

Evaluación del nivel de emisiones y poder calorífico en briquetas de residuos del olivar

Evaluation of the level of emissions and calorific power of briquettes with olive residues

Raul Cartagena Cutipa^{1*}, Hugo Javier Rivera Herrera¹, Percy Fermín Velásquez Ccosi^{II}, Roberto Simeone Falcón Peña¹, Andrea del Rosario Velarde Franco¹

^IUniversidad Privada de Tacna, Tacna, Perú

^{II}Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú

*Autor de correspondencia: raucartagenac@upt.pe

Recibido: 17 de marzo de 2023

Aprobado: 26 de junio de 2023

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



RESUMEN/ ABSTRACT

La industria del olivar genera residuos con efectos ambientales negativos, especialmente durante la obtención de aceite y la elaboración de aceituna de mesa. La investigación tuvo como objetivo evaluar las emisiones y el poder calorífico de briquetas elaboradas con residuos de poda, orujos y pepas de aceituna, con la finalidad de aprovechar esta biomasa. Se llevaron a cabo cuatro tratamientos que se distinguían por la presencia o ausencia de lavado en los orujos utilizados. Las briquetas obtenidas mostraron una relación CO/CO₂ de 0,0097 ppm y un poder calorífico cercano al 80 % del carbón vegetal. Aunque no se encontraron diferencias significativas en las emisiones de CO y CO₂ y poder calorífico debido al lavado del orujo (P-valor > 0,05), se concluye que los residuos del olivar tienen potencial como fuente de energía alternativa. Sin embargo, se requiere mayor investigación antes de considerar su uso como biocombustible comercial.

Palabras clave: residuos del olivar, biomasa, emisiones, poder calorífico.

The olive industry generates waste with negative environmental effects, especially during the extraction of oil and the processing of table olives. The research aimed to assess the emissions and calorific value of briquettes made from olive pruning residues, olive pomace, and olive pits, with the purpose of utilizing this biomass. Four treatments were conducted, varying in the presence or absence of washing the olive pomace. The obtained briquettes exhibited a CO/CO₂ ratio of 0.0097 ppm and a calorific value close to 80% of charcoal. Although no significant differences in CO and CO₂ emissions were found due to the washing of olive pomace (p-value > 0.05), it is concluded that olive waste holds potential as an alternative energy source. However, further investigation is needed before considering its use as a commercial biofuel.

Key words: olive residues, biomass, emissions, calorific power.

INTRODUCCIÓN

La dependencia de la energía hacia los combustibles fósiles, hacen necesaria la búsqueda de otras fuentes de energéticas que sean respetuosas con el medio ambiente. La sociedad actual presenta problemas de un elevado consumo energético que principalmente depende de los recursos fósiles [1]. En ese sentido, desde hace algunos años se está investigando el desarrollo de tecnologías a partir de fuentes y recursos renovables [2-4], como la biomasa lignocelulósica o la energía eólica, solar o geotérmica. La biomasa aprovechada proviene de residuos combustibles, especialmente los de actividades agrícolas, forestales y agroindustriales. Según Nogales [5], el consumo energético mundial de la biomasa representa entre el 8 % y 14 %, siendo más notable en países en desarrollo donde se ubica en un 80 %.

Cómo citar este artículo:

Raul Cartagena Cutipa, *et al.* Evaluación del nivel de emisiones y poder calorífico en briquetas de residuos del olivar. Ingeniería Energética. 2023. 44 (2), mayo/agosto. ISSN: 1815-5901.

Sitio de la revista: <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/index>

La biomasa lignocelulósica se genera en el proceso de fotosíntesis, donde se combinan CO_2 y H_2O en presencia de luz solar, lo que da origen a productos primarios como azúcares y a O_2 como subproductos. Esta biomasa está compuesta principalmente por celulosa (38 % a 50 %), hemicelulosa (23 % a 32 %) y lignina (15 % a 25 %) [1]. Su combustión genera emisiones de dióxido de carbono (CO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2) y monóxido de carbono (CO) los cuales afectan la capa de ozono, incrementan el efecto invernadero y acrecentando el calentamiento global. Se ha encontrado que la concentración media anual mundial de CO_2 alcanzó 407,8 ppm en el 2018, en comparación con los 405,5 ppm registrados en el 2017 [6]. Esta realidad obliga a llevar a cabo estudios sobre fuentes energéticas y la aplicación de tecnologías que reduzcan las emisiones que pueden generar la biomasa utilizada como fuente energética.

Las principales fuentes para la producción de biocombustibles son, por tanto, materiales lignocelulósicos, como residuos de maderas y arbustos. En esa dirección, en Perú existe una alta dependencia de biomasa agraria para cocción y calor en el área rural, lo cual está asociado al empleo ineficiente y la deforestación [7]. En el caso de la región de Tacna, es notable la producción de biomasa procedente del cultivo de olivos, ya que es la zona de producción por excelencia. En comparación al resto del país, Tacna produce el 80 % de las aceitunas, que son el fruto comestible del olivo. En contraparte, como producto del proceso de obtención del aceite, las aceituna y sus derivados, se generan residuos llamados orujo y pepas, de tal forma que el manejo de estos residuos supone un problema para los productores debido a su poder contaminante, así como por el costo que implica su tratamiento.

Además, las labores culturales del olivo también generan residuos de podas, que en algunos casos se depositan en el campo como cercos y otras veces se utiliza como leña para cocinar, lo que representa un potencial contaminante y una baja eficiencia energética. Una forma adecuada de aprovechar esta biomasa residual es fabricar briquetas que pueden ser una alternativa energética para sustituir el carbón vegetal y a la leña. Las primeras contribuyen a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), mientras que las segundas ayudan a evitar la deforestación y a mejorar el rendimiento energético [8]. Esto se debe a es conocido que uno de los problemas de utilizar la leña como combustible es su baja eficiencia calórica. Por estarazón, se requieren grandes cantidades de leña para generar energía, mientras que las briquetas presentan una ventaja frente al uso de leña, ya que reducen la generación de CO_2 en un 50 %, así como presentan concentraciones bajas de azufre (S), nitrógeno (N) y GEI, los cuales impactan en el medio ambiente [9].

Se han realizado algunas investigaciones para obtener briquetas a partir de biomasa residual [10,11], utilizando subproductos que contienen compuestos lignocelulósicos y materiales biológicos aglutinados con varios compuestos, como gomas de carpintero y almidón. Estas investigaciones han determinado características físicas y químicas, como la friabilidad, densificación, poder calorífico. Sin embargo, son escasos los estudios que evidencien la generación de gases. Nogales [5], indica que el uso de la biomasa del orujo como fuente energética puede generar emisiones contaminantes, especialmente debido a que el material contiene compuestos oleosinosos que generan una mayor cantidad de compuestos orgánicos volátiles, como el CO_2 y el CO . En ese sentido, la reducción de emisiones debido a las características del material podría mejorarse con un pretratamiento que consiste en el lavado mecánico para disminuir los compuestos mencionados, lo que podría contribuir en la reducción de las emisiones.

Con base a las consideraciones anteriores, el objetivo de la investigación es evaluar el nivel de emisiones de CO_2 y CO , así como del poder calorífico de las briquetas elaboradas a partir de los residuos del olivar que incluyen los residuos de poda, las pepas de aceituna, así como el orujo lavado (L) y sin lavar (SL), con el propósito de determinar los efectos del pretratamiento sobre los parámetros evaluados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Determinación de poder calorífico

La fabricación de las briquetas se realizó empleando las pepas y orujo de aceituna junto con las podas de olivo. Los dos primeros se obtuvieron de una empresa local dedicada al proceso de transformación de las aceitunas, mientras que las podas se copiaron de un fundo ubicado en la zona productora de olivos en la zona conocida como La Yarada ($18^\circ 17' 08'' \text{S}$ $70^\circ 26' 20'' \text{O}$). Inicialmente, las podas se redujeron de tamaño con un cepillo eléctrico de 750 W, luego se trituraron en un molino de martillos de 60 HP. De manera similar, el orujo y la pepa de aceituna se trituraron en el mismo molino.

Posteriormente, se tamizó toda la biomasa utilizando una malla equivalente a 10 mesh. El pretratamiento se realizó mediante un lavado mecánico durante un tiempo de 3 horas con agitación constante. Esta operación se repitió tres veces, utilizando una muestra de 200 g en 1 L de agua. Las briquetas se formaron en un equipo específico para tal propósito, accionado con una prensa hidráulica. La cantidad de mezcla por briquetas fue 200 gr y se aplicó una presión de 102 kgf/cm^2 obteniéndose piezas con un diámetro de 1 cm y una altura de 10 cm. El diseño estadístico empleado fue completamente al azar, con cuatro repeticiones.

Los tratamientos se formularon con diferentes proporciones de los componentes, que se mezclaron de la siguiente manera: T1: 5 % de pepa + 5 % de Orujo + 70 % de poda, T2: 10 % de pepa + 5 % de Orujo + 80 % de poda, T3: 5 % de pepa + 10 % de Orujo + 80 % de poda, T4: 10 % de pepa + 10 % de Orujo + 70 % de poda. Adicionalmente se utilizó 15 % almidón de papa como aglutinante en forma de engrudo para todos los tratamientos.

Para determinar el poder calorífico, se realizó por análisis inmediato de acuerdo con la ecuación de Goutal [12]. El poder calorífico se calculó como el poder calorífico superior, que es la cantidad total de calor desprendido en la combustión completa por unidad de volumen de combustible cuando el vapor de agua está condensado, para ello se tuvieron en cuenta el porcentaje de humedad, materiales volátiles, cenizas y carbono fijo en base seca, según la ecuación (1).

$$\text{PoderCalorificoSuperior} = (82Cf + AV) \text{ kcal / kg} \quad (1)$$

Donde: Cf = contenido de carbono fijo (%); V = contenido de materia volátil (%); A = coeficiente obtenido de la relación siguiente: $A = V / (V + C)$; (V = contenido de materia volátil (%); C = contenido de cenizas (%). El Carbono Fijo se determinó de acuerdo a la norma ASTM D – 3172 empleando la ecuación (2):

$$\% \text{CarbonoFijo} = 100 - (H + C + MV) \quad (2)$$

Donde: H = contenido de humedad (%); MV = contenido de materia volátil (%); C = contenido de cenizas (%) El cálculo del material volátil se realizó de acuerdo con la norma ASTM D – 1762 S. se pesaron 2 g de muestra que fueron acondicionados en un crisol y se colocaron en la entrada de una mufla a una temperatura de 950 °C y se dejó por 7 min. Posteriormente, se enfrió en una desecadora durante 25 min, registrando los pesos obtenidos. Finalmente, se aplicó la siguiente ecuación (3):

$$\% \text{MaterialVolatil} = ((Pi - Pf) / Pf)(100 - H) \quad (3)$$

Donde: Pi = peso inicial de la muestra de carbón (g); Pf = peso final de la muestra (g); H = contenido de humedad (%).

Las cenizas se determinaron pesando 2 g de muestra carbonizada en una cápsula de porcelana, la cual fue sometida a la mufla a 450 °C por 2 h hasta lograr su incineración total. Luego, se colocó en la desecadora por 30 min. El contenido de ceniza se determina utilizando la ecuación (4):

$$\% \text{Cenizas} = (Pf / Pi) \times 100 \quad (4)$$

Donde: Pf = peso de las cenizas blancas (g); Pi = peso húmedo o acondicionado de la muestra (g).

La humedad se determinó pesando 10 g de muestra y luego secándola en una estufa a 103 °C hasta obtener un peso constante, posteriormente, se pesó la muestra final. El porcentaje de humedad se calcula utilizando la ecuación (5):

$$\% \text{Humedad} = ((Pi - Pf) / Pi) \times 100 \quad (5)$$

Donde: Pi = peso inicial de la muestra (g); Pf = peso final seco en estufa (g).

Determinación de emisiones de CO₂ y CO

Para evaluar las emisiones de monóxido de carbono (CO), se midieron utilizando un sensor MQ-7 marca Hanwei Electronics, con un rango de medición 20 a 2000 ppm. Por otro lado, las mediciones de CO₂ se realizaron utilizando un módulo adaptado con un sensor de calidad de aire BME 680 de la marca Bosch con rango de emisión de 0 a 9999 ppm. Las mediciones se llevaron a cabo siguiendo el procedimiento descrito por Bastidas-Barranco [8] por triplicado. Para ello, se llevó a cabo la combustión de 20 g de muestras de briketa por cada prueba [13].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Emisiones de CO y CO₂

La evolución del nivel de emisiones de CO₂ generado durante la combustión de briquetas de residuos de olivar que contenían orujo de aceituna lavado y sin lavar se muestra en la figura 1. La evolución de las emisiones de CO en ambos tipos de tratamientos es similar al inicio y durante la combustión. Inicialmente, el nivel de emisiones fue en promedio 420 ppm, luego comenzó a incrementarse hasta el tercer minuto, alcanzando valores máximos de 9964,82 ppm y 9929,71 ppm en el T2 que contenía orujo lavado (T2L) y sin lavar (T2SL) respectivamente. A medida que la combustión avanzaba, se observó que los valores disminuyeron hasta un mínimo de 412 ppm.

Las formas de las curvas fueron similares en todos los tratamientos, diferenciándose en los valores máximos. La divergencia entre estos valores estaría relacionada con la variación en la composición; en los tratamientos donde la proporción del orujo y el pepa de aceituna era mayor (T2 y T4), se observaron niveles más altos de CO₂, a diferencia de los demás tratamientos. Por lo tanto, la evolución de las emisiones por tratamiento, considerando la adición de orujo lavado (L) y sin lavar (SL), mostró claramente que no existen diferencias. Al respecto, en una investigación realizada por Nogales [5], al comparar este tipo de emisiones en orujo de aceituna lavada y sin lavar, se encontraron reducciones moderadas en las emisiones de CO₂.

También conviene destacar que la media geométrica de CO₂ (1390 ppm) es ligeramente inferior a la determinada en carbón vegetal (1432 ppm), aunque superior en el caso de briquetas de hueso de palta (480 ppm) [14]. En esa línea, algunos autores [15, 16], también coinciden en que las briquetas elaboradas a partir de biomasa generan emisiones más bajas que el carbón.

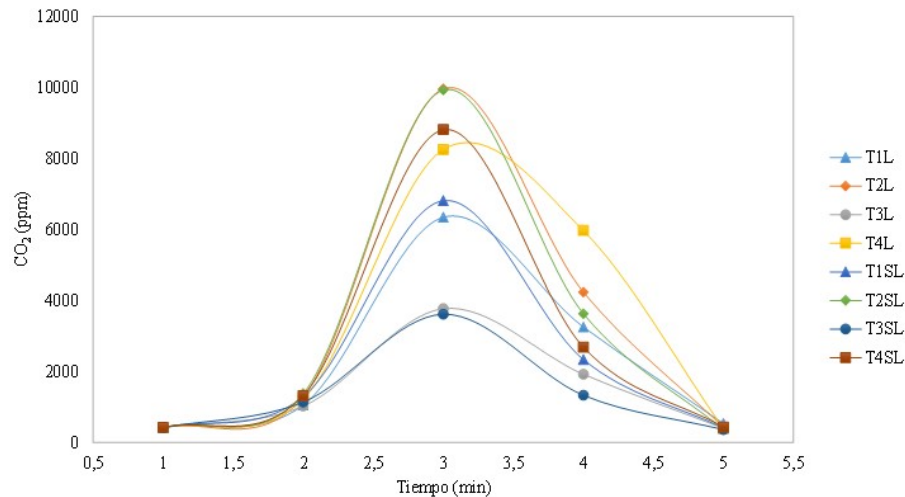


Fig. 1. Influencia del orujo lavado (T1L, T2L, T3L, T4L) y orujo sin lavar (T1SL, T2SL, T3SL, T4SL) en el nivel de emisiones de CO₂ según tratamientos en briquetas de residuos del olivar

Patrones ligeramente diferentes se encontraron en la evolución del CO (véase figura 2), no obstante, se identificó que al inicio los valores fueron bajos con una media de 7,17 ppm, alcanzado promedios máximos de 13,70 ppm. Al finalizar, los 3 min, después de 5 min, las emisiones promedio fueron de 4 ppm. A diferencia del CO₂, el CO se genera con mayor velocidad en las briquetas de residuos del olivar debido a la liberación de compuestos volátiles, principalmente contenido en el orujo de aceituna. Aunque no existe un patrón definido, se observa que los tratamientos que contenían orujo sin lavar (T1SL, T3SL, T4SL) presentaron valores más altos en comparación con los tratamientos similares que contenían orujo lavado. Sin embargo, dichas diferencias no serían estadísticamente significativas.

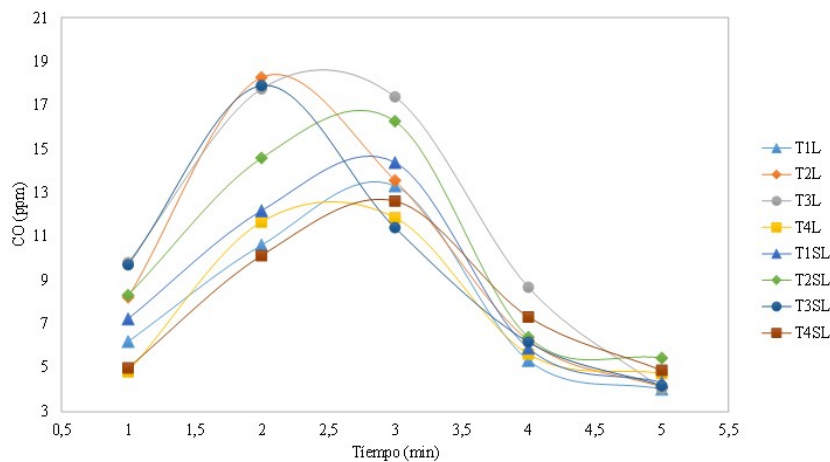


Fig. 2. Influencia del orujo lavado (T1L, T2L, T3L, T4L) y orujo sin lavar (T1SL, T2SL, T3SL, T4SL) en el nivel de emisiones de CO según tratamientos en briquetas de residuos del olivar

La relación entre CO / CO₂ es un indicador de combustión, tal como afirma Bastidas-Barranco [8]. El CO procede de una combustión incompleta, lo cual reduce el poder calorífico y disminuye el rendimiento de la combustión. Es altamente tóxico, ya que al ser inhalado se combina en la hemoglobina, inhibiendo la absorción del oxígeno necesario. Por otro lado, el CO₂ no es un gas tóxico y se produce en el proceso de combustión.

En la figura 3, se observa que la relación entre CO/CO₂ es mayor en los tratamientos que contenían orujo sin lavar (T1SL, T2SL, T4SL), mientras que el tratamiento que contenía orujo lavado (T3L) mostró el valor medio más alto. Esto indica que durante el proceso de combustión de las briquetas compuestas por 10 % pepa de aceituna, 15 % de Orujo y 75 % de poda de olivo se generan 0,0097 ppm de CO por cada ppm de CO₂. Por lo tanto, como señala Bastidas-Barranco [8], existen factores de diseño de las briquetas que dificultan su combustión completa, lo cual puede ser mejorado, entre otros, mediante el control del flujo de aire y confinamiento de gases calientes.

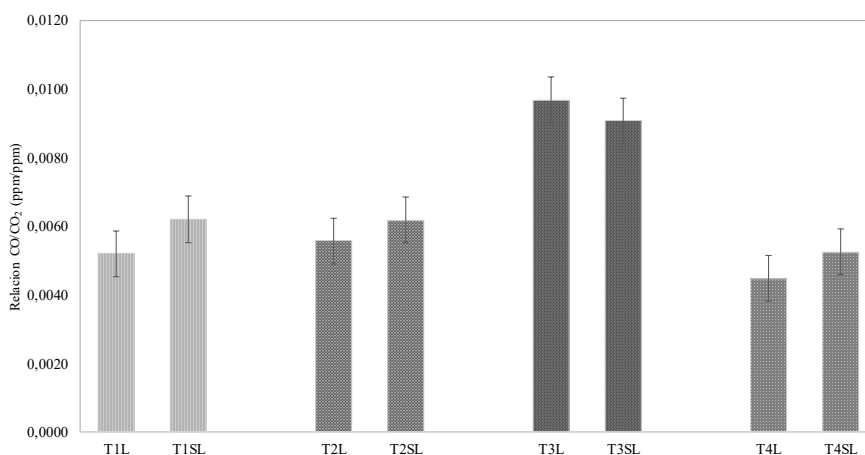


Fig. 3. Relación de emisiones de CO/CO₂ (ppm/ppm) para briquetas de residuos de olivar. Las medias entre pares de tratamientos con adición de orujo lavado (10 % pepa de aceituna+15 % de Orujo+75 % de poda de olivoL) y orujo sin lavado (SL) no difieren entre sí al 5 % de significancia por la prueba de Tukey

Poder calorífico

Según se observa en la tabla 1, los resultados del análisis de varianza indicaron diferencias significativas ($p < 0,05$) únicamente en el tratamiento formulado con un 10 % de pepa de aceituna, un 15 % de Orujo y un 75 % de poda de olivo (T3), donde el segundo componente (orujo) se encontraba tanto lavado como sin lavar. Estadísticamente, no se encontró influencia del lavado de orujo en el poder calorífico en los demás tratamientos. De manera similar, no se encontraron diferencias significativas al compararlos tratamientos que contenían orujo lavado (L) ni al comparar los tratamientos con orujo sin lavar (SL).

Sin embargo, a medida que se incrementaba la proporción de pepa de aceituna en la composición de las briquetas con orujo lavado (L) y sin lavar (SL), el potencial calorífico aumentaba, aunque no de manera significativa ($p > 0,05$). Por otro lado, los tratamientos que contenían orujo sin lavar (SL) sí mostraron diferencias según la prueba de Tukey. En ambos casos, el tratamiento T4 presentó el mayor poder calorífico ($5924,33 \pm 283,55$ kcal/kg), seguido en orden decreciente por los tratamientos T2, T1 y T3, respectivamente. Es importante subrayar que el poder calorífico en todos los tratamientos es considerablemente superior al mínimo establecido por la NTC 2060 para briquetas que no sean fabricadas con carbón, el cual es de $2\,987,57$ kcal/kg ($12\,500$ kJ/kg), así como a los valores exigidos por las normas alemanas DIN-51731/Plus y austriacas ONORM M7135, que establecen valores mayores a $4\,299,23$ kcal/kg [17].

De forma similar, al compararlos con otros tipos de briquetas fabricadas con coco, carbón cascarilla y aglomerante ($4\,071,13$ kcal/kg) [18], tronco y hojas de *Ulex europaeus* ($4\,590,04$ kcal/kg) [19], así como aserrín y corteza de pino ($4\,200$ kcal/kg) [20], se puede observar que el poder calorífico de las briquetas fabricadas con residuos del olivar muestra gran potencial energético para ser usado como biocombustible, en comparación con el potencial que poseen otros materiales similares, incluso al compararlo con el poder calorífico de los residuos leñosos del olivo ($4\,600$ kcal/kg). Estas briquetas presentan un poder calorífico mínimo un 16% superior y cercano al 80 % del poder calorífico del carbón vegetal, el cual teóricamente se encuentra en el orden de los $7\,000$ kcal/kg dependiendo del material utilizado.

Tabla 1. Poder calorífico (kcal/kg) de briquetas de residuos de olivar según tratamientos con adición de orujo lavado (L) y orujo sin lavado (SL).

Tratamientos	L (\bar{X} + SD)	SL (\bar{X} + SD)	Diferencias (L - SL)
10 % pepa de aceituna+10 % de Orujo(L/SL)+80 % de poda de olivo (T1)	5686,62±285,35	5693,61±283,83a	-6,99
15 % pepa de aceituna+10 % de Orujo(L/SL)+75 % de poda de olivo (T2)	5917,26±212,80	5919,45±211,29ab	-2,19
10 % pepa de aceituna+15 % de Orujo(L/SL)+75 % de poda de olivo (T3)	5496,62±2,01	5502,22±52,31b	-5,60*
15 % pepa de aceituna+15 % de Orujo(L/SL)+70 % de poda de olivo (T4)	5924,33±283,55	5926,88±283,67b	-2,54

En la tabla:

\bar{X} representa la media de los tratamientos, SD indica la desviación estándar. Las letras a y b representan diferencias significativas entre los tratamientos. Existe una diferencia significativa (*) en el tratamiento T4 con un nivel de significancia del 5% ($p < 0,05$).

Dado los hallazgos, sería relevante establecer nuevas formulaciones en futuras investigaciones con el fin de profundizar en las emisiones y optimizar el poder calorífico al aumentar el orujo de aceituna antes de realizar una afirmación concluyente. Esto se debe a que, en caso de un posible escalamiento industrial del producto, el pretratamiento podría generar un problema ambiental adicional relacionado con los residuos líquidos resultantes del lavado. Además, es importante estimar el costo-beneficio del proceso de fabricación en relación al poder calorífico obtenido.

CONCLUSIONES

Las briquetas fabricadas a partir de residuos del olivar que contenían orujo lavado no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos en cuanto al nivel de emisiones ni el poder calorífico. En consecuencia, el lavado de los orujos no influye sobre estos dos parámetros. Así mismo, el poder calorífico de todos los tratamientos mostró valores aceptables, que son muy superiores a las exigencias de algunas normativas, por lo tanto, los residuos del olivar tendrían el potencial para ser considerados como una fuente de energía alternativa.

Es necesario realizar investigaciones futuras que se enfoquen en nuevas formulaciones para profundizar en las emisiones y optimizar el poder calorífico, particularmente al aumentar la proporción de orujo de aceituna. Sin embargo, antes de realizar afirmaciones concluyentes, se deben considerar los posibles problemas ambientales asociados al pretratamiento, como la generación de residuos líquidos derivados del lavado. Además, es crucial estimar el beneficio costo del proceso de fabricación en relación con el poder calorífico obtenido, a fin de evaluar la viabilidad económica de la producción a gran escala de estas briquetas.

REFERENCIAS

- [1] Chávez-Sifontes, M., “La biomasa: fuente alternativa de combustibles y compuestos químicos”. Anales de Química, vol. 115, n. 5, 2019, p. 399-399. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7285186>
- [2] Panwar NL, Kaushik SC, Kothari S. “Role of renewable energy sources in environmental protection: A review”. Renewable and sustainable energy reviews. 2011 Apr 1;vol. 15, n. 3, p. 1513-24. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032110004065>
- [3] Hussain A, *et al.* “Optimal energy management of combined cooling, heat and power in different demand type buildings considering seasonal demand variations”. Energies. 2017 Jun 8; vol. 10, n. 6, p. 789. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/6/789/pdf>
- [4] Corma A, Iborra S, Veltly A. “Chemical routes for the transformation of biomass into chemicals”. Chemical reviews. 2007 Jun 13;vol. 107, n. 6, p. 2411-2502. Disponible en: https://www.academia.edu/download/43007775/2_-_Chemical_routes_for_the_transformation_of_biomass_into_chemicals.pdf
- [5] Nogales Delgado S. “Reducción de las emisiones asociadas a la combustión y pirólisis de biomasa mediante diversos métodos”. España. Universidad de Extremadura; 2016. Disponible en: https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/4377/1/TDUEx_2016_Nogales_Delgado.pdf
- [6] World Meteorological Organization (WMO). “Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin) - No. 15: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2018”. WMO 2019. Disponible en: https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21647#.Xw4D0ihKhPY

- [7] Dirección General de Competitividad Agraria. “Política Nacional de Bioenergía, Avances y Retos”. Ministerio de Agricultura de Perú 2012. Gob.pe. Disponible en: https://www.midagri.gob.pe/portal/download/pdf/especiales/bioenergia/foro-seg-alimentaria/bio_expo_senasa.pdf
- [8] Bastidas-Barranco M. “Producción de briquetas a partir de raquis residual de la palma africana para las comunidades alfareras del norte del Cesar (Colombia)”. CIT InformTecnol [Internet]. 2022; vol. 33, n. 1, p. 193–202. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642022000100193>.
- [9] Berastegui Barranco C, et al. “Elaboración de biocombustibles sólidos densificados a partir de tusa de maíz, bioaglomerante de yuca y carbón mineral del departamento de Córdoba”. Ingeniare, RevChilIng [Internet]. 2017; vol. 25, n. 4, p. 643–53. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052017000400643&lng=en&nrm=iso&tlng=en
- [10] León A, Santacruz S. “Elaboración de Briquetas a partir de Subproductos de Palma Africana (*Elaeisguineensis* J) y Arroz (*Oryza sativa* L)”. RevPolitéc [Internet]. 2021; vol. 48, n. 2, p. 65–70. Disponible en: http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-01292021000400065&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [11] Mendoza Fandiño JM, et al. “Fabricación de biocombustibles sólidos densificados (briquetas) a base de serrín de acacia y estiércol de bovinos en el departamento de Córdoba”. Ingeniare, RevChilIng [Internet]. 2020; vol. 28, n. 3, p. 448–60. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052020000300448&lng=en&nrm=iso&tlng=en
- [12] Panduro Carbajal C, et al. “Utilización industrial y mercado de diez especies maderables potenciales de bosques secundarios y primarios residuales”. 2012. Disponible en: <http://www.cnf.org.pe/Publicaciones/Transformacion%20quimica.pdf>
- [13] Blesa Aguilera MJ. “Combustión de briquetas preparadas con co-carbonizados de lignitos y biomasa”. Boletín del Grupo Español del Carbón [Internet]. 2022; n. 66, p. 14–9. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8737534>
- [14] Fanárraga Lukuy, D. C., & Jihuallanca Sánchez, R. J. “Elaboración de briquetas ecológicas a partir del hueso de la palta para reducir las emisiones de CO₂”. 2021[citado el 3 de noviembre de 2022]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/80675>
- [15] Shuma R, Madyira DM. “Emissions Comparison of loose biomass briquettes with cow dung and cactus binders”. ProcediaManuf [Internet]. 2019; vol. 35, p. 130–136. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919306493>
- [16] Cong H, et al. “Evaluating the performance of honeycomb briquettes produced from semi-coke and corn stover char: Co-combustion, emission characteristics, and a value-chain model for rural China”. J CleanProd [Internet]. 2020; vol. 244:e118770. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619336406>
- [17] MaradiagaRodriguez WD, et al. “Producción de briquetas con residuos de cáscara de piñón manso (*Jatropha curcas*) y bagazo de caña de azúcar”. Bosque (Valdivia) [Internet]. 2017; vol. 38, n. 3, p. 527–533. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002017000300010&lang=es
- [18] Hoyos Álvarez CA, et al. “Elaboración de biocombustibles sólidos densificados a partir de la mezcla de dos biomásas residuales, un aglomerante a base de yuca y carbón mineral, propios del departamento de Córdoba”. Ingeniare, RevChilIng [Internet]. 2019; vol. 27, n. 3, p. 454–464. Disponible en: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052019000300454&lang=es
- [19] Núñez-Moreno A, Barbieri G, Gordillo G. “Analysis of the feasibility of generating solid biofuel from *Ulexeuropaeus* plants”. RevFacIng [Internet]. 2019; vol. 29, n. 54:e10454. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-11292020000100006&lang=es
- [20] Díaz Artigas IJ, et al. “Briquetas energéticas con aserrín y corteza de pino”. IngEnerg [Internet]. 2020; vol. 41, n. 1. Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012020000100003&lang=es

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Raul Cartagena Cutipa: <https://orcid.org/0000-0002-3419-7097>

Participó en el diseño de la investigación, en el procesamiento de los datos recogidos para el estudio. Realizó contribuciones en el análisis e interpretación de los datos. Participó en la búsqueda de información, análisis de los resultados, en la revisión y redacción del informe final, así como en la aprobación final.

Hugo Javier Rivera Herrera: <https://orcid.org/0000-0002-9896-5008>

Participó en el diseño de la investigación, programación de los sensores de CO y CO₂, revisión crítica de la organización del trabajo. Participó en la búsqueda de información, análisis de los resultados, en la revisión y redacción del informe final. Aprobación final.

Percy Fermín Velásquez Ccosi: <https://orcid.org/0000-0001-7006-7583>

Participó en la verificación del modelo, apoyo en uso de software estadístico. Revisión de los avances, análisis de los resultados, en la revisión y redacción del informe final. Aprobación final.

Roberto Simeone Falcón Peña: <https://orcid.org/0000-0002-6700-9558>

Participó en el diseño de la investigación, Participó en la preparación de las muestras ensayadas y obtención de datos, búsqueda de información, revisión y redacción del informe final. Aprobación final.

Andrea del Rosario Velarde Franco: <https://orcid.org/0000-0003-2421-4970>

Participó en el diseño de la investigación, Participó en la preparación de las muestras ensayadas y obtención de datos, búsqueda de información, revisión y redacción del informe final. Aprobación final.