

Estimation of the Higher Heating Value of a Mixture of Sawdust and Coffee Husk

Francia de Jesús Interiano-Aguilar^{1,2}, Fernando José Zorto-Aguilera¹, and José Fernando Aguilar-Rodríguez¹

¹Instituto de Investigaciones de Ciencias Aplicadas y Tecnológicas, Facultad de Ingeniería, Honduras, ²OWSD-Honduras
franciainterianoa@gmail.com, fernando.zorto@unah.edu.hn, fernandorodriguez.16@outlook.com

Abstract– The feasibility study of a fuel considers thermochemical characterization, which encompasses chemical composition, moisture content, density, ash content, and calorific value. The latter determines the amount of heat energy released during combustion. The calorific value can be accurately determined using sophisticated equipment or approximated using experimental correlations from scientific literature based on proximate or ultimate analysis. This study prepared a sample of 65.3% pine sawdust and 34.7% coffee husk. The objective was to estimate its calorific value through ash analysis and using four mathematical correlations based on proximate analysis. The sample's estimated average higher heating value (HHV) value was 19.28 MJ/kg. These results support the viability of the analyzed fuel, emphasizing the importance of thermochemical characterization in evaluating the quality and efficiency of fuels.

Keywords-- Biomass, heat value, coffee husk, sawdust, correlations.

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LACCEI).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LACCEI).
DO NOT REMOVE

Estimación del poder calorífico superior de una mezcla de aserrín y cascarilla de café

Francia de Jesús Interiano-Aguilar^{1,2}, Fernando José Zorto-Aguilera¹, and José Fernando Aguilar-Rodríguez¹

¹Instituto de Investigaciones de Ciencias Aplicadas y Tecnológicas, Facultad de Ingeniería, Honduras, ²OWSD-Honduras
franciainterianoa@gmail.com, fernando.zorto@unah.edu.hn, fernandorodriguez.16@outlook.com

El estudio de factibilidad de un combustible considera la caracterización termoquímica, que abarca la composición química, el contenido de humedad, la densidad, el contenido de cenizas y el poder calorífico. Este último determina la cantidad de energía térmica liberada durante la combustión. El poder calorífico puede determinarse con precisión utilizando equipos sofisticados o aproximarse mediante correlaciones experimentales de la literatura científica basadas en el análisis próximo o último. En este estudio se preparó una muestra compuesta por 65.3% de aserrín de pino y 34.7% de cascarilla de café. El objetivo fue estimar su poder calorífico a través del análisis de cenizas y utilizando cuatro correlaciones matemáticas basadas en el análisis próximo. El valor promedio estimado del poder calorífico superior (PCS) de la muestra fue de 19.28 MJ/kg. Estos resultados respaldan la viabilidad del combustible analizado, enfatizando la importancia de la caracterización termoquímica en la evaluación de la calidad y eficiencia de los combustibles.

Palabras clave -- Biomasa, Poder calorífico, cascarilla de café, aserrín, correlaciones.

I. INTRODUCCIÓN

La próxima generación se enfrenta a desafíos cruciales relacionados con el cambio climático y la energía. Según el Banco Mundial [1], se estima que la población mundial superará los 10 mil millones de habitantes para el año 2050. Este incremento demográfico sin precedentes ejercerá una presión significativa en los sistemas energéticos a nivel global. En respuesta a esta creciente demanda, los países están adoptando estrategias y proyectos de energías renovables para garantizar un suministro sostenible y reducir la dependencia de fuentes no renovables[2].

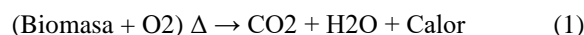
A la luz de lo expuesto, la biomasa emerge como una fuente energética sumamente atractiva debido a su amplia disponibilidad y su capacidad de emitir cero emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera durante su utilización. En este contexto, adquiere una relevancia fundamental comprender de manera exhaustiva cómo la biomasa puede transformarse de manera eficiente y efectiva en una fuente de energía viable[3]. Explorar y desarrollar métodos de termo-conversión adecuados, así como evaluar su viabilidad técnica, económica y ambiental, se convierte en un objetivo crucial para aprovechar plenamente el potencial de la biomasa como una alternativa renovable y sostenible en la matriz energética global[4].

Para aprovechar eficientemente la biomasa como fuente de energía renovable, es fundamental comprender su origen y clasificación. La biomasa puede provenir tanto del reino vegetal como del animal. Se destaca la biomasa forestal, que se obtiene de recursos forestales como la madera y los residuos de la industria forestal. También está la biomasa herbácea, que abarca plantas de rápido crecimiento como cultivos energéticos y pastos. [5].

Al comprender lo anterior permite determinar el método de termo-conversión más adecuado para su aprovechamiento energético. Existen diversas opciones disponibles para aprovechar la biomasa, entre las cuales se destacan: a) la combustión, b) la pirólisis, c) la gasificación y d) la digestión anaeróbica de la biomasa. Cada uno de estos métodos presenta características únicas y ofrece ventajas y desafíos específicos en términos de eficiencia, emisiones y aplicaciones particulares. Al conocer y evaluar minuciosamente estos métodos, se puede seleccionar el enfoque más apropiado para maximizar el rendimiento energético de la biomasa y fomentar una transición hacia fuentes renovables y sostenibles. Este conocimiento también permite identificar posibles sinergias y enfoques integrados que combinen múltiples métodos de termo-conversión, lo cual puede mejorar aún más la eficiencia y la viabilidad económica de la utilización de la biomasa como fuente de energía. [4], [6], [7].

A. Combustión

La combustión es un proceso de termo-conversión empleado para aprovechar los residuos generados por diversas actividades de la industria agroforestal [5]. Este proceso se basa en una reacción química que transforma los residuos en calor, convirtiéndolos en una fuente de energía. Esto se puede observar en la ecuación (1):



Los combustibles sólidos están compuestos principalmente por elementos orgánicos, como el carbono, el hidrógeno, el oxígeno y el azufre, los cuales se encuentran entrelazados en estructuras de gran complejidad [8].

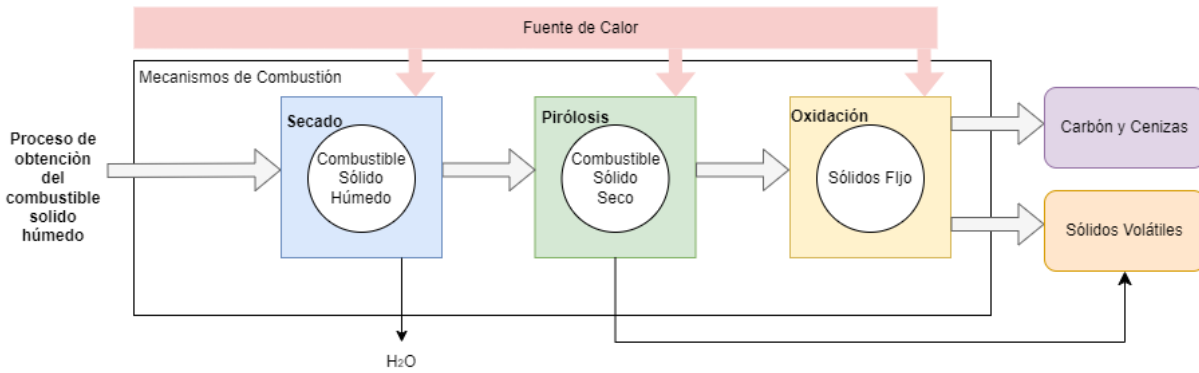


Fig. 1. Mecanismo de combustión en biomasa vegetal

En la fig. 1 se muestra el mecanismo de combustión para lograr esta reacción de un combustible sólido. La primera etapa consiste en la *eliminación de la humedad*, donde el combustible se seca gradualmente, se calienta y se descompone en numerosas partículas. Luego, se llevan a cabo las reacciones de desvolatilización que ocurren mediante *la pirólisis*, en la cual los grupos aromáticos se rompen, lo que resulta en la formación de compuestos volátiles no condensables. Cabe mencionar que la presencia de compuestos inorgánicos puede afectar y desacelerar este proceso. A continuación, se produce la oxidación de la materia volátil, que antecede al proceso más complejo: *la oxidación del carbono* presente en el combustible sólido. Simultáneamente, se generan emisiones atmosféricas durante estas reacciones. Por último, se consideran las posibles reacciones de la materia inorgánica presente en el combustible sólido [9].

B. Propiedades termoquímicas de los combustibles sólidos

Cada combustible posee características termoquímicas únicas ligadas a su composición física y química. Una de las más relevantes en términos de generación de calor es el Poder Calorífico (HV, por sus siglas en inglés) del combustible. Este parámetro se define como la cantidad de energía que se obtiene por kilogramo (MJ/kg) de combustible durante la combustión. Es importante destacar que el poder calorífico se clasifica en dos categorías: superior (HHV, por sus siglas en inglés) e inferior (LHV, por sus siglas en inglés). El HHV representa la energía liberada por la condensación del vapor de agua contenido en los productos de la combustión, mientras que el LHV no considera este calor adicional [8].

La determinación del valor numérico del poder calorífico (HV) se puede llevar a cabo mediante diferentes procesos experimentales. En primer lugar, se puede utilizar una bomba de calor, que analiza la entalpía de intercambio entre los reactantes y los productos de la combustión. Sin embargo, esta técnica tiene la desventaja de ser costosa en términos de equipamiento de laboratorio. Por otro lado, mediante el uso de las correlaciones matemáticas se pueden generar un estimado del poder

calorífico (HV). A través de la caracterización básica del combustible, es posible calcular un valor aproximado del poder calorífico superior (HHV) utilizando estas correlaciones. Esta alternativa resulta más accesible y económica para determinar el HV en algunos casos [10].

La caracterización termoquímica de la biomasa se presenta en la tabla I, donde se presentan dos métodos de análisis: a) el análisis próximo y b) el análisis último. El análisis próximo, incluye las determinaciones de porcentaje de sólidos volátiles (VM), carbón fijo (FC) y cenizas (Ash) posteriores a la combustión de la biomasa. Por otro lado, el análisis último revela el contenido de los elementos químicos claves del combustible, como carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N) y azufre (S). Estos dos métodos de análisis que brindan caracterizaciones básicas permiten que este tipo de análisis sea más factible desde el punto de vista económico en comparación con el uso de la bomba calorimétrica [11].

Tabla I.
CARACTERIZACIÓN TERMOQUÍMICA DE LA BIOMASA

No	Tipo de análisis	Parámetro	Unidad de medición
1	Poder Calorífico Superior	HHV	(MJ kg ⁻¹)
2	Densidad	R	(kg/m ³)
3	Tamaño de la partícula	TP	(ppm)
4	Análisis próximo	Carbón Fijo	(% Peso)
		Sólidos Volátiles	(% Peso)
		Cenizas	(% Peso)
		Humedad	(% Peso)
5	Análisis último	Carbono	(% Peso)
		Oxígeno	(% Peso)
		Nitrógeno	(% Peso)
		Azufre	(% Peso)

Varios estudios previos han propuesto correlaciones matemáticas para estimar el poder calorífico superior (HHV)

utilizando tanto el análisis próximo (AP) como el análisis último (AU). En la tabla II se observan estas correlaciones matemáticas:

Tabla II.
CORRELACIONES MATEMÁTICAS PARA CALCULAR HHV POR ANÁLISIS PRÓXIMO Y ÚLTIMO

Ecuación	Tipo de análisis	Ref.
$HHV = 19.914 - 0.2324 Ash$ (2)	AP	[11]
$HHV = 20.086 - 0.261 Ash$ (3)	AP	[16]
$HHV = 0.3536FC - 0.1559VM - 0.0078Ash$ (4)	AP	[17]
$HHV = 86.191 - 2.051Ash - 1.781C - 237.722Ash^{-1} + 0.030Ash^2 + 0.025C^2 + 0.026N^2$ (5)	AU	[16]
$HHV = 8.725 + 0.0007H^2Ash + 0.0004VC^2H + 0.0002C^2N - 0.014H^2Ash + 0.626S^2Ash - 3.692S^2N$ (6)	AU	[16]
$HHV = 0.3491C + 1.1783H + 0.1005 - 0.1034O - 0.0151N - 0.0211Ash$ (7)	AU	[10]
$HHV = 17.714 + 0.3492 Ash$ (8)	AP	Pro-pia
$HHV = 22.21 - 0.3837M$ (9)	AP	

*HHV está en MJ kg⁻¹ / Composición física de la muestra mediante análisis próximo; Ash: Cenizas (% peso); FC: Carbón Fijo (% peso); VM: Sólidos Volátiles (% peso); M: Humedad (% peso) / Composición química de la muestra mediante análisis último; C: Carbono (% peso); H: Hidrógeno (% peso); O: Oxígeno (% peso); Ni: Nitrógeno (% peso); S: Azufre (% peso).

C. Biomasa en Honduras de origen agroforestal

El Error! Reference source not found. se puede observar el caso de Honduras, donde se estima que el potencial energético de la biomasa vegetal en Honduras, alcanza los 756.5 PJ/año; y demanda energética en Honduras es de aproximadamente 257 PJ/año [12]. Actualmente, la explotación energética de la biomasa en Honduras se basa principalmente en el bagazo de la caña de azúcar, los efluentes del aceite de palma, el pasto King Grass (*Pennisetum purpureum*) y los residuos de la industria de la madera [13].

Tabla III.
DISPONIBILIDAD DE BIOMASA COMO SUBPRODUCTO DEL PROCESO INDUSTRIAL Y EXTRACTIVO

Tipo de biomasa	Disponibilidad [millones de Tm]	Potencial energético [PJ]	Referencia
Biomasa forestal, subproducto	200	3.50	[12]
Cascarilla de Café	0.26	0.45	[14]

Además, la producción de café en Honduras tiene una gran incidencia en la economía nacional, generando el 12% de las exportaciones del país [15]. En el caso del café hondureño, se estima que el rendimiento de cascarilla o pergamino seco es del 6.1% en peso con respecto a 1 kg de grano de café verde. Esto equivale a una cantidad aproximada de 25,529.99 Tm de cascarilla generadas. Esta cascarilla posee un potencial térmico aproximado de 446.77 TJ para una cascarilla seca cuando contiene un 4.6% de hidrógeno, considerando el periodo mencionado anteriormente [14].

Estos residuos generados por estas industrias pueden ser utilizados en la generación de energía por medio de la combustión, lo cual se presenta como una alternativa prometedora en el contexto de Honduras. El principal objetivo de esta investigación es poder estimar el HHV de una mezcla de residuos sólidos orgánicos, de aserrín de pino y cascarilla de café, utilizando correlaciones matemáticas.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

En este estudio, se llevó a cabo el análisis de dos especies de biomasa originarias de Honduras: el serrín o aserrín de pino (1), que es un subproducto del proceso de corte de madera, y la cascarilla de café (2).

A. Preparación de muestra

En el proceso de preparación de las muestras, se llevó a cabo el pesaje de 260 g de aserrín de pino y 260 g de cascarilla de café. Se utilizó una balanza analítica de la marca A&D Weighing. Esta preparación fue desarrollada bajo la normativa ASTM D 2013-03 (2003), la cual abarca el proceso de subdividir y reducir la muestra antes de los análisis requeridos. Entre las instrucciones de este método se incluía la trituration de la muestra, con una proporción objetivo de cada residuo, de 1:1.

Sin embargo, debido a inconvenientes con el molino triturador eléctrico y la dificultad para triturar la cascarilla de café, se ajustó la proporción de la muestra a un 65.3% de aserrín de pino y un 34.7% de cascarilla de café. Las muestras trituradas y tamizadas, con un tamaño de partícula de 250 µm, se almacenaron en recipientes para evitar una mayor exposición ambiental de almacenamiento y preservar su integridad.

Se pudo observar que ambas muestras no presentaban indicios visibles de humedad excesiva o descomposición biológica, por lo cual no fue necesario llevar a cabo un procedimiento de secado previo antes de su almacenamiento.

B. Análisis de humedad

El análisis de humedad de la muestra se llevó a cabo siguiendo los lineamientos de la normativa ASTM D-3173-00 (2000) utilizando un horno de la marca Heraeus. Durante el análisis, se observó que la muestra no cumplía con el criterio de tamaño de partícula de 250 µm, sino que alcanzaba los 2000 µm (el análisis de humedad se realizó antes de la preparación de la muestra a 250 µm).

C. Análisis de cenizas

Por otro lado, el análisis de cenizas se realizó siguiendo las indicaciones de la normativa ASTM D 3174-00 (2000) utilizando una mufla de la marca Heraeus.

D. Análisis estadístico

Se realizaron una serie de n=5 para todos los análisis utilizados, para luego calcular los valores promedios del porcentaje de humedad y cenizas. Se utilizó el método de mínimo cuadrados para el análisis de regresión lineal para determinar

una correlación específica para la muestra de aserrín de pino y café propuesta. Así mismo, se utiliza la ecuación (2) y (3) de la tabla II para complementar el cálculo mediante el análisis próximo. Para este análisis se utilizó el paquete computacional de Microsoft Excel 2024.

III. RESULTADOS

Todas las mediciones realizadas en este estudio se llevaron a cabo en cinco series repetidas.

El porcentaje de humedad obtenido para la muestra en este estudio es de 5.25%, lo cual se considera relativamente bajo en comparación con los valores reportados en la literatura científica, como puede observarse en la tabla IV. Donde su valor oscila en un valor de $10.24\% \pm 3.13\%$.

Los valores promedio obtenidos del análisis de cenizas para las muestras indicaron un porcentaje de cenizas en base seca del 1.31%. Los resultados del análisis de cenizas para cada muestra se reportan de manera detallada en la tabla V.

TABLA III.

ANÁLISIS PRÓXIMO Y ÚLTIMO DE ASERRÍN DE PINO, CHIPS DE PINO Y CASCARILLA DE CAFÉ

Tipo	Análisis próximo (% Peso)				Análisis último (% Peso)					HHV (MJ/kg)	Referencias
	M*	VM	FC	Ash	C	H	N	O	S		
Aserrín de pino	6.80	77.70	15.20	0.30	45.0	5.60	-	41.5	-	19.70	[21]
Aserrín de pino	9.10	81.80	18.00	0.20	48.30	6.10	0.20	45.30	-	18.00	[22]
Cascarilla de café	13.10	73.20	23.10	3.70	47.50	6.40	-	43.70	-	18.40	[22]
Cascarilla de café	7.92	71.63	16.9	3.54	56.83	4.81	0.45	47.86	0.05	18.97	[23]
65.3% aserrín de pino y 34% cascarilla de café	5.25	-	-	1.31	-	-	-	-	-	19.28	Elaboración propia

*HHV está en MJ kg-1 / Composición física de la muestra mediante análisis próximo: Ash: Cenizas (% peso); FC: Carbón Fijo (% peso); VM: Sólidos Volátiles (% peso); M: Humedad (% peso) / Composición química de la muestra mediante análisis último: C: Carbono (% peso); H: Hidrógeno (% peso); O: Oxígeno (% peso); Ni: Nitrógeno (% peso); S: Azufre (% peso).

TABLA IV.
RESULTADOS DE PORCENTAJE DE CENIZAS

Peso de Muestra [g]	Peso de muestra + crisol [g]	Promedio de resultado de cenizas [g]	Cenizas [g]	% de Cenizas en base seca
2.010000	34.780000	32.793150	0.023150	1.215600%
2.008100	39.208100	37.226630	0.026625	1.399300%
2.010000	42.650000	40.664780	0.024775	1.300900%
2.000000	39.570000	37.594880	0.024875	1.312700%
2.010000	29.240000	27.255150	0.025150	1.320600%
Promedio			1.31%	
Desviación estándar			0.07%	

Así mismo, la literatura [11], [16] proponen las ecuaciones 2 y 3 para calcular el HHV a partir del peso porcentual de cenizas en base seca. Por lo que se utilizaron estas correlaciones en la aproximación del HHV de la muestra de 65.3% de aserrín de pino y 34.7% de cascarilla de café. Además, a partir de los datos de la Tabla IV se desarrollaron las ecuaciones (8) y (9) utilizando el método de regresión por mínimos cuadrados para comprender la relación entre el porcentaje de humedad y el HHV, así como entre el porcentaje de cenizas y el HHV.

TABLA VI.
ESTIMACIONES DE HHV POR MEDIO DE ANÁLISIS DE CENIZAS Y ANÁLISIS DE HUMEDAD PARA MEZCLA DE ESTE ESTUDIO

No.	HHV (MJ/kg)	R ²
Ecu. 2	19.61	0.625
Ecu. 3	19.74	0.909

Ecu. 8	18.17	0.232
Ecu. 9	20.20	0.767

Mediante las ecuaciones (8) y (9) se estimó el HHV con el contenido de cenizas y el contenido de humedad de la muestra, con el fin de comparar los valores obtenidos por estas, con los resultados de las ecuaciones (2) y (3).

$$0.3492Ash + 17.714; R^2 = 0.2323 \quad (8)$$

$$0.3837M + 22.212; R^2 = 0.7667 \quad (9)$$

La fig. 2 muestra que la correlación entre el HHV y el porcentaje de cenizas es baja positiva. Según la tabla VI, para la ecuación (8) el coeficiente de determinación (R²) es de 0.232. Es importante destacar que esta correlación baja positiva no se aplica a todos los tipos de muestra, como se ha reportado en el estudio [11].

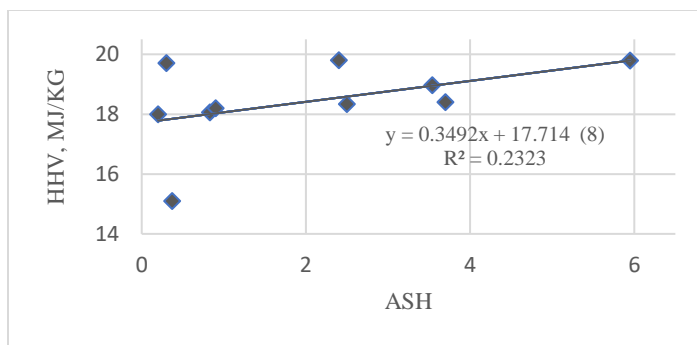


Fig. 2. Relación HHV (MJ/kg) con respecto al contenido de cenizas (% peso en base seca, Ash).

Por otro lado, la fig. 3 revela una correlación significativa entre el HHV y contenido de humedad (M%) de esta biomasa en particular (cascarilla de café + aserrín de pino) y el HHV; con un (R^2) de 0.767. Las estimaciones del HHV, obtenidas a partir de las ecuaciones (3) y (4) de la tabla II y las ecuaciones (8) y (9), utilizando los resultados de análisis de cenizas y humedad para la muestra de aserrín y cascarilla de café, se presentan en la tabla VI como resultados adicionales de este estudio.

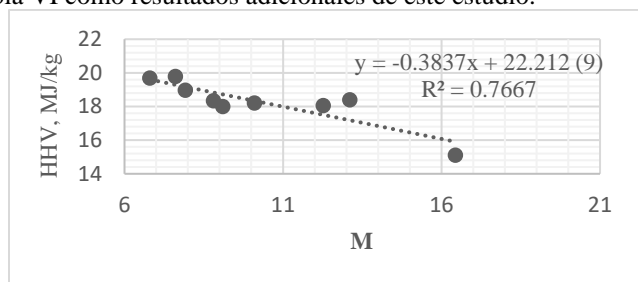


Fig. 3. Relación HHV (MJ/kg) con respecto al contenido de humedad (% peso, M)

IV. DISCUSIÓN

Según los datos de la tabla IV, se observa que, de las muestras de aserrín de la literatura consultada, la que contiene un porcentaje de humedad similar a nuestra muestra tiene un poder calorífico superior (HHV) de 19.70 MJ/kg y un contenido de cenizas (Ash) de 0.3%. En cuanto a las muestras de cascarilla de café, con el mismo análisis, se obtiene un HHV de 18.97 MJ/kg y un contenido de cenizas de 3.54%. Al calcular el promedio de los valores presentados en la tabla IV para la muestra de nuestro estudio, se obtiene un valor de HHV de 19.28 MJ/kg. Estos resultados reflejan el rango de poder calorífico estimado para este tipo de combinación de biomasa.

Se reconoce que las correlaciones basadas en el análisis último son generalmente más precisas, según los documentos consultados en este estudio, ya que se basan en la composición elemental real de la biomasa [21]–[24]. Por otro lado, las correlaciones basadas en el análisis próximo tienden a tener una precisión relativamente menor, ya que se basan en una composición empírica y pueden variar dependiendo de la muestra y las condiciones de análisis.

A pesar de las ventajas de las correlaciones basadas en el análisis último versus las basadas en el análisis próximo,

existen estudios como el [11] que han explorado la relación entre los valores de HHV y las propiedades de la biomasa, como cenizas, materia volátil y carbono fijo. En dicha investigación, se encuentra una correlación significativa entre el HHV y el contenido de cenizas, observando que a medida que aumenta el contenido de cenizas, disminuye el valor de HHV. Como resultado, propusieron una ecuación basada en las cenizas que podría ser útil para estimar los valores de HHV de la biomasa (ecuación 2). Estas correlaciones ofrecen una alternativa para calcular el HHV cuando no se dispone de datos completos del análisis próximo.

Se considera de gran importancia llevar a cabo un estudio que establezca una correlación entre el contenido de humedad (M) y el contenido de cenizas (Ash) con el fin de desarrollar una ecuación que relacione estos parámetros con el poder calorífico superior (HHV) de manera más precisa. Una posible forma de esta ecuación podría ser $HHV = a + bM + cAsh$, o también se podría explorar otras propuestas existentes en la literatura científica. Este enfoque permitiría una mejor comprensión de la relación entre los componentes químicos de la biomasa y su potencial energético, utilizando equipo común de laboratorio, lo cual sería de gran utilidad para la optimización y evaluación de su uso como fuente de energía.

Este análisis también nos permite identificar el método de conversión termoquímica más adecuado, ya sea la combustión, pirólisis, gasificación o digestión anaeróbica. En particular, los residuos de madera y la cascarilla de café han demostrado ser especialmente prometedores como materia prima para la producción de briquetas, una forma compacta y eficiente de utilizar la biomasa. Este enfoque puede contribuir significativamente a la gestión sostenible de los recursos agroforestales y a la reducción de residuos, al tiempo que proporciona una fuente renovable de energía. El proceso de briquetado es una técnica que permite transformar combustibles de difícil manejo o baja densidad en una forma compacta y conveniente para su uso, facilitando su transporte y almacenamiento. Mediante la compresión de biomasa, como el aserrín de pino y la cascarilla de café, se obtiene un combustible sólido con propiedades mejoradas, como mayor densidad aparente, menor contenido de humedad y uniformidad en sus características. Para evaluar la eficacia de esta mezcla de biomasa en forma de briquetas, se recomienda realizar un análisis de combustión en diferentes proporciones, con el objetivo de determinar su desempeño y eficiencia energética en comparación con otras fuentes de combustible. Este estudio permitirá obtener datos relevantes para el diseño y optimización de procesos de briquetado y su aplicación en la generación de energía térmica [24].

V. CONCLUSIONES

La caracterización termoquímica de un combustible nos permite generar estimaciones de poder calorífico mediante el uso de correlaciones empíricas que numerosos autores han desarrollado. Las correlaciones utilizadas para calcular el estimado del HHV de la muestra en este estudio tienen en 3 de las mismas como única variable el valor porcentual en peso de las

cenizas y en una de ellas como única variable a la humedad. No podemos determinar la ecuación que más se apega al valor real del HHV de la muestra debido a que no contamos con el valor comparativo a través de una bomba calorimétrica.

La aproximación del valor del poder calorífico superior (HHV) obtenido de la mezcla de biomasa demuestra su potencial como fuente de energía térmica. Además, se observa una tendencia de disminución del HHV a medida que aumenta el contenido de cenizas. También se identificó una relación significativa entre el valor del poder calorífico y el contenido de humedad (M) en este tipo de biomasa.

Este estudio de caracterización termoquímica de biomasa ha demostrado el potencial de la mezcla de biomasa como fuente de energía térmica, resaltando la importancia de considerar tanto el contenido de cenizas como el de humedad al evaluar su potencial energético. Se recomienda realizar investigaciones adicionales para desarrollar una ecuación más precisa que relacione estos parámetros con el poder calorífico superior (HHV) y obtener un mapeo completo del HHV de este tipo de biomasa en Honduras. Además, se destaca la prometedora aplicación del briquetado de residuos de madera y cascarilla de café como una forma eficiente de utilizar la biomasa, contribuyendo a la gestión sostenible de los recursos y proporcionando una fuente renovable de energía. Se sugiere realizar análisis de combustión en diferentes proporciones de la mezcla de biomasa para evaluar su desempeño y eficiencia energética. Estos resultados son relevantes para el diseño y optimización de procesos de briquetado y otros procesos y su aplicación en la generación de energía térmica.

AGRADECIMIENTOS

A David Pineda† por su entrega vocacional y por el apoyo brindado al equipo de trabajo en todo momento.

REFERENCIAS

- [1] World Bank, "Population World Data Base." 2022. [Online]. Available: <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL?end=2021&start=1960&view=chart>
- [2] L. Da Silva Almeida, "Transición energética y desarrollo sostenible: un análisis intersectorial y de factores determinantes," 2022, [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/10481/74586>
- [3] C. B. Field, J. E. Campbell, and D. B. Lobell, "Biomass energy: the scale of the potential resource," *Trends Ecol. Evol.*, vol. 23, no. 2, pp. 65–72, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.tree.2007.12.001.
- [4] Z. Luo and J. Zhou, "Thermal Conversion of Biomass," in - *Handbook of Climate Change Mitigation*, W.-Y. Chen, J. Seiner, T. Suzuki, and M. Lackner, Eds. New York, NY: Springer US, 2012, pp. 1001–1042. doi: 10.1007/978-1-4419-7991-9_27.
- [5] A. Tursi, "A review on biomass: Importance, chemistry, classification, and conversion," *Biofuel Res. J.*, vol. 6, no. 2, pp. 962–979, 2019, doi: 10.18331/BRJ2019.6.2.3.
- [6] O. Ellabban, H. Abu-Rub, and F. Blaabjerg, "Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 748–764, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2014.07.113.
- [7] N. D. Kaushika, K. S. Reddy, and K. Kaushik, "Biomass Energy and Power Systems," in *Sustainable Energy and the Environment: A Clean Technology Approach*, 2016, pp. 1–242. doi: 10.1007/978-3-319-29446-9.
- [8] B. Jenkins M., L. Bexter L., T. Miles R. Jr., and T. Miles R., "Combustion Properties of Biomass," *Fuel Process. Technol.*, vol. 54, pp. 17–46, 1998.
- [9] D. A. Tillman, "Chapter 1 - Introduction," in *Combustion Engineering Issues for Solid Fuel Systems*, B. G. Miller and D. A. B. T.-C. E. I. for S. F. S. Tillman, Eds. Burlington: Academic Press, 2008, pp. 1–32. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373611-6.00001-X>.
- [10] S. A. Channiwala and P. P. Parikh, "A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels," *Fuel*, vol. 81, no. 8, pp. 1051–1063, 2002, doi: 10.1016/S0016-2361(01)00131-4.
- [11] C. Sheng and J. L. T. Azevedo, "Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data," *Biomass and Bioenergy*, vol. 28, no. 5, pp. 499–507, 2005, doi: 10.1016/j.biombioe.2004.11.008.
- [12] R. J. Tauro, J. L. Cabellero, M. Á. Salinas, A. Ghilardi, and J. M. Arroyo, "Evaluación del potencial energético de los recursos biomásicos en Honduras," 2021. [Online]. Available: https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/47650/1/S2101025_es.pdf
- [13] Enee, "Boletín Estadístico Enero 2022," Tegucigalpa, 2022. [Online]. Available: <https://bit.ly/3wBxHhm>
- [14] F. Torres-Mejía, "Evaluación del Potencial Energético de los Desechos Generados en el Procesamiento del Café en Honduras," Universidad de Zaragoza, 2020. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/344279562>
- [15] OEC, "Honduras Economy Complexity," 2022.
- [16] A. J. Callejón-Ferre, B. Velázquez-Martí, J. A. López-Martínez, and F. Manzano-Agugliaro, "Greenhouse crop residues: Energy potential and models for the prediction of their higher heating value," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 2, pp. 948–955, 2011, doi: 10.1016/j.rser.2010.11.012.
- [17] J. Parikh, S. A. Channiwala, and G. K. Ghosal, "A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels," *Fuel*, vol. 84, no. 5, pp. 487–494, Mar. 2005, doi: 10.1016/j.fuel.2004.10.010.
- [18] ASTM, *ASTM D 2013-03 Standard Practice for Preparing Coal Samples for Analysis*. United States, 2003, pp. 1–11. [Online]. Available: www.astm.org.
- [19] ASTM, *ASTM D-3173-00 Standard Test Method for Moisture in the Coal and Coke Analysis Sample*. United States, 2000, pp. 1–3.
- [20] ASTM, *ASTM D 3174-00 Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal*. United State, 2000, pp. 1–4.
- [21] H. A. Ajimotokan, A. O. Ehindero, K. S. Ajao, A. A. Adeleke, P. P. Ikubanni, and Y. L. Shuaib-Babata, "Combustion characteristics of fuel briquettes made from charcoal particles and sawdust agglomerates," *Sci. African*, vol. 6, 2019, doi: 10.1016/j.sciaf.2019.e00202.
- [22] F. F. Felfli, J. M. Mesa P, J. D. Rocha, D. Filippetto, C. A. Luengo, and W. A. Pippo, "Biomass briquetting and its perspectives in Brazil," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 1, pp. 236–242, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.biombioe.2010.08.011.
- [23] S. Amertet, Y. Mitiku, G. Belete, S. Amertet, Y. Mitiku, and G. Belete, "Analysis of a Coffee Husk Fired Cogeneration Plant in South Western Ethiopia Coffee Processing Industries," *Low Carbon Econ.*, vol. 12, no. 1, pp. 42–62, 2021, doi: 10.4236/lce.2021.121003.
- [24] A. Özyüğüran and S. Yaman, "Prediction of Calorific Value of Biomass from Proximate Analysis," in *Energy Procedia*, Feb. 2017, vol. 107, pp. 130–136. doi: 10.1016/j.egypro.2016.12.149.