, 2018).

5.2.2 Poder Calorífico de los productos de pirólisis

Para el poder Calorífico solo se analizaron el carbón pirolítico y el aceite por separado, debido a que son los aditivos de las briquetas, las condiciones fueron mencionadas en la metodología sin embargo para el análisis de estos resultados es necesario mencionar la temperatura de la pirólisis la cual fue 450°C], en la tabla 9, se reportan los resultados del poder calorífico.

Tabla 10*Poder Calorífico de productos de Pirólisis de la Cascara de Cacao*

Muestra	PCS medido [MJ/kg]	PCS corregido MULT [MJ/kg]	PCS corregido ADD [MJ/kg]
Carbón pirolítico	21.683	20.855 ± 0.599	20.633 ± 0.593
Aceite pirolítico	34.180	32.875 ± 0.945	33.130 ± 0.952

Para el Carbón pirolítico se reporto un poder calorífico superior de 20.633 ± 0.593 [MJ/kg], Akam et al., 2024 reportaron un valor de poder calorífico el cual fue de 17.941 [MJ/kg], estos va-

lores son cercanos sin embargo el carbón reportado por el trabajo es a través de un proceso de carbonización de la cascara de cacao, es un proceso el cual afecta directamente al poder calorífico y además la materia prima es distinta.

Para el aceite pirolítico se reportó un poder calorífico superior de $33.130 \pm 0.952 [MJ/kg]$, Adjin-Tetteh et al., 2018 reportó un valor de $12.48 [MJ/kg]$ este valor fue calculado a partir del análisis elemental sin tomar en cuenta el agua, además reportan un valor de $8.64 [MJ/kg]$ este valor fue reportado tomando en cuenta el porcentaje de agua. En nuestro caso se puede concluir que el valor obtenido es más alto debido a dos razones la primera razón es la metodología utilizada para la obtención PCS en nuestro caso utilizamos una bomba calorímetro o que nos permite saber con más certeza el valor de forma experimental sin embargo de forma teórica no, por no saber el contenido elemental de nuestro aceite, y la segunda razón es el tipo de biomasa y las condiciones de la piro lisis para ellos fue una temperatura de 500 a 600 [°C].

5.2.3 Poder Calorífico de las briquetas

La Tabla 11 muestra que el poder calorífico superior (PCS) de la mezcla estándar es de $14,466 [MJ/kg]$, con valores corregidos de $13,990 \pm 0,402 [MJ/kg]$, mientras que la adición de carbón incrementa sistemáticamente el PCS, alcanzando un máximo de $17,386 [MJ/kg]$ (25 % de carbón y 5 % de aceite) y valores corregidos cercanos a $16,336-16,387 [MJ/kg]$; este comportamiento confirma el efecto positivo del carbón sobre la densidad energética de las briquetas.

Al comparar el resultado estándar con el valor reportado por Adjin-Tetteh et al., 2018, se observa una concordancia razonable: los HHV reportados para briquetas de residuos de cacao oscilan entre $12,48 [MJ/kg]$ y $18,10 [MJ/kg]$, dependiendo del origen y composición, además según la norma ISO 18125 International Organization for Standardization, 2018 los valores de poder calorífico de combustibles sólidos de biomasa no varían demasiado siendo rangos entre los $12,20 [MJ/kg]$, lo que sitúa el valor corregido de la mezcla estándar ($13,99 [MJ/kg]$) dentro del

rango inferior–medio reportado en la literatura.

Tabla 11

Poder Calorífico de las mezclas de Briquetas

Mezcla	PCS medido [MJ/kg]	PCS corregido MULT [MJ/kg]	PCS corregido ADD [MJ/kg]
Estándar	15	14.466 ± 0.416	13.990 ± 0.402
30 % Carbón	17.185	16.529 ± 0.475	16.135 ± 0.464
25 % Carbón y 5 % Aceite	17.386	16.722 ± 0.481	16.336 ± 0.469
20 % Carbón y 10 % Aceite	17.037	16.387 ± 0.471	15.987 ± 0.459

Al comparar los poderes caloríficos de las briquetas con aditivos frente a la mezcla estándar, se observa claramente que todas las formulaciones con adición de carbón presentan un desempeño energético superior. La mezcla estándar alcanza un PCS corregido de $13,990 \pm 0,402$ [MJ/kg], mientras que las mezclas con aditivos incrementan este valor hasta un rango de $15,836$ – $16,387$ [MJ/kg], lo que representa una mejora de aproximadamente 2-3 % respecto a la estándar. Entre ellas, la mezcla con 25 % de carbón y 5 % de aceite presenta el mayor PCS corregido ($16,336 \pm 0,469$ [MJ/kg]), seguida muy de cerca por la mezcla con 20 % de carbón y 10 % de aceite ($15,987 \pm 0,459$ [MJ/kg]) y la de 30 % de carbón ($16,135 \pm 0,464$ [MJ/kg]). En comparación directa con la estándar, todas las mezclas con aditivos son energéticamente mejores; sin embargo, la mezcla con 25 % de carbón y 5 % de aceite puede considerarse la mezcla óptima, ya que alcanza el valor más alto de poder calorífico..

5.3 Humedad

Los valores de humedad reportados en la Tabla 12 muestran una variación significativa en función de la composición de la mezcla, con porcentajes que oscilan entre 15,01 % y 25,53 %. La mezcla estándar presenta una humedad de $20,63 \pm 0,051$ %, mientras que la mezcla con 30 % de

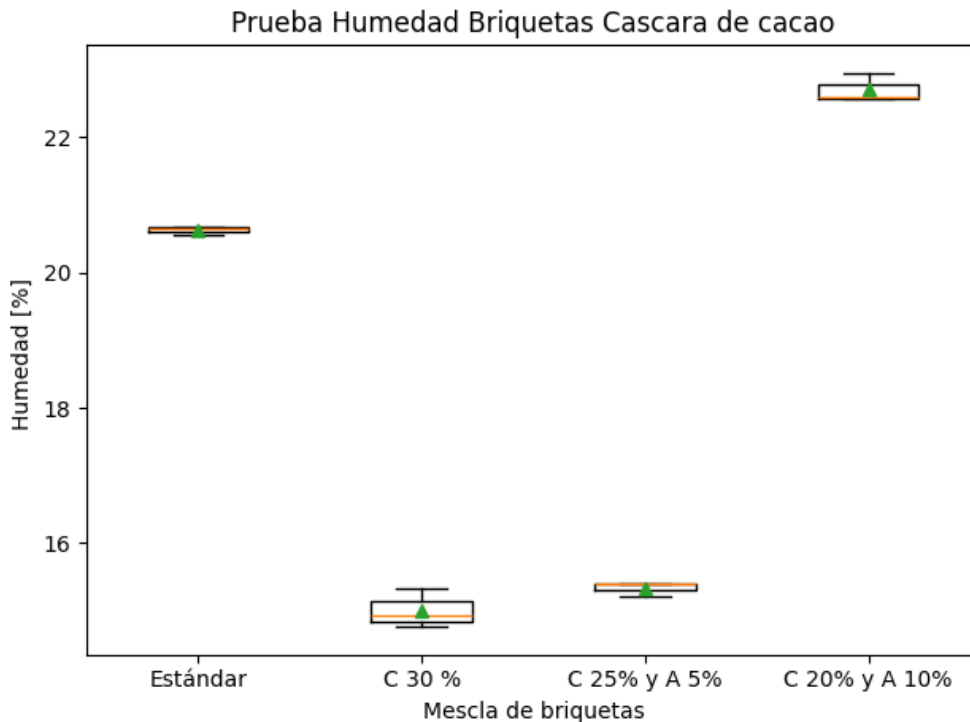
carbón reduce este valor a $15,01 \pm 0,241 \%$, situándose dentro del rango considerado adecuado para procesos de conversión térmica. En contraste, las mezclas con mayores contenidos de aglutinantes líquidos (5 % de aceite y 10 % de aceite) incrementan la humedad hasta $15,33 \pm 0,095 \%$ y $22,7 \pm 0,177 \%$, respectivamente, evidenciando el efecto directo de la formulación sobre el contenido de humedad final.

Tabla 12

Humedad briquetas

Mezcla	Humedad %
Mezcla estándar	$20,63 \pm 0,051$
Mezcla Carbón 30 %	$15,01 \pm 0,241$
Mezcla Carbón 25 % Aceite 5 %	$15,33 \pm 0,095$
Mezcla Carbón 20 % Aceite 10 %	$22,7 \pm 0,177$

Estos resultados pueden compararse con lo reportado por Akam et al., 2024 quienes indican que la humedad de las briquetas depende fuertemente del tipo de biomasa y puede variar desde menos del 15 % hasta valores superiores al 90 %. En este contexto, la mezcla con 30 % de carbón (15,01 %) se aproxima al límite inferior de ese rango, similar a los valores óptimos reportados en la literatura. Asimismo, los valores obtenidos son superiores a los reportados para briquetas de residuos de cacao por Adjin-Tetteh et al., 2018, con 11,07 %, considerados adecuados para procesos de conversión térmica, además según las normas ASTM E871-24 y la norma ISO 18134 los resultados de las pruebas de humedad no deben variar entre las muestras más de 0,5 % y entre el rango que reporta la norma UNE-EN ISO 17225-3 de 10 % a 20 % (International Organization for Standardization, 2021a).

Figura 19*Desviación estándar de la Humedad*

La Figura 19 muestra que la desviación estándar de la humedad es reducida en todas las mezclas, lo que indica una buena repetibilidad del proceso de fabricación y una distribución homogénea de la humedad dentro de cada formulación; no obstante, se observa una clara diferenciación entre mezclas, con la mezcla estándar alrededor de 20,6 %, la mezcla con 30 % de carbón cercana a 15 %, y la mezcla con 20 % de carbón y 10 % de aceite alcanzando los valores más altos, próximos a 22,7 %. Esta tendencia confirma que la incorporación de aceite incrementa sistemáticamente el contenido de humedad, mientras que el aumento del carbón tiende a reducirlo. En concordancia con lo discutido previamente, aunque las bajas desviaciones estándar indican estabilidad del proceso, los valores absolutos de humedad, especialmente en las mezclas con mayor fracción de aceite, se alejan de los rangos óptimos reportados para conversión térmica (7–13 % según Akam et al., 2024).

5.4 Prueba de impacto

Los resultados del ensayo de impacto de las briquetas fabricadas se presentan en términos del porcentaje de índice de resistencia contra el impacto, definido en este estudio como el mayor porcentaje de peso remanente después del ensayo y acotado en la metodología. Bajo esta definición, valores bajos de índice de resistencia contra el impacto representan una menor resistencia mecánica, ya que indican que una mayor fracción de la briqueta permanece intacta tras el impacto

Tabla 13

índice de resistencia al impacto

Mezcla	Índice de resistencia contra el impacto %
Mezcla estándar	97 ± 3,75
Mezcla Carbón 30 %	56 ± 12,91
Mezcla Carbón 25 % Aceite 5 %	54 ± 5,62
Mezcla Carbón 20 % Aceite 10 %	39 ± 8,63

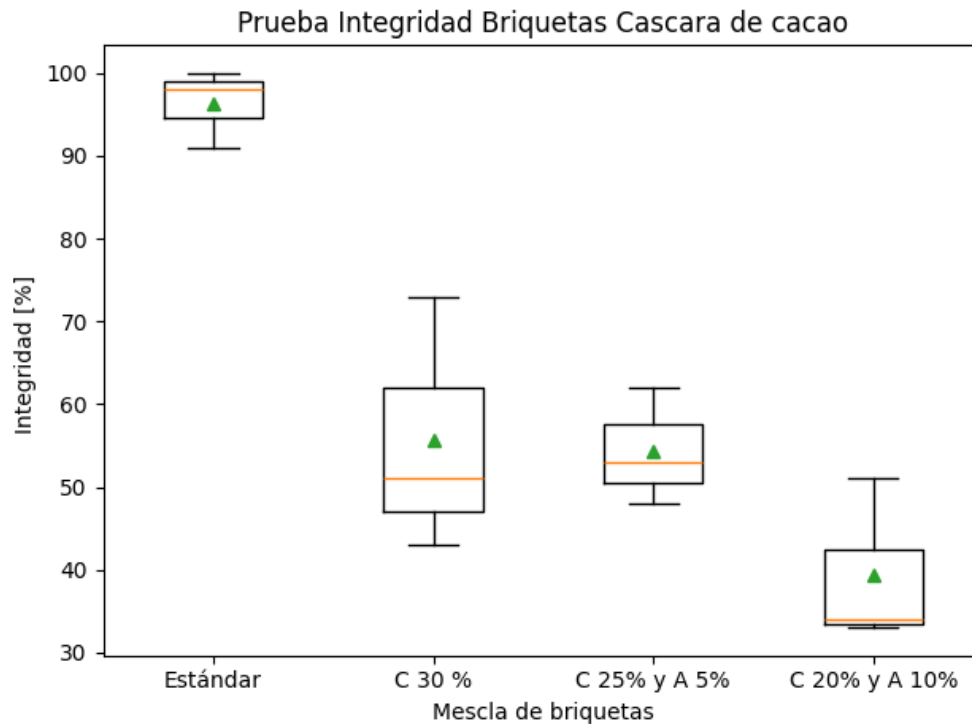
De acuerdo con la Tabla 13, la mezcla estándar presentó un porcentaje de integridad de 97 ± 3,75 %, lo que implica que aproximadamente el 97 % de la masa de la briqueta se mantuvo intacta, evidenciando una alta resistencia al impacto y una estructura interna estable. Este comportamiento contrasta con el observado en las briquetas que incorporan carbono, las cuales exhiben un aumento progresivo del porcentaje de peso perdido y, por ende, una mayor fragilidad mecánica.

La briqueta con 30 % de carbono mostró una pérdida de masa del 56 ± 12,91 %, indicando una reducción significativa de la resistencia mecánica frente al impacto. De manera similar, la mezcla con 25 % de carbono y 5 % de aceite presentó un valor de 54 ± 5,62 %, lo que sugiere que la adición de un 5 % de aceite no compensa completamente el efecto fragilizante asociado al incremento del contenido de carbono. La mayor pérdida de peso se registró en la mezcla con 20 %

de carbono y 10 % de aceite, alcanzando un valor de $39 \pm 8,63$ %, lo que confirma que, a medida que aumenta la proporción de carbono en la formulación, la briqueta se vuelve más susceptible a la fragmentación y además el porcentaje de 10 % de aceite aumento el afecto fragilizante.

Figura 20

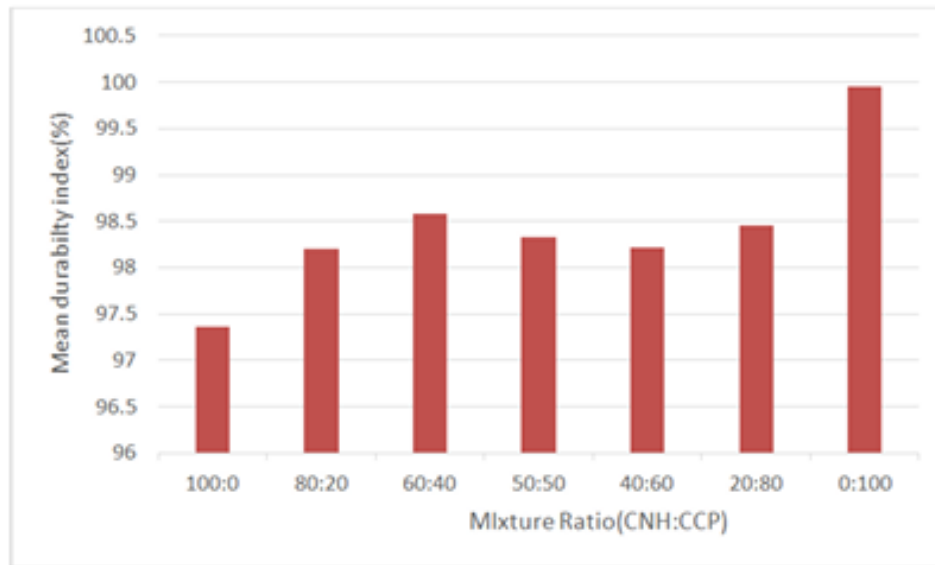
Desviación estándar de la integridad



Esta tendencia se observa con mayor claridad en la Figura 21, donde se evidencia una disminución progresiva de la mediana y del rango del porcentaje de peso perdido al incrementar el contenido de carbono. La mezcla estándar presenta valores cercanos al 100 %, mientras que las mezclas con carbono muestran distribuciones desplazadas hacia valores menores, confirmando una disminución de la resistencia al impacto. Asimismo, las desviaciones estándar reflejan una mayor variabilidad mecánica en las briquetas con mayor contenido de carbono, asociada a una estructura interna más frágil y menos cohesionada.

Figura 21

Effects of mix ratios on durability index (%) of briquette



Nota. Tomado de Yirijor et al., 2022

Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado en la literatura. Según Yirijor et al., 2022, el índice de durabilidad se define como el porcentaje de masa remanente después del ensayo de impacto, y se reportan valores entre 96,67 % y 99,96 %, lo que corresponde a pérdidas de masa muy bajas. En dicho estudio se concluye que, salvo casos específicos, la composición puede influir negativamente en la cohesión entre partículas, y que un aumento en ciertos componentes sólidos puede incrementar la fragilidad del material. Bajo esta perspectiva, este comportamiento se puede observar en la Figura 22 y sigue la tendencia de los resultados obtenidos.

5.5 Densidad

La densidad es una propiedad fundamental en la evaluación de combustibles sólidos, ya que está directamente relacionada con la densidad energética, la resistencia mecánica y el comportamiento durante el transporte y almacenamiento. En este estudio, la densidad de las briquetas se

determinó para diferentes formulaciones, cuyos resultados se presentan en la Tabla 13, mientras que la dispersión de los datos se ilustra en la Figura 23.

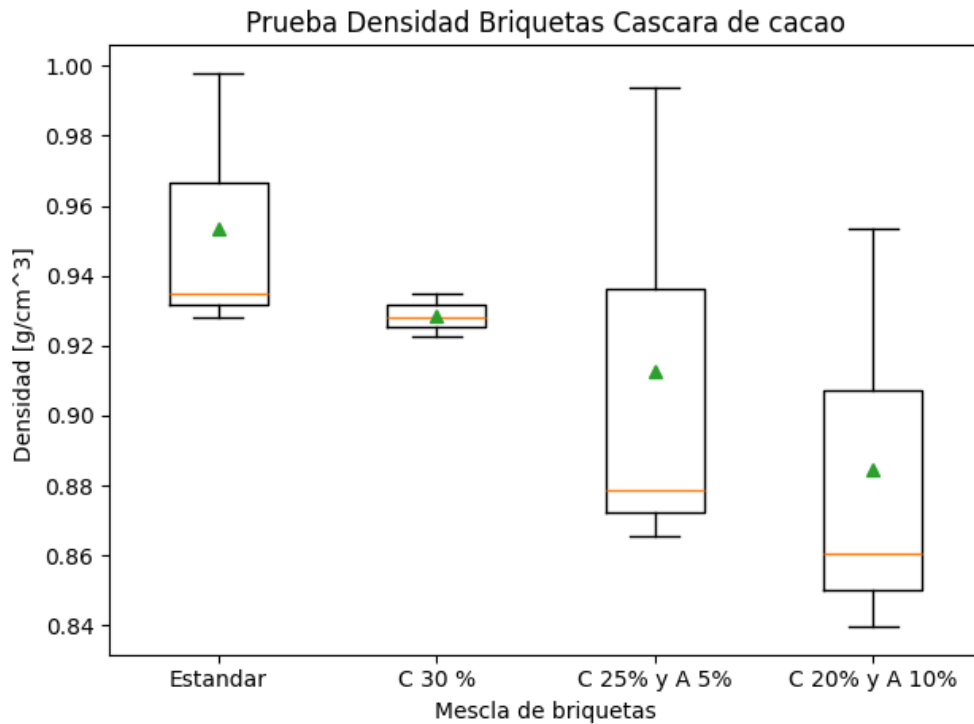
Tabla 14

Densidad briquetas

Mezcla	Densidad [g/cm ³]
Mezcla estándar	0,9537 ± 0,0315
Mezcla Carbón 30 %	0,9412 ± 0,0133
Mezcla Carbón 25 % Aceite 5 %	0,9126 ± 0,0575
Mezcla Carbón 20 % Aceite 10 %	0,8846 ± 0,0495

De acuerdo con la Tabla 14, la mezcla estándar presentó la mayor densidad promedio, con un valor de $0,9537 \pm 0,0315$ [g/cm³], lo que indica una estructura más compacta y con menor volumen de vacíos internos. Al incorporar carbono en la formulación, se observa una disminución progresiva de la densidad. La mezcla con 30 % de carbono alcanzó una densidad de $0,9412 \pm 0,0133$ [g/cm³], mostrando una reducción moderada respecto a la mezcla estándar y una baja dispersión de los resultados, lo que sugiere una compactación relativamente uniforme.

En el caso de la mezcla con 25 % de carbono y 5 % de aceite, la densidad disminuyó a $0,9126 \pm 0,0575$ [g/cm³], evidenciando no solo una reducción adicional del valor medio, sino también un incremento en la variabilidad de los datos. Finalmente, la mezcla con 20 % de carbono y 10 % de aceite presentó la menor densidad, con un valor de $0,8846 \pm 0,0495$ [g/cm³], lo que indica una estructura menos compacta, asociada a una mayor presencia de porosidad interna.

Figura 22*Desviación estándar de la Densidad*

La Figura 22 confirma visualmente esta tendencia, mostrando una disminución progresiva de la mediana de la densidad a medida que se incrementa el contenido de carbono y aceite en la mezcla. Asimismo, las mezclas con mayor proporción de aceite presentan cajas más amplias y mayores rangos intercuartílicos, lo que sugiere una menor homogeneidad en el proceso de compactación. Este comportamiento es consistente con la reducción de la cohesión interna observada previamente en los ensayos de impacto.

Los resultados del presente estudio muestran que la adición de carbono y aceite conduce a una disminución de la densidad, lo cual indica que, aunque el carbono puede mejorar ciertas propiedades energéticas, también introduce una estructura más porosa y menos compacta. Esta diferencia puede atribuirse tanto a la naturaleza del carbono incorporado como al efecto del aceite, que puede interferir con la compactación efectiva durante el proceso de briquetado.

5.6 Resistencia a la compresión

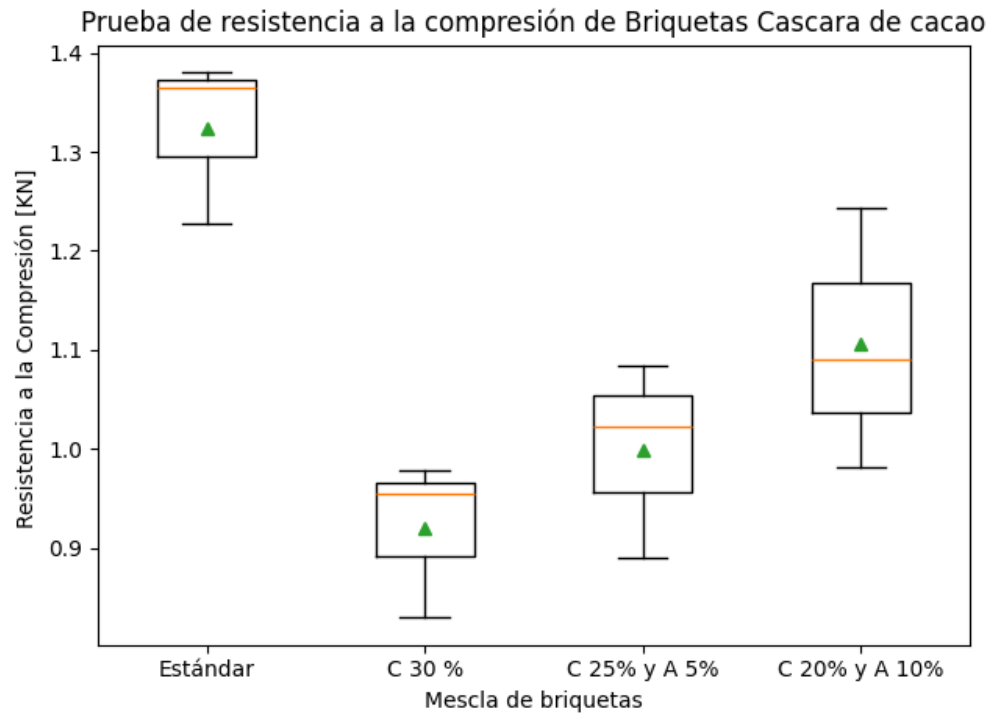
Los resultados mencionados por Galvis Perilla y Nicolas, 2023 indican que la resistencia a la compresión de briquetas de biomasa depende de manera significativa del tamaño de partícula y del porcentaje de aglutinante. En particular, las briquetas con tamaño de partícula mediano presentan los mayores valores de resistencia, alcanzando esfuerzos del orden de 7.300 a 8.050 Pa , independientemente del porcentaje de aglutinante (60~70 %). Asimismo, el estudio señala que todas las briquetas evaluadas superan el requisito mínimo establecido por la norma NTC-2060, que exige un esfuerzo máximo equivalente a 784,31 N por cada 60 g de masa, aun cuando las briquetas analizadas tienen una masa promedio considerablemente menor (12,6 g), lo que refuerza su adecuada resistencia mecánica.

Tabla 15

Compresión briquetas

Mezcla	Resistencia a la Compresión [KN]
Mezcla estándar	1,324 ± 0,068
Mezcla Carbón 30 %	0,921 ± 0,065
Mezcla Carbón 25 % Aceite 5 %	1 ± 0,081
Mezcla Carbón 20 % Aceite 10 %	1,106 ± 0,107

En comparación, los resultados presentados en la Tabla15 y en La Figura23 muestran que la briqueta estándar presenta la mayor resistencia a la compresión, con un valor promedio de $1,324 \pm 0,068 [KN]$, mientras que las briquetas con adición de carbón exhiben una reducción moderada de la resistencia, con valores de $0,921 \pm 0,065 [KN]$ para 30 % de carbón, $1 \pm 0,081 [KN]$ para 25 % de carbón y 5 % de aceite, y $1,106 \pm 0,107 [KN]$ para 20 % de carbón y 10 % de aceite. Esta tendencia concuerda con lo reportado por Galvis Perilla y Nicolas, 2023. Estos valores superan el mínimo exigido por la norma NTC-2060, confirmando que todas las formulaciones desarrolladas presentan una resistencia mecánica adecuada para su manipulación, transporte y uso.

Figura 23*Resistencia a la compresión*

6. Conclusiones

- Se ha logrado la respectiva caracterización fisicoquímicas de la cascara de cacao, mediante la ejecución del análisis próximo siguiendo como normativa la ISO1834,ISO18122 y determinación del poder calorífico superior mediante bomba calorímetro bajo la normativa NTC 2060.Los resultados del análisis próximo mostraron un contenido de humedad del 11.89 %, materia volátil de 61.59 %, cenizas de 8.93 %, carbono fijo de 17.59 % y un poder calorífico de 15 [MJ/kg] (valor medido), con valores corregidos de 14.66 ± 0.416 [MJ/Kg] (Método MULT) y 13.99 ± 0.402 [MJ/Kg] (Método ADD).Estos valores se encuentran dentro de los rangos de reportaros en la literatura para cascara de cacao, confirmando que el material caracterizado es una fuente adecuada para ser utilizada como bio combustible.
- Los resultados confirman la hipótesis de investigación planteada inicialmente:incorporar productos de pirólisis mejora las propiedades termoquimicas de las briquetas, ya que tanto el carbón como el aceite presentan mayor poder calorífico que la materia prima.La concentración con mayor poder calorífico fue la de 25 % carbón + 5 % de aceite (17.386 [MJ/Kg]),incluso superando la mezcla con mayor concentración de aceite la cual era 20 % carbón y 10 % aceite (17.037 [MJ/Kg]), esto se debe a que el aceite pirolitico pierde parte de sus volátiles en el secado y a mayor concentración son mayores estas perdidas. ’
- La evaluación de las propiedades expuso que agregar aditivos productos de pirólisis compromete la integridad mecánica de las briquetas.Todas las composiciones con aditivos presentaron menor densidad (0.8846 - 0.9412 [g/cm^3]) en comparación con la briqueta estándar (0.9537 [g/cm^3]), lo que implica que reduce su resistencia al impacto de (97 % a 39-56 %) como en la resistencia a la compresión de (307.5psi a 213-251psi), sin embargo estos valores están dentro de los rangos mínimos exigidos por la norma NTC-2060.
- Se ha determinado que la concentración con mejores resultados es 25 % de carbón y 5 % aceite pirolitico, alcanzando el mayor poder calorífico (17.386 [MJ/Kg]) con un incremento

del 24 % respecto a la briqueta estándar. Esta composición mantiene las propiedades dentro de los rangos aceptados por la norma NTC-2060: humedad de 15.33 %, densidad de 0.9126 [Kg/m^3], resistencia al impacto de 54 % y resistencia a la compresión de 244.3 psi. Aunque las propiedades físicas son menores que la estándar, es aceptable considerando la ganancia energética.

Referencias Bibliográficas

- Adeleke, A. A., Odusote, J. K., Ikubanni, P. P., Olabisi, A. S., & Nzerem, P. (2022). Briquetting of Subbituminous Coal and Torrefied Biomass Using Bentonite as Inorganic Binder. *Scientific Reports*, *12*(1), 8716. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12685-5>
- Adjin-Tetteh, M., Asiedu, N., Doodoo-Arhin, D., Karam, A., & Amaniampong, P. N. (2018). Thermochemical conversion and characterization of cocoa pod husks a potential agricultural waste from Ghana. *Industrial Crops and Products*, *119*, 304-312. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.060>
- Akam, N. G., Diboma, B. S., Mfomo, J. Z., Ndiwe, B., Bôt, B. V., & Biwolé, A. B. (2024). Physicochemical characterization of briquette fuel produced from cocoa pod husk case of Cameroon. *Energy Reports*, *11*, 1580-1589. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.01.029>
- Alejandro, P. T. M. (2017, julio). *FABRICACIÓN DE BRIQUETAS A PARTIR DE LA CÁSCARA DE CACAO (Theobroma cacao L.) Y COLOFONIA COMO AGLUTINANTE PARA SER UTILIZADAS COMO BIOCOMBUSTIBLE CACAO* [Tesis doctoral, Universidad de San Carlos de Guatemala].
- Asante, W. A., Afriyie, J. K., & Ziem, K. (2019). Quantification and characterization of cocoa pod husks for electricity generation in Uganda. *Energy, Sustainability and Society*, *9*(1), 25. <https://doi.org/10.1186/s13705-019-0206-8>
- British Standards Institution. (1992). *BS 1016-108-108.1:1992: Methods for Analysis and Testing of Coal and Coke – Tests Special to Coke – Determination of Shatter Indices* (British Standard). British Standards Institution. London, UK.
- Climate-Data.org. (s.f.). *Bucaramanga, Santander – Clima y datos climáticos* [Recuperado el 12 de septiembre de 2025]. <https://es.climate-data.org/america-del-sur/colombia/santander/bucaramanga-5923>

- de Desarrollo Rural (ADR), A. (2024, agosto). Plan Departamental de Extensión Agropecuaria (PDEA) de Santander. https://www.adr.gov.co/wpcontent/uploads/2024/08/01_PDEA_Santander_2024.pdf
- Ezzati, M., & Kammen, D. M. (2002). The health impacts of exposure to indoor air pollution from solid fuels in developing countries: Knowledge, gaps, and data needs. *Energy for Sustainable Development*, 6(4), 29-40. [https://doi.org/10.1016/S0973-0826\(08\)60304-X](https://doi.org/10.1016/S0973-0826(08)60304-X)
- Falcón Peña, R. S., & Velarde Franco, A. d. R. (2022). *Efectos del pretratamiento de biomasa sobre poder calorífico y nivel de emisiones de briquetas de residuos del olivar y orégano* [Tesis doctoral]. Universidad Privada de Tacna.
- Forero-Nuñez, C. A., Jochum, J., & Vargas, F. E. S. (2015). Effect of particle size and addition of cocoa pod husk on the properties of sawdust and coal pellets. *Ingeniería e Investigación*, 35, 17-23. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v35n1.46157>
- Galvis Perilla, J. C., & Nicolas, C. N. J. (2023). *Análisis de la viabilidad para obtener briquetas a partir de residuos de cultivo de *Cocculus Laurifolius** [Tesis doctoral, 'Fundación Universitaria de Ciencias de la Salud']. Universidad ECCI.
- Gómez-Peña, D. J., Barbosa-Núñez, C. A., & López-Cárdenas, J. (2023). Síntomas respiratorios en mujeres expuestas a humo de leña (Paipa, Colombia). *Medicina Interna de México*, 39(2), 235-242.
- Guerrero Nossa, Y. A. (2025). *Santander, Antioquia y Arauca reportaron la mayor producción de cacao en 2024; sin embargo, el contrabando sigue siendo un flagelo* [Recuperado de <https://www.fedecacao.com.co/post/santander-antioquia-y-arauca-reportaron-la-mayor-produccion-de-cacao-en-2024-sin-embargo-el-contr>]. Fedecacao. <https://www.fedecacao.com.co/post/santander-antioquia-y-arauca-reportaron-la-mayor-producci%C3%B3n-de-cacao-en-2024-sin-embargo-el-contr>
- Himbane, K. T., Ndiaye, M., Sambou, V., Tamba, S., Sarr, A., & Adj, M. (2022). Physicochemical and Mechanical Properties of Biomass Coal Briquettes from Cashew Shells, Peanut Shells

- and Millet Stalks. *Open Journal of Applied Sciences*, 12, 485-503. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2022.124033>
- International Organization for Standardization. (2018). *Solid biofuels – Determination of calorific value* (inf. téc. N.º ISO 18125:2018). ISO. Geneva, Switzerland.
- International Organization for Standardization. (2021a). *Solid biofuels – Determination of moisture content – Part 3: Clases de briquetas* (inf. téc. N.º ISO 17225-3:2021). ISO. Geneva, Switzerland.
- International Organization for Standardization. (2021b). *Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 1: General requirements* (International Standard N.º ISO 17225-1:2021). ISO. Geneva, Switzerland.
- International Organization for Standardization. (2021c). *Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 7: Graded non-woody briquettes* (International Standard N.º ISO 17225-7:2021). ISO. Geneva, Switzerland.
- Johanna, Q. S. P. (2013, octubre). *EVALUACIÓN ENERGÉTICA DE CÁSCARAS DE CACAO NACIONAL Y CCN-51* [Tesis doctoral, UNIVERSIDAD DE CUENCA].
- Kebebew, B., Nibret, G., & Worku, A. (2025). Parameter optimization of biochar pressing into a briquette for energy use [Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1026918525000952>]. *South African Journal of Chemical Engineering*, 50, 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2024.09.005>
- Klug, M. (2012). Pirólisis, un proceso para derretir la biomasa. *Revista de Química PUCP*, 26(1-2), 37-40. <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica>
- Lisbeth, A. F. P. (2023). *RENDIMIENTO Y CONTENIDO ENERGÉTICO DE BRIQUETAS Y CARBÓN VEGETAL OBTENIDO A PARTIR DE LA MAZORCA DE Theobroma cacao L. (CACAO)* (inf. téc.). UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA.
- LUIS, C. R. E. (2018, agosto). *Obtención de un biocombustible sólido por torrefacción húmeda a partir de la cáscara de la mazorca de cacao para la generación de energía* [Tesis doctoral, ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL].

- Marticorena, V. E. R. (2014). Aprovechamiento de la cachaza, la colofonia y la arcilla como aglutinantes en la formulación de briquetas energéticas utilizando residuos de aserrío. *Guatemala, Universidad San Carlos*.
- Martínez Lozano, S., et al. (2009). *Evaluación de la biomasa como recurso energético renovable en Cataluña*. Universitat de Girona.
- Merino, M. (2019, agosto). *Diseño e implementación de reactor anaerobio semicontinuo para aprovechamiento de cáscaras de cacao* [Tesis doctoral, Universidad de Piura].
- Michelena, M., & Marcos, F. (2008). *Los Biocombustibles*. Mundi-Prensa.
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2017). *Papeles en Salud N.º 11: Estufas mejoradas en Colombia* (inf. téc.). Ministerio de Salud y Protección Social. Bogotá, Colombia.
- Navarro, D. H. L. (2018). *Biomasa, clasificación, potencial energético y perspectivas en la matriz energética de Colombia* [Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/14639>]. Universidad Santo Tomás.
- Obi, O. F., Pecenka, R., & Clifford, M. J. (2022a). A Review of Biomass Briquette Binders and Quality Parameters. *Energies*, 15(7), 2426. <https://doi.org/10.3390/en15072426>
- Obi, O. F., Pecenka, R., & Clifford, M. J. (2022b). A Review of Biomass Briquette Binders and Quality Parameters [Received: 8 March 2022 / Revised: 19 March 2022 / Accepted: 23 March 2022 / Published: 25 March 2022]. *Energies*, 15(7), 2426. <https://doi.org/10.3390/en15072426>
- Oladeji, J. T. (2015). Theoretical Aspects of Biomass Briquetting: A Review Study [Disponible en: <https://www.iiste.org/Journals/index.php/JETP/article/view/20797>]. *Journal of Energy Technologies and Policy*, 5(3), 72-81.
- Pence, V. C. (1977). Cacao (*Theobroma cacao* L.) En *Biotechnology in Agriculture and Forestry* (pp. 203-221). Springer.
- Rodríguez, A. Á., Consuelo, ; García, P., Belén, M., & Díaz, F. (2012). *Caracterización química de biomasa y su relación con el poder calorífico* (inf. téc.). Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

- Rojas, A., Rincón, J., & Cuéllar, A. (2021). Non-isothermal kinetics of cellulose, hemicellulose, and lignin degradation during cocoa bean shell pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 156, 105188. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105188>
- Rojas, M., Ruano, D., Orrego-Restrepo, E., & Chejne, F. (2023). Non-isothermal kinetics of cellulose, hemicellulose, and lignin degradation during cocoa bean shell pyrolysis. *Biomass and Bioenergy*, 177. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106932>
- Saavedra-Rodríguez, A., Ceballos-Murcia, K., & Rodríguez-Borray, G. (2011). Evaluación técnico-económica del aprovechamiento de residuos de cacao para la generación de energía. *DYNA*, 78(165), 174-181.
- Saikia, M., & Baruah, D. (2013). Development of Quality Testing Methodologies of Fuel Briquettes [Conference Paper]. *Recent Advances in Bioenergy Research, Vol. III*.
- Sánchez, L. M., & Benítez, R. A. (2022). *Elaboración de briquetas de carbón ecológico a partir de residuos vegetales provenientes de la mazorca de cacao* [Tesis doctoral, Universidad de Guayaquil] [Trabajo de titulación de pregrado en Ingeniería Ambiental].
- Santillán, V., Romario, J., Alfaro, B., & Gonzales, E. (2021). *Ventajas y desventajas en la obtención de energía a partir de biomasa natural y carbón mineral: Una revisión sistemática* (inf. téc.). Universidad César Vallejo, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental.
- Torres, L. O. (2008). Producción de biocombustibles sólidos de alta densidad en España. *Boletín Informativo CIDEU*, (5), 107-123.
- Tripathi, M., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 467-481. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>
- Vargas-García, Y., Pazmiño-Sánchez, J., & Dávila-Rincón, J. (2021). Potencial de Biomasa en América del Sur para la Producción de Bioplásticos. Una Revisión. *Revista Politécnica (Quito)*, 48(2), 7-20. <https://doi.org/10.33333/rp.vol48n2.01>

- Wiranarongkorn, K., Phajam, P., Im-orb, K., Saebea, D., & Arpornwichanop, A. (2021). Assessment and analysis of multi-biomass fuels for sustainable electricity generation. *Renewable Energy*, *180*, 1405-1418. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.129>
- Yirijor, J., Arhin, E., Agyepong, L., Badu, G., & McBagonluri, F. (2022). Investigation of the Mechanical and Combustion Characteristics of Cocoa Pod and Coconut Husk Composite Briquette [Original Research Article, Academic City University College, Haatso-Accra, Ghana]. *Journal of Materials Science Research and Reviews*, *9*(3), 29-38.