

Evaluación del potencial dendroenergético en la biomasa comprimida del aprovechamiento de
Theobroma cacao, *Cordia gerascanthus* y *Schizolobium parahyba* en el departamento de
Santander

Franky Yamit Suarez Arguello, Jesús Camilo Urrego López

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniería Forestal

Director

Ronald Alfonso Montañez Valencia

M.Sc. Conservación y uso sostenible de sistemas forestales

Codirector

William Javier Mora Espinosa

M.Sc. Ingeniería ambiental

Universidad Industrial de Santander

Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED

Programa de Ingeniería forestal

Bucaramanga

2025

Agradecimientos

Primeramente, a nuestro Dios y creador quien ilumina y dirige nuestra vida, a la gloriosa Universidad Industrial de Santander y todos los miembros de su institución que han sido parte de nuestra formación académica, a nuestro director y M.Sc. en conservación y uso sostenible de sistemas forestales Ronald Alfonso Montañez Valencia, por ser nuestro mentor durante todo el proceso, a la honorable Universidad de Pamplona que en compañía de nuestro codirector y M.Sc. en Ingeniería ambiental William Javier Mora Espinosa, nos permitieron el uso del laboratorio de ingeniería mecánica, al laboratorio de carbones de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín en compañía de la ingeniera y auxiliar de calidad Ángela Henao quienes realizaron los análisis que permitieron la evaluación dendroenergética de los residuos.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo General	14
1.2 Objetivos Específicos.....	14
2. Marco Referencial.....	15
2.1 Marco teórico	15
2.1.1 Biomasa residual	15
2.1.2 Potencial energético	15
2.1.3 Evaluación de pellets	15
2.1.4 <i>Theobroma cacao</i> L. (Cacao).....	16
2.1.5 <i>Cordia gerascanthus</i> L. (Moncoro)	16
2.1.6 <i>Schizolobium parahyba</i> (Vell.) S.F.Blake. (Tambor o frijolito).....	17
2.2 Marco conceptual	17
2.2.1 Agroforestería	17
2.2.2 Pellets.....	18
2.2.3 Cambio Climático	18
2.3 Marco legal	18
3. Metodología	20
3.1 Área de estudio	20
3.2 Podas de Cacao	21
3.3 Residuos de <i>C. gerascanthus</i>	22

3.4 Residuos de <i>S. parahyba</i>	22
3.5 Trabajo en campo.....	22
3.5.1 Medición de variables	22
3.5.2 Residuos del cacao.....	22
3.5.3 Elaboración de pellets	23
3.5.4 Análisis de laboratorio	24
3.5.5 Análisis estadísticos de los resultados	24
4. Resultados	25
5. Discusión.....	36
6. Conclusiones	39
7. Recomendaciones	40
Referencias Bibliográficas	42
Apéndices.....	47

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Combinación de residuos.....	23
Tabla 2. Resultados muestra #1 <i>T. cacao</i> + <i>C. gerascanthus</i> 50/50.....	27
Tabla 3. Resultados muestra #2 <i>T. cacao</i> + <i>C. gerascanthus</i> 70/30.....	28
Tabla 4. Resultados muestra #3 <i>T. cacao</i> + <i>S. parahyba</i> 50/50	29
Tabla 5. Resultados muestra #4 <i>T. cacao</i> + <i>S. parahyba</i> 70/30	30

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Mapa de ubicación.....	21
Figura 2. Individuos de cacao por sitio.....	26
Figura 3. Determinación del contenido de humedad en la biomasa residual para la elaboración de pellets	31
Figura 4. Caracterización del material volátil en la biomasa residual para la elaboración de pellets	32
Figura 5. Caracterización de cenizas en la biomasa residual para la elaboración de pellets	33
Figura 6. Caracterización de carbono fijo en la biomasa residual para la elaboración de pellets	34
Figura 7. Cuantificación del poder calorífico en la biomasa residual para la elaboración de pellets	35
Figura 8. Componentes principales de los parámetros	36

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Podas de cacao.....	47
Apéndice B. Triturado de las podas del cacao.....	47
Apéndice C. Residuos de <i>C. gerascanthus</i>	47
Apéndice D. Residuos de <i>S. parahyba</i>	48
Apéndice E. Mediciones del cacao.....	48
Apéndice F. Formato medición de las variables en cacao.....	48
Apéndice G. Proceso de transformación para obtener el producto final.....	49
Apéndice H. Producto final.....	49
Apéndice I. Muestras empacadas para sus respectivos ensayos en laboratorio.....	49
Apéndice J. Molino triturador de materiales.....	50
Apéndice K. Aglomeradora de materiales.....	50
Apéndice L. Resultados de laboratorio muestra #1 <i>T. cacao</i> + <i>C. gerascanthus</i> 50/50.....	51
Apéndice M. Resultados de laboratorio muestra #2 <i>T. cacao</i> + <i>C. gerascanthus</i> 70/30.....	52
Apéndice N. Resultados de laboratorio muestra #3 <i>T. cacao</i> + <i>S. parahyba</i> 50/50.....	53
Apéndice O. Resultados de laboratorio muestra #4 <i>T. cacao</i> + <i>S. parahyba</i> 70/30.....	54

Glosario

Aprovechamiento forestal: extracción de productos forestales (Real Academia Española, 2024).

Aserradero: escenario mediante el cual la madera es sometida a procesos de transformación (Real Academia Española, 2024).

Biomasa: materia generada de manera orgánica que a su vez es utilizada en la generación de energías limpias (Real Academia Española, 2024).

Cacao: producción de la fruta del árbol de cacao, *Theobroma cacao*, en zonas tropicales húmedas.

Cambio climático: variación previsible en el clima provocado por actividades antropogénicas causando el incremento de gases de efecto invernadero y calentamiento global (Real Academia Española, 2024).

Carbono: compuesto almacenado en la atmosfera de manera segura.

Cultivo permanente: Sistemas de producción en los cuales el ciclo de vida se extiende más de 25 años continuos, debido a la longevidad del cultivo, se recolectan varias cosechas, ya sea de manera cíclica o continúa variando de su finalidad o propósito.

Dap: medida del diámetro a 1,30 de altura de una especie arbórea.

Dióxido de carbono: gas de mayor densidad en relación al aire que se origina por la suma de un átomo de carbono y dos de oxígeno producto de la combustión, siendo así, uno de los causantes del efecto invernadero (Real Academia Española, 2024).

Dendroenergía: energía producida con biomasa forestal, esa que proviene de los árboles.

Energía renovable: energía generada por fuentes naturales que tiende a recuperarse con mayor facilidad de lo que suele consumirse.

Especie arbórea: vegetal leñoso que posee una altura total igual o superior a 5 m y un diámetro de al menos 10 cm.

Especie maderable: árboles capaces de generar tejido leñoso que por composición anatómica, física o mecánica representan oportunidades de aprovechamiento.

Gases de efecto invernadero: gases responsables de la captura generada por la radiación infrarroja que emerge del planeta tras ser sometida al calor del sol reteniendo energía en la atmósfera.

Materia orgánica: compuesto que tiene átomos de carbono a nivel químico.

Material volátil: sustancia que se vaporiza con facilidad, se mueve por el aire, o es variable y cambiante (Real Academia Española, 2024).

Pellets: Pequeñas piezas prensadas de material orgánico o mineral, en líneas generales, de forma esférica o cilíndrica (Real Academia Española, 2024).

Poder calorífico: cantidad de calor transferido por unidad de masa que genera energía al tener una reacción química de oxidación.

Residuo: elemento proveniente del desecho de algún material y que suele ser eliminado dependiendo el tipo de residuo.

Sistema agroforestal: resultado de prácticas forestales que integran la agricultura y/o pastoreo con árboles de sombra.

Resumen

Título: Evaluación del potencial dendroenergético en la biomasa comprimida del aprovechamiento de *C. gerascanthus*, *S. parahyba* y *T. cacao* en el departamento de Santander*

Autor: Franky Yamit Suarez Arguello, Jesús Camilo Urrego López**

Palabras Clave: Aprovechamiento forestal, Biomasa residual, Dendroenergía, Pellets

Descripción: Dentro de las fuentes de energías renovables, la biomasa comprimida es una alternativa que permite el aprovechamiento de residuos forestales, la generación de pellets surge como solución al producir biocombustibles sólidos con bajas emisiones compuestas por partículas lignocelulósicas, celulosas y hemicelulosas. El presente estudio evalúa el potencial dendroenergético en la producción de biomasa comprimida de residuos de *T. cacao*, *C. gerascanthus* y *S. parahyba*, para ello, se realizó la recolección de podas de cacao y viruta en centros de transformación en el departamento de Santander, la metodología implementada para llegar a la producción de pellets, se estandarizó en 80 °C de temperatura, 3 447 500 (Pa) de presión y 40 minutos de compactación para las cuatro combinaciones; *T. cacao* + *C. gerascanthus* (50%-50%), *T. cacao* + *C. gerascanthus* (70%-30%), *T. cacao* + *S. parahyba* (50%-50%) y *T. cacao* + *S. parahyba* (70%-30%). El resultado de los componentes físico-químicos demuestra que la combinación *T. cacao* + *S. parahyba* 50/50, con 7,17 % de humedad total, cenizas de 2,41 % y 21,09 MJ/kg de poder calorífico, logró las condiciones más favorables del estudio. El análisis determina la calidad de todas las combinaciones, exceptuando *T. cacao* + *S. parahyba* (70%-30%) debido a su alto contenido de humedad. Los hallazgos validan la importancia de ajustar los procesos de secado para cumplir los criterios definidos en la ISO 17225-2:2021, que evalúa la calidad de los pellets de madera.

* Trabajo de Grado

** Instituto de Proyección Regional y Educación a Distancia IPRED. Programa de Ingeniería Forestal. Director: Ronald Alfonso Montañez Valencia. Maestría en Ciencias Conservación y uso sostenible de sistemas forestales. Codirector: William Javier Mora Espinosa. Maestría en Ciencias Ingeniería ambiental

Abstract

Title: Evaluation of the dendroenergy potential of compressed biomass from the use of *C. gerascanthus*, *S. parahyba* and *T. cacao* in the department of Santander*

Author(s): Franky Yamit Suarez Arguello, Jesús Camilo Urrego López**

Key Words: Forestry, Residual Biomass, Wood Energy, Pellets

Description: Among renewable energy sources, compressed biomass is an alternative that allows the use of forest waste. Pellet production has emerged as a solution for producing low-emission solid biofuels composed of lignocellulosic, cellulose, and hemicellulose particles. This study evaluates the wood energy potential in the production of compressed biomass from *T. cacao*, *C. gerascanthus*, and *S. parahyba* waste. To this end, cocoa prunings and wood chips were collected from processing centers in the department of Santander. The methodology implemented to produce pellets was standardized at 80 °C, 3,447,500 (Pa) pressure, and 40 minutes of compaction for the four combinations: *T. cacao* + *C. gerascanthus* (50%-50%), *T. cacao* + *C. gerascanthus* (70%-30%), *T. cacao* + *S. parahyba* (50%-50%), and *T. cacao* + *S. parahyba* (70%-30%). The results of the physical-chemical components show that the combination *T. cacao* + *S. parahyba* 50/50, with 7.17% total moisture, 2.41% ash, and 21.09 MJ/kg calorific value, achieved the most favorable conditions in the study. The analysis determines the quality of all combinations, except for *T. cacao* + *S. parahyba* (70%-30%) due to its high moisture content. The findings validate the importance of adjusting drying processes to meet the criteria defined in ISO 17225-2:2021, which evaluates the quality of wood pellets.

* Degree work

** Institute for Regional Projection and Distance Education (IPRED). Forestry Engineering Program. Director: Ronald Alfonso Montañez Valencia. Master of Science in Conservation and Sustainable Use of Forest Systems. Codirector: William Javier Mora Espinosa. Master of Science in Environmental Engineering

Introducción

La producción mundial de gases que intensifican el efecto invernadero (GEI) lograron un máximo de concentraciones en el año 2023 con un aumento del 1,3% con respecto al 2022 (United Nations Environment Programme, 2025). El requerimiento energético, servicios conexos, así como el desarrollo industrial, los transportes y la agricultura, orientados al desarrollo social, económico, con el fin de promover el bienestar humano, va en aumento, por ende, ha surgido un incremento de CO₂ y metano en la atmósfera, siendo considerados los principales gases de efecto invernadero responsables del cambio climático (Plaza y Hernández, 2022).

En este contexto de demanda de energías limpias, ha surgido un mercado dedicado a la fabricación de pellets o briquetas en función de los biocombustibles sólidos constituidos por compuestos a base de lignocelulósicas, celulosas y hemicelulosas (Fedemaderas, 2024). Pandey en 2022, afirma que los residuos agroforestales, son una fuente alterna de energía renovable con especial interés en la actualidad. La biomasa producida de residuos forestales y agrícolas aportó el 2,44% de la generación de electricidad renovable para Nepal en 2023.

El volumen estimado para un metro cúbico de madera aprovechada en los bosques naturales tiende a representar desperdicios aproximados del 50%. Por consiguiente, los residuos provienen de troncos desechados (3,75%), tocones (10%), copas y ramas (33,75%) y recortes de tope (2,5%). En el sector maderero, surge una problemática relacionada a la baja eficiencia en el aprovechamiento de los recursos forestales, en los aserríos se generan pérdidas económicas y ambientales derivadas de los procesos de transformación, esto, debido a que residuos como cortezas, orillos, recortes y aserrín tienden a ser desechados (Alvis y Sotelo, 2009).

Bedolla et al., (2024), manifestaron que los derivados provenientes de estos sistemas no dependen de combustibles fósiles, por ende, relacionando la demanda de energía con la sostenibilidad, se presenta como una solución ante la demanda de electricidad, calor y biocombustibles. La biomasa producto de podas de cacao, representa un importante sumidero de nutrientes. Las hojas, ramas secundarias y primarias aportan nutrientes como (C, N, P, K, Ca, Mg) los cuales son absorbidos por el suelo contribuyendo al ciclo de nutrientes en forma de energía residual (Rojas et al., 2021).

Debido a la falta de información y estudios recientes a nivel global, surge el interés de investigar la capacidad dendroenergética de los residuos asociados a cultivos de cacao y de las especies *S. parahyba* y *C. gerascanthus* producto de aprovechamientos en aserríos.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Evaluar el potencial dendroenergético en la producción de biomasa comprimida de residuos de *T. cacao*, *C. gerascanthus* y *S. parahyba*.

1.2 Objetivos Específicos

Aplicar procesos industriales combinados a nivel de aula para la fabricación de pellets producto de podas de *T. cacao* y viruta de *C. gerascanthus* y *S. parahyba*.

Determinar los parámetros físico-químicos de la biomasa transformada en pellets incorporando residuos provenientes de *T. cacao*, *C. gerascanthus* y *S. parahyba*.

Comparar los resultados de laboratorio en diferentes combinaciones de *T. cacao*, *C. gerascanthus* y *S. parahyba*.

2. Marco Referencial

2.1 Marco teórico

2.1.1 Biomasa residual

La biomasa residual se expresa en kilovatio hora (kWh), detallando el contenido de humedad de los residuos forestales, podemos cuantificar que se aproxima al 50%. Por lo tanto, para obtener 860 kcal necesarias para generar 1 kWh, será necesario aprovechar aproximadamente 4 kg de madera húmeda con capacidad energética de 2200 kcal/kg (Montenegro y Guayazán 2003). La fabricación de pellets en aserraderos es energéticamente eficiente ya que aumentan la producción, a partir de la biomasa disponible en aproximadamente un 15–20% en comparación a otras variables de energías no renovables reduciendo el CO₂ global emisiones entre 30– 50 kg CO₂/MWh pellets (Wolf et al., 2006).

2.1.2 Potencial energético

La provincia de Tocache en Perú en cultivos de cacao genera 14 612,82 t/año de residuo, con un potencial energético de 196 TJ/año de podas y cascarilla. (Ramírez, 2016). La biomasa residual generada a partir del análisis físico, químico y energético disponible en la producción de cacao son recomendables para su utilización energética debido a su gran potencial energético generando entre 631,53 TJ en el año 2016, por ende, se podría cubrir al 100% la demanda energética de 35 250 personas ubicadas en las zonas rurales tres provincias de la región Madre de Dios en el año 2016 (Navarro y Hosnar, 2018).

2.1.3 Evaluación de pellets

Pellets elaborados con residuos de especies maderables coníferas con un valor calorífico superior de 20,31 MJ/kg, contenido de humedad de 19,30 %, contenido de cenizas de 0,31 %,

carbono fijo de 19,75 % y densidad aparente de 692,66 Kg/m³, presentan mejores características de calidad (Stolarski et al., 2022). Los pellets de cascara de mazorca del cacao registran, un valor calorífico superior entre 18,28 - 19,30 MJ/kg, contenido de humedad entre 13,22 - 19,30 %, contenido de cenizas entre 3,49 - 12,99 %, carbono fijo entre 21,25 - 23,10 % y densidad aparente de 692,66 Kg/m³, dando viabilidad para generar energía como alternativa (Jekayinfa & Enweremadu, 2024).

2.1.4 *Theobroma cacao* L. (Cacao)

Comúnmente conocida como cacao, es una especie del reino Plantae, clasificada en la división Angiospermae y la clase Eudicotyledonae. Pertenece al orden Malvales y a la familia Malvaceae, siendo parte del género Theobroma. Es un individuo de talla pequeña, posee una altura de 4 a 7 m de altura (cultivado). Nativo norte de Suramérica y Centroamérica y sus características morfológicas varían del tipo de cultivo, Copa baja, densa y extendida. Hojas grandes, alternas, colgantes, elípticas u oblongas, de 15-20 a 35-50 (cm) de largo por 4 a 15 cm de ancho, de punta larga, ligeramente gruesas, margen liso, verde oscuro en el haz y más pálidas en el envés, cuelgan de un pecíolo. (Lachenaud 1995).

2.1.5 *Cordia gerascanthus* L. (Moncoro)

Comúnmente conocida como moncoro, es una especie perteneciente al reino Plantae, clasificada en la división Angiospermae y la clase Eudicotyledonae, hace parte del orden Boraginales y a la familia Boraginaceae, siendo parte del género Cordia. Es nativo de América del Sur y Centroamérica, la altura máxima alcanzada de la especie es de 30 (m) y un DAP promedio de 65 (cm), sus hojas son compuestas de 5 folios, miden entre 5 y 18 cm de largo y de 3 a 8 cm de ancho, lanceoladas a oblongas con pecíolos largos y desiguales, su persistencia es caducifolia, la

madera de la especie tiene una densidad de 0.74 (g/cm³), se emplea en la carpintería y ebanistería (Catálogo Virtual De Flora Del Valle De Aburrá, n.d.)

2.1.6 *Schizolobium parahyba* (Vell.) S.F.Blake. (Tambor o frijolito)

Comunmente conocida como tambor o frijolito, es una planta del reino Plantae, clasificada en la división Angiospermae y la clase Eudicotyledonae. Pertenece al orden Fabales y a la familia Fabaceae, siendo parte del género *Shizolobium*. Es nativa de América tropical, la altura máxima de la especie es de 30 (m) y un DAP promedio de 100 (cm), sus hojas son compuestas, los folios miden entre 30 y 50 (cm) de largo, similar a un helecho, numerosos folíolos, oblongos, con borde entero, ápice y base redondeados, su persistencia es caducifolia, la madera de la especie tiene una densidad de 0.35 (g/cm³), se emplea para la construcción de instrumentos musicales, artesanías y para pula de papel (Catálogo Virtual De Flora Del Valle De Aburrá, n.d.)

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Agroforestería

Fahad et al., (2022) define la agroforestería como sistemas que incorporan árboles leñosos perennes y cultivos agrícolas, ganado o forraje de manera simultánea, logrando la eficiencia de los recursos del suelo en comparación con el monocultivo mediante la diversificación estructural y funcional de los factores que lo componen. La implementación de especies arbóreas brinda servicios ecológicos relacionados con la regulación, abastecimiento y provisión, con el fin de mejorar la fertilidad, propiedades físicas, biológicas y químicas del suelo, además de proporcionar alimentos, madera y forraje a las familias que implementan estos sistemas.

Los sistemas agroforestales de cacao a una escala menor, proporcionan la mayor parte del cacao cultivado a nivel mundial, dichos sistemas ofrecen una mejora en el bienestar humano de familias cacaoteras que residen en el trópico. No obstante, en ocasiones, los productores de cacao

experimentan bajos rendimientos debido a prácticas inadecuadas que afectan directamente el rendimiento de los cultivos causados generalmente por plagas, enfermedades y baja fertilidad del suelo (Scudder et al., 2022).

2.2.2 Pellets

La implementación de pellets de madera como potencial productor de energía nace como resultado a la problemática de gestionar los residuos del procesamiento de la madera. En la actualidad, la norma UNE EN ISO 17225-2:2021 determina los requisitos generales de las especificaciones de combustible y sus clases, enfatizando la forma en que se ocupan los espacios tanto en condiciones estáticas (almacenamiento) dinámicas (alimentación). Los aspectos geométricos y dimensionales son importantes para la densidad energética y la capacidad térmica efectiva de las centrales térmicas (Pierdicca et al., 2022).

2.2.3 Cambio Climático

El cambio climático ha surgido como problema del siglo XXI, Las comunidades e instituciones científicas ha determinado que la principal causa del cambio climático global es el efecto invernadero, un proceso por el cual la atmósfera transmite la radiación solar a la superficie terrestre y absorbe la radiación térmica que retorna. Estudios indican que el cambio climático sigue generando cambios en la dinámica climática, por ende, según las tendencias actuales, cabe esperar que esta tendencia al alza se intensifique en el futuro (IPCC, 2022).

2.3 Marco legal

ASTM D3172-13(2021) e1, práctica estándar para el análisis próximo de carbón y coque, que define cómo determinar ciertos componentes básicos (humedad, materia volátil, ceniza) y calcular el carbono fijo.

ASTM D3173/D3173M-17a. “Método de prueba estándar para la determinación del contenido de humedad en la muestra de análisis de carbón y coque”

ASTM D3174-12(2018) e1, esta norma describe un método de prueba estándar para determinar el contenido de ceniza en muestras de análisis de carbón y coque.

ASTM D3175-20, método de prueba estándar que especifica cómo determinar la cantidad de materia volátil en una muestra de carbón proveniente del carbón.

ASTM D3302/D3302M-22^a, norma internacional de la ASTM (American Society for Testing and Materials) que establece el método de ensayo estándar para determinar la humedad total en el carbón.

ASTM D5865/D5865M-19, método de ensayo estándar para el valor calorífico bruto del carbón y del coque, indica cómo determinar el poder calorífico bruto (energía que libera el material al quemarse completamente) usando un calorímetro tipo bomba en condiciones controladas.

Decreto 2811 de 1974. “Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.”

Ley 99 de 1993. “Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.”

Ley 1377 de 2010. “La presente ley tiene por objeto definir y reglamentar las plantaciones forestales y sistemas agroforestales con fines comerciales.”

Ley 1665 de 2013. Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). Para fomentar el uso de energías renovables para un desarrollo sostenible. Contribuyendo a su importancia en la seguridad energética, la estabilidad de precios y la reducción de gases de efecto invernadero, contribuyendo así al equilibrio climático.

Ley 1715 de 2014. “Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional.”

Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS). Responsable de la planificación, manejo y administración de los recursos naturales de la región.

Resolución No. 0047 del 22 de enero de 2015. Permiso para la recolección de especies de la diversidad biológica con fines de investigación científica no comercial de la Universidad Industrial de Santander (UIS).

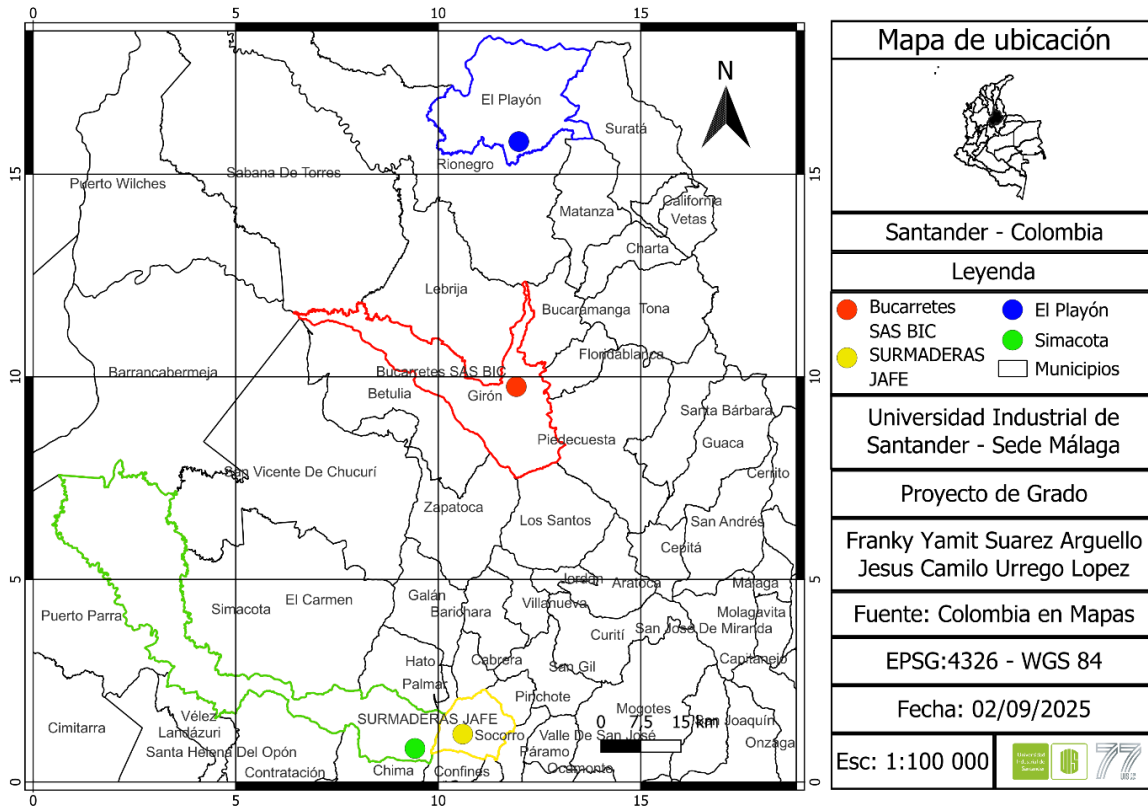
3. Metodología

3.1 Área de estudio

El área de estudio se distribuye en cuatro zonas específicas: dos destinadas a la medición de individuos de *T. cacao*; Simacota, El Playón, y dos orientadas a la obtención de residuos de *C. gerascanthus* y *S. parahyba*; Socorro, Girón, ubicados en el departamento de Santander (Figura 1)

Figura 1

Mapa de ubicación



Nota. Tomado de Colombia en mapas

3.2 Podas de Cacao

La zona de estudio donde se aprovecharon los residuos de las podas de *T. cacao* está ubicada en la región andina, municipio de Simacota Santander, la cual registra un rango altitudinal entre los 90 y 1237 m s. n. m. Según el IDEAM (2021), su clima es cálido, con temperaturas que oscilan entre 20°C y 27°C y una precipitación anual entre 1200 y 2000 mm. El sitio de medición y recolecta de material de podas, se encuentra en la vereda Pedregales. Presenta bosques húmedos premontanos (bh-PM) y bosques húmedos tropicales (bh-T) según Holdridge (1987).

Las podas fueron realizadas por los propietarios de la finca días antes de la visita al lugar, posteriormente a la recolección, se empleó una trituradora de madera para transformar la materia prima en viruta.

3.3 Residuos de *C. gerascanthus*

Los residuos de *C. gerascanthus* se tomaron de la empresa SURMADERAS JAFE, ubicados en la Vereda Bariri, vía Oiba – Socorro, en el municipio de Socorro, se recolectó viruta generada de los aprovechamientos y transformaciones primarias de la madera.

3.4 Residuos de *S. parahyba*

Los residuos de *S. parahyba* fueron tomados de la empresa Bucarretes SAS BIC, ubicados en finca villa Teresa, vía Girón – Corregidor, en el municipio de Girón, se recolectó viruta generada de los aprovechamientos y transformaciones primarias de la madera.

3.5 Trabajo en campo

3.5.1 Medición de variables

Se realizaron catorce (14) transectos de medición rápida (RAP) en Simacota y El playón, siete por cada sitio según la metodología adaptada de Gentry (1982), cada RAP fue de (4 m x 25 m), abarcando un área total de muestreo de 1 400 m².

Los individuos de *T. cacao* (clon CNSS-51), fueron medidos de la siguiente manera: DAP a los 15 y 30 cm, diámetro de copa mayor y menor (DC), altura a la primera bifurcación (APB) y altura total (AT) y el estado fenológico (Apéndice F).

3.5.2 Residuos del cacao

La recolección de podas de cacao implica la toma sistemática de ramas que son eliminadas durante el mantenimiento de los cultivos, las podas se realizan dos veces al año. Este proceso se realizó después de la cosecha, asegurando que las podas sean frescas y en buen estado para su

aprovechamiento. La recolección y manejo de estos residuos orgánicos contribuye a la sostenibilidad del cultivo y a la producción de biocombustibles (Ortiz et al., 2021).

3.5.3 Elaboración de pellets

Se tomaron las especies, *C. gerascanthus* y *S. parahyba*, junto con *T. cacao* para realizar cuatro peletizaciones con las siguientes combinaciones, cada una con un peso de 1500 gramos (Tabla 1).

Tabla 1

Combinación de residuos

Combinación	Porcentaje
Residuos de <i>T. cacao</i> + <i>C. gerascanthus</i>	50%-50%
Residuos de <i>T. cacao</i> + <i>C. gerascanthus</i>	70%-30%
Residuos de <i>T. cacao</i> + <i>S. parahyba</i>	50%-50%
Residuos de <i>T. cacao</i> + <i>S. parahyba</i>	70%-30%

El proceso de peletización se realizó en el taller y laboratorio de materiales de mecánica de la Universidad de Pamplona (UP), para llegar al producto, se utilizó maquinaria industrial las cuales estaban a disposición del laboratorio, la recuperadora de materia prima trituró la biomasa residual para reducir su tamaño durante 10 minutos por combinación, para posteriormente compactarlo en la aglomeradora de materiales y finalmente cortarlos en la sierra caladora de banco.

Los pellets fueron elaborados a través de placas de 20 cm x 20 cm en la aglomeradora de materiales para cada combinación, con la finalidad de obtener el resultado, se realizaron ajustes de calibración de equipos para adecuar los parámetros de la máquina y proceder con los ensayos.

En el primer ensayo se utilizaron 200 gramos de material a una temperatura promedio de 60 ° C, presión de 689 500 (Pa) en un tiempo de 20 minutos, parámetros insuficientes para lograr la compactación, en el segundo ensayo se utilizaron 200 gramos de material a una temperatura promedio de 70 ° C, presión de 1 379 000 (Pa) en un tiempo de 20 minutos, buscando aumentar la presión sin lograr obtener la placa, se retoma este ensayo a una temperatura promedio de 70 ° C, presión de 2 758 000 (Pa) en un tiempo de 20 minutos, obteniendo una placa.

Finalmente, se utilizaron 200 gramos de material a una temperatura promedio de 80 ° C, presión de 3 447 500 (Pa) en un tiempo de 40 minutos para cada combinación. Posteriormente, se recortaron los pellets con dimensiones de 2 cm de largo x 1 cm de ancho usando una sierra caladora de banco.

3.5.4 Análisis de laboratorio

Los pellets se analizaron de forma bioquímica en el laboratorio de carbones de la universidad nacional (UN) sede Medellín, facultad de minas. Las muestras se enviaron con un peso de 50 (g) para cada combinación, se examinaron las siguientes variables; contenido de humedad, contenido de cenizas, material volátil, carbono fijo y poder calorífico, logrando así evaluar el potencial dendroenergético de la biomasa residual en las diferentes combinaciones.

3.5.5 Análisis estadísticos de los resultados

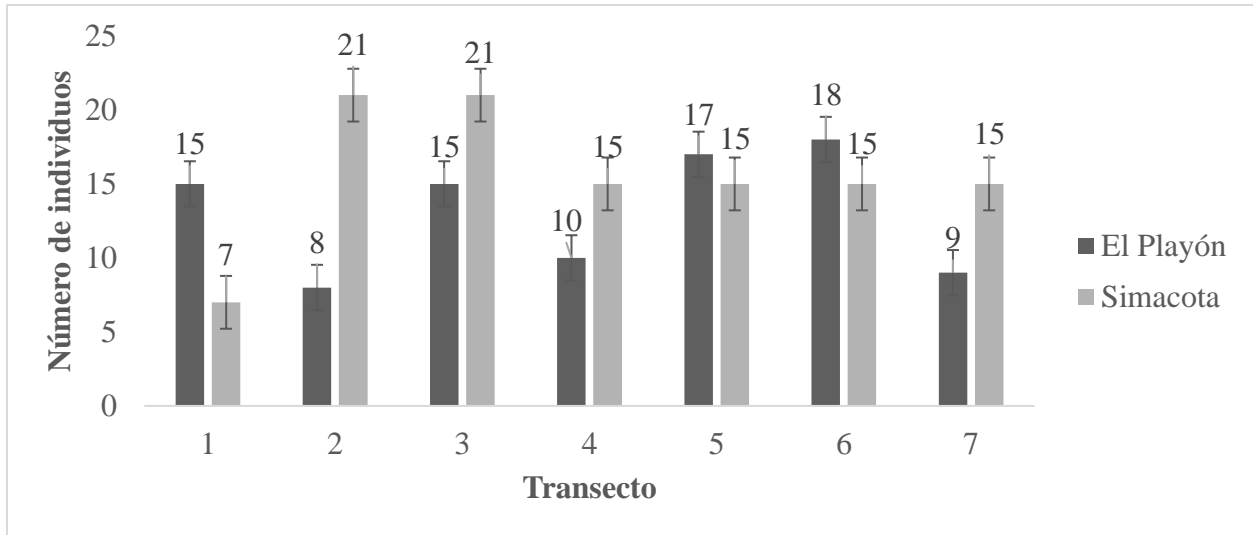
Los datos obtenidos se verificaron mediante modelos estadísticos que determinaron la correlación entre los tipos de ensayo, los parámetros que dieron veracidad a las variables tomadas en campo son la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación, las cuales permitieron describir el comportamiento de la información colectada.

El análisis y procesamiento de los resultados se desarrolló mediante Microsoft Excel y IBM SPSS Statistics 27, cada software contribuye con la organización, análisis y visualización de la información.

4. Resultados

Para cada una de las combinaciones se utilizaron 200 gramos de material sometidos a una temperatura promedio de 80 °C, con una presión de 3,447,500 (Pa) durante un tiempo de 40 minutos. Estas condiciones constituyeron las variables de proceso estandarizadas, las cuales permitieron llevar a cabo las pruebas bajo un marco técnico adecuado para la obtención de resultados estadísticamente confiables.

Los datos afirman que las plantaciones de *T. cacao* en Simacota (1435 individuos/ha) presentaron mayor número de individuos de cacao a diferencia de El Playón (1314 individuos/ha). En adición, la biomasa por hectárea es significativamente más alta en Simacota (0,44 t/ha), en contraste con El Playón (0,12 t/ha). Esta brecha está directamente relacionada con el DAP a 30 cm, para Simacota, los individuos alcanzan un valor promedio de 18,13 cm, frente a los 6,83 cm de El Playón. Los valores de DAP para los individuos y la biomasa reflejan que los individuos en Simacota acumularon más materia sólida, por ende, la fijación de carbono es mayor en Simacota (Figura 2).

Figura 2*Individuos de cacao por sitio*

La base como se determina indica el resultado obtenido directamente en el laboratorio, sin tener en cuenta la humedad ni otras condiciones previas de la muestra. Por su parte, la base como se recibe presenta el valor del material en el estado en que llega, con su contenido natural de agua o ligeras impurezas. La base seca representa el dato calculado tras eliminar por completo la humedad, mostrando únicamente el aporte del sólido (Tabla 2).

Tabla 2*Resultados muestra #1 T. cacao + C. gerascanthus 50/50*

ENSAYO/UNIDADES	Base como se determina	Base como se recibe	Base seca	Documento normativo
Humedad en la muestra de análisis % en masa	5,54	-	-	ASTM D3173 / D3173M – 17a
Determinación de humedad total % en masa	-	8,52	-	ASTM D3302 / D3302M – 22a
Determinación de cenizas en la muestra de análisis % en masa	2,64	2,56	2,79	ASTM D3174 – 12 (2018) e1
Material volátil en la muestra de análisis % en masa	75,71	73,32	80,15	ASTM D3175 – 20
Carbono fijo % en masa	16,11	15,6	17,05	ASTM D3172 – 13 (2021) e1
Determinación del poder calorífico en bruto en cal/g	4699	4551	4975	ASTM D5865 / D5865M – 19
Determinación del poder calorífico en bruto en J/g	19675	19054	20829	ASTM D5865 / D5865M – 19

Tabla 3*Resultados muestra #2 T. cacao + C. gerascanthus 70/30*

ENSAYO/UNIDADES	Base como se determina	Base como se recibe	Base seca	Documento normativo
Humedad en la muestra de análisis % en masa	5,66	-	-	ASTM D3173 / D3173M – 17a
Determinación de humedad total % en masa	-	8,69	-	ASTM D3302 / D3302M – 22a
Determinación de cenizas en la muestra de análisis % en masa	2,88	2,79	3,05	ASTM D3174 – 12 (2018) e1
Material volátil en la muestra de análisis % en masa	73,81	71,41	78,24	ASTM D3175 – 20
Carbono fijo % en masa	17,65	17,08	18,71	ASTM D3172 – 13 (2021) e1
Determinación del poder calorífico en bruto en cal/g	4599	4451	4875	ASTM D5865 / D5865M – 19
Determinación del poder calorífico en bruto en J/g	19254	18636	20409	ASTM D5865 / D5865M – 19

Tabla 4*Resultados muestra #3 T. cacao + S. parahyba 50/50*

ENSAYO/UNIDADES	Base como se determina	Base como se recibe	Base seca	Documento normativo
Humedad en la muestra de análisis % en masa	5,97	-	-	ASTM D3173 / D3173M – 17a
Determinación de humedad total % en masa	-	7,17	-	ASTM D3302 / D3302M – 22a
Determinación de cenizas en la muestra de análisis % en masa	2,41	2,38	2,56	ASTM D3174 – 12 (2018) e1
Material volátil en la muestra de análisis % en masa	74,54	73,59	79,27	ASTM D3175 – 20
Carbono fijo % en masa	17,08	16,86	18,16	ASTM D3172 – 13 (2021) e1
Determinación del poder calorífico en bruto en cal/g	4737	4677	5038	ASTM D5865 / D5865M – 19
Determinación del poder calorífico en bruto en J/g	19833	19580	21092	ASTM D5865 / D5865M – 19

Tabla 5*Resultados muestra #4 T. cacao + S. parahyba 70/30*

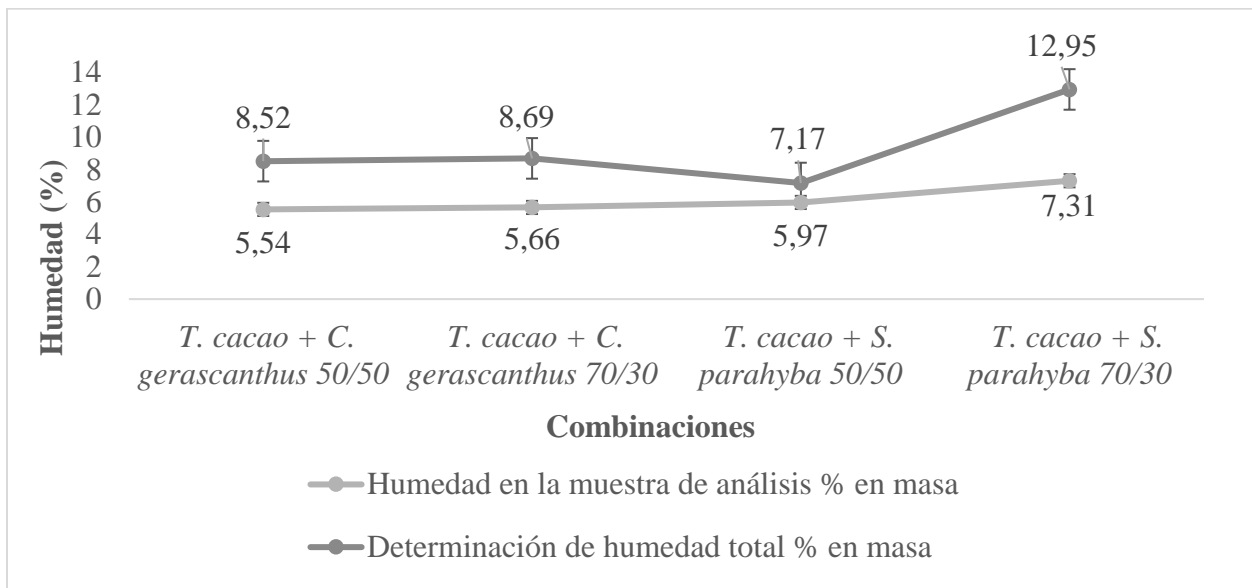
ENSAYO/UNIDADES	Base como se determina	Base como se recibe	Base seca	Documento normativo
Humedad en la muestra de análisis % en masa	7,31	-	-	ASTM D3173 / D3173M – 17a
Determinación de humedad total % en masa	-	12,95	-	ASTM D3302 / D3302M – 22a
Determinación de cenizas en la muestra de análisis % en masa	2,73	2,56	2,95	ASTM D3174 – 12 (2018) e1
Material volátil en la muestra de análisis % en masa	72,64	68,22	78,37	ASTM D3175 – 20
Carbono fijo % en masa	17,32	16,27	18,69	ASTM D3172 – 13 (2021) e1
Determinación del poder calorífico en bruto en cal/g	4564	4286	4924	ASTM D5865 / D5865M – 19
Determinación del poder calorífico en bruto en J/g	19108	17945	20615	ASTM D5865 / D5865M – 19

La combinación *T. cacao + S. parahyba 50/50* refleja que el contenido de humedad en la muestra de análisis es 5,97 % y la humedad total de 7,17 %, afirmando menor capacidad de retención de agua con una diferencia de 1,2 %, porcentaje respecto al peso de la madera seca, en términos de almacenamiento frente a condiciones ambientales variables. Por el contrario, la

combinación 70/30 generó un valor atípico en el contenido de humedad de 12,95 %, desconociendo el factor externo que causó el incremento diferencial de esta combinación en relación a las demás (Figura 3).

Figura 3

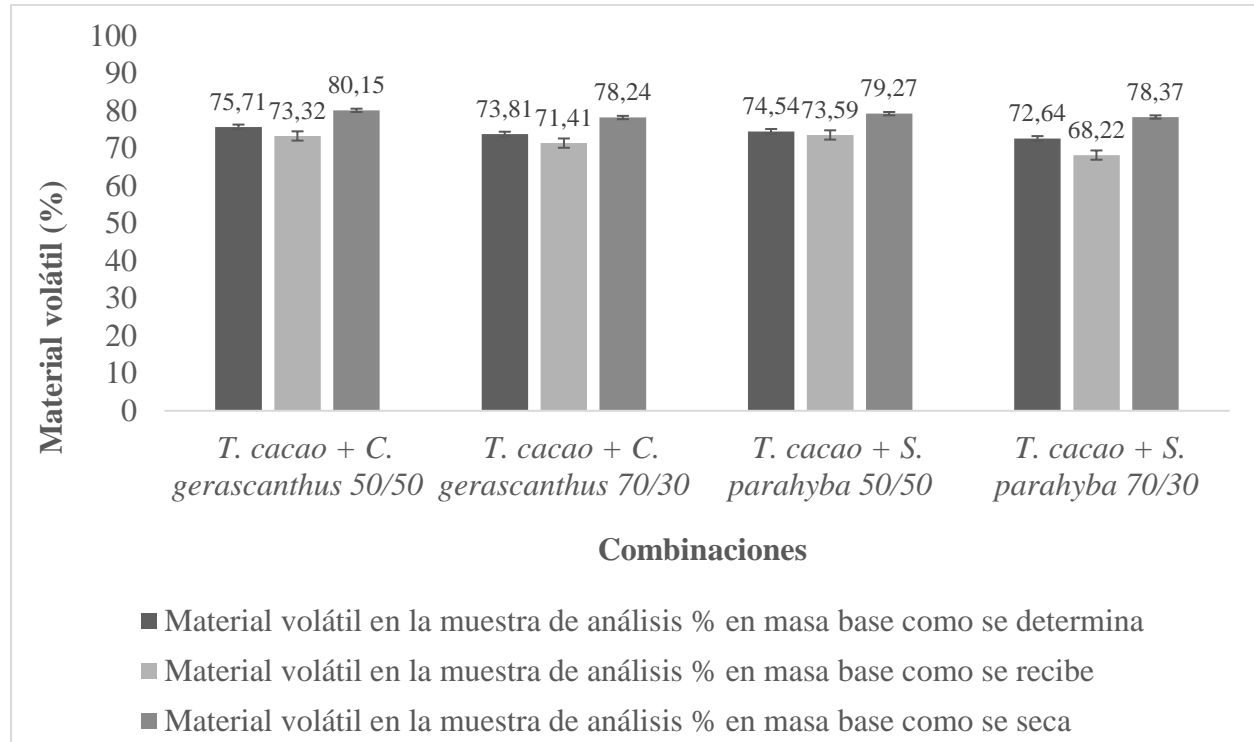
Determinación del contenido de humedad en la biomasa residual para la elaboración de pellets



En la base seca, el contenido de material volátil presentó un incremento de 4,44 %, 4,43 %, 4,73 % y 5,73 % en relación a la base como se determina, lo cual corresponde a la cantidad de gases y compuestos orgánicos que se liberan de la madera al calentarla en ausencia de aire, antes de que se produzca su combustión completa (Figura 4).

Figura 4

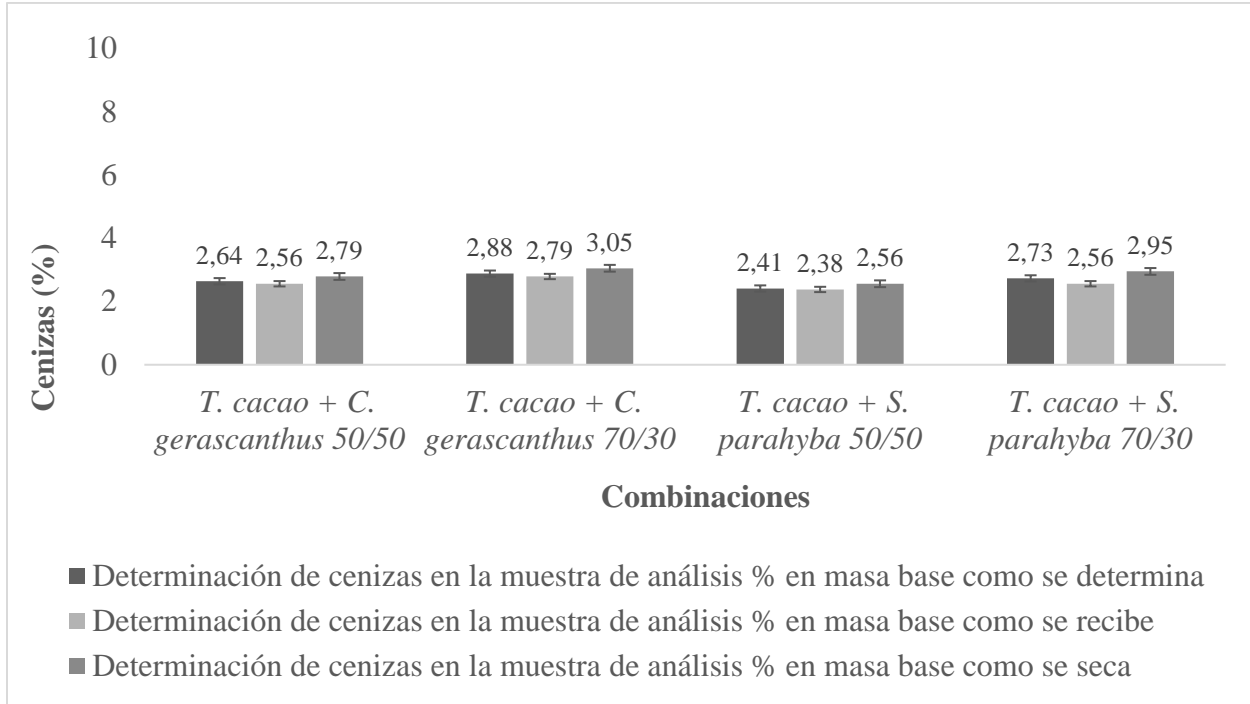
Caracterización del material volátil en la biomasa residual para la elaboración de pellets



En las combinaciones con *C. gerascanthus*, el contenido de cenizas es más alto para las tres bases al comparar las proporciones 50/50 y 70/30. La presencia de *C. gerascanthus* genera un incremento en el contenido de cenizas a diferencia de *S. parahyba*, residuo inorgánico no combustible que queda tras la incineración completa de una muestra de combustible (Figura 5).

Figura 5

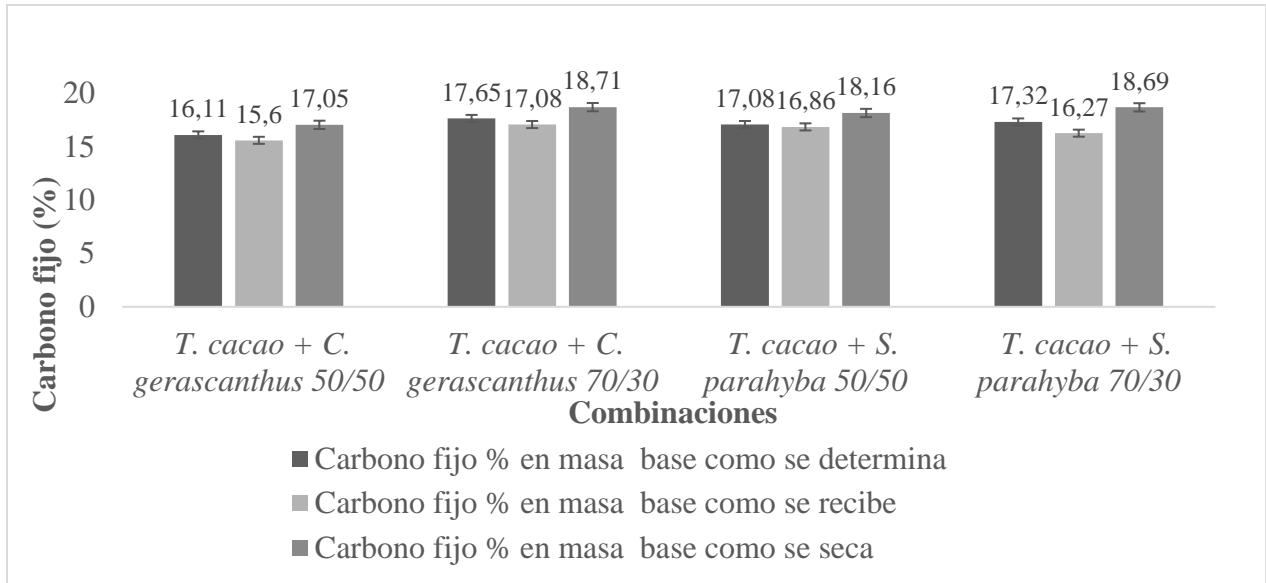
Caracterización de cenizas en la biomasa residual para la elaboración de pellets



Con la presencia de *T. cacao* la biomasa residual retiene más carbono en comparación con mezclas equilibradas, la mayor fijación de carbono en la base “como se determina” se presenta en *T. cacao + C. gerascanthus 70/30*, con 17,65 %, mientras que el valor más bajo ocurre en el 50/50 de la misma, con 16,11 %, lo que corresponde al residuo carbonoso combustible y no volátil que permanece en la muestra después de que la humedad, la materia volátil y las cenizas sean quemadas (Figura 6).

Figura 6

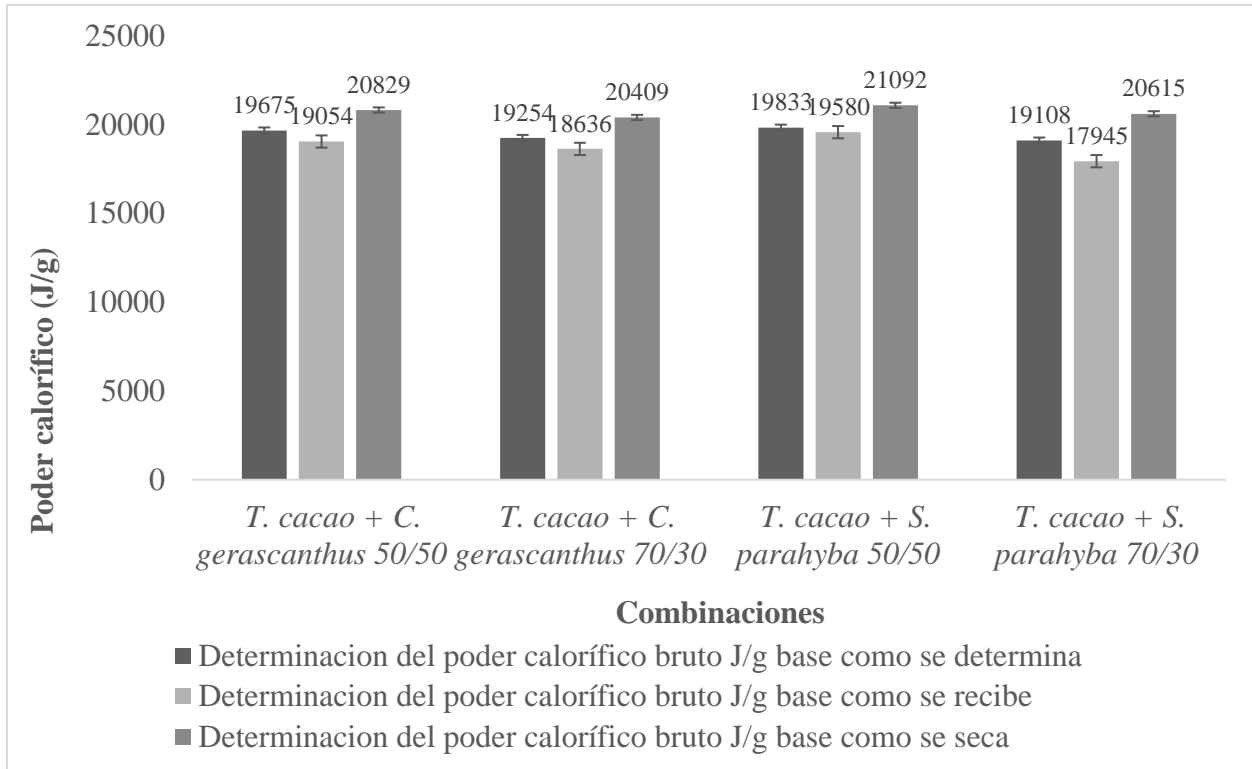
Caracterización de carbono fijo en la biomasa residual para la elaboración de pellets



La combinación con mayor poder calorífico, tomando como referencia la base “como se recibe”, corresponde a la mezcla *T. cacao* + *S. parahyba* 50/50, con 19 580 J/g. Las combinaciones equilibradas (50/50) presentaron valores superiores frente a las proporciones 70/30 en ambas especies, lo que evidencia que la distribución balanceada favorece el contenido energético de la biomasa, en particular donde existe mayor presencia de *S. parahyba* (Figura 7).

Figura 7

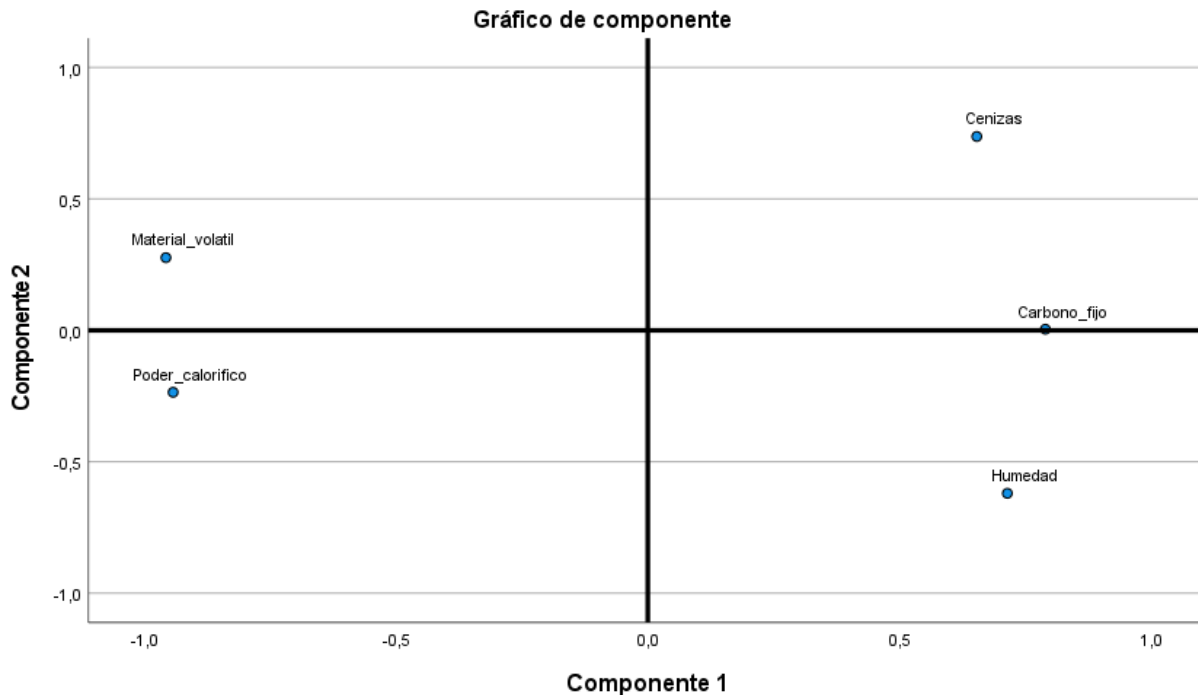
Cuantificación del poder calorífico en la biomasa residual para la elaboración de pellets



Los ensayos que se encuentran más lejos del origen (0,0) son los que más contribuyen a la variabilidad explicada por los componentes principales. Los presentes con ángulos pequeños y que se encuentran más cerca entre sí están positivamente correlacionados, no obstante, los ensayos que están en direcciones opuestas muestran correlación negativa. Si entre dos variables se forma un ángulo cercano a 90°, no se relacionan (Figura 8).

Figura 8

Componentes principales de los parámetros



5. Discusión

En Simacota se evidenció que la biomasa fue de 0,44 (t/ha) a diferencia de El Playón, donde la biomasa fue 0,12 (t/ha), para Hernández et al., (2015) se deben tener en cuenta variables como la densidad de árboles en el sistema agroforestal y el manejo del mismo, que también son factores que influyen en la captura y almacenamiento de carbono. En este sentido, los hallazgos de nuestro estudio complementaron estas observaciones, ya que, al evaluar parámetros físico-químicos de la biomasa residual para la producción de pellets, se identificó que las combinaciones con mayor proporción de *T. cacao* presentaron mayor porcentaje de carbono fijo, resaltando la importancia de estas plantaciones en la captura de carbono.

El presente estudio tuvo como propósito evaluar la calidad de pellets elaborados a partir de residuos de *T. cacao*, *C. gerascanthus* y *S. parahyba* aplicando procesos industriales combinados en condiciones controladas, 80 °C de temperatura, 3 447 500 (Pa) y 40 minutos de compactación. Esta metodología respondió al objetivo planteado, asegurando un marco técnico adecuado para el análisis posterior de las propiedades del biocombustible.

Los resultados concuerdan con los criterios definidos en la ISO 17225-2:2021, que evalúa la calidad de los pellets de madera, incluyendo contenido de cenizas, humedad y poder calorífico. El producto evidencia un potencial energético competitivo, la estandarización de los ensayos evaluados favorecen la estabilidad del biocombustible.

Sin embargo, a diferencia de lo reportado por Elniski et al. (2023), quienes fabricaron tres lotes de pellets utilizando una peletizadora de anillo a escala de laboratorio (Mini Pellet Mill) y determinaron la longitud según la ISO 17829:2015, Este estudio usó una aglomeradora de placas para compactar y generar la homogeneidad de los residuos. Esta diferencia metodológica destaca la variabilidad de los procesos de peletización y sugiere diferentes equipos siempre y cuando cumplan con los estándares de calidad, los cuales, pueden emplearse para transformar biomasa residual en biocombustibles eficientes.

El resultado de los componentes físico-químicos determina que la combinación *T. cacao* + *S. parahyba* 50/50, con 7,17 % de humedad total, valores en la muestra de análisis para cenizas de 2,41 % resaltando 21,09 MJ/kg de poder calorífico, logró las condiciones más favorables dentro del estudio. Estos parámetros cumplen lo establecido por la normativa ISO 17225-2:2021, que sugiere humedades ≤ 10 %, cenizas < 3 % y valores caloríficos superiores a 16 MJ/kg para biocombustibles sólidos confirmando la viabilidad del material evaluado.

Al confrontar con Morales et al. (2023), quienes obtuvieron pellets de residuos de *Pinus spp.* Con 15,3 % de humedad total, 0,43 % de cenizas y 17,6 MJ/kg, se afirma que, aunque sus cenizas son ligeramente inferiores, el contenido de humedad sobrepasa los límites establecidos limitando la eficiencia energética. Por consiguiente, el pellet del presente estudio muestra un mejor balance general entre humedad, cenizas y energía liberada bajo los parámetros establecidos de la ISO 18125:2022 para el cálculo del poder calorífico.

En contraste con los resultados de Saletnik et al. (2023), quienes examinaron pellets elaborados a partir de coníferas para fines de biocarbonos, el poder calorífico registrado 31,49 MJ/kg supera en gran medida los valores de esta investigación. Sin embargo, aunque identificaron un contenido mínimo de cenizas de 0,53 %, la media general de sus cenizas resultó superior a la recomendación de la ISO 17225-2:2021 con valores de 4,9 %.

En consecuencia, el pellet derivado de la mezcla *T. cacao* + *S. parahyba* 50/50 afirma ser una alternativa en la demanda energética de biocombustibles sólidos, ya que cumple con las especificaciones de la ISO 17225-2:2021 y afirma mediante la ISO 18125:2022 su capacidad para mantener el balance entre bajo contenido de humedad, reducida cantidad de cenizas y mayor poder calorífico siendo la combinación con mejores resultados.

Para la combinación *T. cacao* + *C. gerascanthus* 50/50, los parámetros evaluados determinan una humedad total de 8,52 % y un poder calorífico de 19,675 MJ/kg con porcentaje de cenizas de 2,64 % en la muestra de análisis. Estos valores se encuentran dentro de los rangos establecidos por la ISO 17225-2:2021, que recomienda humedades inferiores al 10 %, cenizas menores al 3 % y poderes caloríficos mayores a 16 MJ/kg para pellets sólidos. Por ende, la combinación cumple con los estándares internacionales, lo que confirma su desempeño de calidad como biocombustible sólido de origen residual (ISO, 2021).

En el caso de *T. cacao* + *C. gerascanthus* 70/30, la humedad total registrada fue de 8,69 %, el poder calorífico alcanzó 19,254 MJ/kg y el contenido de cenizas llegó a 2,88 % para la muestra de análisis. Los parámetros permanecen dentro de los límites propuestos por la ISO 17225-2:2021. No obstante, el aumento porcentual de cenizas en relación a la mezcla 50/50 indica una reducción en la calidad energética del pellet. De igual manera, su poder calorífico sigue siendo adecuado y la humedad estable, lo que lo mantiene como una opción eficiente (ISO, 2021).

En torno a la combinación *T cacao* + *S. parahyba* 70/30, los resultados muestran una humedad total de 12,95 % y en la muestra de análisis, un poder calorífico de 19,108 MJ/kg con un contenido de cenizas del 2,73 %. El aumento del contenido humedad excede lo pactado por la ISO 17225-2:2021, por ende, la eficiencia de combustión y la estabilidad del pellet se vería afectada durante el almacenamiento. A pesar de ello, su poder calorífico y el bajo nivel de cenizas mantienen características aceptables, aunque esta formulación requeriría ajustes en el secado para cumplir completamente con la normativa (ISO, 2021).

6. Conclusiones

Finalmente, la evaluación del potencial dendroenergético de la presente investigación, afirma que los residuos de *T. cacao*, *C. gerascanthus* y *S. parahyba* son biocombustibles eficientes. En este mercado de energías limpias, los derivados de aserríos y podas realizadas en sistemas de producción de cacao, surgen como una alternativa viable en la producción de pellets, logrando así, que el material que suele desperdiciarse, se convierta en una propuesta para la industria de negocios verdes en el departamento de Santander.

Al aplicar los procesos industriales establecidos para llegar al producto final, se concluye que cada maquinaria implementada contribuyó en la elaboración de los pellets; la unificación de

los residuos en un solo compuesto, solidificación del material mediante el prensado y herramientas de recorte, como resultante, un producto con dimensiones de 2cm de largo x 1 cm de ancho de forma rectangular.

El análisis de los parámetros físico-químicos determinaron la calidad de todas las combinaciones, exceptuando *T. cacao* + *S. parahyba* 70/30 debido a su alto contenido de humedad, por consiguiente, los hallazgos validan la importancia de ajustar los procesos de secado y selección de residuos para optimizar la calidad de los pellets. Someter el material a procesos de secado garantizan menor contenido de humedad y cenizas, ya que, al reducir al máximo estos dos componentes, la energía liberada en masa sería mayor, logrando así más poder calorífico.

7. Recomendaciones

Realizar procesos de secado antes de la peletización con el propósito de reducir el valor porcentual de humedad y cenizas.

Proponer alternativas en el proceso de peletización para optimizar tiempos en la fase de transformación del producto.

Promover capacitaciones técnicas en comunidades cacaoteras y centros de transformación de madera, con el fin de implementar prácticas sostenibles que fomenten el aprovechamiento de la biomasa residual para fines energéticos y económicos.

Incentivar investigaciones con énfasis en la biomasa residual tropical, integrando nuevas especies, combinaciones y tratamientos que garanticen los indicadores de calidad establecidos por la ISO 17225-2:2021.

Consolidar alianzas público-privadas que ayuden a la gestión, producción y comercialización de pellets derivados de biomasa residual, integrando modelos de negocios verdes que incentivan la gestión sostenible de los recursos en el departamento de Santander.

Referencias Bibliográficas

- Alvis, J., & Sotelo-Muñoz, M. (2009). Identificación de las causas que alteran el rendimiento de los equipos de extracción de madera. Estudio de tiempos y movimientos. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 7(2), 15-23.
- ASTM International. (2021). Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke (ASTM D3172-13(2021) e1). ASTM International.
- ASTM International. (2017). Standard Test Method for moisture in the analysis sample of coal and coke (ASTM D3173/D3173M-17a). ASTM International.
- ASTM International. (2018). Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal (ASTM D3174-12(2018) e1). ASTM International.
- ASTM International. (2020). Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke (ASTM D3175-20). ASTM International.
- ASTM International. (2022). Standard Test Method for Total Moisture in Coal (ASTM D3302/D3302M-22a). ASTM International.
- ASTM International. (2019). Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke (ASTM D5865/D5865M-19). ASTM International.
- Ayala Álvarez, I. R., Salas, A., Kruscalla, N., & Cerda González, S. R. (2021). Identificación de nuevas tecnologías para la elaboración de pellet destinado a calefacción (Doctoral dissertation, Universidad de Talca (Chile). Instituto de Innovación Basado en Ciencia).
- Catálogo virtual de flora del Valle de Aburrá. (n.d.). <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/>
- Decreto 2811 de 1974 - Gestor Normativo. (s/f). Gov.co. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1551>

- Durango Sánchez, C. A., & Bedoya Agudelo, U. E. (2024). Estrategias para la adaptación y mitigación del cambio climático, basadas en la sostenibilidad del sector pecuario en Colombia.
- Fahad, S., Chavan, S. B., Chichaghare, A. R., Uthappa, A. R., Kumar, M., Kakade, V., ... & Poczai, P. (2022). Agroforestry systems for soil health improvement and maintenance. *Sustainability*, 14(22), 14877.
- Fedemaderas. (2024). Informe sobre el desarrollo sostenible del sector forestal en Colombia. <https://www.fedemaderas.org>
- González trejo, j. I. (2021). Calidad de los residuos de madera y tecnologías propuestas para su aprovechamiento energético. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/112796>
- Hernández-Gómez, E., Hernández-Morales, J., Avendaño-Arrazate, C. H., López-Guillen, G., Garrido-Ramírez, E. R., Romero-Nápoles, J., & Nava-Díaz, C. (2015). Factores socioeconómicos y parasitológicos que limitan la producción del cacao en Chiapas, México. *Revista mexicana de fitopatología*, 33(2), 232-246.
- Herrera, G. (s/f). Ley 1665 de 2013 – Estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA). Gov.co. <https://www.anla.gov.co/07rediseureka2024/normativa/leyes/ley-1665-de-2013-estatuto-de-la-agencia-internacional-de-energias-renovables-irena>
- International Organization for Standardization. (2021). ISO 17225-2:2021 — Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 2: Graded wood pellets. ISO.
- International Organization for Standardization. (2022). ISO 18125:2022 — Solid biofuels — Determination of calorific value. ISO.

Intergovernmental Panel on Climate Change (2022). IPCC <https://www.ipcc.ch/>

ISO 172252:2021.(2021).ISO.<https://www.iso.org/es/contents/data/standard/07/60/76088.html>

Jekayinfa, S. O., & Enweremadu, C. C. (2024). Influence of Selected Processing Variables on Quality Attributes of Cocoa Pod-Husk Pellets.

John, N., Fathima, P. S., Harsha, V. S., Paul, N. M., & Nisha, P. (2024). Physical conversion of biomass: dewatering, drying, size reduction, densification, and

Congreso de la República de Colombia (1979). Ley 11 del 5 de marzo de 1979 “Por la cual se reconoce la profesión de bibliotecólogo y se reglamenta su ejercicio”. Bogotá: El Congreso separation. In Handbook of Biomass (pp. 987-1013). Singapore: Springer Nature Singapore.

Ley 99 de 1993 - Gestor Normativo. (s/f). Gov.co.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297>

Ley 1377 de 2010 - Gestor Normativo. (s/f). Gov.co.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=38687>

Ley 1715 de 2014 - Gestor Normativo. (s/f). Gov.co.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>

Montenegro Huesa, M., & Guayazán Ballesteros, A. R. (2003). Factibilidad de la producción de energía eléctrica a partir del aprovechamiento de los residuos industriales de la madera en la inmunizadora de maderas Serrano Gómez SA.

Morales-Máximo, M., García, C. A., Pintor-Ibarra, L. F., Alvarado-Flores, J. J., Velázquez-Martí, B., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2021). Evaluation and characterization of timber residues of *Pinus* spp. as an energy resource for the production of solid biofuels in an indigenous community in Mexico. *Forests*, 12(8), 977.

- Navarro, L., & Hosnar, D. (2018). Potencial energético de los residuos de la cadena de valor del cacao (*Theobroma cacao*) en la Región Madre De Dios.
- Ortiz et al., (2021). Agricultura circular: una estrategia sostenible para impulsar el agro colombiano
- Pandey, S. (2022). Wood waste utilization and associated product development from under-utilized low-quality wood and its prospects in Nepal. *SN Applied Sciences*, 4(6), 168.
- Pierdicca, R., Balestra, M., Micheletti, G., Felicetti, A., & Toscano, G. (2022). Semi-automatic detection and segmentation of wooden pellet size exploiting a deep learning approach. *Renewable Energy*, 197, 406-416.
- Plaza-Hernández, F. N. (2022). Fuentes energéticas renovables en Ecuador. *Perspectivas a futuro. Polo del Conocimiento*, 7(3), 1382-1394.
- Ramírez Candia, J. M. (2016). Biomasa residual agrícola con potencial energético en la provincia de Tocache, departamento de San Martín.
- Rojas-Molina, J., Ortiz-Cabrera, L., Escobar-Pachajoa, L. D., Rojas-Buitrago, M., & Jaimes-Suarez, Y. Y. (2021). Descomposición y liberación de nutrientes en biomasa por poda de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Rionegro, Santander, Colombia. *Agronomía Mesoamericana*, 888-900.
- Saletnik, B., et al. (2023). The use of wood pellets in the production of high-quality biocarbon materials. *Energies*, 16(8), 3456. <https://doi.org/10.3390/en16083456>
- Scudder, M., Wampe, N., Waviki, Z., Applegate, G., & Herbohn, J. (2022). Smallholder cocoa agroforestry systems; is increased yield worth the labour and capital inputs?. *Agricultural Systems*, 196, 103350.

- Stolarski, M. J., Stachowicz, P., & Dudziec, P. (2022). Wood pellet quality depending on dendromass species. *Renewable Energy*, 199, 498-508.
- Toscano, G. (2023). Standards and quality assessment of wood pellets: A global review. *Renewable Energy*, 206, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.041>
- United Nations Environment Programme (2025). We are all in this together - Annual Report 2024. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/47082>.
- Wolf, A., Vidlund, A., & Andersson, E. (2006). Energy-efficient pellet production in the forest industry—a study of obstacles and success factors. *Biomass and Bioenergy*, 30(1), 38-45

Apéndices

Apéndice A

Podas de cacao



Apéndice B

Triturado de las podas del cacao



Apéndice C.

Residuos de *C. gerascanthus*



Apéndice D.

Residuos de *S. parahyba*



Apéndice E

Mediciones del cacao



Apéndice F

Formato medición de las variables en cacao

MEDICIÓN DE VARIABLES DENDROMÉTRICAS EN SAF (CACAO)										
Municipio	Vereda	Finca		Clon	Coordenadas			Altitud		
Responsables		Años de soca		Densidad de siembra	Parcela	Área:				
#	Nombre científico	Nombre común	D ₁₅ (cm)	D ₃₀ (cm)	Altura total H (m)	Altura primera bifurcación (m)	Diámetro de copa mayor (m)	Diámetro de copa menor (m)	de	No. Surco

Apéndice G

Proceso de transformación para obtener el producto final



Apéndice H.

Producto final



Apéndice I

Muestras empacadas para sus respectivos ensayos en laboratorio



Apéndice J

Molino triturador de materiales

Motor eléctrico	4 HP, 1600 rpm
Transmisión	Por polea
Sistema	Doble cuchilla de acero en rotor
Tamiz	Agujeros de 5 mm
Tolva	Alimentación y estructura en acero
Voltaje	220 V
Procesamiento	Plásticos y material vegetal

Apéndice K

Aglomeradora de materiales

Capacidad del cilindro hidráulico	50 toneladas
Temperatura de trabajo	0 a 300 °C
Estructura	Rígida en acero estructural
Calentamiento	Molde por resistencias eléctricas de 1500 W
Indicador de presión	De 0 a 10.000 Psi
Tamaño de molde	200mm x 200mm x 12 mm
Molde	Modular para extracción de placas
Control de temperatura	Bizona de placa superior y placa inferior
Tiempo continuo de operación con calentamiento	Hasta 12 horas
Tiempo continuo de operación solo presión	De 24 a 36 horas
Voltaje de trabajo	110 V

Apéndice L

Resultados de laboratorio muestra #1 *T. cacao* + *C. gerascanthus* 50/50

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		INFORME DE RESULTADOS				Código: FAR-001	
		LABORATORIO DE CARBONES				Versión: 09	
						Solicitud: 409	
Ciudad	Medellín	Fecha	2025	08	29	Informe No. 25 - 293 A	
INFORMACIÓN DEL CLIENTE							
Nombre	RONALD ALFONSO MONTAÑEZ VALENCIA			NIT. o CC.	88031463		
Dirección	Calle 13 # 12 - 61			Teléfono	3214085148 3103609795		
Persona de contacto	Jesús Camilo Urrego López			Cargo	Docente		
Correo electrónico	ronald.montanez@correo.uis.edu.co, jesus2204154@correo.uis.edu.co			Ciudad	Málaga, Santander		
INFORMACIÓN DE LA MUESTRA							
Fecha de recepción	2025 08 27		Tipo de muestra	Biomasa	Solicitud No.	271	
					Código asignado por el laboratorio	250667	
Identificación asignada por el cliente			Muestra # 1, T. Cacao + C. gerascanthus 50 / 50				
Tipo de muestreo realizado por el cliente			No Suministrado				
RESULTADOS							
FECHA DE ANÁLISIS			ENSAYO UNIDADES	BASE COMO SE DETERMINA	BASE COMO SE RECIBE	BASE SECA	DOCUMENTO NORMATIVO
año	mes	día	Humedad en la muestra de análisis % en masa	5,54	--	--	ASTM D3173 / D3173M - 17a
2025	08	29	Determinación de humedad total % en masa	--	8,52	--	ASTM D 3302 / D3302M - 22a
2025	08	28	Determinación de cenizas en la muestra de análisis % en masa	2,64	2,56	2,79	ASTM D3174 - 12 (2018) e1
2025	08	29	Materia volátil en la muestra de análisis % en masa	75,71	73,32	80,15	ASTM D3175 - 20
2025	08	29	Carbono Fijo % en masa	16,11	15,60	17,05	ASTM D3172 - 13 (2021) e1
2025	08	28	Determinación de poder calorífico bruto cal/g	4699 *	4551 *	4975 *	ASTM D5865 / D5865M - 19
2025	08	28	Determinación de poder calorífico bruto J/g	19675 *	19054 *	20829 *	ASTM D5865 / D5865M - 19

*Resultado reportado sin corrección por cantidad de Azufre Total.

NOTAS

1. El presente informe sólo es válido con la firma autorizada por el Laboratorio de Carbones.
2. No está permitida la reproducción total o parcial del presente informe.
3. Los resultados reportados son de carácter confidencial, de propiedad del cliente y son válidos únicamente para las muestras recibidas. El muestreo y la cantidad de muestra recibida, son responsabilidad exclusiva del cliente.
4. La identificación de la muestra es proporcionada única y exclusivamente por el cliente y no es verificada por el laboratorio. El laboratorio no se hace responsable de su veracidad ni de la validez de los resultados si esta información es incorrecta.
5. Convenciones de unidades: % - Porcentaje, cal/g - Calorías por gramo, J/g - Julios por gramo.

Aprobó: 
PhD GUSTAVO NEIRA ARENAS
 Coordinador del Laboratorio

Elaboró: Ing. Ángela Hervo
 Auxiliar de Calidad

FIN DEL INFORME

Apéndice M

Resultados de laboratorio muestra #2 *T. cacao* + *C. gerascanthus* 70/30

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA	INFORME DE RESULTADOS						Código: FAR-001
	LABORATORIO DE CARBONES						Versión: 09
						Solicitud: 409	
Ciudad	Medellín	Fecha	2025	08	29	Informe No.	25 - 293 B
INFORMACIÓN DEL CLIENTE							
Nombre	RONALD ALFONSO MONTAÑEZ VALENCIA					NIT. o CC.	88031463
Dirección	Calle 13 # 12 - 61					Teléfono	3214085148 3103609795
Persona de contacto	Jesús Camilo Urrego López					Cargo	Docente
Correo electrónico	ronald.montanez@correo.uis.edu.co, jesus2204154@correo.uis.edu.co					Ciudad	Málaga, Santander
INFORMACIÓN DE LA MUESTRA							
Fecha de recepción	2025 08 27		Tipo de muestra	Biomasa		Solicitud No.	271
					Código asignado por el laboratorio	250668	
Identificación asignada por el cliente				Muestra # 2, T. Cacao + C. gerascanthus 70 / 30			
Tipo de muestreo realizado por el cliente				No Suministrado			
RESULTADOS							
FECHA DE ANÁLISIS			ENSAYO UNIDADES	BASE COMO SE DETERMINA	BASE COMO SE RECIBE	BASE SECA	DOCUMENTO NORMATIVO
año	mes	día					
2025	08	29	Humedad en la muestra de análisis % en masa	5,66	--	--	ASTM D3173 / D3173M - 17a
2025	08	29	Determinación de humedad total % en masa	--	8,69	--	ASTM D 3302 / D3302M - 22a
2025	08	28	Determinación de cenizas en la muestra de análisis % en masa	2,88	2,79	3,05	ASTM D3174 - 12 (2018) e1
2025	08	29	Materia volátil en la muestra de análisis % en masa	73,81	71,44	78,24	ASTM D3175 - 20
2025	08	29	Carbono Fijo % en masa	17,65	17,08	18,71	ASTM D3172 - 13 (2021) e1
2025	08	28	Determinación de poder calorífico bruto cal/g	4599 *	4451 *	4875 *	ASTM D5865 / D5865M - 19
2025	08	28	Determinación de poder calorífico bruto J/g	19254 *	18636 *	20409 *	ASTM D5865 / D5865M - 19

*Resultado reportado sin corrección por cantidad de Azufre Total.

NOTAS

1. El presente informe sólo es válido con la firma autorizada por el Laboratorio de Carbones.
2. No está permitida la reproducción total o parcial del presente informe.
3. Los resultados reportados son de carácter confidencial, de propiedad del cliente y son válidos únicamente para las muestras recibidas. El muestreo y la cantidad de muestra recibida, son responsabilidad exclusiva del cliente.
4. La identificación de la muestra es proporcionada única y exclusivamente por el cliente y no es verificada por el laboratorio. El laboratorio no se hace responsable de su veracidad ni de la validez de los resultados si esta información es incorrecta.
5. Convenciones de unidades: % = Porcentaje, cal/g = Calorías por gramo, J/g = Julios por gramo.

Aprobó: 
PhD GUSTAVO NEIRA ARENAS
 Coordinador del Laboratorio

Elaboró: Ing. Ángela Henao
 Auditor de Calidad

FIN DEL INFORME

Apéndice N


Resultados de laboratorio muestra #3 *T. cacao* + *S. parahyba* 50/50

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		INFORME DE RESULTADOS				Código: FAR-001	
		LABORATORIO DE CARBONES				Versión: 09	
						Solicitud: 409	
Ciudad	Medellín	Fecha	2025	08	29	Informe No. 25 - 293 C	
INFORMACIÓN DEL CLIENTE							
Nombre	RONALD ALFONSO MONTAÑEZ VALENCIA				NIT. o CC.	88031463	
Dirección	Calle 13 # 12 - 61				Teléfono	3214085148 3103609795	
Persona de contacto	Jesús Camilo Urrego López				Cargo	Docente	
Correo electrónico	ronald.montanez@correo.uis.edu.co, jesus2204154@correo.uis.edu.co				Ciudad	Málaga, Santander	
INFORMACIÓN DE LA MUESTRA							
Fecha de recepción	2025 08 27		Tipo de muestra	Biomasa	Solicitud No.	271	
					Código asignado por el laboratorio	250669	
Identificación asignada por el cliente				Muestra # 3, T. Cacao + S. Parahyba 50 / 50			
Tipo de muestreo realizado por el cliente				No Suministrado			
RESULTADOS							
FECHA DE ANÁLISIS			ENSAYO UNIDADES	BASE COMO SE DETERMINA	BASE COMO SE RECIBE	BASE SECA	DOCUMENTO NORMATIVO
año	mes	día					
2025	08	29	Humedad en la muestra de análisis % en masa	5,97	--	--	ASTM D3173 / D3173M - 17a
2025	08	29	Determinación de humedad total % en masa	--	7,17	--	ASTM D 3302 / D3302M - 22a
2025	08	28	Determinación de cenizas en la muestra de análisis % en masa	2,41	2,38	2,56	ASTM D3174 - 12 (2018) e1
2025	08	29	Materia volátil en la muestra de análisis % en masa	74,54	73,59	79,27	ASTM D3175 - 20
2025	08	29	Carbono Fijo % en masa	17,08	16,86	18,16	ASTM D3172 - 13 (2021) e1
2025	08	28	Determinación de poder calorífico bruto cal/g	4737 *	4677 *	5038 *	ASTM D5865 / D5865M - 19
2025	08	28	Determinación de poder calorífico bruto J/g	19833 *	19580 *	21092 *	ASTM D5865 / D5865M - 19

*Resultado reportado sin corrección por cantidad de Azufre Total.

NOTAS

1. El presente informe sólo es válido con la firma autorizada por el Laboratorio de Carbones.
2. No está permitida la reproducción total o parcial del presente informe.
3. Los resultados reportados son de carácter confidencial, de propiedad del cliente y son válidos únicamente para las muestras recibidas. El muestreo y la cantidad de muestra recibida, son responsabilidad exclusiva del cliente.
4. La identificación de la muestra es proporcionada única y exclusivamente por el cliente y no es verificada por el laboratorio. El laboratorio no se hace responsable de su veracidad ni de la validez de los resultados si esta información es incorrecta.
5. Convenciones de unidades: % = Porcentaje, cal / g = Calorías por gramo, J/g = Julios por gramo.


Aprobó: 
PhD GUSTAVO NEIRA ARENAS
 Coordinador del Laboratorio

Elaboró: Ing. Ángela Herreo
 Auditor de Calidad

FIN DEL INFORME

Apéndice O

Resultados de laboratorio muestra #4 T. cacao + S. parahyba 70/30

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA		INFORME DE RESULTADOS				Código: FAR-001	
		LABORATORIO DE CARBONES				Versión: 09	
						Solicitud: 409	
Ciudad	Medellín	Fecha	2025	08	29	Informe No. 25 - 293 D	
INFORMACIÓN DEL CLIENTE							
Nombre	RONALD ALFONSO MONTAÑEZ VALENCIA				NIT. o CC.	88031463	
Dirección	Calle 13 # 12 - 61				Teléfono	3214085148 3103609795	
Persona de contacto	Jesús Camilo Urrego López				Cargo	Docente	
Correo electrónico	ronald.montanez@correo.uis.edu.co, jesus2204154@correo.uis.edu.co				Ciudad	Málaga, Santander	
INFORMACIÓN DE LA MUESTRA							
Fecha de recepción	2025 08 27		Tipo de muestra	Biomasa		Solicitud No. 271	
					Código asignado por el laboratorio 250670		
Identificación asignada por el cliente			Muestra # 4, T. Cacao + S. Parahyba 70 / 30				
Tipo de muestreo realizado por el cliente			No Suministrado				
RESULTADOS							
FECHA DE ANÁLISIS			ENSAYO UNIDADES	BASE COMO SE DETERMINA	BASE COMO SE RECIBE	BASE SECA	DOCUMENTO NORMATIVO
año	mes	día					
2025	08	29	Humedad en la muestra de análisis % en masa	7,31	--	--	ASTM D3173 / D3173M - 17a
2025	08	29	Determinación de humedad total % en masa	--	12,95	--	ASTM D 3302 / D3302M - 22a
2025	08	28	Determinación de cenizas en la muestra de análisis % en masa	2,73	2,56	2,95	ASTM D3174 - 12 (2018) e1
2025	08	29	Materia volátil en la muestra de análisis % en masa	72,64	68,22	78,37	ASTM D3175 - 20
2025	08	29	Carbono Fijo % en masa	17,32	16,27	18,69	ASTM D3172 - 13 (2021) e1
2025	08	28	Determinación de poder calorífico bruto cal/g	4564 *	4286 *	4924 *	ASTM D5865 / D5865M - 19
2025	08	28	Determinación de poder calorífico bruto J/g	19108 *	17945 *	20615 *	ASTM D5865 / D5865M - 19

*Resultado reportado sin corrección por cantidad de Azufre Total.

NOTAS

1. El presente informe sólo es válido con la firma autorizada por el Laboratorio de Carbones.
2. No está permitida la reproducción total o parcial del presente informe.
3. Los resultados reportados son de carácter confidencial, de propiedad del cliente y son válidos únicamente para las muestras recibidas. El muestreo y la cantidad de muestra recibida, son responsabilidad exclusiva del cliente.
4. La identificación de la muestra es proporcionada única y exclusivamente por el cliente y no es verificada por el Laboratorio. El laboratorio no se hace responsable de su veracidad ni de la validez de los resultados si esta información es incorrecta.
5. Cconvenciones de unidades: % = Porcentaje, cal /g = Calorías por gramo, J/g = Julios por gramo.

Aprobó: 
PhD GUSTAVO NEIRA ARENAS
 Coordinador del Laboratorio

Elaboró: Ing. Ángela Henao
 Auxiliar de Calidad

FIN DEL INFORME