


Ariticulo Original

Comparativa energética y química de pellets de subproductos de *Coffea arabica* bajo el proceso de torrefacción en Siguatepeque, Honduras

Energy and Chemical Comparison of Coffea arabica By-Product Pellets Under the Torrefaction Process in Siguatepeque, Honduras

Eva Cristel Valladares Cruz*
Ingeniera en Energía Renovable, Investigador Independiente
Siguatepeque, Comayagua, Honduras
 ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6648-9149>

*Autor correspondiente: er.eva.valladares@gmail.com

Recepción: octubre de 2025. **Aceptación:** noviembre de 2025. **Publicación:** diciembre de 2025.

Como citar: Valladares Cruz, E. C. (2025). Comparativa energética y química de pellets de subproductos de *Coffea arabica* bajo el proceso de torrefacción en Siguatepeque, Honduras. *TATASCÁN*, 33(1), 1–11. <https://doi.org/10.5377/tatascn.v33i1.21700>

Resumen: La biomasa agrícola compuesta principalmente por hemicelulosa es una fuente de energía estudiada bajo procesos térmicos como la torrefacción. Debido al alto volumen de residuos del sector caficultor en Siguatepeque, se compararon las propiedades energéticas y composición química de pellets elaborados a partir de casulla y pulpa de café de la especie *Coffea arabica* denominados como PEcasut y PuPEt respectivamente en este estudio. Se utilizó un diseño completamente al azar con dos variables de temperatura (200°C y 300°C) durante 2 horas, generando 4 grupos muestrales y los respectivos grupos de control. Los resultados al comparar los grupos de control con los torrefactados arrojan que existen diferencias significativas para PEcasut en sus características energéticas en PC (+63.95 %), CH (-78.23 %) y CC (+98.7 %), en cambio son nulas en PuPEt para PC (+5.11 %) y CC (-25.3 %) a excepción del CH (+87.5 %); referente a su composición química se presentaron para C y N en ambos grupos, difiriendo del Cl que solo se presentaron en PuPEt. Es concluyente que, al someterse a este proceso, PEcasut obtuvo mejores características energéticas y químicas en comparación a PuPEt, ya que este último mostró variaciones mínimas pese al tratamiento aplicado.

Palabras clave: Características energéticas, composición química, PEcasut, PuPEt, torrefacción.

Abstract: Agricultural biomass composed primarily of hemicellulose is an energy source studied under thermal processes such as torrefaction. Due to the high volume of waste generated by the coffee sector in Siguatepeque, the energetic properties and chemical composition of pellets produced from coffee husk and coffee pulp of the species *Coffea arabica*, referred to in this study as PEcasut and PuPEt respectively, were compared. A completely randomized design was used with two temperature variables (200 °C and 300 °C) applied for 2 hours, generating four sample groups and their respective control groups. The results, when comparing the control groups with the torrefied groups, indicate that there are significant differences for PEcasut in its energetic characteristics in HHV (+63.95%), VM (-78.23%), and FC (+98.7%). In contrast, PuPEt showed no significant differences in HHV (+5.11%) and FC (-25.3%), except for VM (+87.5%). Regarding chemical composition, variations were observed in C and N for both groups, whereas Cl was only detected in PuPEt. It is concluded that, when subjected to this process, PEcasut exhibited superior energetic and chemical characteristics compared to PuPEt, as the latter showed minimal variations despite the treatment applied.

Keywords: Energy characteristics, chemical composition, PEcasut, PuPEt, roasting.

INTRODUCCIÓN

La producción de café se posiciona como el segundo mayor comercio mundial de materia prima después del petróleo de acuerdo con Enriquez et al. (2020). La Organización Internacional del Trabajo (2024) menciona que en Honduras, este representa más del 5% del PIB y cerca del 30% del PIB agrícola, por lo que, al ser un mercado altamente demandado, la generación de residuos tiende a causar problemáticas ambientales, sin embargo, estos pueden transformarse en energía mediante diversos procesos y mejorarse a través de otros procesos térmicos como la torrefacción, produciendo combustibles aprovechables en el marco de la generación con mejores rendimientos energéticos (Cabrera, 2018; Fernández et al. 2020; Heredia et al. 2016). Rupasinghe et al. (2023) determinó en su investigación al analizar los subproductos del café que pellets de pulpa y casulla de café poseen un PC de 15.76 MJ/kg y 16.96 MJ/kg respectivamente. Por otra parte, estudios basados en el mejoramiento de las características energéticas como el caso de Guillén & Dávila, (2014) han documentado en análisis comparativos de ciertas especies lignocelulósicas, poderes

caloríficos de biomasa que ha sido torrefactada y que no ha sido torrefactada, siendo de entre 20 – 22 MJ/kg y 17.7 MJ/kg. Autores como Cayo (2018) y Jaramillo et al. (2022) contribuyeron en este aspecto al destacar la relevancia de la temperatura en función del tiempo de residencia de la biomasa, debido a que conforme incrementa, existe una pérdida del rendimiento másico y del rendimiento energético, de la misma forma como asevera Bustamante-García et al. (2016), al establecer que la disminución del peso de la biomasa es causada por la reducción de la hemicelulosa y la lignina, los cuales son compuestos estructurales de la misma. Shankar-Tumuluru et al. (2012) señaló en su análisis elemental que, al aumentar la temperatura durante la torrefacción, se liberan gases condensables y no condensables, el contenido de C tiende a aumentar y los niveles de H y O disminuyen debido a la liberación de CO, CO₂ y H₂O. Por su parte, Bayona-Roa et al. (2023) establece que el contenido de Cloro tiende a disminuir la temperatura de fusión de las cenizas, aumentando su reactividad, por lo que, afecta las estructuras industriales como calderas; aunado a estos análisis elementales, Ros-Martínez (2021) señaló que parte del N que no reacciona, absorbe calor y reduce la energía disponible por unidad de masa del combustible, disminuyendo así el PC de la biomasa. Como es su objetivo, se pretende que la biomasa empleada en procesos energéticos cumpla con su propósito, no obstante, que no sea perjudicial para la vida útil de los equipos, ya que puede incrementar los costos operacionales y es por ello, que Pegoretti Leite de Souza (2020), menciona lo siguiente: “Es ideal que la biomasa presente altos contenidos de carbono e hidrógeno, y que posea bajos contenidos de oxígeno y cenizas para un mejor rendimiento energético” (p. 34), por lo que, conocer su composición es crucial en las operaciones. Sin embargo, la torrefacción también presenta otro tipo de comportamientos y de acuerdo con Shankar-Tumuluru et al. (2012) y Rupasinghe et al. (2023) el contenido de cenizas de la biomasa tiende a aumentar, debido a los altos niveles de metales alcalinos y la pérdida de materia orgánica, siendo este último el factor que reduce la durabilidad mecánica de los pellets. Bajo esta premisa, con esta investigación se pretende comparar las características energéticas y la composición química de pellets de subproductos de Coffea arabica torrefactados en Siguatepeque, Comayagua, Honduras, a partir de una hipótesis de investigación que establece que existen diferencias significativas entre PEcasut¹ y PuPEt²; y su contraparte, una hipótesis nula que establece la ausencia de dichas diferencias.

MATERIALES Y MÉTODOS

Enfoque, alcance y diseño de la investigación

Con un enfoque cuantitativo y un alcance explicativo, la evaluación se basa en un diseño experimental puro completamente al azar con posprueba únicamente y grupo de control, implementando la torrefacción como tratamiento, convirtiéndola en una variable independiente que, a su vez, incluye dos parámetros de ejecución: temperatura (T) y tiempo (t). Las variables dependientes son las características energéticas: poder calorífico (PC), contenido de humedad (CH) y contenido de cenizas (CC); físico-mecánicas: diámetro, longitud, durabilidad mecánica y friabilidad; y químicas: contenido de cloruros (Cl), contenido de Carbono (C) y contenido de nitrógeno (N). De acuerdo con Hernández Sampieri et al. (2014) explica que este diseño es adecuado para grupos experimentales y de control, permitiendo diferentes modalidades en la manipulación de la variable independiente, por lo que, en esta investigación se determinó un tiempo constante de 2h y 2 temperaturas (200 °C y 300 °C) generando los grupos muestrales³ PEcasut-2T, PEcasut-3T, PuPEt-2T y PuPEt-3T con sus correspondientes grupos de control denominados como PEcasut-NT y PuPEt-NT, con 3 repeticiones por T y biomasa, generando 18 subgrupos.

La Tabla 1 muestra la distribución de la torrefacción en el diseño experimental

Tabla 1
Distribución de la torrefacción en el diseño experimental

Tipo de pellets		No. repetición	T ₁ de torrefacción	T ₂ de torrefacción
PEcasut-NT	PuPEt-NT	1	200 °C	300 °C
PEcasut-NT	PuPEt-NT	2	200 °C	300 °C
PEcasut-NT	PuPEt-NT	3	200 °C	300 °C

Nota. Cada repetición se realizó en el reactor con 1.8 kg de pellets por biomasa y temperatura.

Trabajo de campo

Para la transformación de la materia en pellets torrefactados, es necesario emplear ciertos procedimientos unitarios que logren el propósito tal como se muestra en la Figura 1. Sin embargo, en esta investigación se realizó una modificación en dicha secuencia, debido a la ausencia de una máquina peletizadora de carbón, por lo que, se antepuso la peletización a la torrefacción para su viabilidad, las cuales son descritas a continuación.

¹ Nombre genérico de Pellets de Casulla de Café

² Nombre genérico de Pellets de Pulpa de Café

³ Los grupos muestrales con nombres genéricos PEcasut-XT y PuPEt-XT poseen una variación correspondiente a su tratamiento de la siguiente forma: NT = No Torrefactados; 2T = Torrefactados a 200 °C; 3T = Torrefactados a 300 °C.

Figura 1
Secuencia para la producción de pellets torrefactados



Nota. Obtenido de Guillén & Dávila, (2014).

Diseño del reactor de torrefacción

Posterior a investigaciones de los diferentes reactores de torrefacción, funcionamientos y posturas, se fabricó un torrefactor experimental a base de leña. Siendo de índole experimental, se diseñó con medidas reducidas: una cámara de hierro dúctil de 3 mm de espesor, diámetro de 23 cm y altura de 27 cm; la cámara fue suspendida a 0.3 m para crear una cámara de combustión que induzca el gradiente de temperatura en el interior del reactor. La estructura total es de 2.5 m de altura, con un recubrimiento metálico de 0.9 m de alto, 0.32 m de ancho y 0.38 m de largo, y un tiro atmosférico de 1.7 m; fue instalado un termómetro de la marca Messen con una carátula de 3 pulg. y un máx. de 500 °C.

Recolección de la biomasa

La recolección de biomasa se llevó a cabo en las afueras del municipio de Siguatepeque, un área conocida por sus fincas y beneficios de café. Se recolectaron 2 sacos de casulla de café y 4 sacos de pulpa de café en la comunidad de Buena Vista, propiedad de un caficultor con diversas variedades de *Coffea arabica*. Cabe destacar que la casulla se encontró en estado seco, mientras que la pulpa en estado húmedo, lo cual es resultado del orden en el procesamiento del café durante su extracción.

Secado de la biomasa

La casulla de café recolectada no requirió un proceso de secado, ya que se obtiene tras el trillado del café. Sin embargo, la pulpa, que es extraída en su estado de cereza, es rica en humedad y materia orgánica, por lo que necesita secado, el cual fue realizado de forma convencional bajo el sol. Es esencial secar la biomasa antes de pulverizarla y reducir su contenido de humedad a 10-12% para obtener pellets con 8-12% de humedad, ya que de acuerdo con Rodríguez (2019), el agua no puede eliminarse por completo debido a su capacidad higroscópica y efecto ligante en la peletización.

Chipeado de la biomasa

La pulpa y la casulla de café tienen tamaños de partículas diferentes, por lo que, según Correa-Méndez et al. (2014), para la elaboración de pellets se requiere materia prima con partículas finas de menos de 1 mm, ya que las partículas mayores a 1 mm tienden a tener menor durabilidad mecánica. Las partículas de la casulla de café son pequeñas y finas, no requirieron chipeado, no obstante, la pulpa sí lo necesitó para garantizar la homogeneidad de la biomasa en la fabricación de pellets mediante una chipeadora, debido a sus grandes proporciones.

Peletizado de la biomasa

La peletización de la biomasa requiere condiciones específicas como un contenido adecuado de humedad (10-12%) que actúe como aglutinante, así como la temperatura y presión adecuadas según la biomasa utilizada (Rupasinghe et al. 2023). En este estudio, se utilizaron tres máquinas peletizadoras con las mismas características en ambos subproductos, generando dos tipos de pellets con tres repeticiones cada uno: PEcasut-NT, a partir del 100% de casulla de café no torrefactada y PuPET-NT, del 100% pulpa de café no torrefactada. El CH medido previo a la peletización para la casulla de café: 12%, 15%, y 13%; y la pulpa de café: 10.5%, 11.5%, y 13%. Posterior a la peletización, los pellets deben reposar debido a las altas temperaturas alcanzadas para generar consistencia y resistencia.

Torrefacción de la biomasa

Como prueba del reactor de torrefacción, se introdujeron pequeños trozos de madera que resultaron en biocarbón sin combustión espontánea, por lo que se determinó exitosa. Sin embargo, los gases de pirólisis, denominados alquitranes, salieron por el ducto del termómetro, dejándolo inutilizable. Shankar-Tumuluru et al. (2021) mencionan que la volatilización de alquitranes ocurre en áreas donde se presentan altas temperaturas y su condensación, por el contrario, ocurre en regiones de baja temperatura, como ductos de escape. La torrefacción de la biomasa se realizó en la misma proporción que la peletización: tres repeticiones por biomasa y temperatura (200 °C y 300 °C). Este proceso se llevó a cabo con 1.8 kg de pellets por tipo de biomasa y con un enfriamiento de 2 horas dentro del equipo; a partir del tratamiento aplicado, se originaron cuatro grupos muestrales adicionales, denominados como PEcasut-2T, PEcasut-3T, PuPET-2Ty PuPET-3T. Adicionalmente fue documentado el consumo de leña necesario para alcanzar las temperaturas estipuladas, sin embargo, con la experimentación fueron aprovechados los gases de pirólisis, lo que disminuyó el consumo de leña en la operación, volviendo el proceso más eficiente en cuanto a su combustible.

La Tabla 2 muestra los grupos de pellets torrefactados

Tabla 2
Grupos de pellets torrefactados

Descripción de los pellets posterior a la torrefacción				
Nombre genérico	Composición	Estado de la biomasa	T de torrefacción	Masa resultante
PEcasut-2T	Casulla de café al 100 %	B. torrada	200 °C	0.79 kg
PEcasut-3T	Casulla de café al 100 %	B. torrada	300 °C	0.82 kg
PuPET-2T	Pulpa de café al 100 %	B. torrada	200 °C	0.56 kg
PuPET-3T	Pulpa de café al 100 %	B. torrada	300 °C	0.61 kg

Nota. La tabla muestra los grupos de pellets torrefactados con la cuantificación del rendimiento másico resultante posterior al tratamiento, considerando que fueron ingresados 1.8 kg.

Mediciones de variables

Fueron realizadas las pruebas físico-mecánicas para determinar su friabilidad, densidad y durabilidad mecánica, además de sus dimensiones. Dichas pruebas son realizadas con el fin de determinar su viabilidad de producción, lo que permite reducir los costos de transporte y operación de acuerdo con la literatura. Se hizo uso de una balanza OHAUS modelo PA4202, un vernier digital de la marca Calipers y una cinta métrica, empleando la metodología planteada por Paz Fernández, (2024) para la determinación de las características físico-mecánicas.

Diámetro y longitud

Para medir las dimensiones de los pellets, se empleó un vernier digital Calipers, midiendo el diámetro y la longitud de 50 pellets seleccionados aleatoriamente de cada grupo generado durante la investigación. Estas mediciones permitieron el análisis posterior de las características físicas de los pellets.

Densidad (ρ)

Para la determinación de la densidad se utilizó un biker de laboratorio, la balanza OHAUS y los grupos muestrales obtenidos, donde se cuantificó la masa que ocuparon los pellets dentro del recipiente, analizada con la ecuación descrita por Cengel & Boles, (2011):

Ecuación 1

Cálculo de la densidad

$$\rho = m/V$$

Nota. ρ = densidad, m = masa y V = volumen.

Durabilidad mecánica (DM)

Para evaluar la durabilidad mecánica, se seleccionaron al azar tres pellets de las muestras y se pesaron en una balanza OHAUS modelo PA4202. Luego, se dejaron caer desde 1.8 m de altura sobre una superficie lisa repitiendo este proceso tres veces, posteriormente se pesaron los fragmentos grandes apartados tras cada caída. Este procedimiento se repitió tres veces por grupo muestral y se aplicó la ecuación correspondiente descrita por Méndez Santos (2020) para calcular el promedio; esta variable define una mayor resistencia a los golpes, permitiendo su movilidad.

Ecuación 2

Cálculo de la durabilidad mecánica

$$DM = \left(m_f / m_i \right) * 100$$

Nota. DM = durabilidad mecánica (%); m_f = masa final (g) y m_i = masa inicial (g), multiplicado por 100 para calcular un porcentaje.

Friabilidad (FR)

La friabilidad se calcula a partir del método del golpe, el cual consiste en dejar caer 10 pellets aleatorios de los grupos muestrales desde una altura de 1 m, para luego contar el número de pelles que se rompen en 2, 3, 4 o más pedazos para generar un índice de friabilidad a partir de la ecuación 3 descrita por Méndez Santos (2020). Esta variable permite evaluar la resistencia de los pellets a la fragmentación.

Ecuación 3

Cálculo del Índice de friabilidad

$$FR = \frac{N_f}{N_i}$$

Nota. *FR* = Índice de Friabilidad; *N_f* = número final de pellets; *N_i* = el número inicial; este índice es adimensional y su valor mínimo es 1. Cuanto más lejano sea a 1, mayor es la friabilidad y menor la resistencia al golpe.

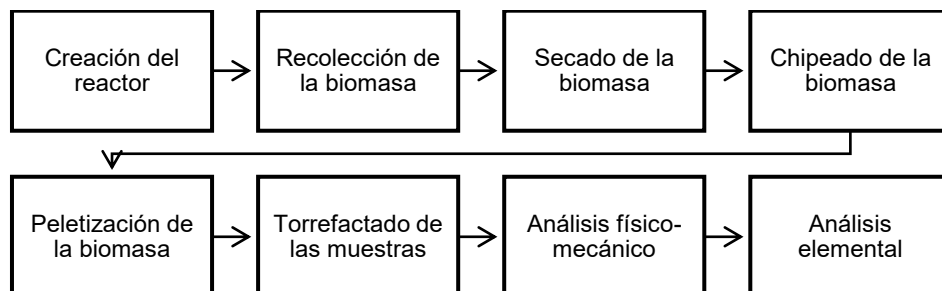
Características energéticas y composición química

Aleatoriamente, se seleccionaron grupos muestrales torrefactados para analizar sus características energéticas y composición química, siendo el grupo de 200 °C para la casulla (PEcasut) y de 300 °C para la pulpa de café (PuPEt) debido a factores económicos. Además de realizarse análisis en los grupos de control de cada tipo de biomasa para un comparativo postratamiento. Estos fueron enviados a dos laboratorios especializados, siendo El Laboratorio Choloma Electric Power Corporation (CEPCO) donde se analizó el poder calorífico (PC), contenido de humedad (CH) y contenido de cenizas (CC), mientras que el Laboratorio Químico de la Fundación Hondureña de Investigación Agrícola se encargó de los análisis químicos, determinando los contenidos de Carbono (C), Nitrógeno (N) y cloruros (Cl).

La Figura 2 muestra una secuencia lógica del trabajo de campo y medición de variables.

Figura 2

Secuencia para la producción de pellets torrefactados



Nota. Elaboración propia.

RESULTADOS

Características físico-mecánicas

Dimensiones

Las dimensiones de los pellets, siendo diámetro y longitud, fueron analizadas por separados, determinándose que existen diferencias significativas respecto al diámetro entre los que fueron torrefactados (\bar{x} = 5.3 mm) y los que no lo fueron (\bar{x} = 6.2 mm) en ambas clases, diferencia atribuida a la pérdida de materia. Por otro lado, la longitud de los pellets varió significativamente entre los grupos de PEcasut, mientras que para los PuPEt no se encontraron diferencias significativas en sus longitudes, ubicándose con valores desde 17.55 mm hasta 25.6 mm.

Densidad (ρ)

El análisis estadístico de la densidad muestra diferencias significativas para ambos tipos de pellets y el tratamiento aplicado. En una perspectiva total, PEcasut posee una menor densidad que PuPEt, tanto para antes del tratamiento como después de él con una densidad promedio de 683.87 kg/m³ (NT), 302.69 kg/m³ (2T) y 290.72 kg/m³ (3T); por otra parte, PuPEt arrojaron una densidad promedio de 782.87 kg/m³ (NT), 493.26 kg/m³ (2T) y 471.7 kg/m³ (3T).

Friabilidad (*FR*)

El análisis de la friabilidad, basado en pruebas estadísticas, mostró que no existen diferencias significativas en la friabilidad de los pellets de casulla entre los torrefactados y los no torrefactados. Sin embargo, para los pellets de pulpa de café, sí se encontraron diferencias significativas entre los pellets testigo y aquellos que fueron tratados.

Durabilidad mecánica (*DM*)

Los resultados mostraron que no existen diferencias significativas entre los pellets torrefactados y los no torrefactados para ambas clases de pellets en cuanto a la durabilidad mecánica. La durabilidad mecánica para PEcasut es de 84 %, 69% y 68 %

en los grupos NT, 2T y 3T; en cambio para PuPEt son de 93 %, 82 % y 75 % para el mismo orden de grupos, encontrándose con una mayor resistencia en los pellets no torrefactados.

Características energéticas

Poder calorífico (PC)

El PC posee 2 clasificaciones, siendo el PCS que considera la energía contenida en la condensación del agua y el PCI que no lo hace, por lo que, este último en base húmeda es conveniente en sistemas de aprovechamiento como calderas, debido a que tiende a una estimación real en cálculos para dimensionamientos energéticos.

La Tabla 3 muestra los resultados del PCI para ambas clases de pellets

Tabla 3
Resultados del PCI para ambas clases de pellets

Resultados del Poder Calorífico Inferior de PEcasut y PuPEt				
Tipo de PC	Tipo de base	Grupo muestral	\bar{x} en MJ/kg	Resultado
PCI	Base húmeda	PEcasut-NT	16.92	A
		PEcasut-2T	30.08	B
		PuPEt-NT	11.45	C
		PuPEt-3T	14.09	D
	Base seca	PEcasut-NT	18.72	A
		PEcasut-2T	30.69	B
		PuPEt-NT	13.68	C
		PuPEt-3T	14.38	C

Nota. La tabla muestra el promedio de los resultados en MJ/kg con el resultado correspondiente a partir de las diferencias significativas, donde cada base fue analizada de forma independiente.

Para la base húmeda, fueron establecidas diferencias significativas en ambos grupos de pellets, encontrándose mejores resultados en PEcasut antes y después del tratamiento que en PuPEt; en cambio, para la base seca solo se determinaron diferencias significativas en PEcasut, no obstante, fueron ausentes en PuPEt. Al comparar los mismos grupos torrefactados en BS y BH⁴, la diferencia entre los resultados es mínimo debido al bajo CH en ambas clases de pellets.

Contenido de Humedad (CH)

A partir de los análisis calorimétricos, se evaluó el CH en BH de las muestras seleccionadas, determinando que existen diferencias significativas tanto para PEcasut como para PuPEt. Las medias de CH son de 8.52 % (PEcasut-NT), 1.85 % (PEcasut-2T), 13.84 % (PuPEt-NT) y 1.73 % (PuPEt-3T); debido a que la BS elimina el CH presente en la biomasa y la torrefacción también lo redujo, este conjunto de factores puede explicar la similitud en los resultados de PCI de los pellets torrefactados en base seca y base húmeda.

Contenido de Cenizas (CC)

El contenido de cenizas es un dato fundamental en ciertos procesos, por lo que, al analizarse estadísticamente, no se encontraron diferencias significativas entre los pellets no torrefactados y los pellets torrefactados, tanto para PEcasut como para PuPEt. No obstante, de acuerdo con los datos tabulados, es posible observar que los mayores contenidos de cenizas corresponden a los pellets torrefactados, tanto para PEcasut-2T como para PuPEt-3T, con un incremento de 98.7 % para PEcasut y un 25.3 % más para PuPEt (Ver Tabla 5 para consultas de datos). En un enfoque generalizado es evidente que los pellets de pulpa de café tienen un mayor contenido de cenizas que los pellets de casulla de café.

Composición química

Contenido de Carbono (C)

El análisis de Carbono arrojó que sí se encuentran diferencias significativas para PEcasut-NT (\bar{x} = 49.73 %) y PEcasut-2T (\bar{x} = 47.21 %), siendo evidente una disminución en este análisis del 2.52 %; de igual forma, se presentan diferencias significativas

⁴ Base seca y base húmeda

entre PuPet-NT y PuPet-3T donde se determinó un contenido del 31.39 % y 26.47 % para cada una respectivamente, con una diferencia de 4.92 %. De acuerdo con los resultados en una escala general, se observa una disminución del contenido de Carbono en los pellets posterior a la torrefacción, la cual puede atribuirse a que, debido a su gran cantidad de hemicelulosa en su composición estructural, este fue degradado y liberado como reacción química en otros compuestos moleculares.

Contenido de Cloruros (Cl)

El análisis de los datos mostró que sí existen diferencias significativas en el contenido de cloruros (Cl) para los pellets de pulpa, sin embargo, los mismos arrojan que no hay diferencias significativas para los pellets de casulla, donde se presenta un contenido de 0.03 % para PEcasut-NT y un 0.04 % de PEcasut-2T, lo que indica un aumento mínimo posterior a la torrefacción; en cambio para los pellets de pulpa se determinaron contenidos de 0.32 % para los que no recibieron el tratamiento y 0.54 % para los que sí lo recibieron, con un incremento de aproximadamente el 61 % posterior a la torrefacción en este tipo de biomasa.

Contenido de Nitrógeno (N)

Referente al contenido de N, se evidenció la presencia de diferencias significativas en ambas clases de pellets, donde los pellets de casulla poseen un contenido de N de 1.01 % en PEcasut-NT y de 0.6 % en PEcasut-2T, lo que representa una reducción del 41 % tras la torrefacción. En el caso de pellets de pulpa, se observó un incremento en el contenido de N posterior a la torrefacción, con un aumento del 49 % que, de acuerdo con los análisis elementales, los PuPet-NT tienen una composición de N del 2.27 % que subió a 2.77 % en los PuPet-3T.

DISCUSIÓN

La peletización aunado a la torrefacción muestra una diferencia entre sus propiedades y Rupasinghe et al. (2023) que cuantificó el PC de pellets de casulla (16.96 MJ/kg) y pulpa (15.76 MJ/kg) de café, así como Guillén y Dávila (2014), registraron incrementos en el PC de hasta 24 % tras la torrefacción en especies lignocelulósicas. Tal es el caso que esta investigación coincidió que pellets de casulla poseen un PC de 16.92 MJ/kg, mayor que los de pulpa, los cuales poseen un PC de 11.45 MJ/kg, no obstante, posterior al tratamiento implementado, se presentaron aumentos del 77 % en los PEcasut-2T (30.08 MJ/kg) y 23 % en los PuPet-3T (14.09 MJ/kg).

El CH es crucial para la viabilidad del combustible, por lo que los pellets de casulla sin el proceso de torrefacción presentaron un CH en BH de 8.52 %, y los de pulpa un 13.84 % de CH. Tras la torrefacción, el CH de los pellets de casulla mostraron un 1.85 % y los de pulpa un 1.73 %, con una reducción notable de la humedad en un 78.23 % y 87.5 % respectivamente. Un menor CH significa un mayor aprovechamiento energético y la reducción de formación de ácido carbónico (H_2CO_3), que puede causar corrosión en calderas y tuberías de vapor, como se ha documentado en estudios anteriores (Bustamante-García et al. 2016).

El contenido de cenizas aumentó en los pellets torrefactados, con incrementos del 98.7 % para PEcasut y 25.3 % para PuPet y de acuerdo con Shankar-Tumuluru et al. (2012) este aumento es asociado por los altos niveles de metales alcalinos y la pérdida de materia orgánica durante la termodegradación de la biomasa, donde también Bustamante-García et al. (2016) adiciona en su estudio sobre los efectos negativos del CC al aseverar que un alto contenido de cenizas puede facilitar la formación de escoria y corrosión en metales, tal como equipos de presión.

Sin embargo, con la torrefacción se indujeron otros efectos en sus propiedades, donde la durabilidad mecánica se vio afectada al reducirse debido a la desintegración de su estructura a medida que aumentó la temperatura, siendo el caso que los pellets de casulla pasaron de un 84 % a 69 % y los de pulpa de un 93 % a un 68 %. Este señalamiento también fue documentado por Rupasinghe et al. (2023) que indicó que la durabilidad mecánica tiende a ser menor en biomasa que ha sido torrefactada, y, por consiguiente, esta influye en la friabilidad de los pellets, determinándose que los pellets torrefactados presentan menor resistencia a los golpes en comparación con los pellets no torrefactados en esta investigación.

La pérdida de masa experimentada también es descrita por Cayo Reinoso (2018) y Jaramillo et al. (2022), quienes documentaron una disminución en el rendimiento másico y rendimiento energético, donde la primera siempre será mayor que la segunda, la cual es atribuida a la reducción de hemicelulosa y lignina. Este comportamiento de reducción fue detectado en este estudio, donde al introducir 1.8 kg de masa resultó aproximadamente 1/3 de la masa inicial.

La densidad disminuyó significativamente al reducirse la masa de los pellets, por lo que, para los pellets de casulla sin torrefactar la densidad fue de 683.87 kg/m³, reduciéndose a 302.69 kg/m³ en los que sí fueron torrefactados, representando una disminución del 55.7 %. De una forma similar, los pellets de pulpa sin tratamiento presentaron una densidad de 782.87 kg/m³, reduciéndose a 471.70 kg/m³ en los que sí fueron torrefactados, equivalente a una disminución del 39.47 %.

La densidad es uno de los factores esenciales en la industria del aprovechamiento, así como el PC y es por ello por lo que Ruediger, (2025) plantea lo siguiente al comparar distintos tipos de biomasa: "¿Cuánto volumen se necesita para generar la misma cantidad de energía?" estableciendo como referencia 100 m³ de chip de eucalipto, 12.12 MJ/kg de PC y 320 kg/m³ de densidad, determinando una generación de energía de 387.84 GJ con 32 ton de chip de eucalipto. Asimismo, tabula el volumen necesario para aserrín, siendo de 168 m³ con 37.12 ton y al utilizar biocombustibles de tipo pellets se requieren 32.4 m³ con 21.07 ton de materia. Siguiendo esta continuidad, se tabuló el volumen necesario para generar la misma cantidad de energía a partir de los datos obtenidos en esta investigación.

La Tabla 4 muestra el volumen necesario de pellets para generación de energía (387.84 GJ)

Tabla 4
Volumen necesario de pellets para generación de energía (387.84 GJ)

Cantidad de volumen para generar 387.84 GJ de energía				
Materia	PC (MJ/kg)	Densidad (kg/m^3)	Volumen (m^3)	Masa (ton)
PEcasut-NT	16.92	683.8	33.51	22.9
PEcasut-2T	30.08	302.4	42.55	12.9
PuPEt-NT	11.45	782.8	43.46	34.02
PuPEt-3T	14.09	471.7	58.35	27.5

Nota. Se muestra los resultados con el volumen (m^3) y masa (ton) para generar X cantidad.

La torrefacción mejora las propiedades energéticas, no obstante, la baja densidad debido a que la peletización se realizó antes de la torrefacción por la ausencia de una peletizadora de carbón, disminuyó su capacidad energética, sin embargo, de haber sido utilizada y plantear la misma densidad de los pellets de casulla no torrefactados en los pellets torrefactados, es decir, 683.8 kg/m^3 , la cantidad necesaria sería de 18.9 m^3 con 12.9 ton de pellets torrados a 200°C , siendo 5 veces menor el volumen referente, lo que puede optimizar una industria biomásica.

Asimismo, se determinó que los contenidos de C en PEcasut-NT y PEcasut-2T son de 49.73% y 47.21% respectivamente, con una reducción del 5.06% mientras que en PuPEt-NT y PuPEt-3T la reducción es de 15.67% siendo de 31.39% y 26.47% sus niveles. Estas reducciones se atribuyen a la liberación de compuestos extraíbles y gases durante las reacciones químicas. Los niveles de N presentan valores de 0.6% (PEcasut-NT) y 1.01% (PEcasut-2T), mientras que hay un 2.77% (PuPEt-NT) y 2.27% (PuPEt-3T), siendo mayor en PuPEt. Los pellets de pulpa de café poseen un mayor contenido de N que los de casulla y según Ros-Martínez (2021) el N que no reacciona absorbe calor, lo que disminuye la energía disponible para una oxidación, a lo que puede atribuirse su bajo PC posterior a la torrefacción.

El CC tiende a producir efectos negativos en equipos de presión como calderas, ya que el CI disminuye la temperatura de fusión de las cenizas, afectando el rendimiento y la vida útil de las parrillas, según lo descrito por Bayona-Roa et al. (2023), por lo que, en cuanto a cloruros, los pellets de pulpa de café pueden generar un mayor impacto al poseer 0.32% (PuPEt-NT) y 0.54% (PuPEt-3T) que los de casulla con un 0.03% (PEcasut-NT) y 0.04% (PEcasut-2T).

La Asociación Española de Normalización y Certificación en su norma ISO 17225 parte 6, ha generado parámetros con base en 2 clases para establecer una homogeneidad internacional, por lo que, en la Tabla 5, son comparados los resultados de este estudio en las clases A y B, siendo la clase A más rigurosa, permitiendo mayores márgenes en la clase B.

Tabla 5
Comparación de PEcasut y PuPEt de acuerdo con la Normativa ISO serie 17225-6

Comparación de PEcasut y PuPEt según la Normativa ISO serie 17225-6							
	Normativa ISO		PEcasut		PuPEt		
	A	B	NT	2T	NT	3T	
C. físico-mecánicas	D (mm)	6 < D < 25 D ± 1	6 < D < 25 D ± 1	6.18	5.19	6.15	5.60
	L (mm)	3.15 < L < 40 P: 06 < D < 25	3.15 < L < 40 P: 06 < D < 25	25.60	23.29	18.15	18.05
	DM (%)	DM 97.5 ≥ 97,5	DM 96.0 ≥ 96,0	84	69	93	65
	FR (-)	-	-	1.13	1.30	1.08	1.50
	P (kg/m³)	D 600 ≥ 600	D 600 ≥ 600	683.87	302.69	782.87	471.70
C. anatómicas	PC (MJ/kg)	PC14.5 ≥ 14,5	PC14.5 ≥ 14,5	16.92	30.08	11.45	14.09
	CH (%)	CH12 ≤ 12	CH15 ≤ 15	8.52	1.85	13.84	1.73

Comparación de PEcasut y PuPEt según la Normativa ISO serie 17225-6							
	Normativa ISO		PEcasut		PuPEt		
	A	B	NT	2T	NT	3T	
C. química	CC (%)	CC 6.0 ≤ 6	CC 10 ≤ 10	0.78	1.55	23.90	29.95
	C (%)	-	-	49.73	47.21	31.39	26.47
	Cl (%)	Cl 0.1 ≤ 0,1	Cl 0.3 ≤ 0,3	0.03	0.04	0.32	0.54
	N (%)	N 1.5 ≤ 1,5	N 2.0 ≤ 2,0	1.01	0.60	2.27	2.77

Nota. Las variables abreviadas en la tabla representan las características investigadas en esta investigación, correspondientes a: D = diámetro, L = longitud, DM = durabilidad mecánica, FR = friabilidad, ρ = densidad, PC = poder calorífico, CH = contenido de humedad, CC = contenido de cenizas, C = Carbono, Cl = Cloruros y N = Nitrógeno. Las unidades correspondientes a cada variable se muestran entre paréntesis, únicamente la friabilidad no posee unidades debido a que es adimensional.

Por lo que, a partir de esta comparativa es posible determinar que los pellets que cumplen con mejores valores respecto a la normativa ISO en la clase A son los PEcasut-NT, ya que cumple con 8 de las características, en cambio PEcasut-2T cumplen 7 de estos 11 parámetros. Sin embargo, los PuPEt-NT solo cumplen 4 de estas 11 especificaciones para la clase B, finalizando con PuPEt-3T, la cual cumplen con 3 de estos en la clase B.

CONCLUSIONES

Las características energéticas y la composición química de los pellets elaborados a partir de casulla y pulpa de café fueron evaluadas bajo diferentes temperaturas de torrefacción. Los resultados muestran que la aplicación de este proceso mejoró notablemente el desempeño de los PEcasut en comparación con los PuPEt. En particular, el pellet PEcasut-2T alcanzó rendimientos energéticos superiores tanto a nivel general como por grupos, además de una mayor correspondencia con los criterios establecidos en la Norma ISO 17225-6 para su uso en sistemas energéticos, superando al PuPEt-3T.

Asimismo, el análisis energético permitió identificar variaciones importantes en el Poder Calorífico (PC), el Contenido de Humedad (CH) y el Contenido de Cenizas (CC) para ambos tipos de pellets. Los PEcasut evidenciaron mejoras más notorias tras la torrefacción: el PC aumentó en un 63.95 %, el CH se redujo en un 78.23 % y el CC incrementó en un 98.7 %. Por su parte, los PuPEt registraron un aumento del 5.11 % en el PC, una disminución del 87.5 % en el CH y un incremento del 25.3 % en el CC. Estos resultados confirman que los PEcasut presentan un desempeño energético más favorable para su combustión.

En cuanto a la composición química, se evaluaron los contenidos de Cloruros (Cl), Nitrógeno (N) y Carbono (C) en ambos tipos de pellets. El análisis elemental mostró una disminución del C en los dos grupos, asociada a la liberación de gases ligeros como CO y C₂O durante la torrefacción. A diferencia del C, el contenido de Cl aumentó en ambos materiales, posiblemente debido a compuestos derivados de la hemicelulosa. Por último, el N presentó un comportamiento opuesto entre los grupos: se incrementó en los PuPEt y se redujo en los PEcasut, lo cual se atribuye a la pérdida de compuestos volátiles característica del proceso termodinámico.

Finalmente, la comparación con estudios previos permite corroborar que la torrefacción genera incrementos significativos en las propiedades energéticas de diversas biomásas. Además, se evidencia cómo este proceso modifica la estructura y composición del material, mejorando su rendimiento y haciendo más viable el aprovechamiento de biomasa agrícola, la cual tradicionalmente es menos utilizada que la biomasa lignocelulósica debido a su alto contenido de humedad.

Contribución de los autores

El autor como investigador independiente, declara que la realización de esta investigación se efectuó siguiendo los principios del método científico y las pautas de la metodología de la investigación, obteniendo como resultado la recolección de datos y la redacción del artículo, los cuales son de su exclusiva autoría, asumiendo plena responsabilidad por la veracidad, integridad y contenido expuesto en este estudio

Conflicto de interés

El autor establece que, como investigador principal, no existe ningún tipo de conflicto de intereses en cuanto a relaciones personales, financieros y profesionales que pudieron haber influido en la elaboración o publicación de dicha obra.

Financiamiento

El autor declara que el financiamiento de esta investigación ha sido cubierto con fondos propios, sin recibir apoyo financiero externo de ninguna entidad.

Uso de inteligencia artificial (IA)

Fue utilizada la inteligencia artificial como herramienta de asistencia en redacción y organización del texto, sin ser implementada en la tabulación de datos y su interpretación. El autor verificó de forma personal el contenido del estudio y coherencia a través de toda la investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Bayona Roa, C. A., García Navarro, J. G., Jeisson, G., & Ricaurte, H. (2023). Hacia el aprovechamiento energético de los raquis de palma en calderas de biomasa. *Palmas*. Vol. 44. Núm. 1. <https://doi.org/10.56866/01212923.13806>
- Bustamante, V., Carrillo Parra, A., Prieto Ruiz, J. Á., Corral-Rivas, J. J., & Hernández Díaz, J. C. (2016). Química de la biomasa vegetal y su efecto en el rendimiento durante la torrefacción: revisión. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 7(38). http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322016000600005&lng=es&tlng=es.
- Cabrera, L. A. (2018). Determinar el porcentaje adecuado de cascara de café para el correcto desarrollo y ciclo productivo del cultivo de la zanahoria, en la finca la estrella en el municipio de Oporapa, Huila. *Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente, Huila*. <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/25496/%20cabreram.pdf;jsessionid=7C0BF12DA2124118EF051892F943FBF1.jvm1?sequence=1>
- Cayo, E. L. (2018). Obtención De Un Biocombustible Sólido Por Torrefacción Húmeda a Partir De La Cáscara De La Mazorca De Cacao Para La Generación De Energía. *Universidad Politécnica Nacional, Quito, Ecuador*. <https://bibdigital.epn.edu/bitstream/10596/25496/%20cabreram.pdf;jsessionid=7C0BF12DA2124118EF051892F943FBF1.jvm1?sequence=1>
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011). *Thermodynamics: an engineering approach*. New York, NY: McGraw-Hill, Seventh edition. <https://doi.org/978-0-07-352932-5>
- Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiriones, J. G., Márquez-Montesino, F., González-Rodríguez, H., Jurado Ybarra, E., & Garza-Ocañas, F. (2014). Distribución granulométrica en subproductos de aserrío para su posible uso en pellets y briquetas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* Vol. 5, No. 5. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-11322014000500005
- Enríquez, J. P., Retes-Cáliz, R. F., & Vásquez-Reyes, E. F. (2020). Importancia, genética y evolución del café en Honduras y el mundo. *Innovare: Revista de ciencia y tecnología*. Vol. 9. Núm. 3. <https://doi.org/10.5377/innovare.v9i3.10649>
- Fernández, Y. C., Sotto Rodríguez, K. D., & Vargas Marín, L. A. (2020). Impactos ambientales de la producción del café, y el aprovechamiento sustentable de los residuos generados. *Producción + Limpia*, Vol. 15, N° 1. <https://doi.org/https://doi.org/10.22507/pml.v15n1a>
- Guillén, R. V., & Dávila, J. P. (2014). Aprovechamiento sostenible de los residuos forestales para la producción de pellets de biomasa leñosa torrefactada. *Saber y Hacer*. Vol. 1. Núm. 2. <https://revistas.usil.edu.pe/index.php/syh/article/view/12>
- Heredia, M., Tarelho, L., & Matos, A. (2016). Valoración del calor residual de reactores de pirólisis para la producción combinada de carbón vegetal y combustible torreficado. *Universidad de Aveiro, Departamento de Ambiente y Ordenamiento. Aveiro, Portugal: Revista Técnica "Energía"*. Núm. 12.
- Hernández Sampieri, R., Fernández-Collado, C. F., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (Vol. Sexta edición). México D.F.: McGraw-Hill Education. <https://doi.org/https://doi.org/978-1-4562-2396-0>
- Jaramillo, F. E., Alvarado, P. N., & Mazo, R. A. (2022). Torrefacción de biomasa en un reactor de tornillo a escala de banco: efecto de la temperatura y del tipo de biomasa. *Tecnológicas*. Vol. 25. Núm. 54. <https://www.redalyc.org/journal/3442/344271354004/>
- Méndez Santos, N. J. (2020). CARACTERÍSTICAS ENERGÉTICAS DEL PÉLET OBTENIDO DE LA COMBINACIÓN DE LAS ESPECIES Hibiscus sabdariffa Y Arundo donax. *Universidad Nacional de Ciencias Forestales, Siguatepeque, Honduras*.
- Organización Internacional del Trabajo. (2024). Mapping the coffee value chain in Honduras. *Geneva, Suiza: International Labour Office*. <https://www.ilo.org/sites/default/files/2024-09/Honduras%20Mapeo%20cadena%20de%20valor%20del%20cafe.pdf>
- Paz Fernández, N. E. (2024). Caracterización energética de pellets de 2 especies Calliandra houstoniina y Clethra macrophylla en el municipio de Siguatepeque, Comayagua, Honduras. *Universidad Nacional de Ciencias Forestales, Escuela de Ambiente y Desarrollo*.
- Pegoretti Leite de Souza, H. J. (2020). Evaluación de propiedades de diferentes especies con potencial energético para la elaboración de pellets de calidad con fines energéticos. *Universidad de Concepción, Concepción, Chile*. <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/31150>
- Rodríguez, J. (2019). Biomasa Forestal - Producción de Pelets. https://eforown.ctfc.cat/pdf/44b_3_Biomasa%20forestal%20-%20Produccion%20de%20%20Pelets.pdf

- Ros-Martínez, A. (2021). Análisis termodinámico de procesos reactivos con biomasa y biodiésel empleando termocombustión. Universidad Politécnica de Cartagena , Cartagena. <https://repositorio.upct.es/server/api/core/bitstreams/81171832-9dba-4c40-8121-aa4698915ae4/content>
- Ruediger, L. (2025). Qual o volumen necessário para gerar a mesma energia? Universidad Regional de Blumenau. Blumenau, Santa Catarina, Brasil.
- Rupasinghe, R. L., Perera, P., Bandara, R., Amarasekera, H., & Vlosky, R. (2023). Insights into Properties of Biomass Energy Pellets Made from Mixtures of Woody and Non-Woody Biomass: A Meta-Analysis. *Energies*. Vol. 17. Núm. 1. <https://doi.org/10.3390/en17010054>
- Shankar-Tumuluru, J., Boardman, R. D., Wright, C. T., & Hess, R. J. (2012). Some Chemical Compositional Changes in Miscanthus and White Oak Sawdust Samples during Torrefaction. *Energies*. Vol. 5. Núm. 10. <https://doi.org/10.3390/en5103928>
- Shankar-Tumuluru, J., Ghiasi, B., Soelberg, N. R., & Sokhansanj, S. (2021). Biomass Torrefaction Process, Product Properties, Reactor Types, and Moving Bed Reactor Design Concepts.. *Frontiers in Energy Research*. Vol. 9. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.728140>