



Efecto de dos métodos artesanales de carbonización en la elaboración de carbón a partir de semilla de aguaje (*Mauritia flexuosa*)

Effect of two artisanal carbonization methods on the elaboration of charcoal from aguaje (*Mauritia flexuosa*) seed

Edinson Flores¹; Oscar Mendieta¹; Shallinny Ramírez²; Vladimir Reátegui²; William Rodríguez³; Carlos Láinez⁴; Eduardo Morales-Soriano^{4,*}

¹ Universidad Nacional de San Martín, Jr. Amorarca 315, Tarapoto, San Martín, Perú.

² Terra Nuova - Centro Per la Solidarietá e la Cooperazione Tra I Popoli, Calle Federico Gerdes 193, Lima, Perú.

³ Industrias Ecoamazónicas, Jr. Moyobamba 261, Tarapoto, San Martín, Perú.

⁴ Facultad de Industrias Alimentarias, Universidad Nacional Agraria La Molina, Av. La Molina s/n, Lima, Perú.

ORCID de los autores

E. Flores: <https://orcid.org/0000-0002-4630-2667>

O. Mendieta: <https://orcid.org/0000-0003-4302-6852>

S. Ramírez: <https://orcid.org/0000-0003-3053-5121>

V. Reátegui: <https://orcid.org/0000-0002-0206-0627>

W. Rodríguez: <https://orcid.org/0000-0002-7764-3480>

C. Láinez <https://orcid.org/0000-0001-9991-1936>

E. Morales-Soriano <https://orcid.org/0000-0002-9863-9157>

RESUMEN

La producción de carbón a partir de biomásas surge como una alternativa sustentable, tanto para aprovechar residuos como para proteger el medio ambiente. Esta investigación tiene como objetivo aprovechar semillas de aguaje para elaborar ecocarbón. En primer lugar, las semillas (procedentes de Pucallpa y Yurimaguas) fueron caracterizadas proximalmente. Luego fueron caracterizadas morfológicamente (largo, diámetro y peso), tanto en estado fresco y deshidratado. En la segunda parte se realizó la carbonización, empleando un Diseño Completamente al Azar con arreglo factorial. El primer factor fue el estado de la semilla (fresca y deshidratada), y el segundo fue el método de carbonización (abierto y en caja), siendo la variable respuesta el rendimiento. En la tercera etapa se elaboraron las briquetas, evaluando principalmente el poder calorífico. Los resultados mostraron que el deshidratado solar redujo similarmente el peso de las semillas. Existe un efecto significativo del estado de la semilla como del método de carbonización en el rendimiento, siendo el mejor tratamiento con semilla seca y carbonización abierta (rendimiento 25,77%). Este tratamiento también obtuvo el mayor poder calorífico (6716,93 cal/g) en las briquetas finales, mayor en casi 25% que el de las briquetas tradicionales.

Palabras clave: carbón de biomásas; secado solar; carbonización; briqueta; poder calorífico.

ABSTRACT

The production of coal from biomass emerges as a sustainable alternative, both to take advantage of waste and to protect the environment. This research aims to take advantage of aguaje seeds to make ecochar. First, the seeds (from Pucallpa and Yurimaguas) were characterized proximally. They were then characterized morphologically (length, diameter, and weight), both fresh and dehydrated. In the second part, the carbonization was carried out, using a Completely Random Design with factorial arrangement. The first factor was the state of the seed (fresh and dehydrated), and the second was the carbonization method (open and boxed), the response variable being yield. In the third stage, briquettes were made, mainly evaluating the calorific value. The results showed that solar dehydration similarly reduced the weight of the seeds. The state of the seed and the carbonization method have a significant effect on the yield, being the best treatment with dry seed and open carbonization (yield 25.77%). This treatment also obtained the highest calorific value (6716.93 cal/g) in the final briquettes, higher by almost 25% than that of traditional briquettes.

Keywords: biomass coal; solar drying; carbonization; briquette; calorific value.

1. Introducción

En la selva de Perú existen de aguajales los cuales representan un gran potencial de subproductos derivados que se desperdician anualmente por su aprovechamiento, como lo es la pepa de aguaje. Estos residuos pueden ser utilizados en la elaboración de diferentes productos, dentro de los cuales podemos destacar la producción de carbón ecológico o comercialmente conocido ecocarbón, la cual se muestra como una alternativa viable y sostenible para la comunidad, los productores de aguaje y el medio ambiente.

El carbón vegetal es el resultado de la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de aire (pirólisis) a una temperatura por encima de 300 °C. Todos los tipos de biomasa se pueden utilizar en la producción de carbón vegetal (Pinheiro, 2017). Según SERFOR (2020), la producción del carbón vegetal a nivel nacional en el 2019 fue de 45 140 858,9 kg y los principales departamentos de producción fueron Ucayali, Madre de Dios, Lambayeque, Tumbes y Piura.

Uno de los principales problemas medioambientales hoy en el mundo son los productos originados por la combustión del carbón, como son el dióxido de carbono (CO₂), gas de efecto invernadero, la ceniza y el azufre, los cuales forman óxidos a lo largo de la combustión que pueden originar deterioro del agua en las nubes ocasionando lluvias ácidas (Sierra Rubio & Londoño Camacho, 2013). Tecnologías limpias como la fabricación de ecocarbón son ideales para reducir el calentamiento global ya que se considera neutral en el efecto de gases invernadero (el dióxido de carbono liberado proviene del carbono obtenido por fotosíntesis en la planta) (Mugoronji et al., 2022).

Otro problema presentado es que muchas veces la materia prima de los carbones vegetales son los árboles, contribuyendo a la generación de una tala indiscriminada. En países africanos ya se está alertando de la situación de puesta en peligro de algunas especies de árboles por su uso en carbones vegetales (Asare et al., 2022). Ante esta situación la empresa de Industrias Ecoamazónicas saca al mercado un producto hecho a partir de residuos de la industria del coco en primer lugar, el cual es más eficiente, emite menos CO₂ en comparación con la producción de carbón clásico, ya que cuenta con un sistema de recuperación. Dicho ecocarbón podría ser usado en hornos, parrillas, saunas, cocinas rústicas y chimeneas; y sus cenizas, sirven como abono para las plantas.

Existen trabajos previos de elaboración de carbón a partir de diferentes biomásas. Ifa et al. (2019) realizaron una investigación relacionada con la producción de bio-briquetas a partir de pirólisis de desechos de nuez de marañón. Los resultados obtenidos permiten concluir que el tamaño de partícula y la concentración de adhesivo afectan el contenido de humedad, contenido de cenizas, contenido de carbono fijo y volatilidad de las bio-briquetas. El tamaño de partícula óptimo para hacer bio-briquetas fue de 200 mallas, con poder calorífico de 29,49 MJ/kg, contenido de humedad del 5,3%, contenido de cenizas del 4,3%, contenido de sustancias volátiles de 17,16% y contenido de carbono de 72,62%. La mejor concentración de almidón de tapioca, usado como adhesivo, fue de 12%, mientras que la fuerza de compresión empleada fue de 7,45 Pa.

Bot et al. (2021) prepararon briquetas de biocombustible utilizando cáscaras de plátano, desechos de palmera ratán, cáscaras de coco y bagazo de caña de azúcar a través de un proceso convencional que involucró secado, carbonización, trituración, mezclado con almidón de mandioca como aglutinante, compactado y secado. Los resultados del estudio de reducción de masa mostraron que las pérdidas son más importantes para piel de banana (97,98%) y bagazo de caña de azúcar. La densidad aparente de las briquetas producidas estuvo en el rango de 0,470 - 0,851 g/cm³; el valor calorífico de las briquetas fue 16,98; 30,07; 32,16 y 25,93 MJ/kg para cáscaras de plátano, desechos de ratán, cáscaras de coco y bagazo de caña de azúcar, respectivamente.

Tanko et al. (2020) estudiaron las propiedades físicas de briquetas hechas de cáscara de arroz y cáscara de coco, en diferentes proporciones, evaluadas en base a sus propiedades termofísicas. Los valores calóricos calculados de la cáscara de arroz y la cáscara de coco fueron 16,51 MJ/kg y 18,60 MJ/kg, con densidades de 1,50 g/cm³ y 3,00 g/cm³, respectivamente. La cáscara de coco tuvo menor contenido de humedad y cenizas de 10% y 26%, respectivamente, antes de formar briquetas. Los valores caloríficos calculados de las briquetas (17 a 21 MJ/kg) mostraron además que no eran una función de su contenido de humedad y cenizas, sino de su contenido total de carbono. La briqueta en la proporción 90:10 de cáscara de arroz a cáscara de coco presentó el poder calorífico más alto e implica que tiene más ventajas de calentamiento y, por lo tanto, sería adecuado como combustible sólido alternativo.

Del mismo modo, Sunardi et al. (2019) desarrollaron un método para fabricar briquetas de buena calidad a partir de corontas de maíz, con aplicación de presiones medias, empleando una técnica húmeda. Las briquetas obtenidas fueron de forma cilíndrica, determinándose el efecto de las variables (densidad, contenido de humedad, contenido de ceniza, materia volátil, y carbón fijo) sobre la calidad de combustión de la briqueta (valor calorífico, tiempo de combustión y tasa de llama) para diferentes presiones de compactación y rugosidad de las partículas. Los valores caloríficos de las briquetas resultantes estuvieron comprendidos entre 5091,71 cal/g y 5691,15 cal/g. Por lo tanto, las briquetas obtenidas presentaron características similares con las obtenidas empleando otros residuos agrícolas.

Los estudios observados hacen referencia a la elaboración de briquetas a partir de diferentes biomásas, así como de la influencia de la composición, métodos de elaboración o ingredientes durante el proceso. Asimismo, existen estudios sobre la viabilidad económica, a nivel industrial (69 t/día) en la producción de carbón a partir de residuos de granos de cervecera (Mugoronji et al., 2022). Sin embargo, no existe mucha información de carácter científico sobre el empleo de pepa de aguaje en la elaboración de este producto, sin considerar aún realidades de la industria en la selva peruana. Ya que se trata de un residuo voluminoso, y dado el carácter orgánico y el uso de residuos similares para la elaboración de ecocarbón, el uso de la pepa de aguaje tiene un gran potencial y la investigación en el desarrollo de este producto llenaría el vacío científico existente con el empleo de esta semilla. Considerando el uso potencial de la semilla de aguaje y teniendo en cuenta los trabajos previos de la empresa, el presente trabajo tiene como objetivo principal desarrollar y evaluar los principales factores (tipo de carbonización y humedad de la semilla) que influyen en la elaboración de un ecocarbón a partir de semilla de aguaje.

2. Material y métodos

2.1. Lugar de ejecución

El deshidratado de las semillas de aguaje (procedentes de Pucallpa y Yurimaguas), el proceso de carbonización y la producción de briquetas de ecocarbón se realizó en la empresa Industrias Ecoamazónicas SAC (6°50'53,3"S; 76°20'44,5"O), en el distrito de Pucacaca, provincia de Picota, región de San Martín - Perú.

2.2. Caracterización y acondicionamiento de la semilla de aguaje

La materia prima empleada fue la semilla de aguaje (*Mauritia flexuosa*), obtenida de dos zonas (Pucallpa y Yurimaguas) y recepcionada en la empresa Industrias Ecoamazónicas S. A. C.

Un total de 150 kg de semilla de aguaje fueron recepcionadas, tomándose muestras de 50 semillas por cada lugar de procedencia. A cada muestra, se les midió el largo (cm) y diámetro de la semilla (cm) (vernier KAMASA, KM447); mientras que con una balanza se determinó el peso de la semilla (g). Asimismo, se determinó el análisis proximal de las semillas de ambas procedencias (AOAC, 2005).

La semilla de aguaje fue evaluada en 2 condiciones: semilla fresca y semilla seca. Para obtener la semilla seca, ésta fue deshidratada durante 7 días al sol, a temperatura ambiente (máximas de 35,67 °C en promedio). Se hizo un seguimiento al proceso de secado mediante el control de la temperatura y humedad relativa ambiental, usando un termohigrómetro (Coolbox, modelo 968H); así como el control de la temperatura de la semilla de aguaje mediante el uso de un termómetro láser (Taylor, modelo 9523).

2.3. Carbonización de semilla de aguaje

Para el proceso de acondicionamiento y carbonización de la semilla se siguió el flujo mostrado en la Figura 1.

Luego de la obtención de semilla de aguaje fresca y deshidratada, se evaluaron dos métodos de carbonización: cerrado (o en caja) y abierto. Para ambos casos, se quema biomasa de coco como agente de combustión, dentro de unas campanas carbonizadoras con orificios (para el ingreso de oxígeno) y la semilla de aguaje se coloca externamente a dicha campana. El primer método, cerrado, se realizó con la disposición de una caja externa (Figura 2A), la cual también contenía agujeros para el ingreso de oxígeno, de tal manera que la semilla a carbonizar queda entre la campana y la caja. En el segundo método, abierto, la pepa es colocada sobre la campana carbonizadora y luego es tapada con biomasa conformada por palma y coco (sin caja), tal como se muestra en la Figura 2B. Los diagramas de dichas estructuras también son mostrados en la Figura 2, donde se ve con más claridad que sólo la campana carbonizadora es usada en el método abierto mientras que el método en caja contiene internamente a dicha campana.

El proceso de carbonización dura aproximadamente 4 días, hasta que las temperaturas internas lleguen a más de 300 °C. También se observa visualmente una completa carbonización de la semilla. Asimismo, se sacan muestras y se parten para observar que internamente también se hayan carbonizado. El proceso es empírico, se debe controlar también que no haya un exceso de carbonización, pues ello afectaría también el rendimiento final.

Una vez terminada la carbonización, para ambos métodos se empleó agua para finalizar el proceso, luego se expanden para realizar un segundo secado solar, pero con menor tiempo de duración (es con fines de eliminar el agua de enfriado). La temperatura de todo el proceso se controló mediante un termómetro láser (Taylor, modelo 9523).

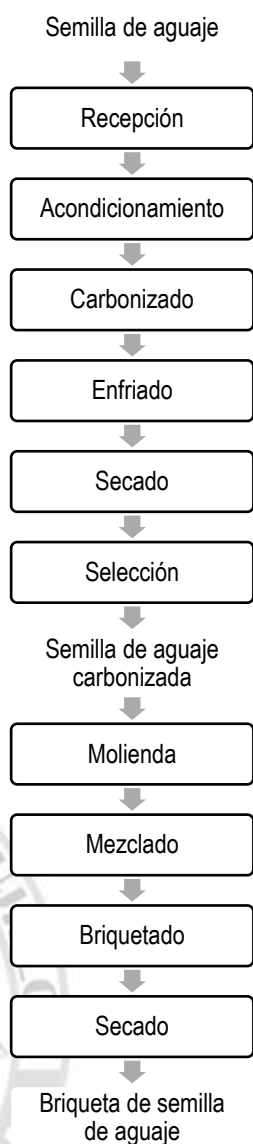


Figura 1. Flujo de operaciones para obtener ecocarbón a partir de semilla de aguaje.

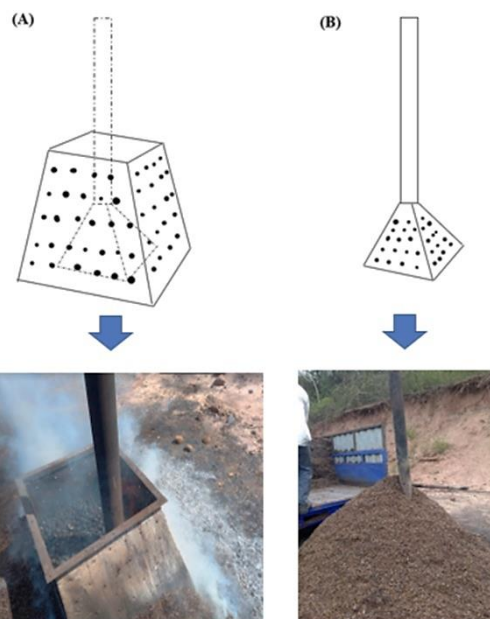


Figura 2. Diagramas y fotografías de estructuras usadas en los métodos de carbonización (A) en caja y (B) abierto.

El diseño experimental aplicado para esta etapa fue un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2 x 2. El primer factor considerado fue el método de carbonización con dos niveles (abierto y en caja), el segundo factor fue la humedad de la semilla de aguaje también con dos niveles (seca y fresca), haciendo un total de cuatro tratamientos (ver Tabla 3).

2.4. Obtención y caracterización de las briquetas de carbón

Para la obtención de las briquetas, se realizó el flujo de operaciones mostrado en la Figura 1 a partir de la semilla de aguaje carbonizada. La molienda de la semilla carbonizada se hizo empleando un molino de martillos (industria nacional) donde se fragmentó el carbonizado en partículas uniformes. Posteriormente se realizó un mezclado de dichas partículas con un aglomerante conformado por una proporción de arroz molido más agua (22:100, p/v) y tratado térmicamente hasta 98 °C. El aglomerado es luego enfriado hasta 65 °C aproximadamente y en la etapa de mezclado, se adiciona aproximadamente 33% en peso de aglomerante con respecto al carbón molido.

Luego se realizó el briquetado con una máquina briquetadora de rodillo con moldes hexagonales tipo panal (industria nacional), con una presión de compactación de 2,5 - 3 MPa. Finalmente, se realizó un secado solar por 5 días para posteriormente ser envasado y almacenado.

La obtención de briquetas se realizó solamente en los tratamientos T1, T2 y T3, ya que el T4 fue descartado por el bajo rendimiento obtenido (ver Tabla 3). Por lo tanto, el diseño experimental aplicado para esta etapa fue un diseño completamente azar con tres tratamientos. La variable dependiente o respuesta fue el poder calorífico (ASTM D5865). Como caracterización, además del poder calorífico, se midió humedad (ASTM D3173), materia volátil (ASTM D3175), cenizas (ASTM D3174) y carbono fijo (ASTM D3172) a cada tratamiento (ASTM International, 2022).

Finalmente, se hizo caracterizó el mejor tratamiento de las briquetas de semilla de aguaje, además de poder calorífico, en resistencia a la compresión diametral, humedad de equilibrio y densidad aparente, y estos valores fueron comparados junto con los fisicoquímicos (humedad, materia volátil, cenizas y carbono fijo) de las briquetas tradicionales elaboradas con biomasa de coco.

2.5. Análisis estadístico

Para todos los tratamientos se realizaron tres repeticiones. A los resultados obtenidos se les aplicó un análisis de varianza y en caso de haber diferencia significativa entre tratamientos se realizó una prueba de comparación de medias de Tukey, ambos con un nivel de significancia del 95%. Se usó el software estadístico Statgraphics Centurion 19. Además, al mejor tratamiento se hizo una prueba de comparación de medias con el ecocarbón elaborado a partir de coco, producto que ya comercializa la empresa.

3. Resultados y discusión

3.1. Caracterización y acondicionamiento de la semilla de aguaje

El análisis proximal de la semilla de aguaje tanto de la proveniente de Pucallpa como de Yurimaguas se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1
Composición proximal de la semilla de aguaje

Componente (1) (2)	Semilla de Pucallpa (%)	Semilla de Yurimaguas (%)
Humedad	45,90 ± 0,95	44,75 ± 1,25
Cenizas	1,35 ± 0,25	1,42 ± 0,30
Proteínas	11,54 ± 1,50	10,32 ± 2,32
Grasa	7,53 ± 0,09	7,86 ± 1,10
Fibra cruda	1,10 ± 0,10	1,25 ± 0,21
Carbohidratos	32,58	34,42

(1) Promedio de tres repeticiones ± desviación estándar

(2) El cálculo de carbohidratos se hizo por diferencia.

No existieron diferencias significativas entre los valores de composición proximal entre ambas semillas, por lo que se puede deducir que su composición básica no influirá en el producto final. Asimismo, los valores son bastante similares a los reportados por (Vásquez-Ocmín et al., 2010). Los valores de humedad son ligeramente menores, probablemente debido a algún nivel de deshidratación durante el transporte. El nivel de carbohidratos es ligeramente superior, pero los demás componentes se encuentran dentro del rango de las variedades estudiadas por el autor.

Los valores promedio de peso, largo y diámetro de semilla de aguaje medidos al inicio y al final del secado se pueden observar en la Tabla 2. Para las muestras de semillas de Pucallpa se observó una pérdida final promedio de 6,94 gramos lo que equivale a una pérdida de 34,63% del peso inicial. Para las muestras de Yurimaguas se observó una pérdida final promedio de 10,88 gramos lo que equivale a una pérdida de 38,50% del peso inicial. En el caso de estudios con repeticiones, poner atención en la presentación de los resultados; éstos deben tener análisis estadístico, incluyendo el desvío estándar de las medidas y barras de error en los gráficos.

Asimismo, durante el secado de ambas semillas (procedentes de Pucallpa y Yurimaguas), la evolución de temperatura ambiental estuvo en un rango de 28 a 45 °C, la temperatura de la semilla en un rango de 25 a 52 °C y la humedad relativa en un rango de 28% a 75%. En términos generales, se observa que hay una relación inversa entre la humedad relativa y las temperaturas de secado, tanto ambiental como de la semilla. En horas de la mañana, la humedad relativa es mayor, llegando a valores por encima del 50%, con temperaturas iniciales por debajo de 35 °C. Los picos de temperatura se alcanzan alrededor del mediodía, donde la humedad relativa es mínima. Se tomaron los datos para verificar el control del secado, el cual se realizó en días donde no hubo lluvia en la zona. Los datos corresponden a un secado solar en condiciones normales, donde se obtuvo una semilla deshidratada con humedades menores al 10% en todos los casos. De manera similar, en la India, existen investigaciones previas realizadas con hojas y otras biomásas deshidratadas al sol con humedades menores a 12% para la producción de briquetas (TT et al., 2022).

3.2. Carbonización de la semilla de aguaje

En la Figura 3 se observa la evolución de las temperaturas (ambiental, zona superior de carbonización, zona inferior de carbonización)

durante el carbonizado para el tratamiento (T1) con mejor desempeño, el cual alcanzó temperaturas mayores a los 350 °C. Asimismo, se tomaron datos de la humedad relativa, la cual estuvo en el rango de 38% a 88%. Según la FAO (1985), a mayor temperatura de carbonización se obtendrá una menor proporción de materia volátil y un menor rendimiento del producto final; carbonizaciones a temperaturas de 300 °C, el rendimiento suele ser cercano al 50% y para las que manejan temperaturas de 500 – 600 °C puede ser inferior al 30%. Asimismo, existen estudios donde se ha evaluado el efecto de la

temperatura de carbonización aplicados en restos de madera (Lima et al., 2022). La temperatura final de carbonización afecta el consumo de la materia prima y por ende el rendimiento. Los mismos autores también mencionan que las temperaturas ideales son las menores a 500 °C. Cabe resaltar que las temperaturas ambientales y humedades relativas promedio fueron similares para todos los tratamientos.

En la Tabla 3 se observan los rendimientos promedio de los tratamientos de carbonización realizados, siendo el que mejor resultado obtuvo el tratamiento T1 con un rendimiento de 25,77%.

Tabla 2

Peso, largo y diámetro de la semilla de aguaje antes y después del secado solar ⁽¹⁾

Antes del secado solar			Después del secado solar			Variación		
Peso inicial (g)	Largo inicial (cm)	Diámetro inicial (cm)	Peso final (g)	Largo final (cm)	Diámetro final (cm)	Var Peso	Var Largo	Var Diámetro
<u>Semilla procedente de Pucallpa</u>								
20,04 ± 3,96	3,54 ± 0,43	2,57 ± 0,18	13,10 ± 2,88	3,06 ± 0,34	2,36 ± 0,16	6,94 g (34,63%)	0,48 cm (13,50%)	0,21 cm (8,16%)
<u>Semilla procedente de Yurimaguas</u>								
28,26 ± 5,46	3,91 ± 0,38	2,94 ± 0,26	17,38 ± 3,92	3,53 ± 0,38	2,92 ± 0,30	10,88 g (38,50%)	0,38 cm (9,68%)	0,02 cm (0,52%)

(1) Media de 50 unidades ± desviación estándar.

Tabla 3

Rendimiento de la obtención de semillas de aguaje carbonizadas y poder calorífico de las briquetas

Tratamiento	Método Carbonización	Humedad de semilla	Rendimiento ⁽¹⁾⁽²⁾ (%)	Poder Calorífico ⁽¹⁾⁽²⁾ (cal/g)
T1	Abierto	Seca	25,77 ± 1,65 a	6716,93 ± 54,53 a
T2	Abierto	Fresca	15,43 ± 0,52 b	6713,16 ± 5,15 a
T3	En caja	Seca	12,74 ± 3,29 b	6409,01 ± 6,46 b
T4	En caja	Fresca	1,97 ± 1,04 c	--

(1) Promedio ± desviación estándar de tres repeticiones

(2) Letras diferentes significan medias diferentes según la prueba de Tukey (alfa 0,05).

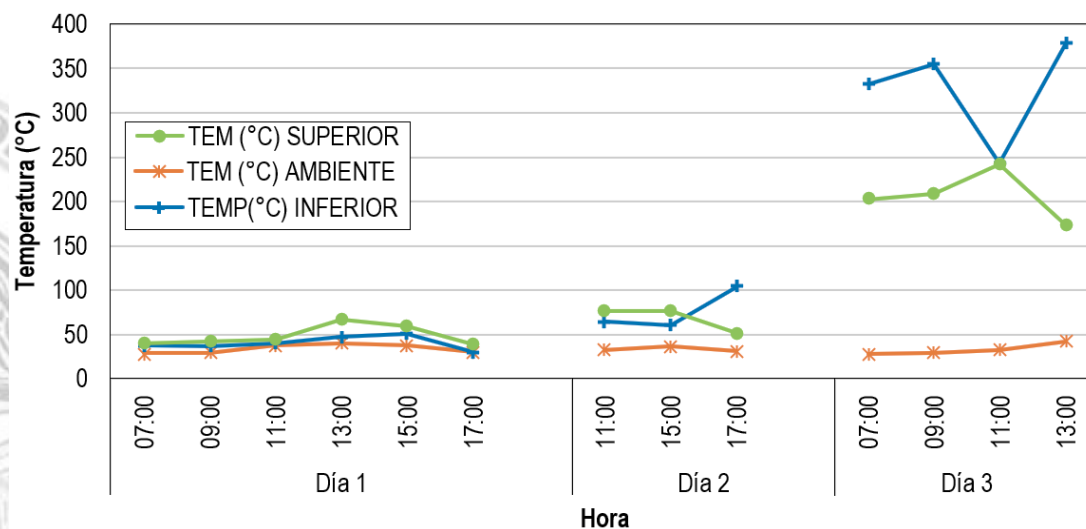


Figura 3. Evolución de la Temperatura de la Semilla Seca durante el proceso de Carbonización Abierto.

De acuerdo con el análisis de varianza realizado, ambos factores (estado de humedad de la semilla y método de carbonización) resultaron significativos, afectando el rendimiento de dicha etapa. Los mayores rendimientos se obtienen con la semilla seca, y con el método de carbonización abierto, por lo que el tratamiento T1 resultó con el mejor resultado. En general se puede ver que el material fresco va a tener un menor rendimiento por la mayor pérdida de agua durante el proceso. En el caso del factor método de carbonización, hay una clara influencia de la presencia y distribución de oxígeno en el medio. Otieno et al. (2022) han estudiado justamente la influencia del oxígeno, sobre todo en la combustión ya que se trata de un proceso exotérmico. Por ello es de esperarse que, en el caso del método cerrado, las cajas a pesar de tener agujeros impiden una buena dosificación de oxígeno en el interior. Homchat & Ramphueiphad (2022) elaboraron una máquina carbonizadora, donde aprovechan la recirculación de gases de combustión en la elaboración de carbón a partir de cascarilla de arroz. Un elemento importante es que el ventilador siempre debe estar encendido, ya que ayuda a la recirculación de los gases y también a la incorporación de oxígeno para la combustión. Asimismo, hallaron un rendimiento mayor (36.97% en peso), ya que el diseño del equipo (zonas definidas de secado, pirólisis y carbonización) así como la regulación de la velocidad de entrada mediante un tornillo, son factores controlados que hicieron a dicho equipo más eficiente.

Por otro lado, otros factores no evaluados, como los lavados con agua o con ácido sulfúrico sobre el material, también afectan el rendimiento de la carbonización, en general, haciendo que se pierda menos material (Navarrete et al., 2005).

3.3. Obtención y caracterización de las briquetas de carbón

Se realizó la molienda del carbonizado obtenido en los tratamientos T1, T2 y T3 con una recuperación del 98,33% del carbonizado luego de esta etapa (el T4 no fue considerado por su bajo rendimiento en la etapa de carbonización). Luego fue añadido el aglomerante para briquetarlos.

En el caso del briquetado del tratamiento T1 se obtuvieron en promedio 5,05 briquetas / kg de mezcla, en el tratamiento T2 se obtuvieron 5,13 briquetas / kg de mezcla, y en el tratamiento T3 se

obtuvieron 5,18 briquetas / kg de mezcla. Finalmente, se realizó el secado final de las briquetas que arrojó un rendimiento de 72,48% del peso inicial antes del secado.

En la Tabla 3 se puede observar que los resultados del poder calorífico obtenidos en los tratamientos T1, T2 y T3 son bastante buenos coincidiendo con lo mencionado por Barba Revelo (2020), quien menciona que las briquetas formadas por carbón vegetal deben tener un poder calorífico igual o mayor a 5019,12 cal/g. Asimismo, Ifa et al. (2020) encontraron un poder calorífico de 29,49 MJ/Kg (es decir 7043,57 cal/g) en briquetas a partir de cáscara de marañón, valor ligeramente superior al obtenido con la pepa de aguaje. Asimismo, los valores obtenidos son bastante superiores al rango establecido por Ferronato et al. (2022) quienes mencionan valores alrededor de 16,22 MJ/Kg (3874,08 cal/g) para briquetas elaboradas con biomasas o 19,03 MJ/Kg (4545,24 cal/g) para briquetas hechas a partir de madera.

Por otro lado, la FAO (1985) menciona que porcentajes de humedad entre 5% - 15% del peso bruto del carbón vegetal son los límites máximos de especificaciones para una buena calidad del carbón y porcentajes mayores al 10% son indeseables, además el porcentaje de materia volátil en el carbón puede variar entre 5% y 40%. Un carbón de alta volatilidad es fácil de encender, pero puede quemarse produciendo mucho fuego y humo; por otro lado, el carbón de baja volatilidad es difícil de encender y se quema muy limpiamente. El contenido de carbono fijo del carbón varía desde un mínimo de alrededor del 50% hasta un máximo de alrededor del 95%; mientras que el contenido de cenizas varía de alrededor del 0.5% a más del 5% dependiendo de la especie de madera. Todos estos valores están dentro de las características observadas en la Tabla 4.

Finalmente, el mejor tratamiento elaborado a partir de semilla de aguaje (T1 por tener mayor rendimiento en la etapa de carbonización, y mayor poder calorífico en la briqueta) fue comparado con las briquetas tradicionales elaboradas a partir de biomasa de coco, en las características que se aprecian en la Tabla 4.

Se puede observar la diferencia en poder calorífico es significativa, probablemente debido a que la briqueta de semilla de aguaje tiene menor contenido de cenizas en comparación con la briqueta elaborada con biomasa de coco.

Tabla 4

Comparación de características fisicoquímicas de la briqueta elaborada con semilla de aguaje (T1) con las briquetas tradicionales elaboradas con biomasa de coco

Característica	Briqueta elaborada con semilla de aguaje ⁽¹⁾⁽²⁾	Briqueta elaborada con biomasa de coco ⁽²⁾
Humedad (%)	6,72 ± 1,66 a	5,40 ± 1,30 a
Materia volátil (%)	20,11 ± 5,58 a	19,87 ± 2,33 a
Cenizas (%)	4,65 ± 0,83 a	14,26 ± 1,66 b
Carbono fijo (%) ⁽³⁾	68,53	60,47
Poder calorífico (cal/g)	6716,93 ± 54,53 a	5384,65 ± 31,32 b
Resistencia a la compresión diametral (gf)	33374,18 ± 4023,96 a	26586,80 ± 3008,97 a
Actividad de agua	0,611 ± 0,002 a	0,596 ± 0,004 b
Densidad aparente (g/cm ³)	0,7977 ± 0,09 a	1,0377 ± 0,02 b

(1) T1: método de carbonización abierto, humedad de semilla < 10%

(2) Letras diferentes dentro de una misma fila son significativamente diferentes mediante la prueba t.

(3) El carbono fijo se obtiene por diferencia [100 - (humedad + material volátil + cenizas)].

Otra diferencia se observa en la densidad aparente de la briqueta, ya que a pesar de que estadísticamente tienen la misma resistencia a la compresión diametral, la briqueta de semilla de aguaje tiene menos densidad aparente, es decir hay menos masa en un mismo volumen, lo cual se puede observar visualmente que la briqueta de coco es más compacta y menos porosa.

4. Conclusiones

A partir de los análisis realizados podemos concluir que es factible obtener ecocarbón en briquetas a partir de la semilla de aguaje, con buenas características fisicoquímicas y con una buena relación de materia volátil, carbono fijo y humedad. Para esta elaboración se recibieron semillas de Pucallpa y Yurimaguas, de las cuales una parte fue procesada en estado fresco y otra en seco, realizándose un secado al sol, el cual disminuyó el peso de las semillas de ambas procedencias en proporciones similares. El método de carbonización que dio mejores resultados fue el método abierto empleando semilla de aguaje seca (T1) con un rendimiento de 25,77% sobre su peso inicial. La humedad de la semilla y el método de carbonización influyeron significativamente en el rendimiento. Finalmente, las briquetas que obtuvieron un mayor poder calorífico fueron también las del tratamiento T1 con un poder calorífico de 6716,9 cal/g.

Agradecimientos

Este trabajo de investigación ha sido financiado con fondos de la Unión Europea a través del proyecto Circulando en la Amazonía.

Referencias bibliográficas

- AOAC. (2005). *Official Methods of Analysis* (18th ed.). Association of Official Analytical Chemist.
- Asare, F., Owusu, F. W., & Gazo, R. (2022). Sustainable charcoal production drive in rural communities in Ghana, West Africa.

- Energy for Sustainable Development*, 68, 364–372. <https://doi.org/10.1016/J.ESD.2022.04.013>
- ASTM International. (2022). *ASTM International - Standards Worldwide*. <https://www.astm.org/>
- Barba Revelo, M. G. (2020). *Propuesta de implementación de una línea de producción para la elaboración de briquetas de carbón a partir del bagazo, residuo generado de la caña de azúcar* Universidad Central del Ecuador. Titulación - Ingeniería Ambiental.
- Bot, B. V., Sosso, O. T., Tamba, J. G., Lekane, E., Bikai, J., & Ndame, M. K. (2021). Preparation and characterization of biomass briquettes made from banana peels, sugarcane bagasse, coconut shells and rattan waste. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/S13399-021-01762-W>
- FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Mechanical Wood Products Branch. (1985). *Industrial charcoal making*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Ferronato, N., Calle Mendoza, I. J., Gorrity Portillo, M. A., Conti, F., & Torretta, V. (2022). Are waste-based briquettes alternative fuels in developing countries? A critical review. *Energy for Sustainable Development*, 68, 220–241. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.03.013>
- Homchat, K., & Ramphueiphad, S. (2022). The continuous carbonisation of rice husk on the gasifier for high yield charcoal production. *Results in Engineering*, 15, 100495. <https://doi.org/10.1016/J.RINENG.2022.100495>
- Ifa, L., Yani, S., Nurjannah, N., Damengsih, D., Rusnaenah, A., Mel, M., Mahfud, M., & Kusuma, H. S. (2020). Techno-economic analysis of bio-briquette from cashew nut shell waste. *Heliyon*, 6(9), e05009. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2020.E05009>
- Ifa, L., Yani, S., Nurjannah, N., Sabara, Z., Yuliana, Y., Septya Kusuma, H., & Mahfud, M. (2019). Production of bio-briquette from biochar derived from pyrolysis of cashew nut waste. *Ecology, Environment & Conservation*, 25(September Supplement), 125–130.
- Lima, M. D. R., Massuque, J., Bufalino, L., Trugilho, P. F., Ramalho, F. M. G., Protásio, T. de P., & Hein, P. R. G. (2022). Clarifying the carbonization temperature effects on the production and apparent density of charcoal derived from Amazonia wood wastes. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 166, 105636. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2022.105636>
- Mugoronji, M., Manyuchi, M. M., Sukdeo, N., & Stinner, W. (2022). Techno-economic assessment for bio coal production from brewers spent grain. *South African Journal of Chemical Engineering*, 40, 1–9. <https://doi.org/10.1016/J.SAJCE.2022.01.001>
- Navarrete, L. F., Giraldo, L., Baquero, M. C., & Moreno, J. C. (2005). Carbón activado: efecto del lavado con ácido sulfúrico del precursor lignocelulósico, cuesco de palma africana, sobre los procesos de carbonización y activación. *Rev. Colomb. Quím.*, 34(1), 67–78.
- Otieno, A. O., Home, P. G., Raude, J. M., Murunga, S. I., & Gachanja, A. (2022). Heating and emission characteristics from combustion of charcoal and co-combustion of charcoal with

- faecal char-sawdust char briquettes in a ceramic cook stove. *Heliyon*, 8(8). <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2022.E10272>
- Pinheiro, P. C. da C. (2017). La producción del carbón vegetal. In *Energía - Investigaciones en América del Sur* (pp. 69–88). Bahía Blanca: Editorial de la Universidad Nacional del Sur, Ediuns.
- SERFOR. Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre. (2020). *Anuario forestal y de fauna silvestre 2019*. www.gob.pe/serfor
- Sierra Rubio, M. Y., & Londoño Camacho, E. (2013). *Creación de empresa de consultoría ambiental para las empresas de explotación y producción de carbón en los departamentos de Boyacá y Cundinamarca*. Trabajo de Grado y Tesis, Facultad de Administración, Finanzas y Ciencias Económicas. Universidad EAN.
- Sunardi, Djuanda, & Mandra, M. A. (2019). Characteristics of Charcoal Briquettes from Agricultural Waste with Compaction Pressure and Particle Size Variation as Alternative Fuel. *International Energy Journal*, 19, 139–148.
- Tanko, J., Ahmadu, U., Sadiq, U., & Muazu, A. (2020). Characterization of Rice Husk and Coconut Shell Briquette as an Alternative Solid Fuel. *Advanced Energy Conversion Materials*, 2(1), 1–12. <https://doi.org/10.37256/aecm.212021608>
- TT, A. K., Mech, N., Ramesh, S. T., & Gandhimathi, R. (2022). Evaluation of composite briquettes from dry leaves in energy applications for agrarian communities in India. *Journal of Cleaner Production*, 350, 131312. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131312>
- Vásquez-Ocmín, P. G., Alvarado, L. F., Solís, V. S., Torresb, R. P., & Mancini-Filho, J. (2010). Chemical characterization and oxidative stability of the oils from three morphotypes of *Mauritia flexuosa* L.f. from the Peruvian Amazon. *Grasas y Aceites*, 61(4), 390–397. <https://doi.org/10.3989/GYA.010110>

