

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v4i8.0032>

OPTIMIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS Y ESTRUCTURALES DE BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS A PARTIR DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA

OPTIMIZATION OF THE MECHANICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF SOLID BIOFUELS FROM LIGNOCELLULOSIC BIOMASS

Romero-Mendoza María Alexandra^{1*}, Palacios-Vallejos Karla Yuliana¹, Rosero-Delgado Ernesto¹, Latorre-Castro Gisela¹

¹Carrera de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Universidad Técnica de Manabí, UTM. Portoviejo, Ecuador.

*Correo: ale97romero@gmail.com

Resumen

A pesar del gran potencial de la biomasa lignocelulósica densificada (pellets), no existe aprovechamiento energético eficiente de estos biocombustibles, debido a la complejidad de sus propiedades mecánicas y estructurales más relevantes (tamaño, diámetro). El objetivo del presente trabajo fue optimizar las propiedades mecánicas y estructurales de un biocombustible sólido elaborado a partir de biomasa lignocelulósica (BL) de la palma Africana. Se evaluó el efecto de dos longitudes (10 y 16 mm) y dos diámetros (5 y 8mm) sobre el valor calorífico superior (HHV) de los biocombustibles sólidos. Se realizó un análisis proximal y un ensayo de combustión a cada una de las combinaciones evaluadas. Se determinó que una longitud de 10 mm y un diámetro de 8 mm de los pellets, alcanza el mayor HHV con un valor de $16,736 \pm 0,14$ Mj/kg y la mayor temperatura de combustión con un pico máximo de $725,10 \pm 36,9$ °C a los 10 minutos. Estadísticamente, se pudo comprobar que la longitud influye directamente sobre el potencial energético, y por el contrario el diámetro del pellet no tiene incidencia sobre el HHV.

Palabras clave: pellets, HHV, propiedades mecánicas.

Abstract

Despite the great potential of densified lignocellulosic biomass (pellets), there is no efficient energy use of these biofuels, due to the complexity of their most relevant mechanical and structural properties (size, diameter). The objective of the present work was to optimize the mechanical and structural properties of a solid biofuel elaborated from lignocellulosic biomass (BL) of the African palm. The effect of two lengths (10mm and 16mm) and two diameters (5 and 8mm) on the upper calorific value (HHV) of solid biofuels was evaluated. A proximal analysis and a combustion test were performed on each of the combinations evaluated. It was determined that a length of 10 mm and a diameter of 8 mm of the pellets reaches the highest HHV with a value of 16.736 ± 0.14 Mj / kg and the highest combustion temperature with a maximum peak of 725.10 ± 36.9 °C at 10 minutes. Statistically, it was possible to verify that the length directly influences the energy potential, and on the contrary, the diameter of the pellet has no effect on the HHV.

Keywords: pellets, HHV, mechanical properties.

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 08 de enero de 2021

Fecha de aceptación: 04 de febrero de 2021

Fecha de publicación: 09 de julio de 2021

1. Introducción

El acelerado incremento de la demanda energética y el consumo de combustibles fósiles ha provocado que las consecuencias sobre el cambio climático y el medio ambiente se intensifiquen. El fenómeno de cambio climático engloba complejas interacciones y diversos impactos. Estos impactos se refieren normalmente a los efectos sobre la vida, los ecosistemas, la salud, las sociedades, las economías, las culturas y las infraestructuras debido a los fenómenos climáticos naturales peligrosos que acontecen dentro de un lapso de tiempo específico. (Mayor et al., 2019). En consecuencia, se ha desarrollado la importancia de estudiar fuentes de energías alternativas y renovables.

La biomasa lignocelulósica derivada de residuos agroindustriales, como fuente de energía renovable, es una solución viable para satisfacer necesidades energéticas que, además, considera el cambio climático y ayuda a disminuir la dependencia de los combustibles fósiles (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2002).

Para el año 2014, en Ecuador la producción de residuos agrícolas superó los 10 millones de toneladas (Instituto Nacional de Prevención del Ecuador, 2014). La eminente cantidad de residuos generados permite el estudio y el aprovechamiento de los mismos mediante su transformación, obteniendo así biocombustibles de alto valor agregado para su uso en la generación de energía (Palacios et al., 2020), por ejemplo durante el proceso de la elaboración del aceite de palma se originan varios residuos, que se derivan de los racimos de frutos frescos después de la extracción del aceite de palma, los cuales se componen de raquis (racimos de frutos vacíos), fibra y cuesco; que aplicando las técnicas y estrategias apropiadas, esta biomasa lignocelulósica posee características para ser aprovechada en la generación de energía (Contreras et al., 2011).

La biomasa lignocelulósica puede ser destinada para fines industriales en la producción de energía térmica, a pesar de ello, el alto contenido de ceniza representa un gran desafío para lograr una operación fiable (Carvalho et al., 2013). En términos

generales, se ha demostrado que el pretratamiento de biomasa lignocelulósica resulta clave al momento de someterla a procesos de valorización (Chin et al., 2015). Cada tipo de biomasa posee características específicas que determinan su rendimiento como combustible para la generación de energía, entre las propiedades más relevantes se encuentran el contenido de humedad, ceniza, el carbono fijo, materia volátil, la composición elemental, el poder calorífico y la densidad de masa (Palacios et al., 2020), en donde son los procesos de peletizado los que principalmente permiten incrementar la densidad energética, aprovechando estos componentes y facilitando así el manejo, la reducción de los costos de transporte y almacenamiento, tanto a nivel doméstico como industrial (Tumuluru et al., 2011).

La densificación de la biomasa lignocelulósica para la obtención de pellets, se denomina peletizado, estos son elaborados a partir de biomasa molida que después pasa por un proceso de prensado utilizando como aglutinante la propia lignina presente en la biomasa; y que

generalmente son de forma cilíndrica (Palacios et al., 2020), dentro de sus componentes químicos el carbono fijo y el material volátil establece el potencial energético de la biomasa, y adicionalmente, establece la selección óptima del material a peletizar (Oberberger & Thek, 2004).

Entre las principales ventajas que ofrece el uso de biocombustibles sólidos se encuentran: el bajo costo de recolección y el bajo nivel de las emisiones de gases de efecto invernadero en los procesos de transformación (Palacios et al., 2020).

A pesar del gran potencial mencionado, no existe aprovechamiento energético eficiente de estos biocombustibles, debido a la complejidad de sus propiedades mecánicas y estructurales más relevantes (tamaño, diámetro). Para garantizar la calidad de los pellets, existen normas europeas como ÖNORM M 7135, la PVA, SS 187171, DIN 51719, en las que se establece los siguientes parámetros: diámetro 4-10 mm, la longitud $<5 \cdot D$, densidad al granel $>600 \text{ Kg/m}^3$, contenido de agua $<10 \text{ Qt\%}$, contenido de ceniza,

poder calorífico superior e inferior, contenido de elementos como azufre, potasio, cloro, cadmio, zinc, plomo, entre otros (Oberberger & Thek, 2004). Por otra parte, los residuos de palma africana son generados a nivel local; sucesos que constituyen el eje motivador principal de este trabajo. Por consiguiente, resulta importante la generación de nuevas investigaciones que permitan optimizar la eficiencia de la producción, la calidad del producto final y aprovechar de mejor manera las características de estos biocombustibles.

Esta investigación tiene como objetivo optimizar las propiedades mecánicas y estructurales de biocombustibles sólidos obtenidos a partir de biomasa lignocelulósica.

2. Metodología

En este estudio se utilizó como biomasa lignocelulósica la fibra de la palma africana (*Elaeis guineensis*).

2.1. Análisis físico-químicos

La humedad, el contenido de cenizas, material volátil y carbono fijo, fueron evaluados a los pellets de diversos tamaños y diámetros, cada ensayo se realizó por triplicado. Estos análisis constituyen la base

para determinar su potencial energético (Demirbas, 1997; Palacios et al., 2020).

Los análisis de humedad, cenizas y el contenido de material volátil se realizaron siguiendo la metodología de Al-Karany & Al-Kassir (2013). Para el análisis de la humedad se utilizó una termobalanza modelo BMBA150, el contenido de ceniza se lo realizó en una mufla Thermolyne Cientific FD1315M, el material volátil se obtuvo mediante el porcentaje de pérdida de peso que se produjo en cada muestra al someterlas a temperatura de 950°C en atmósfera inerte durante 7 minutos; mientras que el carbono fijo se calculó sustrayendo de cien la suma del contenido de humedad, de cenizas y de materia volátil (Al-Karany & Al-Kassir, 2013) (Castells, 2005).

2.2. Cálculo del calor de combustión

El valor calorífico superior (HHV), se obtuvo aplicando la fórmula desarrollada por Parikh et al. (2004) expresada por la ecuación 1. Con este parámetro se determina la cantidad de calor (energía) por unidad de masa desprendida

durante el proceso de combustión de los pellets (Seijas et al., 2014).

$$HHV = 0,3536CF + 0,1559MV - 0,0078ASH \left(\frac{Mj}{Kg}\right) \text{ (Ec. 1)}$$

Donde: CF representa el porcentaje de carbono fijo, MV el porcentaje del material volátil y ASH el porcentaje de ceniza.

2.3. Elaboración de los comprimidos (pellets)

El proceso de elaboración de los pellets se realizó en una peletizadora modelo S120, este ensayo consistió en la densificación de la biomasa previamente molida y tamizada.

2.4. Diseño del experimento

Se evaluaron 2 factores con 2 niveles cada uno (2^2), los resultados se analizaron con la ayuda del programa *Statgraphics centurión XVI.I*, los atributos del diseño se muestran en la tabla 1.

Tabla 1.
Atributos del experimento

Longitud (mm)	L1	10	-1
	L2	16	1
Diámetro (mm)	D1	5	-1
	D2	8	1

Los valores de longitud y diámetro (tabla 1) fueron seleccionados en

función del estándar que se encuentra en la norma ÖNORM M 7135 (Oberberger & Thek, 2004).

2.5. Combustión de los pellets

La quema de los pellets se efectuó en un equipo de combustión piloto, sometiendo a combustión 100g de pellets, se evaluó el incremento de temperatura hasta lograr la combustión completa de los pellets, registrando el valor de las temperaturas alcanzadas a cada minuto durante un período de tiempo de 22 minutos. Los resultados se utilizaron para establecer la cinética de combustión.

3. Resultados y discusión

3.1. Análisis físico-químicos

En la tabla 2 se muestran los resultados del análisis proximal realizado a los pellets según el tamaño y el diámetro de los mismos antes y después de la combustión. Se evaluó el contenido de ceniza, material volátil y carbono fijo con la finalidad de conocer las características que atribuyen el poder energético a estos biocombustibles. La composición química proximal es un parámetro para determinar el potencial energético de la biomasa, por su

parte, el contenido de carbono fijo favorece el potencial energético del pellet, al actuar como un generador de calor principal durante la combustión, es decir, muestra una fuerte correlación lineal con el valor calorífico del biocombustible (Oberberger & Thek, 2004; Ozyuguran & Yaman, 2017). No obstante, valores elevados de

cenizas y humedad; disminuyen el potencial energético del material, afectando el proceso de combustión (Gebgeegziabher et al., 2013). Sobre esto Demirbas (1997), menciona que el contenido de material volátil es un parámetro que está relacionado directamente con la velocidad de calentamiento y el incremento de la temperatura.

Tabla 2.
Análisis proximal de los pellets antes y después de la combustión

Combinación	Antes de la combustión			Después de la combustión		
	CEN (%)	MV (%)	CF (%)	CEN (%)	MV (%)	CF (%)
L1-D1	6,40 ± 0,34	82,61 ± 0,58	10,99 ± 0,81	80,24 ± 0,50	28,83 ± 0,3	0,0 ± 0
L2-D1	7,24 ± 0,18	84,57 ± 0,39	8,19 ± 0,26	67,85 ± 0,54	27,74 ± 0,19	4,45 ± 1,55
L1-D2	6,99 ± 0,76	81,44 ± 0,73	11,71 ± 0,13	86,66 ± 0,32	34,14 ± 0,35	0,0 ± 0
L2-D2	8,02 ± 0,20	83,04 ± 0,44	8,95 ± 0,32	83,70 ± 0,41	23,08 ± 1,15	0,0 ± 0

CEN: ceniza; MV: Material Volátil; CF: Carbono Fijo.

Los resultados del análisis proximal fueron variando en cada experimento, el menor contenido de ceniza se obtuvo para L1-D1 y el menor contenido de material volátil se obtuvo para L1-D2, y ambas presentaron los valores de CF más altos siendo estos de 10,99 ± 0,81% y 11,71 ± 0,13% respectivamente, por lo que se puede decir que los experimentos con mejores características según su análisis proximal son los de L1 (10 mm).

Luego del proceso de combustión se observó que existe una cantidad de material volátil sin consumirse, lo cual representa una cantidad de materia prima que se está perdiendo en el proceso. A pesar de que L1-D2 resultó con mejores características en su análisis proximal, también presenta el valor de MV más elevado luego de la combustión, lo cual puede ser aprovechado para incrementar aún más el poder energético de esta combinación.

Sulaiman et al. (2019) en su investigación con pellets elaborados a partir del tallo de maíz obtuvieron un elevado valor calorífico (33,600 Mj/kg), con un bajo contenido de cenizas (0,7%), de material volátil (55%) y un contenido de carbono fijo de 44,3%; por el contrario Adjin-Tetteh et al. (2018) reportaron un valor calorífico de 12,480 Mj/kg, así como un alto contenido de ceniza (16,24%), con una concentración de material volátil del 61,73% y carbono fijo de 10,96%.

3.2. Calor de combustión calculado (Mj/kg)

En la figura 1 se presentan los resultados de la evaluación energética, se observa que el valor calorífico superior (HHV) contenido en los biocombustibles (pellets) está condicionado principalmente a parámetros como contenido de humedad, ceniza, material volátil y carbono fijo, como lo demuestran

Ozyuguran & Yaman (2017) en su estudio.

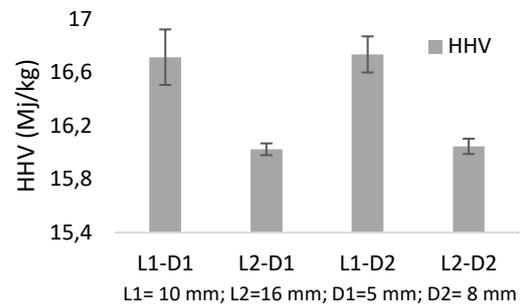


Figura 1. Valor calorífico superior (HHV) de cada experimento

El diagrama de Pareto (figura 2) muestra que la longitud tiene un efecto significativo sobre el valor calorífico superior (HHV) del biocombustible, mientras que el diámetro no tiene efecto. Además, se tiene que el efecto del diámetro sobre el HHV es positivo, es decir cuando el diámetro aumenta el valor calorífico se incrementa, mientras que la longitud tiene un efecto negativo ya que cuando la longitud aumenta el valor calorífico disminuye.

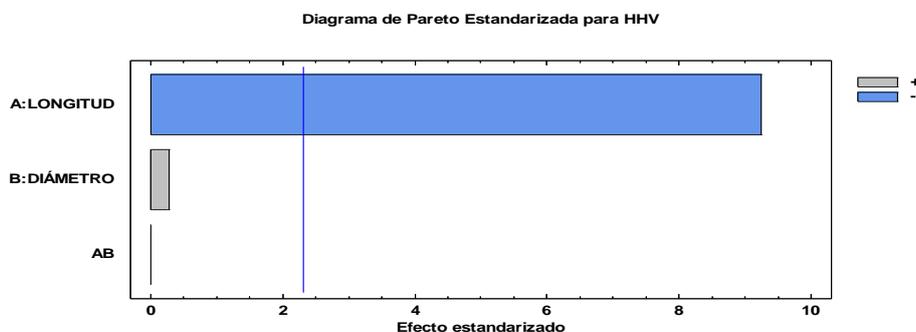


Figura 2. Diagrama de Pareto estandarizado para evaluar los efectos de la longitud y el diámetro sobre el valor calorífico superior calculado.

En la tabla 3 se muestra la prueba de múltiples rangos ($\alpha=0,05$), realizada a las dos longitudes y diámetros evaluados, en la cual se observa que existen diferencias significativas para las dos longitudes evaluadas (10 y 16 mm) en función del HHV de los pellets, por el contrario para el diámetro no se observan diferencias estadísticas, lo cual comprueba que el diámetro de los pellets en el intervalo evaluado (5-8 mm) no tiene incidencia sobre el valor calorífico superior de los biocombustibles elaborados con residuos de palma Africana.

Los pellets que mayor valor calorífico superior alcanzaron fueron los elaborados con una longitud de 10 mm (L1) y un diámetro de 8 mm (D2), con un HHV de $16,736 \pm 0,14$ Mj/kg; por su parte, los pellets que menor valor calorífico superior presentaron ($16,024 \pm 0,04$ Mj/kg), fueron los elaborados a partir de una longitud (L2) de 16 mm y un diámetro de 5 mm (D1).

Tabla 3.

Prueba de múltiples rangos: longitud y diámetro de los pellets en función de HHV

Longitud (mm)	Media HHV (Mj/kg)	Grupos Homogéneos
1	16,04	X
-1	16,73	X
Diámetro (mm)		
-1	16,37	X
1	16,39	X

3.3. Cinética de combustión

En la figura 3 se muestran las cinéticas de temperatura de cada uno de los experimentos durante la combustión en un tiempo de 22 minutos. En cada uno de los gráficos se muestran los valores de temperatura máxima alcanzada.

La cinética de la combustión es de mucha importancia porque permite observar la oscilación de temperatura, el desprendimiento de energía y el tiempo que se requiere para realizar la combustión de una determinada cantidad de biocombustible sólido (pellets).

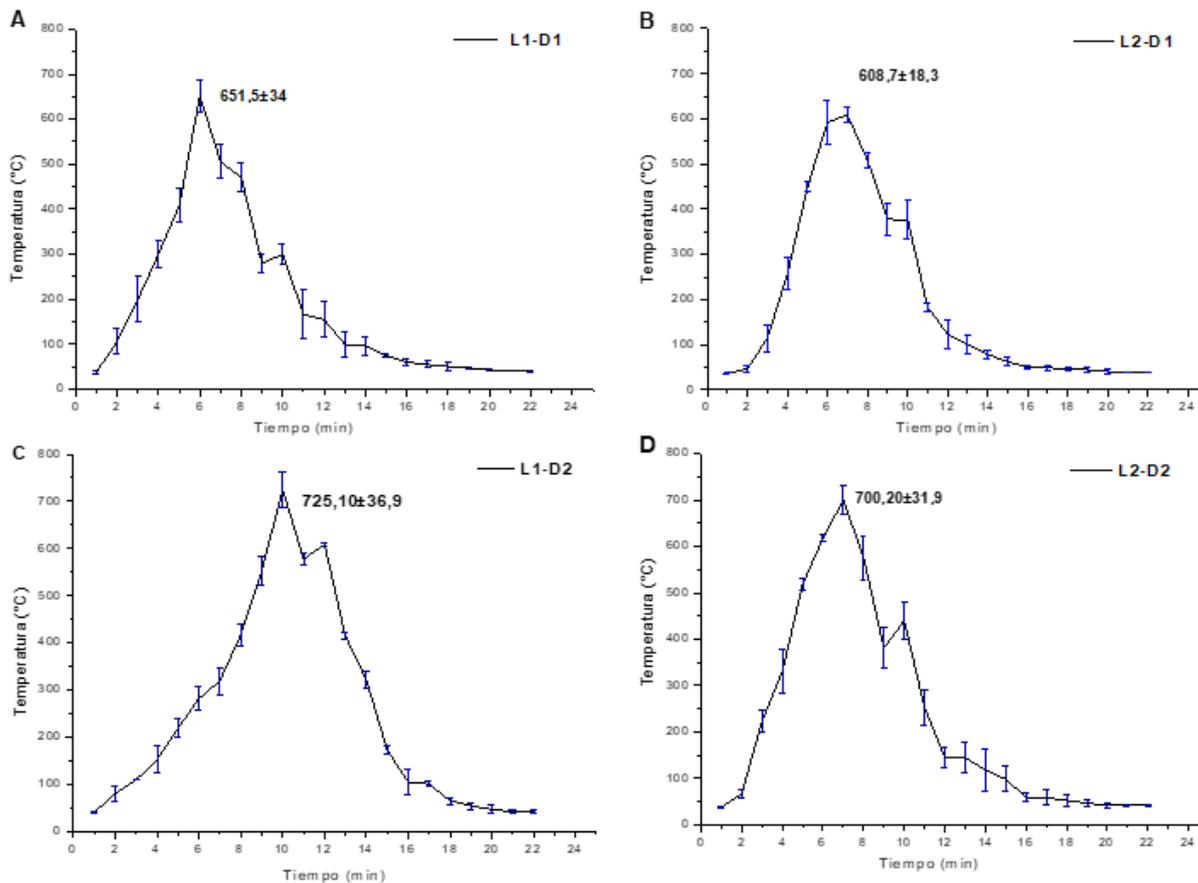


Figura 3. Cinética de combustión de los pellets (T_{Max}) para A): L1-D1 (10-5) mm, B): L2-D1 (16-5) mm, C): L1-D2 (10-8) mm, D): L2-D2 (16-8) mm.

Cuando la ruta de combustión básica de un combustible sólido inicia, lo primero que ocurre es la evaporación de la humedad (Sandoval et al., 2013). Posteriormente, se libera una gran variedad de productos gaseosos a través de la descomposición del combustible. Basu (2006), menciona que la combustión de los biocombustibles sólidos elaborados a partir de biomasa lignocelulósica desprende cierta cantidad de gases volátiles como hidrocarburos poliaromáticos

(PAH), los cuales son quemados después de la desvolatilización, y el carbono fijo presente en la biomasa es quemado, emitiendo calor hasta que la biomasa queda reducida en ceniza.

En la cinética (figura 3), se puede observar que el perfil de temperaturas alcanzado durante la combustión de los diferentes ensayos (L1-D1, L2-D1, L1-D2 y L2-D2) es similar. Es decir, se observa un incremento de temperatura entre los primeros 8 minutos, tiempo

promedio en el cual se alcanza un máximo de temperatura (pico máximo) que dura aproximadamente 1 a 2 minutos, posterior a ello, la temperatura desciende rápidamente.

Durante la práctica, el experimento L1-D2 (Fig. 3C) alcanza la mayor temperatura con un pico máximo de $725,10 \pm 36,9$ °C a los 10 minutos del proceso de combustión, punto a partir del cual la temperatura disminuye hasta estabilizarse alrededor de los 50 °C. Este patrón se observó en cada una de las curvas de cinética de combustión obtenidas, mientras que la temperatura más baja se obtuvo en la cinética del experimento L2-D1 (Fig. 3B) alcanzando una temperatura de $608,7$ °C $\pm 18,3$ a los 7 minutos.

Los resultados de la cinética de combustión corroboran lo expuesto en el apartado 3.2, donde el mayor valor calorífico superior (HHV) se obtuvo con L1-D2, por lo que con una menor longitud es posible aprovechar las características del biocombustible sólido. Según Fernández et al. (2015) la superficie reactiva de contacto con el oxígeno del aire (para dar la reacción de combustión) es mayor en una astilla

de menor tamaño, esto se debe a que, en la materia de mayor tamaño, las moléculas internas de su estructura no pueden interactuar fácilmente o de forma directa con el reactivo.

Forero et al. (2012) mencionan que el tamaño de los pellets afecta el consumo del material durante su combustión, más que la composición de este, de manera que grandes tamaños de partícula generan más tiempo en cada una de las etapas de combustión.

4. Conclusiones

Los biocombustibles sólidos presentan características físicas que condicionan su aprovechamiento energético. Con las pruebas realizadas se evidencia que la combustión del pellet depende del tamaño de partícula, que a su vez influye en el poder calorífico superior, demostrando que con menor longitud de los pellets, se puede alcanzar un mayor HHV, debido a que una partícula más pequeña permite una combustión más uniforme para alcanzar una temperatura más elevada.

Los biocombustibles sólidos (pellets) como práctica para la producción de

energía térmica, vienen ganando relevancia, provocando, a primera vista, un menor impacto ambiental, un mejor manejo y distribución; por ende, resulta relevante este estudio, ya que con la optimización se busca mejores resultados, volviendo el proceso más eficiente.

Bibliografía

- Adjin-Tetteh, M., Asiedu, N., Dodoo-Arhin, D., & Karam, A. (September de 2018). Thermochemical conversion and characterization of cocoa pod husks a potential agricultural waste from Ghana. *Industrial Crops & Products*, 119, 304-312. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.02.060>
- Al-Karany, & Al-Kassir, R. (2013). *Caracterización y preparación de residuos de biomasa con ensayos experimentales de secado térmico y combustión no contaminante*. Portoalegre: Instituto Politécnico de Portoalegre.
- Basu, P. (2006). *Combustion and Gasification in Fluidized Beds*. CRC Press.
- Carvalho, L., Wopienka, E., Pointner, C., Lundgren, J., Verma, V. K., Haslinger, W., & Schmidl., C. (2013). Performance of a pellet boiler fired with agricultural fuels. *Applied Energy*, 104, 286-296.
- Castells, X. (2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Ediciones Díaz de Santos.
- Chin, K., H'ng, P., Paridah, M., Szymona, K., Maminski, M., Lee, S., . . . Goc., W. (2015). Reducing ash related operation problems of fast growing timber species and oil palm biomass for combustion applications using leaching techniques. *Energy*, 90, 622-630.
- Contreras, N., Silva, Á., Garzón, E., & Yañez, E. (2011). *Caracterización y manejo de subproductos del beneficio del fruto de palma de aceite*. Bogotá: Centro de Investigación en Palma de Aceite - Cenipalma.
- Demirbas, A. (1997). Calculation of higher heating values of biomass fuels. *Fuel*, 76(5), 431-4.
- Fernández, J., Gutierrez, F., Del Rio, P., San Miguel, G., Bahillo, R., Sanchez, J., . . . Rodriguez, L. (2015). *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética*. Ediciones Paraninfo, S.A.
- Forero, C., Guerrero, C., & Sierra, F. (2012). Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de

- gasificación. *Iteckne*, 9(1), 21-31.
- Gebgeegziabher, T., Oyedun, A., Zhang, Y., & Hui, C. (2013). Effective Optimization Model for Biomass Drying. 23rd *European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, 97–102. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63234-0.50017-8>
- Instituto Nacional de Prevención del Ecuador. (2014). *Atlas bioenergético de la república del Ecuador*. ESIN consultora S.A.
- Mayor, F., Fariñas, F., & Vega, S. (2019). *One health: Cambio climático, contaminación ambiental y el impacto sobre la salud humana y animal*. Amazing Books.
- Obernberger, I., & Thek, G. (2004). Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. *Biomass and bioenergy*, 653-669.
- Ozyuguran, A., & Yaman, S. (2017). Prediction of Calorific Value of Biomass from Proximate Analysis. *Energy Procedia*, 107, 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.149>
- Palacios, K., Romero, M., & Rosero, E. (2020). Estimación de las propiedades físico-químicas de residuos agroindustriales para el aprovechamiento como biocombustible. *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT*, 4(2), 28-32.
- Parikh, J., Channiwala, S., & Ghosal, G. (2005). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, 84(5), 487-494.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2002). *Conversión de residuos agrícolas orgánicos en fuente de energía*. Centro Internacional de Tecnología Ambiental.
- Sandoval, S., Hernández, E., & Rodríguez, J. (2013). Simulación multi-física del secado de madera en *COMSOL Multiphysics 3.4*. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14(3), 389-398.
- Seijas, S., Seijas, P., Seijas, N., Chávez, A., Salgado, L., & Alva, M. (2014). Optimización del proceso de densificación de desechos lignocelulósicos para la conformación de pellets energéticos. *Ciencia para el desarrollo*, 17(1), 73-80.
- Sulaiman, M. A., Adetifa, B., Adekomaya, O., & Lawal, N. S. (2019). Experimental Characterization of Maize Cob and Stalk Based Pellets for Energy Use. *Engineering Journal*, 23(6), 117-128.

<https://doi.org/10.4186/ej.2019.23.6.117>

Tumuluru, J., Wright, C., Hess, R., & Kenney, K. (2011). A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. *Biofuels Bioprod. Biorefin*, 5, 683–707.