

USO DE RESIDUOS VEGETALES PARA LA GENERACIÓN SOSTENIBLE DE ENERGÍA CALÓRICA: UNA REVISIÓN

Castro Pérez, Andrés Camilo¹
Téllez Rincón, Lida Mercedes²
Salazar Sánchez, Margarita del Rosario³
Solaniella Duque, José Fernando⁴

Recibido: 28/07/2023 Revisado: 08/02/2024 Aceptado: 07/09/2024

RESUMEN

El sector primario, que comúnmente funciona como un sistema de producción lineal, genera gran cantidad de residuos. En este artículo de revisión se aborda la creciente problemática global de la gestión de estos residuos derivados de las actividades productivas de aquel, dado su impacto ambiental, social y en la salud pública. Se destaca la necesidad de implementar prácticas sostenibles, centrándose en el aprovechamiento de residuos vegetales para la producción de briquetas, un tipo de biocombustible sólido. Las briquetas se pueden fabricar a partir de una variedad de materiales vegetales, forestales, agrícolas y orgánicos domiciliarios. Su producción requiere considerar factores como densidad, presión, contenido de humedad y el tipo de aglutinante utilizado. La lignina, presente en vegetales y residuos forestales, desempeña un papel clave en la densidad y resistencia de las briquetas, así como en su capacidad de combustión. Los residuos forestales y agrícolas se destacan como insumos importantes para la producción de briquetas, contribuyendo a la generación de energías renovables y a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Se han realizado estudios prometedores, en los que se utilizan diferentes combinaciones de materiales y aglutinantes, resaltando el potencial de residuos como los provenientes de podas urbanas y cáscaras de frutos y semillas. En estos procesos, el tipo y la cantidad de aglutinante utilizados influyen significativamente en las propiedades de las briquetas, afectando su capacidad térmica, combustión y durabilidad. Se han identificado aglutinantes tanto

¹ Ingeniero Ambiental y Sanitario (Universidad Popular del Cesar-UPC, Colombia). Investigador del Programa Facultad de Ingenierías, Universidad Popular del Cesar, Seccional Aguachica. *Dirección postal:* Carrera 40 vía al mar, Universidad Popular del César Seccional Aguachica, Cesar, Colombia. Código postal 190002. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9766-7690>. *Teléfono:* +57 3128583331; *e-mail:* andrescamilocastro@unicesar.edu.co

² Ingeniera Ambiental y Sanitario (Universidad Popular del Cesar Seccional Aguachica). Investigadora del Programa Facultad de Ingenierías, Universidad Popular del Cesar, Seccional Aguachica. *Dirección postal:* Carrera 40 vía al mar, Universidad Popular del César Seccional Aguachica, Cesar, Colombia. Código postal 190002. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8517-9323>. *Teléfono:* +57 3045684611; *e-mail:* lmtellez@unicesar.edu.co

³ Doctora en Ciencias Agrarias y Agroindustriales (Universidad del Cauca-UniCauca, Colombia); Magister en Recursos Hidrobiológicos Continentales (UniCauca, Colombia); Bióloga (UniCauca, Colombia). Docente de la Universidad Popular del Cesar, Seccional Aguachica; Investigadora adscrita al Grupo de investigación en Ingeniería de producto y Procesos Agroindustriales (GIPA), Cesar, Colombia. *Dirección postal:* Carrera 40 vía al mar, Universidad Popular del César Seccional Aguachica, Cesar, Colombia. Código postal 190002. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3636-2922>. *Teléfono:* +573058853401; *e-mail:* mdlrosariosalazar@unicesar.edu.co

⁴ Doctor en Ciencias y Tecnologías de Coloides e Interfaces (Universidad Pablo de Olavide-UPO, España); Ingeniero Agroindustrial (Universidad La Gran Colombia-UGC, Colombia); Especialización en Química en Productos Naturales (Universidad del Tolima-UT, Colombia). Profesor Titular del Departamento de Agroindustria, Programa de Ingeniería Agroindustrial y del Programa de Doctorado en Ciencias Agrarias y Agroindustriales de la Universidad del Cauca-Unicauca, Colombia; Investigador del Departamento Agroindustria, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad del Cauca. *Dirección Postal:* Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad del Cauca, Campus Sede Las Guacas, Popayán, Cauca, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6664-9134>. *Teléfono:* +57 3208478350; *e-mail:* jsolanilla@unicauca.edu.co

orgánicos (almidón y melaza) como inorgánicos (arcilla, cemento), cada uno con sus ventajas y desventajas. La elección del aglutinante adecuado depende del tipo de materia prima y las propiedades deseadas en las briquetas. En conclusión, la producción y utilización de briquetas a partir de residuos vegetales representa una solución innovadora y sostenible para la gestión de residuos y la generación de energía. Esta práctica ofrece beneficios ambientales, sociales y económicos –entre ellos, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero–, cuya adopción y promoción son fundamentales para avanzar hacia una economía más circular y sostenible.

Palabras clave: sector primario, residuos vegetales, briquetas, combustibles, energía renovable, sostenibilidad

ABSTRACT

The primary sector, which commonly operates as a linear production system, generates much waste. This review article addresses the growing global problem of managing these wastes derived from agricultural production activities, given their environmental, social, and public health impact. It highlights the need to implement sustainable practices, focusing on using plant residues to produce briquettes, a type of solid biofuel. A variety of plant, forestry, agricultural, and household organic materials can be used to make briquettes. Their production requires consideration of factors, such as density, pressure, moisture content, and the type of binder used. Lignin, present in plant and forest residues, plays a key role in the density and strength of briquettes, as well as in their combustion capacity. Forestry and agricultural residues stand out as important inputs for the production of briquettes, contributing to the generation of renewable energies and the reduction of greenhouse gas emissions. Promising studies show the potential of residues, such as those from urban pruning and fruit and seed husks, as researchers have carried out experiments using different combinations of materials and binders. In these processes, the type and amount of binder used significantly influences the properties of the briquettes, affecting their thermal capacity, combustion, and durability. Both organic (starch and molasses) and inorganic (clay, cement) binders play a significant role in influencing the properties of the briquettes, with each having its advantages and disadvantages. The choice of the appropriate binder depends on the type of raw material and the desired properties of the briquettes. In conclusion, the production and use of briquettes from vegetable waste represents an innovative and sustainable solution for waste management and energy generation. This practice offers environmental, social, and economic benefits - among them, the reduction of greenhouse gas emissions - whose adoption and promotion are essential to move towards a more circular and sustainable economy.

Key words: primary sector, plant residues, briquettes, fuels, renewable energy, sustainability

RÉSUMÉ

Le secteur primaire, qui fonctionne généralement comme un système de production linéaire, génère beaucoup de déchets. L'article aborde le problème mondial croissant de la gestion des déchets solides, en soulignant ses incidences sur l'environnement, la société et la santé publique. Il souligne la nécessité d'adopter des pratiques durables pour résoudre ce problème, en se concentrant sur l'utilisation de déchets végétaux pour la production de briquettes, un type de biocarburant solide. Les briquettes peuvent être fabriquées à partir de divers matériaux organiques végétaux, forestiers, agricoles et ménagers. Leur production nécessite la prise en compte de facteurs tels que la densité, la pression, la teneur en humidité et le type de liant utilisé. La lignine, présente dans les résidus végétaux et forestiers, joue un rôle clé dans la densité et la résistance des briquettes, ainsi que dans leur combustibilité. Les résidus forestiers et agricoles sont des ressources importantes pour la production de briquettes, car ils contribuent à la production d'énergie renouvelable et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Des études prometteuses ont été réalisées en utilisant différentes combinaisons de matériaux et de liants, mettant en évidence le potentiel de déchets tels que les tailles urbaines et les pelures de fruits. Le type et la quantité de liant utilisés influencent considérablement les propriétés des briquettes, en jouant sur leur capacité thermique, leur combustion et leur durabilité. Des liants organiques (amidon, mélasse) et inorganiques (argile, ciment) ont été identifiés, chacun avec ses avantages. En conclusion, la production et l'utilisation de briquettes à partir de déchets végétaux représentent une solution innovante et durable pour la gestion des déchets et la production d'énergie. Cette pratique offre des avantages environnementaux, sociaux et économiques - parmi lesquels la réduction des émissions de gaz à effet de serre - dont l'adoption et la promotion sont essentielles pour évoluer vers une économie plus circulaire et durable.

Mots clés : secteur primaire, déchets végétaux, briquettes, combustibles, énergie renouvelable, durabilité

RESUMO

O sector primário, que normalmente funciona como um sistema de produção linear, gera muitos resíduos. Este artigo de revisão aborda o crescente problema global da gestão de resíduos sólidos, destacando seus impactos ambientais, sociais e na saúde pública. Destaca a necessidade de práticas sustentáveis para lidar com essa questão, concentrando-se no uso de resíduos vegetais para a produção de briquetes, um tipo de biocombustível sólido. Os briquetes podem ser feitos a partir de uma variedade de materiais orgânicos vegetais, florestais, agrícolas e domésticos. Sua produção requer a consideração de fatores como densidade, pressão, teor de umidade e o tipo de aglutinante utilizado. A lignina, presente em resíduos vegetais e florestais, desempenha um papel fundamental na densidade e na resistência dos briquetes, bem como em sua combustibilidade. Os resíduos florestais e agrícolas se destacam como importantes recursos para a produção de briquetes, contribuindo para a geração de energia renovável e para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Estudos promissores foram realizados com diferentes combinações de materiais e aglutinantes, destacando o potencial de resíduos como podas urbanas e cascas de frutas. O tipo e a quantidade de aglutinante usado influenciam significativamente as propriedades dos briquetes, afetando sua capacidade térmica, combustão e durabilidade. Foram identificados aglutinantes orgânicos (amido, melão) e inorgânicos (argila, cimento), cada um com suas respectivas vantagens. Como conclusão tem-se que a produção e utilização de briquetes, a partir de resíduos vegetais, representa uma solução inovadora e sustentável para a gestão de resíduos e a produção de energia. Esta prática oferece benefícios ambientais, sociais e econômicos, entre eles, a redução das emissões de gases com efeito de estufa, cuja adoção e promoção são essenciais para avançar para uma economia mais circular e sustentável.

Palavras-chave: setor primário, resíduos vegetais, briquetes, combustíveis, energia renovável, sustentabilidade

1. INTRODUCCIÓN

El sector de la producción agrícola y pecuaria –aún muy importante en América Latina y que continúa creciendo en la mayoría de sus países, excepto en aquellos que enfrentaron significativos desastres naturales– es uno de los que comúnmente funciona como un sistema de producción lineal –no circular–, generando por tanto una gran cantidad de residuos. La inadecuada disposición de estos últimos puede provocar contaminación del agua, del suelo y de la atmósfera, al tiempo aumenta la demanda de nuevas materias primas generadas a partir de una mayor extracción de recursos naturales (Cervantes, 2021).

De otro lado, factores como el crecimiento de la población, el desarrollo de las industrias, el mejoramiento de la calidad de vida, entre otros, han llevado a que la gestión de los residuos sólidos se convierta en una problemática a nivel mundial debido a su incremento exponencial (Rodríguez, Evangelista, Sette, Júnior, & da Silva, 2017). No obstante, en un informe publicado a inicios de la década de 2010, «Hacia una economía verde: guía para el desarrollo sostenible y la

erradicación de la pobreza» (PNUMA, 2011), ya entonces Naciones Unidas advertían que regresar a las llamadas economías verdes no necesariamente implicaría una reducción en el crecimiento económico y el nivel de empleo. Al contrario, dicha transición fortalecería el crecimiento, generando con ello empleos decentes como estrategia clave para la reducción de la pobreza. Con esta orientación, sectores como la agricultura, la construcción, la pesca, la silvicultura, el abastecimiento de energía, la industria, el turismo, transportes, el manejo de residuos y el agua –los 10 evaluados en dicho informe–, fueron identificados como fundamentales para transitar hacia una economía global más verde (Boniatti, 2011).

En la mayoría de los casos el manejo de los residuos –particularmente los sólidos– es comprendido como un compendio de recolección y disposición final, desprendiéndose así de las diferentes etapas que conforman su manejo, tales como: generación, recolección, transporte, tratamiento y disposición final, así como el aprovechamiento que algunos de ellos pueden tener. Pero también se refiere a la limitación que produce

el empleo inadecuado de aquellos y que provoca severos impactos ambientales, sociales, culturales y en la salud (Sáez & Urdaneta, 2014). En otros casos, como el de sectores agroalimentarios específicos –*e.g.* el de las frutas y hortalizas–, los residuos que se generan a lo largo de la cadena tiene importantes implicaciones en términos de la seguridad alimentaria y suponen un importante agotamiento de los recursos recursos (*e.g.*, agua, tierra, energía), al tiempo que producen innecesariamente gases de efecto invernadero. En ellos es por tanto necesario la reducción de los residuos, tanto para mejorar la sostenibilidad de la cadena alimentaria como para lograr la seguridad alimentaria y nutricional (Berjan, Capone, Debs & El Bilali, 2018).

Dentro de las principales actividades generadoras de residuos vegetales en zonas urbanas se encuentran las plazas de mercado, donde el 88,5% corresponden al desecho de hortalizas, hierbas y frutas (Alfonso, Robayo, Ferrucho & Vargas, 2016). Por otro lado, actividades de limpieza de las áreas urbanas como cortes de césped o podas de árboles y arbustos ubicados en zonas públicas representan también una gran problemática, al no tener un esquema de gestión bien definido (Ayala & Sandoval, 2018). La creación de nuevas alternativas energéticas surge como respuesta a la necesidad imperante de brindar un aprovechamiento útil a distintos tipos de residuos, lo cual constituye uno de los retos más significativos en caso particular del territorio colombiano. Estas alternativas basadas en el uso de la biomasa vegetal como fuente alternativa para la producción de energía (Vivek, Rochak, Suresh & Kiran (2019) están destinadas a reducir de manera notable los impactos ambientales derivados de los gases de efecto invernadero, la reproducción de vectores, las afectaciones a la salud y la obstrucción visual y paisajística (Valderrama, Curo, Quispe, Llantoy & Gallo, 2007).

Dentro de las distintas alternativas identificadas en la revisión de literatura, este artículo presenta una revisión de los materiales y técnicas utilizadas para la obtención de briquetas, con el objetivo de evidenciar el aprovechamiento de los residuos generados en diferentes actividades, desde las domésticas

hasta las agrícolas y forestales (Chávez & Rodríguez, 2016), en pro de la sostenibilidad del medio ambiente. Se resaltan de modo particular su rendimiento como combustible, en tanto generan menor cuantía de material particulado, humo y olores, a diferencia de lo que ocurre con otras fuentes de energía calórica (Dicosvkiy, Pichardo, Rodríguez, Martínez & Rodríguez, 2014). Además, las briquetas biodegradables se utilizan con frecuencia como fuente alternativa de energía para pequeñas industrias y aplicaciones de cocina doméstica (Vivek *et al.*, 2019), cuyo uso se traduce por tanto en una menor dependencia de las energías fósiles para estos sectores económicos.

1. BRIQUETAS

Las briquetas son un biocombustible sólido (Adeleke *et al.*, 2021). Es un término claro y a su vez confuso. Si bien desde un punto de vista no pueden ser confundidas con otro tipo de combustible, es paradójicamente confuso porque pueden estar fabricadas con gran variedad de materiales (Marcos, 2015), como residuos forestales, agrícolas, residuos orgánicos o domiciliarios, entre otros. También es importante mencionar que para la elaboración de este biocombustible se deben tener en cuenta aspectos muy importantes como la densidad, presión, contenido de humedad, proceso de secado, tipo de maquinaria utilizada y el aglutinante empleado para su compactación (Demirbas & Sahin-Demirbas, 2004). De igual manera es fundamental identificar si es necesaria la adición de dicho aglutinante, ya que existen ciertos materiales que no lo necesitan, pues cuentan con componentes como la lignina (Beker, 1997).

La lignina es uno de los componentes más abundantes de las plantas (Chávez-Sifontes & Domine, 2013). Este se puede encontrar en vegetales, residuos forestales y en los hongos (Khan & Ahring, 2019), que proporciona rigidez a los tejidos vegetales (Zavaleta-Mejía & Lagunes-Fortiz, 2015). A su vez se vuelve un elemento muy importante en la elaboración de briquetas, por cuanto se ha comprobado que la lignina influye de manera importante en la densidad y resistencia a la compresión de las briquetas. De igual forma, en cuanto a combustión se obtienen temperaturas más altas y una ignición

más uniforme cuando este componente se encuentra dentro del bicomcombustible (Setter, Sanchez Costa, Pires & Farinassi, 2020).

Las briquetas elaboradas a partir de residuos vegetales poseen una serie de propiedades que las hacen altamente deseables como una forma de biocombustible sostenible y eficiente. En general, estas briquetas tienen una alta densidad (170 y 320 kg m⁻³) (Madariaga *et al.*, 2017), lo que les confiere una mayor capacidad calorífica y una mayor durabilidad durante su almacenamiento y transporte. Además, su composición natural las hace menos propensas a producir emisiones tóxicas durante la combustión, en comparación con los combustibles fósiles.

Adicionalmente, la resistencia mecánica es otra propiedad fundamental de las briquetas. Esta característica se refiere a la capacidad de las briquetas para mantener su integridad estructural tanto durante su manipulación como durante el proceso de combustión (Carrillo-Parra, Contreras, Garza, Ngangyo & Rutiaga-Quiñones, 2018). Las briquetas que han sido adecuadamente compactadas y aglutinadas presentan una mayor resistencia mecánica, lo que facilita su transporte, almacenamiento y utilización en diferentes aplicaciones.

Según datos obtenidos de estudios recientes (Cartagena, Rivera, Velásquez, Falcón & Velarde, 2023), se ha demostrado que las briquetas de residuos vegetales con un contenido de humedad controlado del 8% al 10% tienen un rendimiento óptimo durante la combustión, con una reducción del 20% al 30% en las emisiones de humo y gases nocivos, en comparación con las briquetas con un contenido de humedad más alto. Además, se encontró que las briquetas compactadas con una presión de al menos 150 MPa tienen una resistencia mecánica superior, lo que las hace más duraderas y fáciles de manejar en comparación con las briquetas menos compactadas.

3. COMPONENTES USADOS PARA OBTENCIÓN DE BRIQUETAS

3.1. COMPONENTES DE ORIGEN FORESTAL Y AGRÍCOLA

Algunos de los materiales utilizados para la producción de briquetas son los residuos

forestales y agrícolas (Wilczynski, Berdychowski, Talaska, & Wojtkowiak, 2021), pues estos se han convertido en un importante recurso para la producción de energía eléctrica y otro tipo de energías renovables que contribuyen a la disminución de las emisiones de gases efecto invernadero y otros gases de combustión (Wijianto, Sarjito, Akli, Anggono & Darmawan, 2020). Por tal razón, este tipo de materiales resulta bastante atractivo para la elaboración de biocombustibles sólidos (Han, Jacobson, Bilek, & Sessions, 2018). También actualmente los residuos lignocelulósicos han dejado de ser un problema para la población, dado que se pueden implementar en diferentes proyectos de aprovechamiento para la producción de energías (Riaño, Morales, Muñoz & Barrero, 2010).

Algunos autores refieren el efecto que tiene la implementación de residuos urbanos de podas (RPU) para el aprovechamiento como biomasa (Rojas, Ruales & Velasco, 2015). Por su parte, en una investigación de briquetas a partir de una mezcla de residuos de poda urbana, glicerina (aglutinante) y bagazo de yuca, Petricoski *et al.* (2020) llevaron a cabo 5 tratamientos con los siguientes porcentajes de RPU: i) al 100%; ii) 92% de RPU y 8% de bagazo de yuca; iii) 97% de RPU y 3% de glicerina; iv) 89% de RPU, 8% bagazo de yuca y 3% glicerina; y, v) 94,5% de RPU, 4% bagazo de yuca y 1,5% glicerina. Sus hallazgos evidenciaron los mejores resultados en relación con el menor contenido de material volátil (66,520%) y carbono fijo (16,858%) en el tratamiento que contenía 92% de RPU y 8% de bagazo de yuca. De esta manera, el potencial de la biomasa a partir de residuos de podas urbanas representan un potencial bastante notable, dado que la transformación de la biomasa revela una mejor combustión, además de un manejo y almacenamiento aún mejor (Reis *et al.*, 2020).

Otras matrices han utilizado la cáscara de la avellana con aceite pirolítico como aglutinante, el cual transforma las cadenas lineales de triglicéridos con elevada viscosidad a cadenas lineales de menor viscosidad y porcentaje de carbono, cuyas características son parecidas al combustible diésel (Albuja & Mora, 2014), lo cual permite obtener valores caloríficos de hasta

18,5 KJ.g⁻¹ y permite evidenciar los parámetros físicos como densidad, contenido de material aglutinante y la resistencia a la compresión como los más importantes a la hora de producir una briqueta con indicadores de calidad alta (Demirbas, 1999a). Si bien las briquetas tienen grandes ventajas, también se le atribuyen ciertas desventajas, entre ellas el que al ser completamente sólidas no puedan ser utilizadas en maquinarias con motores, además de absorber grandes contenidos de humedad del aire si no se almacenan en lugares adecuados (Saeed *et al.*, 2021).

Demirbas (1999b), usando briquetas a partir de papel usado y paja de trigo, determinó el parámetro de la densidad como uno de los más importantes junto a los porcentajes de humedad deseados entre el 13% y 18% para facilitar el proceso de compactación. De igual forma subrayó el efecto del papel Kraft y el papel periódico como buenos aglutinantes en la producción de briquetas, ya que en la experimentación se evidenció que cuando se utilizaba este material como aglutinante las propiedades de las briquetas eran mucho más efectivas y duraderas.

En la Tabla N° 1 se sintetizan, a partir de las fuentes consultadas, una serie de otras materias primas de origen vegetal que potencialmente pueden ser utilizadas para la producción de briquetas destinadas a la producción de energía calórica.

3.2. COMPONENTES DE RESIDUOS DE MADERA

En el tratamiento de la madera se generan gran cantidad de desechos de grano fino, como el aserrín, polvo de madera, virutas, astillas y cortezas (Brozek, Novakova & Kolarova, 2012). Los mismos son considerados como una forma sostenible de producir biocombustibles sólidos (briquetas), que puedan reemplazar de manera parcial a los combustibles fósiles (Song, Cooke-Willis, Theobald, & Hall, 2021). Normalmente este tipo de desechos son generados por aserraderos, industrias de muebles y la industria de la madera contrachapada, al estar directamente relacionadas con la transformación de dicho material (Owoyemi, Zakariya & Elegbede, 2016).

En distintos estudios se ha demostrado que los residuos generados por la producción de materiales a base de madera son bastante viables a la hora de generar energía de manera sostenible, siendo el aserrín el componente más utilizado a la hora de producir biocombustibles sólidos (Meincken & Funk, 2015), como es el caso del estudio realizado por Brozek *et al.* (2012). En este caso utilizaron material de aserrín de tres especies diferentes de árboles tropicales (*Azelia africana*, *Terminalia superba* y *Melicia elcelsa*), además de la integración de aglutinantes tales como ceniza de madera, almidón y estiércol de vaca, obteniendo resultados prometedores en la reducción de materia volátil en la mezcla de aserrín con ceniza de madera (60,39 ± 1,41%). Sin embargo, respecto al contenido de cenizas fue el que presentó mayor cantidad en relación con mezclas de aserrín con almidón de yuca y de aserrín con estiércol de vaca. Por otro lado, en cuanto a la generación de poder calórico por parte de las diferentes mezclas se obtuvieron los resultados más favorables en las briquetas producidas con almidón de yuca, siendo las de menor eficiencia las producidas con cenizas de madera.

Moreno, Font & Conesa (2016), cuyo estudio estuvo orientado a la evaluación física y química de las briquetas producidas a partir de residuos de muebles, se enfocaron en la madera resultante y la espuma de tapicería. Estos materiales presentan un alto potencial calorífico, además de basarse bajo parámetros como contenido de humedad, presión de compactación, presencia de lignina, entre otros. Bajo este precepto realizaron distintos procesos de densificación, dado que los materiales con poca densidad presentan un contenido energético pobre. Los autores tuvieron en cuenta una fijación de humedad del material al 8%, ya que es apta para obtener mejores resultados en la calidad de la briqueta. Por otro lado, la espuma de poliuretano era la que presentaba el valor calorífico neto más alto (24,2 MJ•kg⁻¹), Asimismo Correa-Méndez *et al.* (2014) llevaron a cabo una investigación basada en estándares internacionales de humedad y porcentajes de cenizas, obteniendo resultados de 51,5 ± 1.9% y 53,7 ± 0,1% respectivamente, indicando los valores

Tabla 1
Otras materias primas utilizadas para la obtención de briquetas

Materia prima	Proceso	Técnica de elaboración	Propiedades				Referencia
			Humedad (%)	Ceniza (%)	Material volátil (%)	Carbono fijo (%)	
<i>Pinus pseudostrubos</i>	Intemperizado	Compresión en una máquina briqueteadora de laboratorio	9,12	0,83	73,72	16,33	Carrilo-Parra, Contreras, Garza, Ngangyo & Rutiaga-Quiñones (2018)
	Fresco		9,83	0,24	75,74	14,19	
Acacia y estiércol de bovino	Acacia	Densificación en una máquina briqueteadora semiautomática	12,09	1,27	70,92	15,72	Mendoza, González, Doria, Pedroza & Ruiz (2020)
	Estiércol de bovino		11,78	31,71	44,76	11,75	
Cáscara de Piñón manzo y bagazo de caña de azúcar	75% bagazo - 25% cáscara de Piñón	Densificación	12	5	83,2	8,5	Rodríguez <i>et al.</i> (2017)
	75% cáscara de Piñón - 25% bagazo		12	11,8	78,36	9,5	
Cascarilla de café	-	Máquina briqueteadora de compactación	7,9	0,7	-	-	Dicosvkiy <i>et al.</i> (2014)
Paja de arroz	-	Prensa hidráulica de pistón manual	10,3	13,41	64,07	11,59	Rahaman & Salam (2017)
Residuos de té	-	Compactación manual	8,24	5,67	70,76	-	Naruephat & Patcharee (2015)

arrojados como los máximos permisibles. Esta afirmación coincide con lo reportado en la investigación de Valverde, Bienvenido & Monteagudo (2007) dado que la humedad de la materia prima incide principalmente sobre la composición elemental del combustible.

Mediante el análisis de briquetas de cartón-aserrín de Lela, Barisic & Nizetiz (2016) se obtuvieron resultados de características físico-químicas tales como fuerza de compresión (588,6 kN), porcentaje de masa de aserrín (46,66%), temperatura (22 °C), poder calorífico (17,41 MJ• kg⁻¹), contenido de cenizas mínimas (6,62%) y fuerza máxima de compresión

(149,54 N•mm⁻¹). Dichos parámetros inciden en la eficiencia de la briketa y en la posterior implementación dentro de una aplicabilidad del biocombustible, dado que los resultados son viables frente a la generación de energía.

Por su parte Deac, Fechete-Tutunarú & Gaspar (2016) llevaron a cabo una investigación experimental, cuyo objetivo era generar energía térmica para edificios residenciales con áreas menores a 100 m², a partir de dos especies de madera resultantes de su comercialización (Abeto y Haya). En su investigación se probaron tres tipos de briquetas (Abeto al 100%, Haya al 100%, 50% Abeto-50% Haya), obteniendo

resultados prometedores en las briquetas de Haya respecto al poder calorífico ($19.377 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). Por otro lado, se recalca la importancia de mantener porcentajes bajos de humedad entre 6% y 8%, ya que esto genera alta capacidad calorífica en el biocombustible. Mediante la documentación de la fabricación de briquetas utilizando biomasa, en específico hierba Eleusine indica y aserrín unido a tubérculos de taro (*Colocasia esculenta*) gelatinizado, se elaboraron biocombustibles sólidos a partir de una máquina de prensa de

tornillo baja potencia obteniendo resultados de valor calorífico máximo de $15.539 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Narzary, Chauhan & Das, 2020).

4. LOS AGLUTINANTES

El aglutinante juega un papel importante en la producción de briquetas, ya que la calidad y el rendimiento de las mismas depende del tipo y la cantidad, al influir directamente en la capacidad térmica y la combustión de las briquetas (aspecto que se detalla en la Tabla N° 2). También es relevante tener en cuenta

Tabla 2

Influencia de los aglutinantes en las propiedades físicas y combustibles de las briquetas

Materia prima de la briqueta	Tipo de aglutinante	Aglutinante añadido	Propiedades				Referencia
			Densidad de prensado (kg/m^3)	Poder calorífico (MJ/kg)	Carbono fijo (%)	Cenizas (%)	
Aserrín	Lodo de molino de aceite de palma	30%	$710,10 \pm 0,46$	$14,17 \pm 0,01$	$18,61 \pm 0,02$	$2,91 \pm 0,01$	Obi (2015)
Bagazo molido y triturado	Lignina	20%	320-280	5,57-14	12-16	3,3-7,21	Omoniyi & Olorunnisola (2014); Afra, Abyaz & Saraeyan (2021)
Finos de carbón	Lodo de carbón (CS) y alcohol polivinílico (PVA)	20% (CS) y 1% (PVA)	104,01	Aumenta	56,54	15,08	Liu <i>et al.</i> (2020)
Tusa de maíz y desechos de cáscara de coco	Aceite lubricante de vehículos	20 ml	-	29,77	11,57	2,87	Napitupulu <i>et al.</i> (2020)
Cáscara de cacahuate y bagazo de caña de azúcar	Almidón de yuca y almidón de trigo	30 g	258,8	21-23	12,2	2,5	Lubwama, Yiga, & Lubwama (2020)
Pulpa de café	Almidón	30%	150	$1,95 \times 10^{10}$	59,32	8,41	Setiawan, Hayat, Faisal & Nur (2019)
Tusa de maíz carbonizada	Almidón de yuca	30%	952-1.437	-	10-30	-	Aransiola, Oyewusi, Osunbitan, & Ogunjimi (2019)
Desechos de palma	Melaza	5% 10% 15%	$1,02 \pm 0,08$ $1,00 \pm 0,10$ $0,99 \pm 0,11$	28,95 28,21 28,01	$43,64 \pm 0,43$ $45,56 \pm 1,51$ $40,16 \pm 1,02$	$5,69 \pm 0,64$ $5,70 \pm 0,71$ $6,44 \pm 0,63$	Utcharyajit <i>et al.</i> (2019)

que para cada materia prima se necesita uno que cumpla con los propósitos finales de la briqueta (Zhang, Sun & Xu, 2018). De este modo, estos compuestos son divididos en aglutinantes orgánicos e inorgánicos (Lohmeier, Thaler, Harris, Wollenberg & Schröder, 2020). Los de naturaleza orgánica suelen ser el petróleo crudo, el almidón, la melaza, entre otros. Por su parte, los inorgánicos se refieren a la arcilla, el silicato de sodio y el cemento (Ugwu & Agbo, 2013).

Katimbo, Kiggundu, Kizito, Kivumbi & Tumutegereize (2014) reportaron diferentes combinaciones de aglutinantes para poder identificar la idoneidad de las briquetas, a partir de 3 mezclas distintas. En su caso, la primera combinación fue de almidón y suelo arcilloso; siguiendo con almidón y suelo rojo; y por último, almidón, además, de la adición de semilla de mango triturada. Como principales resultados destacan que las propiedades físicas y combustibles de las briquetas presentaban mayor densidad y no hubo variación en el contenido de humedad. Por otro lado, en cuanto al material volátil el resultado fue relativamente alto, lo que indica una capacidad alta de ignición en comparación con briquetas sin aglutinantes añadidos.

En el trabajo de Idah & Mopah (2013), en el cual se hizo una evaluación comparativa de los valores energéticos de las briquetas con diferentes aglutinantes, se utilizaron desechos de la cáscara de arroz, tusa de maíz, cáscara de cacahuate y sacos de caña de azúcar como materias primas para las briquetas; por su parte, los aglutinantes fueron cáscara de plátano y gel de la cáscara de yuca. Después de la elaboración de cada una de las briquetas se procedió a la evaluación energética, obteniendo como resultado que el gel de la cáscara de yuca como aglutinante presentaba valores relativamente menores en las briquetas elaboradas con cáscara de arroz ($26,12 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), a diferencia de los obtenidos para la cáscara de plátano ($29,980 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). En los casos de las briquetas con cáscara de cacahuate (yuca: $33,703 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$; plátano: $32,432 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), de saco de caña de azúcar (yuca: $32,762 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$; plátano: $31,508 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) y de tusa de maíz (yuca: $28,255 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$; plátano: $28,981 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) los resultados energéticos fueron muy similares. Y aunque los

valores fueron parecidos, el aglutinante que presentaba mejor combustión y capacidad energética fue la cáscara de plátano.

Por otro lado, Muazu & Stegemann (2017) exploraron y compararon los efectos de dos aglutinantes (almidón y microalgas) sobre la densidad, durabilidad contenido energético y capacidad de combustión. Del análisis estadístico de los resultados concluyeron que con la adición de aglutinante de microalgas mejoró la densidad de las briquetas, mientras que el almidón redujo dicha propiedad. De manera general evidenciaron que las briquetas con este tipo aglutinante eran más duraderas, pues mostraron un valor energético más alto, una pérdida de masa más lenta en el proceso de combustión y un mayor tiempo de resplandor a diferencia del aglutinante de almidón.

En la investigación realizada por González, López & Pérez (2020) se recolectaron muestras de residuos de jardín, de las cuales se analizaron sus propiedades físicas y termoquímicas del biocombustible con glicerol de aglutinante. En efecto, se evidenció un aumento de las propiedades de las briquetas a las cuales es añadido dicho aglutinante. Florentino-Madiedo, Díaz-Faes, Barriocanal, Castro-Díaz & Snape, (2018) ratifican estos hallazgos, pues según los autores al momento de incorporar el aglutinante en el biocombustible se controla la composición química de las briquetas. Sin embargo, en la publicación presentada por Banerjee (2008) se evidencia que la combinación de aglutinantes orgánicos e inorgánicos en las briquetas tienen una resistencia relativamente más alta que las elaboradas con un solo aglutinante y son térmicamente más estables a temperaturas elevadas.

De la revisión anterior resulta evidente que el aglutinante influye en las propiedades de las briquetas, pero también es importante tener en cuenta los costos que pueden llegar a tener. No obstante, se puede encontrar una gran variedad de estos materiales a precios bajos, como es el caso del alquitrán, la melaza, el betún y la arcilla (Orhan, Savasci & Eskikaya, 1989), por lo que es posible acceder libremente a la implementación de estas energías renovables.

Por último es importante apuntar que la efectividad del aglutinante también depende

del tipo de materia prima utilizada en la briqueta. Así, en consonancia con lo descrito por Cong *et al.* (2021), se observó que si bien se utilizaba el mismo aglomerante (bio-alquitrán), en las briquetas en las que fue añadido carbón vegetal fue mucho más efectiva en cuanto a poder calorífico –a diferencia de las que solo fueron elaboradas con residuos forestales, las cuales no tuvieron ningún efecto significativo en las propiedades–. Así mismo, en la revisión de Olugbade & Ojo, (2021) se demuestra que las briquetas que tengan presencia de lignina en su materia prima, como es el caso de los residuos forestales, muestran las mismas propiedades que las que contienen algún tipo de aglutinante.

5. TÉCNICAS PARA ELABORACIÓN DE BRIQUETAS

La elaboración de briquetas de residuos vegetales involucra un proceso que combina la selección de materias primas, la preparación de los materiales, la compactación, la aglutinación y el acabado final. Inicialmente se realiza la recolección y clasificación de los residuos vegetales, seguida de una fase de trituración para obtener un tamaño de partícula uniforme, lo que facilita la manipulación y mejora la eficiencia del proceso de compactación. Posteriormente, los materiales triturados se someten a un proceso de secado controlado, donde se reduce el contenido de humedad a niveles óptimos, generalmente entre el 8% y el 10%, para mejorar la calidad del biocombustible resultante. Una vez secos los materiales se mezclan con aglutinantes orgánicos o inorgánicos –como almidón, arcilla o melaza–, para mejorar la cohesión de las partículas durante la compactación y aumentar la resistencia mecánica de las briquetas. Luego, la mezcla se alimenta en una prensa de alta presión, donde se aplica una fuerza de compresión significativa –típicamente al menos 150 MPa–, para formar las briquetas con la forma y densidad deseadas. Finalmente, las briquetas se someten a un proceso de enfriamiento gradual para garantizar su estabilidad dimensional y se almacenan en condiciones adecuadas antes de su distribución y uso como biocombustible (Akande *et al.*, 2018; Sánchez, Aspe & Sindol, 2022).

A continuación se describen brevemente algunos de los pasos metodológicos utilizados

en la generación de briquetas a partir de residuos vegetales, *i.e.*, del proceso productivo y de logística en forma generalizada:

i) Selección de materias primas: donde se consideran factores como el tipo de material vegetal, su contenido de humedad, densidad energética y disponibilidad. Esta selección garantiza la calidad y eficiencia del biocombustible final.

ii) Pretratamiento de los residuos: una vez seleccionados, los residuos vegetales pueden requerir pretratamiento para mejorar su manejo y rendimiento en la producción de briquetas. Esto puede implicar operaciones como trituración, tamizado, secado o fermentación, según las características específicas de los materiales vegetales utilizados.

iii) Mezclado y homogeneización: los residuos vegetales pretratados se mezclan con aglutinantes y aditivos, si es necesario, para mejorar la cohesión y las propiedades físicas de las briquetas. Este proceso garantiza una distribución uniforme de los componentes y una mezcla homogénea que facilita la compactación.

iv) Compactación: la mezcla se alimenta en una máquina compactadora donde se aplica una presión significativa para formar las briquetas. Esta compactación puede lograrse mediante diferentes métodos, como prensado hidráulico, extrusión o rodillos compresores. La presión aplicada y la velocidad de compactación se controlan cuidadosamente para garantizar la densidad y resistencia adecuadas de las briquetas.

v) Secado y curado: Una vez formadas, las briquetas pueden someterse a un proceso de secado para eliminar la humedad residual y mejorar su estabilidad dimensional. Este secado puede realizarse en hornos o a temperatura ambiente, dependiendo de los requisitos del producto final. Posteriormente, las briquetas pueden someterse a un proceso de curado para mejorar su resistencia y durabilidad. Y,

vi) Almacenamiento y distribución: finalmente, las briquetas se almacenan en condiciones adecuadas para evitar la absorción de humedad y mantener su calidad. Se pueden empaquetar y distribuir para su uso como biocombustible en diversas aplicaciones, como

calefacción residencial, industria alimentaria o generación de energía en centrales térmicas. Estas técnicas de elaboración aseguran la producción de briquetas de alta calidad con propiedades físicas y químicas como una opción viable y sostenible para la generación de energía calorífica a partir de residuos vegetales.

6. CONCLUSIONES

A nivel mundial, pero particularmente en América Latina, las distintas actividades productivas que tienen lugar en el sector primario rural aún generan una gran cantidad de subproductos y/o residuos. Un inadecuado manejo de estos, de modo similar a lo que ocurre con otros procedentes de los ambientes urbanos actuales, suele traducirse en externalidades negativas para el ambiente. Frente a esta problemática, la utilización de la biomasa vegetal como insumo para procesos industriales destinados a la producción de combustibles ambientalmente amigables –los biocombustibles– emerge como una alternativa viable y necesaria, de cara a la transición hacia una economía más sostenible.

Uno de estos usos, cuyas potencialidades vienen siendo evaluadas de forma creciente en la literatura, es la producción de briquetas destinadas a la generación de energía calórica, convirtiéndose así en alternativas de cara a mejorar la eficiencia en muchas cadenas agroproductivas y en oportunidades para el desarrollo de nuevas industrias en. Acá la versatilidad en la elección de diferentes tipos de material vegetal para la producción de briquetas representa un aspecto fundamental en la transformación de la biomasa, ya que este enfoque permite abordar una amplia gama de fuentes y reduce la dependencia de los combustibles fósiles. Esta transición no solo tiene un impacto positivo en el ámbito ambiental, sino que también conlleva beneficios significativos en términos sociales y económicos.

Las investigaciones en curso amplían aún más el horizonte de posibilidades en cuanto al aprovechamiento de residuos vegetales. La conversión de estos desechos en nuevos materiales de valor, impulsados por sus propiedades fisicoquímicas, no solo abre

puertas en la generación de energía renovable, sino que también diversifica las opciones de recursos disponibles en la industria. Este enfoque innovador fortalece la base de una economía más circular y sostenible, reduciendo el agotamiento de recursos naturales no renovables.

La elevada capacidad térmica inherente a las briquetas elaboradas a partir de material vegetal resalta su potencial como una iniciativa clave en el panorama de la energía renovable. En ellos la adopción de briquetas como fuente de energía sostenible conlleva efectos positivos tangibles, como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la revitalización del entorno paisajístico y la disminución de la propagación de vectores transmisores de enfermedades. Pero, además de los beneficios ambientales y de salud, las briquetas también pueden tener un impacto económico considerable al generar una nueva corriente de ingresos a través de su implementación como biocombustibles. Esta dualidad en la entrega de beneficios, tanto en términos económicos como ambientales, presenta un argumento sólido para la adopción y promoción de estas soluciones en diferentes contextos y regiones.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Popular del Cesar-UPC, Seccional Aguachica y a Universidad del Cauca-UniCauca, por el apoyo al Grupo de Investigación GIPA para la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

-
- Adeleke, A. A., Odusote, J. K., Ikubanni, P. P., Orhadahwe, T. A., Lasode, O. A., Ammasi, A., & Kumar, K. (2021). Ash analyses of bio-coal briquettes produced using blended binder. *Scientific Reports*, 11, 547. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79510-9>

- Afra, E., Abyaz, A., & Saraeyan, A. (2021). The production of bagasse biofuel briquettes and the evaluation of natural binders (LNFC, NFC, and lignin) effects on their technical parameters. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123543. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123543>
- Akande, O. M., & Olorunnisola, A. O. (2018). Potential of briquetting as a waste-management option for handling market-generated vegetable waste in Port Harcourt, Nigeria. *Recycling*, 3(2), 11. <https://doi.org/10.3390/recycling3020011>
- Albuja Torres, J. M., & Mora Constante. (2014). Evaluación de la pirólisis térmica de aceite vegetal de desecho en un reactor batch. *Revista Politécnica*, 33(2), 1-15. Recuperado de https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/article/view/137
- Alfonso Moreno, F., Robayo Quintana, M., Ferrucho Rodríguez, L., & Vargas Oyola, M. (2016). Aprovechamiento de residuos vegetales de pétalos de rosas, tallos de girasol y vástago de plátano para la fabricación artesanal de papel. *INVENTUM*, 11(20), 71-82. <https://doi.org/https://doi.org/10.26620/uniminuto.inventum.11.20.2016.71-82>
- Aransiola, E. F., Oyewusi, T. F., Osunbitan, J. A., & Ogunjimi, L. A. O. (2019). Effect of binder type, binder concentration and compacting pressure on some physical properties of carbonized corncob briquette. *Energy Reports*, 5, 909-918. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.07.011>
- Ayala, N., & Sandoval, G. (2018). Bioenergy from forest and wood residues. *Madera y Bosques*, 24(Special Issue), e2401877. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401877>
- Banerjee, G. N. (2008). Development of a thermally stable binder combination for briquetting of coke fines. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 56(12), 249-251.
- Beker, Ü. G. (1997). Briquetting of Afsin-Elbistan lignite of Turkey using different waste materials. *Fuel Processing Technology*, 51(1-2), 137-144. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(96\)01081-8](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(96)01081-8)
- Berjan, S., Capone, R., Debs, P., & El Bilali, H. (2018). Food losses and waste: A global overview with a focus on Near East and North Africa Region. *International Journal of Agricultural Management and Development*, 8(1), 1-16. Recuperado de https://ageconsearch.umn.edu/record/292516/files/IJAMAD_Volume%208_Issue%201_Pages%201-16.pdf?ln=en&withWatermark=1
- Boniatti Pavese, H. (2011). Delineamientos de una economía verde. *Política Ambiental*, (8), 16-24. Recuperado de https://animacionsociocultural2013.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/05/politica_ambiental_08_espanhol.pdf#page=126
- Brozek, M., Novakova, A., & Kolarova, M. (2012). Quality evaluation of briquettes made from wood waste. *Research in Agricultural Engineering*, 58(1), 30-35. Recuperado de https://rae.agriculturejournals.cz/artkey/rae-201201-0005_quality-evaluation-of-briquettes-made-from-wood-waste.php
- Cartagena Cutipa, R., Rivera Herrera, H. J., Velásquez Ccosi, P. F., Falcón Peña, R. S., & Velarde Franco, A. D. R. (2023). Evaluación del nivel de emisiones y poder calorífico en briquetas de residuos del olivar. *Ingeniería Energética*, 44(2), 102-109. Recuperado de <https://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/852>
- Carrilo-Parra, A., Contreras Ortiz, E., Garza Ocañas, F., Ngangyo Heya, M., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2018). Efecto de la intemperización y proceso en las características físicas, mecánicas y energéticas de briquetas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(50), 496-513. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i50.239>
- Cervantes, G. (2021). Transitando a la economía circular en el sector agropecuario: granjas experimentales en Guanajuato, México. *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente*, (7), 45-66. <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202101.003>
- Chávez-Sifontes, M., & Domine, M. E. (2013). Lignina, estructura y aplicaciones: métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Avances en ciencias e Ingeniería*, 4(4), 15-46. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/3236/323629266003.pdf>

- Chávez Porras, Á., & Rodríguez González, A. (2016). Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica. *Academia y Virtualidad*, 9(2), 90-107. <https://doi.org/10.18359/ravi.2004>
- Cong, H., Yao, Z., Masek, O., Meng, H., Sheng, C., Wu, Y., & Zhao, L. (2021). Co-combustion, co-densification, and pollutant emission characteristics of charcoal-based briquettes prepared using bio-tar as a binder. *Fuel*, 287(1), 119512. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119512>
- Correa-Méndez, F., Carrillo-Parra, A., Rutiaga-Quiñones, J. G., Márquez-Montesino, F., González-Rodríguez, H., Jurado-Ybarra, E., & Garza-Ocañas, F. (2014). Contenido de humedad y sustancias inorgánicas en subproductos maderables de pino para su uso en pélets y briquetas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 20(1), 77-88. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=62930437007>
- Deac, T., Fecete-Tutunaru, L., & Gaspar, F. (2016). Environmental impact of sawdust briquettes use - experimental approach. *Energy Procedia*, 85, 178-183. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.12.324>
- Demirbas, A. (1999a). Properties of charcoal derived from hazelnut shell and the production of briquettes using pyrolytic oil. *Energy*, 24(2), 141-150. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(98\)00077-2](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(98)00077-2)
- Demirbas, A. (1999b). Physical properties of briquettes from waste paper and wheat straw mixtures. *Energy Conversion and Management*, 40(4), 437-445. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00111-3](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00111-3)
- Demirbas, A., & Sahin-Demirbas, A. (2004). Briquetting properties of biomass waste materials. *Energy Sources*, 26(1), 83-91. <https://doi.org/10.1080/00908310490251918>
- Dicovski Riobóo, L. M., Pichardo, C. B., Rodríguez Zeledón, A. N., Martínez Centeno, B. J. M., & Rodríguez Espinoza, K. D. R. (2015). Validación de briquetas elaboradas con cascarilla de café para el remplazo de leña en la producción de rosquillas de maíz. *El Higo Revista Científica*, 5(1), 10-19. <https://doi.org/10.5377/elhigo.v4i1.8631> (recuperado de <https://camjol.info/index.php/elhigo/article/view/8631>)
- Florentino-Madiedo, L., Díaz-Faes, E., Barriocanal, C., Castro-Díaz, M., & Snape, C. E. (2018). Importance of biomass and binder selection for coking briquette preparation. Their Effect on coal thermoplastic properties. *Energy and Fuels*, 32(10), 10727-10736. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.8b02555>
- González, W. A., López, D., & Pérez, J. F. (2020). Biofuel quality analysis of fallen leaf pellets: Effect of moisture and glycerol contents as binders. *Renewable Energy*, 147, 1139-1150. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.094>
- Han, H. S., Jacobson, A., Bilek, E. M. (Ted), & Sessions, J. (2018). Waste to wisdom: Utilizing forest residues for the production of bioenergy and biobased products. *Applied Engineering in Agriculture*, 34(1), 5-10. <https://doi.org/10.13031/aea.12774>
- Idah, P. A., & Mopah, E. J. (2013). Comparative assessment of energy values of briquettes from some agricultural by-products with different binders. *IOSR Journal of Engineering*, 3, 36-42. Recuperado de [https://iosrjen.org/Papers/vol3_issue1%20\(part-4\)/H03143642.pdf](https://iosrjen.org/Papers/vol3_issue1%20(part-4)/H03143642.pdf)
- Katimbo, A., Kiggundu, N., Kizito, S., Kivumbi, H. B., & Tumutegyereize, P. (2014). Potential of densification of mango waste and effect of binders on produced briquettes. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 16(4), 146-155. Recuperado de <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2945>
- Khan, M. U., & Ahring, B. K. (2019). Lignin degradation under anaerobic digestion: Influence of lignin modifications - A review. *Biomass and Bioenergy*, 128, 105325. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105325>
- Lela, B., Barisic, M., & Nizetiz, S. (2016). Cardboard/sawdust briquettes as biomass fuel: Physical-mechanical and thermal characteristics. *Waste Management*, 47, 236-245. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.035>
- Liu, S., Chang, Z., Yang, S., Zhang, Q., Shangguan, J., Du, W., ... Zhang, K. (2020). High strength clean briquettes production from long-flame coal fines by using polyvinyl alcohol and coal slime as binders. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 15(2). <https://doi.org/10.1002/apj.2414>

- Lohmeier, L., Thaler, C., Harris, C., Wollenberg, R., & Schröder, H.-W. (2020). Briquetting of fine grained residues from iron and steel production using organic and inorganic binders. *Steel Research International*, 91(12), 2000238. <https://doi.org/10.1002/srin.202000238>
- Lubwama, M., Yiga, V. A., & Lubwama, H. N. (2022). Effects and interactions of the agricultural waste residues and binder type on physical properties and calorific values of carbonized briquettes. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 12(11), 4979-4999. Recuperado de <https://nru.uncst.go.ug/items/9c2c6f67-c5bf-4b13-b071-696dc75c3dc1>
- Maradiaga Rodriguez, Walter Danilo, Wagner Evangelista, Adão, Sette Jr, Carlos R, Alves Júnior, José, & Fernandes da Silva, Macksuel. (2017). Producción de briquetas con residuos de cáscara de piñón manso (*Jatropha curcas*) y bagazo de caña de azúcar. *Bosque (Valdivia)*, 38(3), 527-533. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002017000300010>
- Marcos Martín, F. (2015). Pélets y briquetas. *Ecología*, 54-52. https://infomadera.net/uploads/articulos/archivo_2293_9990.pdf
- Meincken, M., & Funk, S. (2015). Burning characteristics of low-cost safety charcoal briquettes made from wood residues and soil for domestic use. *Agroforestry Systems*, 89(2), 357-363. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9772-8>
- Mendoza Fandiño, J. M., González Doria, Y. E., Doria Oviedo, M., Pedroza Urueta, A., & Ruiz Garcés, A. F. (2020). Manufacture of densified solid biofuels (Briquettes) made of acacia sawdust and cattle manure in the region of Cordoba. *Ingeniare*, 28(3), 448-460. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052020000300448>
- Moreno, A. I., Font, R., & Conesa, J. A. (2016). Physical and chemical evaluation of furniture waste briquettes. *Waste Management*, 49, 245-252. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.048>
- Muazu, R. I., & Stegemann, J. A. (2017). Biosolids and microalgae as alternative binders for biomass fuel briquetting. *Fuel*, 194, 339-347. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.01.019>
- Napitupulu, R. A. M., Ginting, S., Naibaho, W., Sihombing, S., Tarigan, N., & Kabutey, A. (2020). The effect of used lubricating oil volume as a binder on the characteristics of briquettes made from corn cob and coconut shell. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 725, 012010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/725/1/012010>
- Naruephat, T., & Patcharee, P. (2015). The evaluation of fuel briquettes produced from municipal wastes. *International Journal of Environmental Science and Development*, 6(3), 221. <https://doi.org/10.7763/IJESD.2015.V6.594>
- Narzary, A., Chauhan, R., & Das, A. K. (2020). Briquette making using waste biomass and analysis of its properties. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 57, 33-43. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0990-2_4
- Obi, O. F. (2015). Evaluation of the effect of palm oil mill sludge on the properties of sawdust briquette. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1749-1758. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.001>
- Olugbade, T. O., & Ojo, O. T. (2021). Binderless briquetting technology for lignite briquettes: A review. *Energy, Ecology and Environment*, 6, 69-79. <https://doi.org/10.1007/s40974-020-00165-3>
- Omoniyi, T. E., & Olorunnisola, A. O. (2014). Experimental characterisation of bagasse biomass material for energy production. *International Journal of Engineering and Technology*, 4(10), 582-589.
- Orhan Kural, O., Savasci, T., & Eskikaya, S. (1989). APP, a new binder for briquetting lignites. *Fuel*, 68(3), 404-407. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(89\)90112-9](https://doi.org/10.1016/0016-2361(89)90112-9)
- Owoyemi, J. M., Zakariya, H. O., & Elegbede, I. O. (2016). Sustainable wood waste management in Nigeria. *Environmental & Socio-Economic Studies*, 4(3), 1-9. <https://doi.org/10.1515/enviro-2016-0012>
- Petricoski, S. M., Feiden, A., Ferla De Oliveira, A., Tokura, L. K., Antonio, J., Siqueira, C.,... Martinez, S. (2020). Briquettes Produced with a mixture of urban pruning waste, glycerin and cassava processing residue. *Journal of Agricultural Science*, 12(6). <https://doi.org/10.5539/jas.v12n6p158>

- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente). (2011). *Hacia una economía verde: Guía para el desarrollo sostenible y la erradicación de la pobreza - Síntesis para los encargados de la formulación de políticas*. Ginebra, Suiza: PNUMA. Recuperado de <https://www.unep.org/greeneconomy>
- Rahaman, S. A., & Salam, P. A. (2017). Characterization of cold densified rice straw briquettes and the potential use of sawdust as binder. *Fuel Processing Technology*, 158, 9-19. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.12.008> (Recuperado de <https://www.sumernet.org/publication/characterization-of-cold-densified-rice-straw-briquettes-and-the-potential-use-of-sawdust-as-binder>)
- Reis Portilho, G., Resende de Castro, V., de Cássia Oliveira Carneiro, A., Cola Zanuncio, J., José Vinha Zanuncio, A., Gabriella Surdi, P., ... de Oliveira Araújo, S. (2020). Potential of briquette produced with torrefied agroforestry biomass to generate energy. *Forests*, 11(12), 1272. <https://doi.org/10.3390/f11121272>
- Riaño, A. S., Morales, A. G., Hernández, J. M., & Barrero, C. R. (2010). Producción de bioetanol a partir de subproductos agroindustriales lignocelulósicos. *Tumbaga*, 1(5), 61-91. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3628225>
- Rodriguez, W. D. M., Evangelista, A. W., Sette, C. R., Júnior, J. A., & da Silva, M. F. (2017). Producción de briquetas con residuos de cáscara de piñón manso (*Jatropha curcas*) y bagazo de caña de azúcar. *Bosque*, 38(3), 527-533. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002017000300010>
- Rojas González, A., Ruales Salcedo, A., & Velasco, F. (2015). Vista de Características energéticas de combustibles densificados de residuos de la uva isabella (*Vitis labrusca* L.). *Revista Mutis*, 5(2), 5-15. <https://doi.org/10.21789/22561498.1069>
- Saeed, A. A. H., Yub Harun, N., Bilad, M. R., Afzal, M. T., Parvez, A. M., Roslan, F. A. S., ... Afolabi, H. K. (2021). Moisture content impact on properties of briquette produced from rice husk waste. *Sustainability*, 13(6), 3069. <https://doi.org/10.3390/su13063069>
- Sáez, A., & Urdaneta, J. A. (2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. *Omnia*, 20(3), 121-135. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/737/73737091009.pdf>
- Sánchez, P. D. C., Aspe, M. M. T., & Sindol, K. N. (2022). An overview on the production of bio-briquettes from agricultural wastes: Methods, processes, and quality. *Journal of Agricultural and Food Engineering*, (1), 1-17. <http://doi.org/10.37865/jafe.2022.0036> (recuperado de <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/4E2ND00I/>)
- Setiawan, A., Hayat, F., Faisal, & Nur, T. B. (2019). Combustion characteristics of densified bio-char produced from Gayo Arabica coffee-pulp: Effect of binder. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 364, 012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/364/1/012007>
- Setter, C., Sanchez Costa, K. L., Pires de Oliveira, T. J., & Farinassi Mendes, R. (2020). The effects of kraft lignin on the physicochemical quality of briquettes produced with sugarcane bagasse and on the characteristics of the bio-oil obtained via slow pyrolysis. *Fuel Processing Technology*, 210, 106561. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106561>
- Song, B., Cooke-Willis, M., Theobald, B., & Hall, P. (2021). Producing a high heating value and weather resistant solid fuel via briquetting of blended wood residues and thermoplastics. *Fuel*, 283, 119263. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119263>
- Ugwu, K., & Agbo, K. (2013). Evaluation of binders in the production of briquettes from empty fruit bunches of Elais Guinensis. *International Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2(4), 176-179. <https://doi.org/10.11648/j.ijrse.20130204.17>
- Utcharyajit, K., Panprasert, V., Chayawat, L., Jungthanasombat, W., Janprom, P., & Choatchuang, M. (2019). Physical properties and calorific value of briquettes produced from Palmyra palm waste with molasses binder. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 639, 012046. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/639/1/012046>
- Valderrama, A., Curo, H., Quispe, C., Llanto, V., & Gallo, J. (2007). Briquetas de residuos sólidos orgánicos como fuente de energía calórica en cocinas no convencionales. [Anales del] XVII CONIMERA (pp. 26-34), Lima.

- Valverde G, A., Bienvenido Sarria, L., & Monteagudo Y., J. P. (2007). Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la cascarilla de arroz. *Scientia et Technica*, 13(37), 255-260. Recuperado de <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/4055>
- Vivek, C. P., Rochak, P. V., Suresh, P. S., & Kiran, K. R. R. (2019). Comparison study on fuel briquettes made of eco-friendly materials for alternate source of energy. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 577(1), 012183. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/577/1/012183>
- Wijianto, Sarjito, Aklis, N., Anggono, A. D., & Darmawan, A. (2020). The influence of the type of adhesive on the properties of sawdust briquettes. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(9), 5352-5356. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/73892020>
- Wilczynski, D., Berdychowski, M., Talaska, K., & Wojtkowiak, D. (2021). Experimental and numerical analysis of the effect of compaction conditions on briquette properties. *Fuel*, 28, 119613. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119613>
- Zavaleta-Mejía, E., & Lagunes-Fortiz, E. (2015). Función de la lignina en la interacción planta-nematodos endoparásitos sedentarios. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 34(1), 43-63. <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1506-7>
- Zhang, G., Sun, Y., & Xu, Y. (2018). Review of briquette binders and briquetting mechanism. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(Part 1), 477-487. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.072>